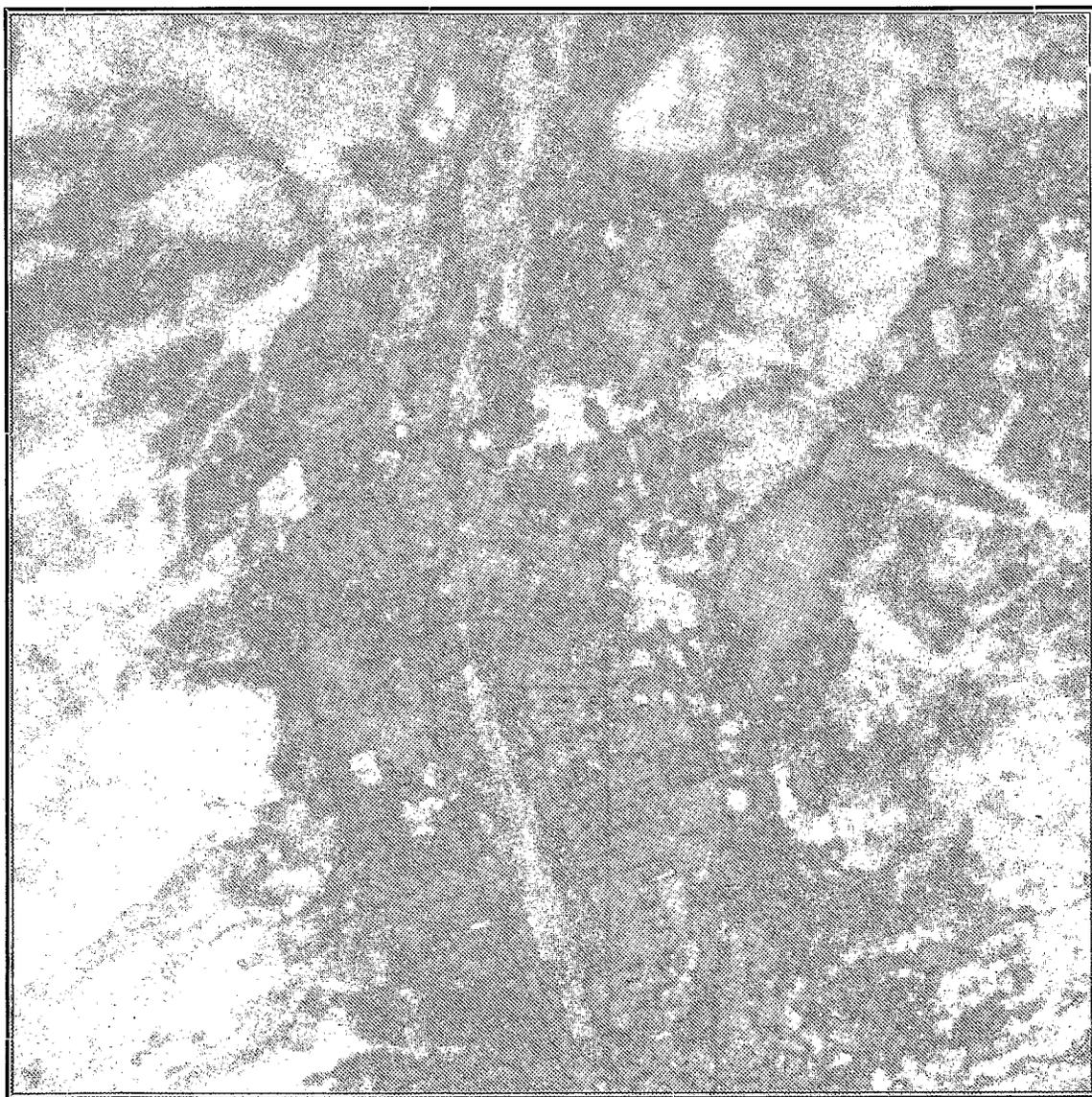


FD 60 - 334 - AVR

CONVENTION MINISTERE DE LA COOPERATION - ORSTOM

**L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION
POUR L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE
EN MILIEU URBAIN**

RAPPORT FINAL - MAI 1989



**Responsable scientifique
F. DUREAU, U.R. 15, Département SDU**

**Equipe du département SDU ayant réalisé les recherches
BARBARY O., DUREAU F., LORTIC A., MICHEL A.**

F 26949

42 59471

2 F
1 F
1 F

CONVENTION MINISTERE DE LA COOPERATION - ORSTOM

wp1 2

**L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION
POUR L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE
EN MILIEU URBAIN**

RAPPORT FINAL - MAI 1989

**Responsable scientifique
F. DUREAU, U.R. I 5, Département SDU**

**Equipe du département SDU ayant réalisé les recherches
BARBARY O., DUREAU F., LORTIC A., MICHEL A.**

AVERTISSEMENT

Ce rapport fait un bilan des travaux réalisés dans le cadre de la convention Ministère de la Coopération / ORSTOM sur "L'utilisation de la télédétection pour l'observation démographique en milieu urbain".

L'objectif de la recherche financée par cette convention était de développer et mettre à disposition des professionnels de la collecte de données et de la gestion urbaine une méthode rapide de production d'information démographique: ce rapport est donc intégralement consacré à la présentation du résultat final de la recherche, c'est à dire la méthode de collecte que nous avons développée.

Pour plus de détails sur les résultats fondamentaux obtenus dans chacun des domaines sur lesquels a porté la recherche, le lecteur se reportera aux rapports scientifiques intermédiaires rédigés par les membres de l'équipe, cités en pages 25 à 28: ces rapports font le point, de façon détaillée, au fur et à mesure de l'avancement des recherches, de tous les travaux réalisés et des résultats auxquels ils ont donné lieu. Ces différents textes intermédiaires ont servi de base à la rédaction du présent rapport final, qui intègre certains paragraphes des écrits présentant des travaux et résultats de chacun des chercheurs ayant participé au programme.

F. DUREAU
Responsable scientifique de l'équipe

**L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION POUR
L'OBSERVATION DEMOGRAPHIQUE EN MILIEU URBAIN
RAPPORT FINAL - AVRIL 1989**

	Page
1. OBJECTIFS DU PROGRAMME DE RECHERCHE	4
2. MOYENS UTILISES	5
Contexte institutionnel	5
Moyens en personnel	5
Moyens financiers	6
Moyens en matériel	7
3. CALENDRIER DES OPERATIONS ET PLANS D'EXPERIENCE	8
Conception générale du programme: les différentes phases de la recherche	8
Plan d'expérience sur Marseille	10
Plan d'expérience sur Quito	12
4. RESULTATS	14
Synthèse des résultats en télédétection urbaine	14
Description générale de la méthode de sondage	17
Etapas de la mise en oeuvre	18
Précision des résultats	19
Coûts de mise en oeuvre	21
Domaines et sites d'application	21
5. DIFFUSION DES RESULTATS DE LA RECHERCHE	22
Organisation d'ateliers de formation	22
Organisation de séances d'information	22
Participation à des colloques	23
Production de documents audio-visuels	24
Publications et notes de travail	25
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	29
Une méthode opérationnelle...	29
... pouvant être mise en oeuvre selon plusieurs scénarios.	29
Les possibilités d'amélioration de la méthode par de nouvelles recherches	30
Annexe. MANUEL DE FORMATION AUX SONDAGES AREOLAIRES SUR IMAGES SATELLITE POUR DES ENQUETES SOCIO- DEMOGRAPHIQUES EN MILIEU URBAIN	31

1. OBJECTIFS DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Les populations urbaines des pays en développement posent des problèmes spécifiques d'observation du fait des caractéristiques de l'urbanisation dans ces pays: **rythmes de croissance démographique très élevés et modifications rapides du tissu urbain.**

Les recensements exhaustifs font appel à des moyens techniques, financiers et humains considérables, au regard des économies de ces pays, qui interdisent une périodicité inférieure à une dizaine d'années; de plus, compte tenu de la durée d'exploitation des recensements, les résultats sont souvent caducs dès leur parution.

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. Mais, sans base de sondage complète et à jour, sans cartographie fidèle et exhaustive, les enquêtes par sondage se révèlent difficiles à mettre en oeuvre.

Face à ce constat, il nous a paru nécessaire de développer de nouvelles méthodes de collecte de données démographiques adaptées aux spécificités des villes des pays en développement. A cet effet, la télédétection spatiale (LANDSAT TM et SPOT), 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 aériennes¹, on peut utiliser avec profit l'information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines.

Le Département D (Urbanisation et socio-systèmes urbains) de l'ORSTOM a donc initié en 1985 un programme de recherche² dont l'objectif central est 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, et en moyens financiers et humains. L'idée centrale de la méthode est **d'utiliser l'image satellite comme base de sondage et d'exploiter l'information morphologique sur le milieu urbain que fournissent ces images pour stratifier un plan de sondage spatial applicable à une enquête démographique.**

La réalisation de l'objectif général du programme a impliqué des travaux, menés en parallèle par une équipe pluridisciplinaire, dans différentes directions de recherche, notamment: l'interprétation des images satellite SPOT et LANDSAT TM en milieu urbain, et les sondages spatiaux à objectif démographique en milieu urbain. Nous avons également été amenés à travailler sur l'intégration des données de télédétection dans des bases de données géographiques.

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'ilots 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.

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.

² La définition du programme de recherche est exposée dans: "L'utilisation de l'imagerie aérienne et spatiale pour l'observation démographique en milieu urbain", DUREAU F., 1984. Paris, 12 p. multigr.

2. MOYENS UTILISES

CONTEXTE INSTITUTIONNEL

Sur ce programme de recherche, inscrit dans l'Unité de Recherche I 5 (Systèmes d'accumulation des hommes et des richesses en milieu urbain) du Département S.D.U. (Sociétés, Développement et Urbanisation) de l'Orstom, trois services de l'Orstom ont collaboré:

- l'U.R. I 5 du Département SDU,
- l'Unité de Télédétection du L.I.A. (Laboratoire d'Informatique Appliquée) de Bondy,
- l'Unité d'Infographie du L.I.A. (Laboratoire d'Informatique Appliquée) de Bondy.

En outre, pour les travaux concernant Marseille, nous avons collaboré avec l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (A. CHATELAIN).

Quant aux partenaires équatoriens, il s'agit des institutions participant au programme Atlas Informatisé de Quito:

- l'I.G.M. (Institut Géographique Militaire),
- l'I.P.G.H. (Institut Panaméricain de Géographie et d'Histoire),
- la Direction de la Planification de la Mairie de Quito.

MOYENS EN PERSONNEL

Ce programme de recherche met en oeuvre quatre disciplines principales : la démographie, la statistique, la télédétection et l'urbanisme. L'équipe de recherche, pluridisciplinaire, était composée de:

DUREAU Françoise, chargée de recherche ORSTOM, géographe-démographe, U.R. I 5, département S.D.U.. Responsable du programme de recherche. Détermination des objectifs; conception et organisation des plans d'expérimentation nécessaires aux développements méthodologiques sur Marseille et Quito; recueil et analyse des données existantes; collecte, exploitation et analyse des données morphologiques et démographiques; production, évaluation et diffusion des résultats.

BARBARY Olivier, allocataire de recherche MRES, statisticien, U.R. I 5, département S.D.U.. Formalisation mathématique des relations entre morphologie urbaine et population, et développement de techniques de sondage spatiaux pour des enquêtes démographiques en milieu urbain. Participation au programme de juin 1985 à janvier 1989.

MICHEL Alain, allocataire de recherche MRES, urbaniste spécialisé en télédétection, U.R. I 5, département S.D.U.. Participation au programme de décembre 1985 à décembre 1988.

et LORTIC Bernard, géographe spécialisé en télédétection, Unité de Télédétection du L.I.A..
Intégration des données de télédétection dans une base de données localisées. Développement de méthodes de classification d'image satellite SPOT et LANDSAT TM permettant d'aboutir à une stratification de l'espace urbain pour réaliser un sondage à objectif démographique.

Ont également participé à certaines phases des travaux:

- télédétection: EBERHARD J.M. (stage de D.E.A. sur l'image SPOT de Quito, mai-juillet 1987), CHATELAIN A. (EHESS, participation aux premiers travaux sur Marseille);
- infographie: SOURIS M. (ingénieur de recherche ORSTOM, mathématicien -informaticien), PELLETIER F. (ingénieur de recherche ORSTOM, cartographe-informaticienne);
- traitements photographiques: RANNOU I. et AING A. (techniciennes ORSTOM, photographes).

Les tâches de digitalisation des cartes ont été assurées par une technicienne de l'ORSTOM (ANTIGEOL I.C.).

Les enquêtes menées à Quito ont été réalisées par:

- enquête Morphologie urbaine (octobre-décembre 1986): 2 enquêteurs équatoriens;
- enquête Bâti/Population, avril 1987, 5 enquêteurs équatoriens;
- enquête Migrations, décembre 1987, 16 enquêteurs et 3 superviseurs équatoriens.

MOYENS FINANCIERS

Outre les financements ORSTOM (1986 = 134.800 F ; 1987 = 149.200 F ; 1988 = 90.000 F), le projet a bénéficié des moyens suivants:

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

MOYENS EN MATERIEL

La station SUN de Quito n'étant entré en service qu'en mars 1988, la majorité des traitements d'image satellite ont été réalisés à Bondy (logiciel PLANETES de l'ORSTOM), sur le matériel décrit ci-dessous :

UNITE D'INFOGRAPHIE	ATELIER DE TELEDETECTION
<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)	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 (THETASCAN)
<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)	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 (THETASCAN)

La saisie et le traitement des données collectées à Quito ont été effectués sur un IBM AT dont disposaient les chercheurs de l'équipe basés à Quito (F. DUREAU et O. BARBARY), acquis sur financement ATP CNRS/CNES.

Les traitements photographiques ont été réalisés à l'Atelier de Traitement Photochimique de Bondy.(I. RANNOU et A. AING).

3. CALENDRIER DES OPERATIONS ET PLANS D'EXPERIENCE

CONCEPTION GENERALE DU PROGRAMME: LES DIFFERENTES PHASES DE LA RECHERCHE

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-date 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 SCEES¹ 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:

- 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 (Figures 2 et 3).

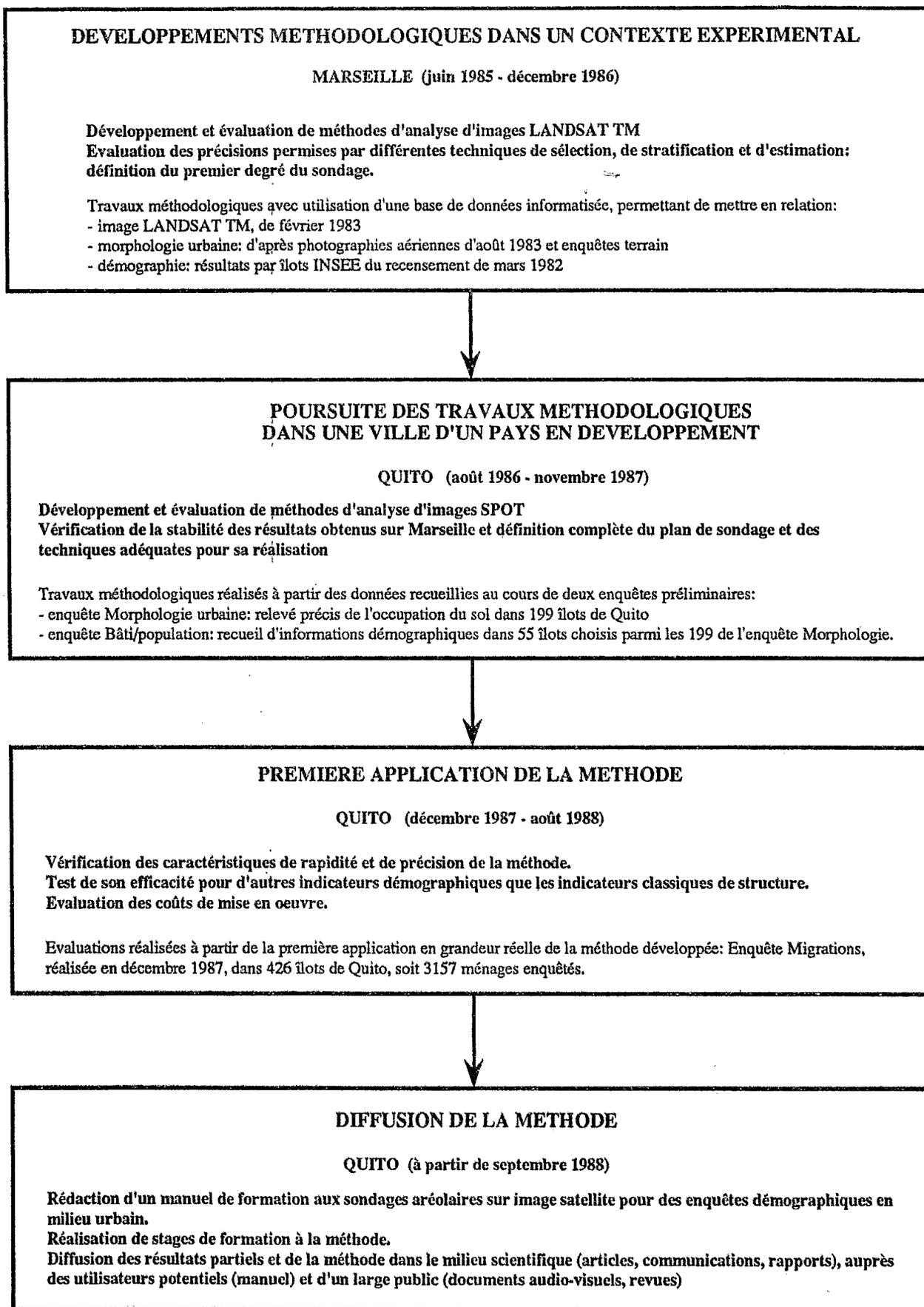
Afin de disposer de références fiables, nous avons choisi de travailler d'abord sur une ville française, Marseille, disposant d'une image Thematic Mapper, d'un recensement récent disponible au niveau du district de recensement et d'une couverture aérienne à grande échelle: l'intégration de l'ensemble de ces informations dans une base de données gérée par le système d'information géographique SAVANE² nous a placé 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 choisi de travailler 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.

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

² Système développé par l'Unité d'Infographie de l'ORSTOM.

Figure 1 - Les différentes phases du programme de recherche



PLAN D'EXPERIENCE SUR MARSEILLE

La zone d'étude, rassemblant 3534 districts de recensement, a été déterminée de manière à couvrir les différents types de quartiers de Marseille, c'est à dire les quartiers industriels et de grands ensembles ouvriers du nord, les quartiers résidentiels du sud, le centre, et les 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 recherche de notre programme ont été menées en parallèle, leurs résultats se conditionnant mutuellement (Figure 2).

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

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 LANDSAT 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 informatique¹ qui, en appliquant les formulaires associés à un plan de sondage donné, calcule la variance exacte des estimateurs correspondants.

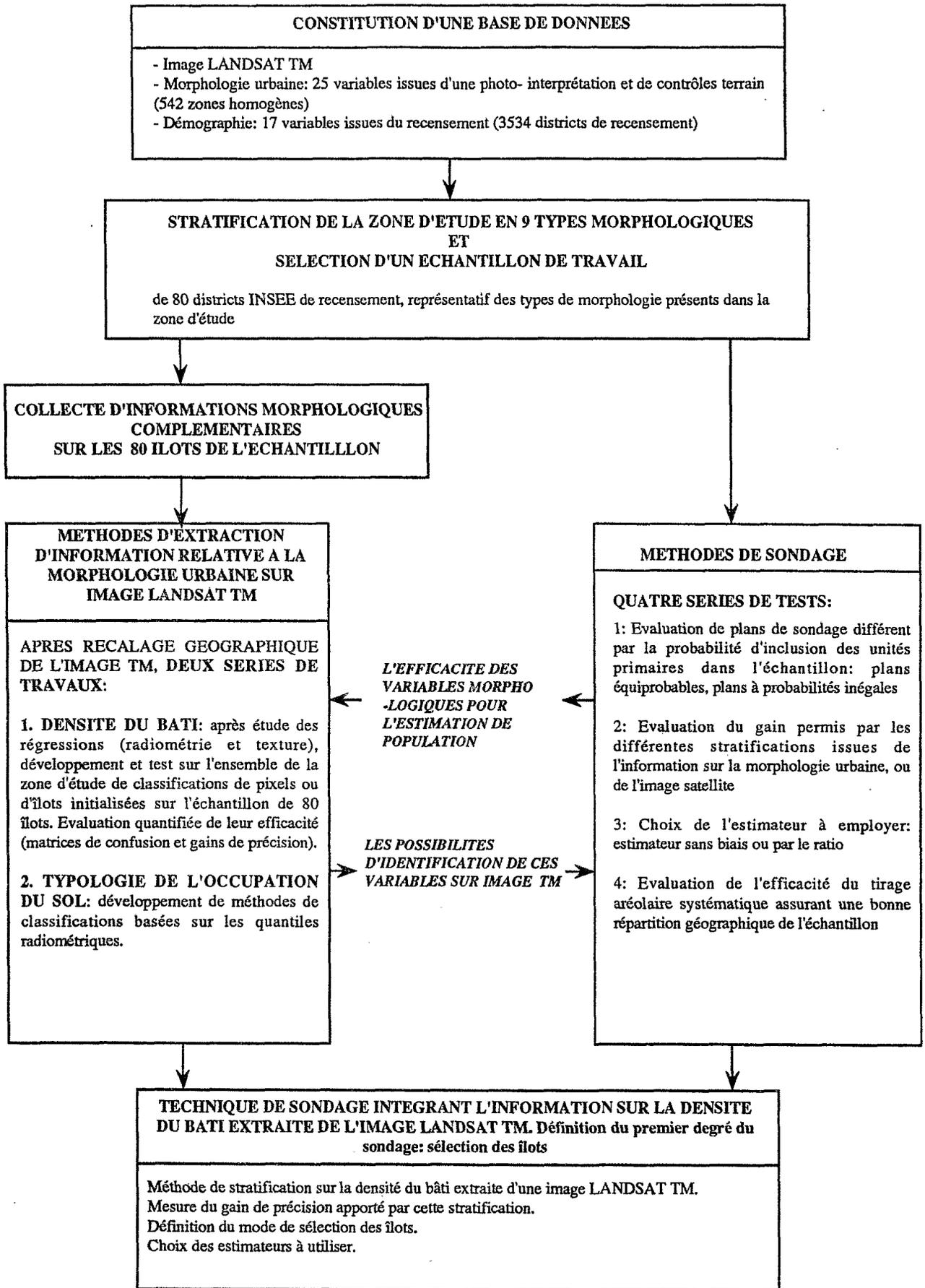
A l'issue de cette étape de développement méthodologique sur Marseille, nous disposions donc d'une première série de résultats:

- chaîne de traitements opérationnelle pour obtenir une classification de l'espace urbanisé selon la densité du bâti à partir d'une image LANDSAT 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.

¹ Programme VARECH, développé par O. BARBARY, sous DBASE III.

Figure 2 - Le plan d'expérience sur Marseille



PLAN D'EXPERIENCE SUR 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?
- 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?

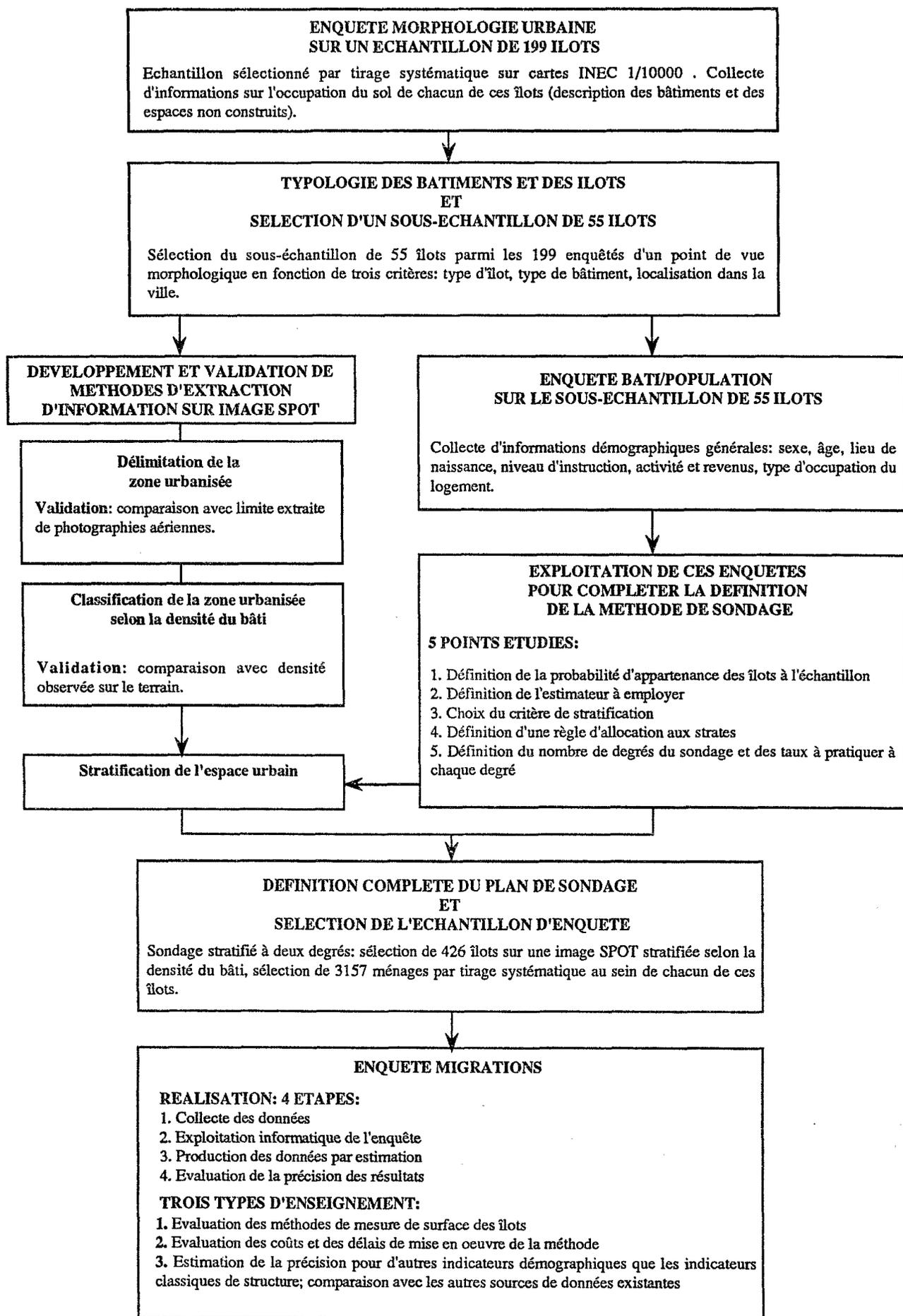
Afin de pouvoir rechercher des réponses à ces différentes questions et disposer des éléments nécessaires à l'application de la méthode, nous avons réalisé deux enquêtes préliminaires (voir Figure 3):

- 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 plaçons 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 quiténienne et analyse des systèmes de résidence).

Figure 3 - Le plan d'expérience sur Quito



4 . 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 LANDSAT TM en milieu urbain et les sondages aréolaires à objectif démographique en ville; c'est l'utilisation cohérente de l'ensemble de ces résultats¹ qui a permis d'atteindre l'objectif que nous nous étions fixé, c'est à dire 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. La mise en oeuvre de la méthode est décrite précisément dans le manuel présenté en annexe de ce rapport: nous insisterons donc plus particulièrement ici sur la précision, les coûts ainsi que les domaines d'application de la méthode, éléments fondamentaux pour conclure sur l'intérêt de la méthode proposée.

SYNTHESE DES RESULTATS EN TELEDETECTION URBAINE

Les résultats obtenus en méthodes d'analyse des images SPOT et LANDSAT 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 ci-après, 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 tangible, mais, n'étant pas encore directement applicables, ces méthodes ne peuvent pas encore être intégrées dans un système routinier de production d'information.

Résultats obtenus en télédétection urbaine

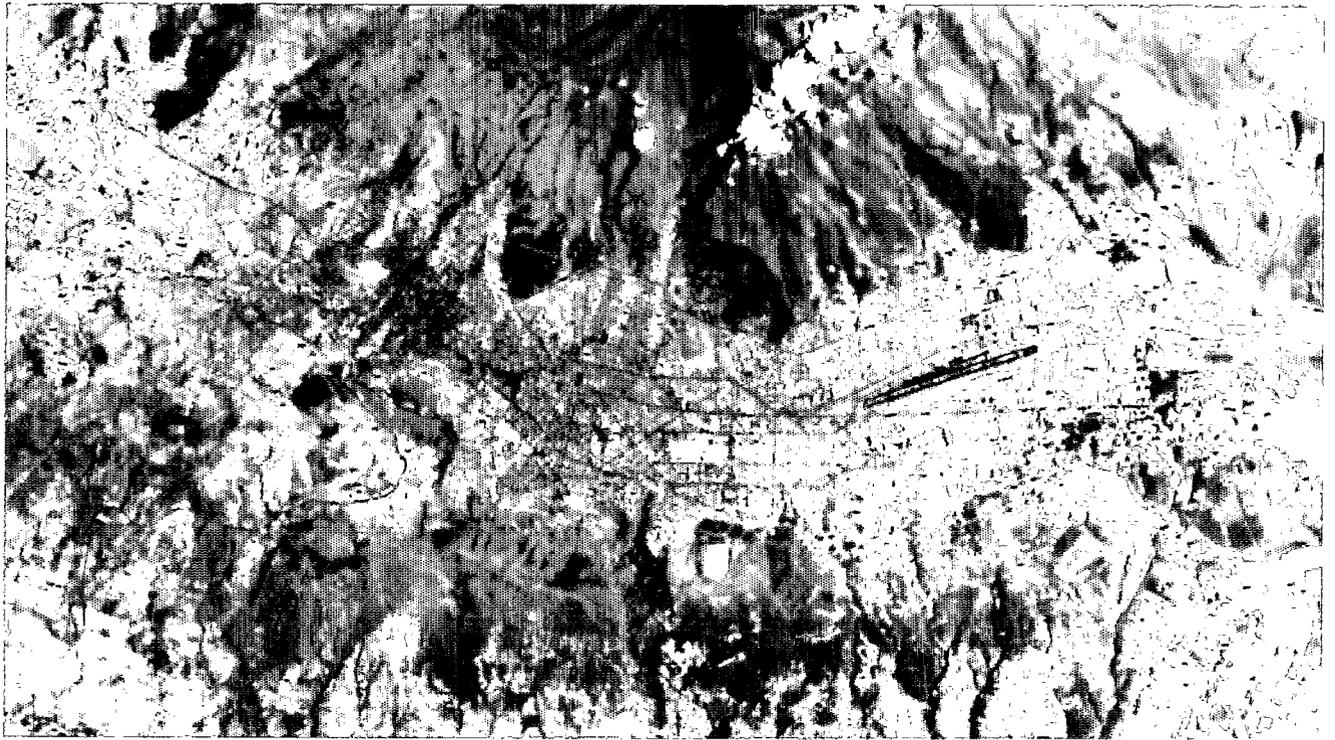
OBJECTIF	OBSERVATIONS
Intégration images satellite/ système d'information géographique	Utilisation combinée d'un SIG (SAVANE) et d'un logiciel de traitement d'image satellite, développés par l'Orstom. Facilite le développement de nouvelles méthodes d'analyse en télédétection; permet d'enrichir et actualiser 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).

¹ Les résultats sont exposés en détail dans les rapports et thèses cités au chapitre 5.

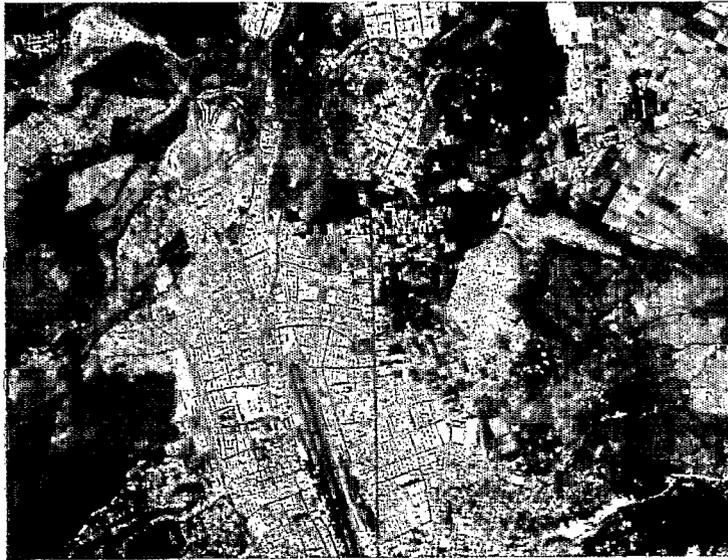
Résultats obtenus en télédétection urbaine (suite)

OBJECTIFS	OBSERVATIONS
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 LANDSAT 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 des sur image SPOT	Essai de caractérisation et classification des quartiers 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.

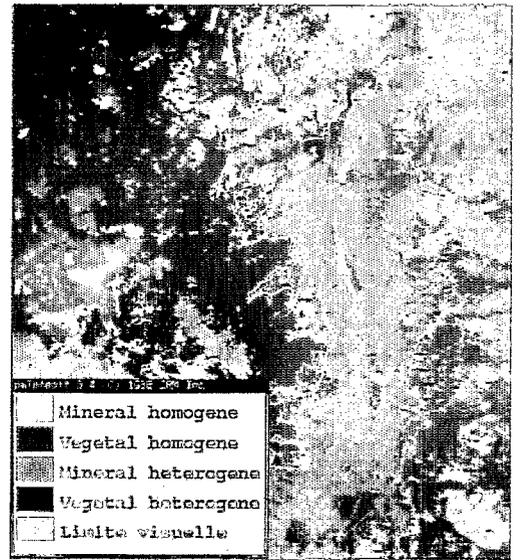
Les photographies présentées page 16 illustrent les trois grandes utilisations qui peuvent être faites dès maintenant des images satellites dans une perspective de production de données démographiques par sondage en milieu urbain: **délimitation, stratification et actualisation de la base de sondage.**



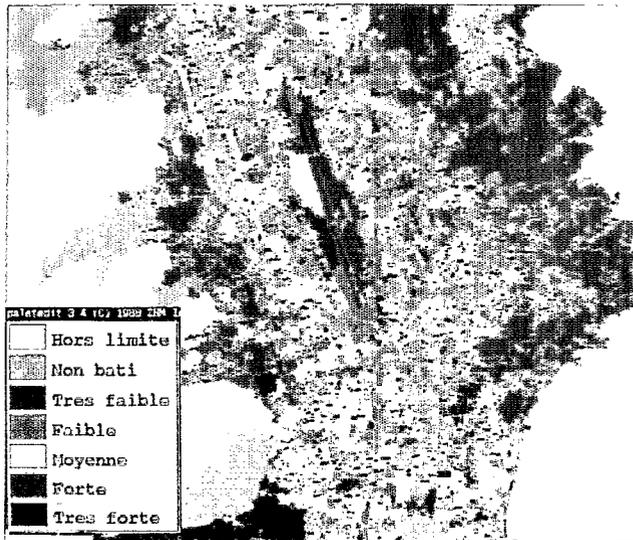
Composition colorée - Image SPOT du 3 Juin 1986- Echelle approximative 1/100 000



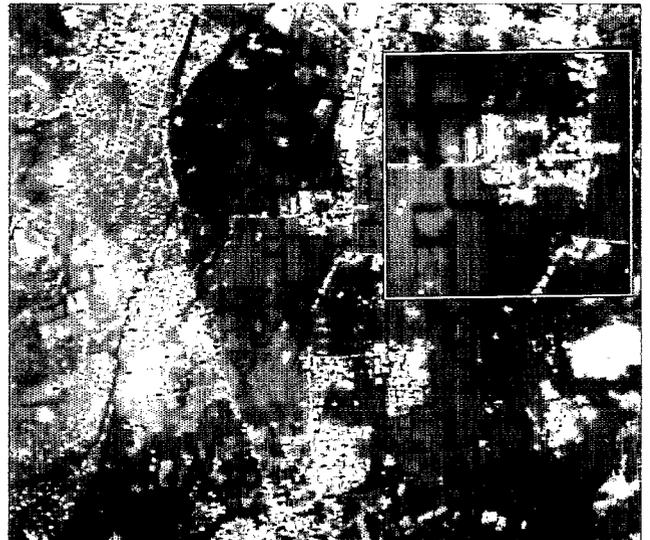
Panchromatique SPOT du 9 Août 1986



Délimitation de la base de sondage



Stratification de la base de sondage



Actualisation de la base de sondage

DESCRIPTION GENERALE DE LA METHODE DE SONDAGE

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.

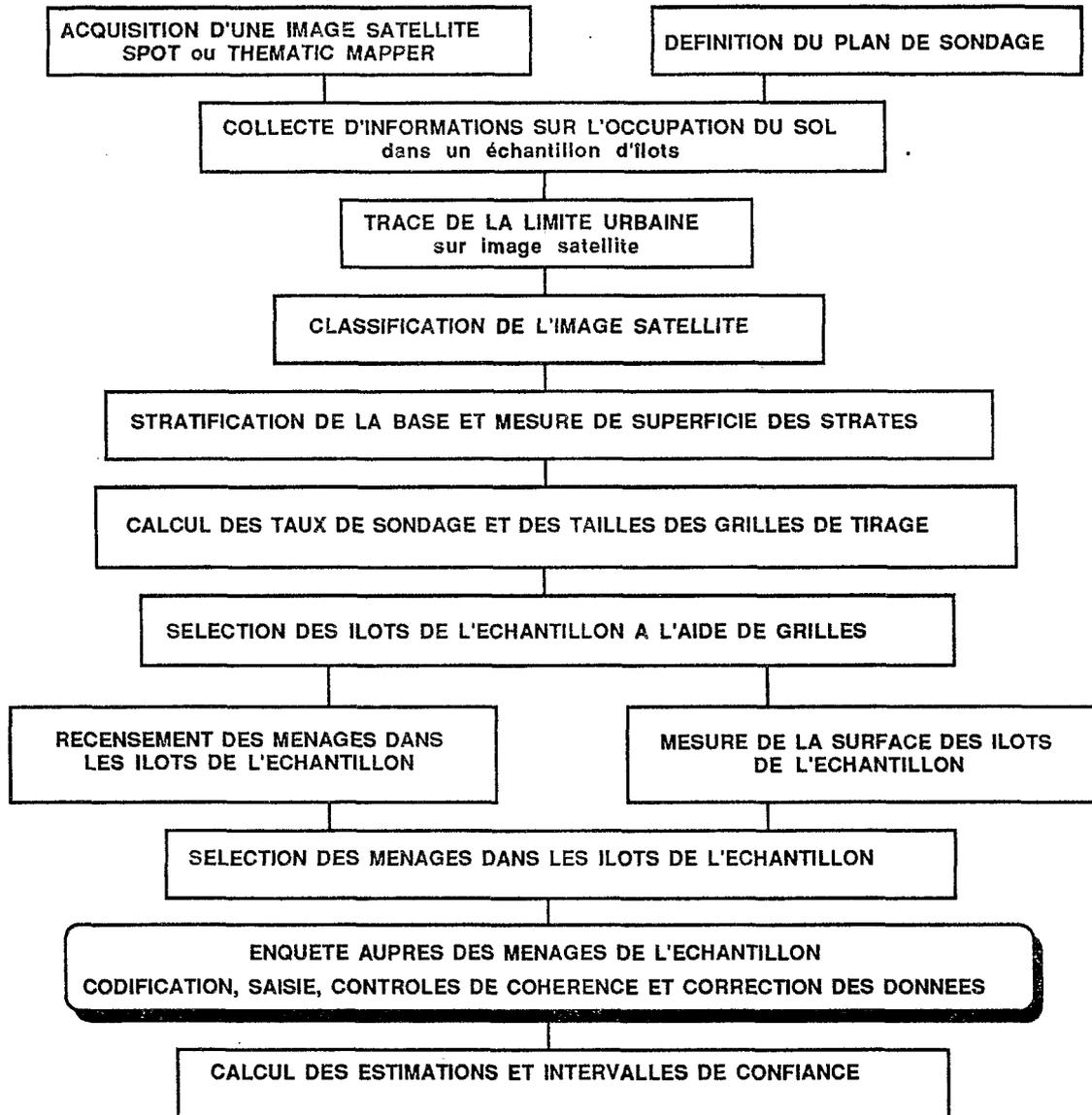
Prenant en considération les contraintes d'application de la méthode dans des villes des pays en développement, les conséquences de l'utilisation d'une image satellite comme base de sondage et les résultats des expérimentations préliminaires sur les villes de Marseille et Quito, nous avons abouti à la définition d'un plan de sondage à partir d'image satellite adapté à notre objectif; le tableau ci-dessous en précise les principales caractéristiques.

Caractéristiques du plan de sondage

Structure générale	Sondage aréolaire 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. Quotients: estimateur du ratio sous plan à probabilités proportionnelles aux surfaces des îlots.

ETAPES DE LA MISE EN OEUVRE

Pour mettre en œuvre le plan de sondage décrit ci-dessus, un certain nombre d'opérations doivent être réalisées. Ces différentes étapes étant précisément décrites dans chacune des fiches composant le manuel qui figure en annexe de ce rapport, nous ne les exposons donc pas en détail ici et présentons uniquement ci-dessous le schéma général de mise en œuvre de la méthode.



PRECISION DES RESULTATS

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 sélection de l'échantillon et d'inférence;
- estimations des variances des estimateurs calculés à partir des données collectées lors de l'application de la méthode (enquête Migrations, décembre 1987, Quito).

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 quatre 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 exclusion de la base. Pour l'estimation des effectifs, le gain que permet la stratification en cinq niveaux de densité du bâti se situe autour de 50 % du coefficient de variation de l'estimateur.
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 45 % et 95 % de la variance d'un tirage aléatoire non stratifié.
4. En termes de précision, il est bien plus efficace de pratiquer un sondage à deux degrés qu'un sondage en grappes où tous les ménages des îlots de l'échantillon seraient enquêtés.

La mesure de la précision des différentes étapes de la sélection de l'échantillon sur une image SPOT ou LANDSAT TM a permis de sélectionner les techniques les plus performantes pour chacune des étapes, autorisant ainsi une mise en oeuvre correcte du plan de sondage défini en fonction des conclusions des expériences préliminaires menées sur Marseille et Quito.

Mode 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 1/2000 de l'Institut Géographique Militaire

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

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 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 (construite, ici, uniquement d'après la classification de l'image), et de l'augmentation du taux au premier degré (îlots) avec allègement au second degré (ménages).

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

Indicateur démographique	Estimation (ensemble de la base)	Estimation du coefficient de variation de l'estimateur (%)
Nombre total de personnes	1 120 991	6, 73
Taille moyenne du ménage	4, 535	1, 10
Age moyen du chef de ménage	43, 96	1, 02
% ménages de 7 pers. et plus	9,84	6, 80
% ménages propriétaires	46,01	2, 49
Sex ratio	0, 959	1, 50
% plus de 60 ans	5, 77	5, 40
% nés à Quito	63, 22	1, 38
% nés à l'étranger	1, 94	14, 69

Pour statuer définitivement sur les qualités de précision de la méthode, il importe maintenant de comparer ces précisions à celles fournies par d'autres méthodes de sondage utilisées pour des enquêtes démographiques en milieu urbain: cette comparaison, rendue très difficile du fait de la rareté des indications existant dans les rapports, en est encore à ses débuts.

COUTS DE MISE EN OEUVRE

A partir de la comptabilité des frais engagés durant toute la phase d'application à Quito¹, il nous a été possible de calculer les fonctions de coût et de précision caractérisant la méthode. Ces fonctions et les évaluations auxquelles elles conduisent sont présentées dans la fiche 1 du manuel ci-joint; deux remarques doivent être faites par rapport à ces informations.

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 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.

DOMAINES ET SITES D'APPLICATION

Le **domaine thématique d'application** de ce type d'enquête démographique par sondage sur image satellite est principalement déterminé par deux contraintes : d'une part l'enquête doit porter sur des individus statistiques compatibles avec la structure du sondage proposé et d'autre part, si l'on veut que la méthode soit efficace, il faut qu'existent certaines corrélations entre les thèmes abordés dans le questionnaire et la morphologie urbaine.

Par rapport à la première contrainte, l'utilisation de l'image satellite comme base de sondage est un principe applicable à tout domaine thématique où l'on observe des unités statistiques rattachées à des unités d'échantillonnage repérables sans ambiguïté sur l'image ; en l'état actuel des possibilités d'interprétation des images satellite en milieu urbain, l'îlot physique est la plus petite unité d'échantillonnage praticable.

Le domaine thématique concerné par ce type d'unité couvre donc théoriquement tout le champ des sciences sociales en milieu urbain : géographie humaine, démographie, sociologie, économie, épidémiologie et médecine sociale etc... L'accumulation des expériences d'application de la méthode à ces différents thèmes permettra de vérifier le degré de performance de la méthode pour des domaines autres que celui qui a servi à sa mise au point, la démographie.

Les **sites potentiels d'application** de la méthode sont eux aussi très nombreux. L'équipement informatique nécessaire à la définition du plan de sondage, au traitement de l'image et à l'exploitation de l'enquête n'est pas un obstacle à sa portabilité puisque l'ensemble des tâches peuvent être réalisées sur une configuration micro-informatique standard.

Le traitement de l'image peut être limité à la production des seules sorties sur papier des canaux, néo-canaux ou classifications nécessaires à la définition et à la stratification de la base de sondage; ces opérations seront éventuellement sous-traitées à une institution nationale ou étrangère, possédant l'équipement nécessaire.

Les limites de l'application de la méthode tiennent plutôt à la taille de la ville à laquelle on pense l'appliquer et à la précision que l'on veut atteindre, du fait de l'existence d'une part importante de frais fixes: pour conserver la précision obtenue à Quito (agglomération de 1 120 000 habitants) sur une ville de 100 000 habitants, le taux de sondage devrait être d'environ 15% et le coût de l'enquête peut alors être lourd relativement au budget dont on dispose dans des villes de cette taille.

Enfin, il ne faut oublier que l'utilisation d'une image satellite comme base de sondage suppose l'acquisition d'une image exploitable sur la ville que l'on désire enquêter: avant de mettre sur pied une enquête par sondage sur image satellite, il est indispensable de procéder à une étude préliminaire des probabilités d'obtention d'une image satellite sur ce site. Dans le cas de villes à très forte nébulosité durant toute l'année, la méthode ne pourra pas être appliquée, faute d'image exploitable.

¹ Voir: DUREAU F., 1988. Eléments de calcul des coûts d'enquête à Quito. Quito, 13 p.

5. DIFFUSION DES RESULTATS DE LA RECHERCHE

ORGANISATION D'ATELIERS DE FORMATION

Quito (EQUATEUR), 19 - 22 décembre 1988

Atelier de formation aux sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain.

Stage organisé et financé par l'ORSTOM, réalisé par F. DUREAU et O. BARBARY.

25 participants, appartenant aux institutions suivantes: CEDIME, CEPAR, CLIRSEN, CONADE, IGM, INEC, IPGH, Ministère de l'Agriculture, Ministère de la Santé, Municipalité de Quito (Direction de la Planification), ORSTOM, Université de Quevedo.

Bogota (COLOMBIE), 25 - 27 janvier 1989

Atelier de formation aux sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain.

Stage organisé et financé conjointement par l'ORSTOM et le Bureau Régional de Coopération Scientifique et Technique, réalisé par F. DUREAU et O. BARBARY.

35 participants, des institutions suivantes: DANE, IGAC, Ministère de l'Agriculture, *Planeación distrital* de Bogota, Université Nationale de Bogota (Département de mathématique et statistique, Département de physique), de Medellin et de Manizales, *Universidad del Valle* (Cali).

ORGANISATION DE SEANCES D'INFORMATION

Equateur

Au cours des visites de professionnels à l'Atlas Informatisé de Quito, nous avons été amenés à faire un grand nombre d'exposés sur la méthode de sondage que nous avons développée, et de façon plus générale sur la télédétection en milieu urbain. Parmi les principales institutions concernées par ces séances d'information, citons: les différentes directions de la Municipalité de Quito, les Ministères de l'Education et de la Santé, le CONADE, l'INEC, l'IGM et le CLIRSEN. Le 19 mai 1989, nous avons exposé la méthode aux stagiaires du cours régional de télédétection organisé par le CNES et l'ESA, à Quito du 16 au 26 mai 1989.

Colombie

- Cali, 23 janvier 1989: *Planeación urbana de la Gobernación* de Cali, *Planeación municipal* de Cali, *Planeación municipal* de Pereira.

- Medellin, 24 janvier 1989: *Planeación metropolitana de la Gobernación* de Medellin, *Planeación departamental*, Services publics de la ville de Medellin, service du cadastre de la *Gobernación* de Medellin.

- Bogotá, 28 janvier 1988: IGAC (Institut Géographique Augustin Codazzi).

PARTICIPATION A DES COLLOQUES

Florence (ITALIE), 5-12 juin 1985. XXe congrès général de l'Union Internationale pour l'Etude Scientifique de la Population.

Lyon (FRANCE), 10-13 juin 1987. Forum International de l'Instrumentation et de l'Information géographiques.

San José (COSTA RICA), 5-9 octobre 1987. Primera Conferencia Latinoamericana sobre informática en geografía.

Bogota (COLOMBIE), 16-20 novembre 1987. II Simposio Latinoamericano sobre sensores remotos.

Paris (FRANCE), 23-27 novembre 1987. Colloque SPOT.

Quito (EQUATEUR), 2-7 mai 1988. Colloque INEC sur les sondages aréolaires dans les pays andins.

Lyon (FRANCE), 20-22 septembre 1988. Colloque ISTEDE: Gestion urbaine et développement.

Paris (FRANCE), 20-22 septembre 1988. Colloque ORSTOM: Migration Changements sociaux et Développement.

Paris (FRANCE), 24-28 octobre 1988. Colloque PIXIM 88.

Bondy (FRANCE), 14-17 novembre 1988. Journées de télédétection de l'ORSTOM.

Guayaquil (EQUATEUR), 12-15 décembre 1988. Colloque CLIRSEN: El uso de los sensores remotos en la evaluación de los recursos naturales.

Quito (EQUATEUR), 12-16 décembre 1988. Séminaire-atelier Informatique, base de données et gestion urbaine.

Orléans (FRANCE), 17-19 janvier 1989. Colloque ATP CNES/ CNRS télédétection spatiale.

PRODUCTION DE DOCUMENTS AUDIO-VISUELS

Panneaux didactiques

Au fur et à mesure de l'avancement de nos travaux, nous avons réalisé des panneaux didactiques exposant la méthodologie utilisée et les résultats obtenus; ces panneaux ont été présentés dans les colloques, séances d'information et ateliers auxquels nous avons participé.

Liste des panneaux:

- un panneau sur le thème "système d'information géographique et télédétection", à partir de nos travaux sur Marseille.
- un panneau intitulé "Une nouvelle méthode de collecte de données démographiques à partir d'images SPOT", qui synthétise les résultats obtenus en télédétection (limite urbaine, niveaux de densité du bâti, évolution entre deux dates) sur l'exemple de Quito. (2 versions, français et espagnol).
- une série de 9 panneaux montrant de façon très simplifiée, à partir de l'exemple de Quito, comment peut être utilisée l'imagerie SPOT pour produire de l'information sur la morphologie urbaine et sur la démographie (utilisation de l'image comme base de sondage et de stratification). (2 versions, français et espagnol).

Diapositives

Nous avons constitué une collection de diapositives, pouvant être utilisées comme support pédagogique lors de chacune de nos présentations publiques.

Thèmes traités:

- télédétection aérienne et spatiale et observation démographique en milieu urbain: rappel des expériences menées sur cette question;
- le programme de recherche mené à l'Orstom: description des plans d'expérience à Marseille et Quito et de la méthodologie;
- les méthodes d'analyse des images SPOT et LANDSAT TM mises au point par notre équipe, sur les exemples de Marseille (utilisation d'un système d'information géographique) et de Quito;
- la méthode de sondage aréolaire à partir d'image satellite pour des enquêtes démographiques en milieu urbain: différentes étapes, précision des résultats, coûts de mise en oeuvre.

Séquence dans un film de SPOT IMAGE

Dans le film sur les potentialités de l'imagerie SPOT, réalisé par SPOT IMAGE et les Films du Centaure, une séquence d'environ une minute est consacrée à nos travaux sur l'utilisation de l'imagerie SPOT pour l'observation des populations urbaines; cette séquence a été construite à partir de prises de vues de terrain réalisées à Quito en octobre 1988 et de résultats de traitement sur station SUN enregistrées dans les laboratoires de l'Orstom à Bondy.

Par cette séquence, nous avons tenté de transmettre trois idées essentielles au public de non-spécialistes auquel s'adresse le film: l'importance, pour gérer correctement une ville, de disposer d'informations actualisées, l'intérêt de l'imagerie satellitaire pour produire rapidement des données sur la morphologie urbaine, et sur la démographie, grâce à des sondages auprès d'échantillons tirés sur image satellite, et la méthode de sélection sur une image SPOT classée de l'échantillon d'ilots où les ménages devront être enquêtés.

PUBLICATIONS ET NOTES DE TRAVAIL

. Ouvrages

DUREAU F., BARBARY O., MICHEL A., LORTIC B., 1989. Manuel de formation aux sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain. ORSTOM - CNES, en cours d'édition, 15 fiches recto-verso, + 8p.

. Fiches techniques

DUREAU F., MICHEL A., LORTIC B., 1989. Aide à la délimitation des zones urbaines. Classification des zones urbaines selon la densité du bâti. SPOT IMAGE, SAP (Spot Added Product), en cours d'édition, 2 fiches recto-verso.

. Articles

CHATELAIN A., DUREAU F., GUILLAUME A., PONCET Y., 1984. La télédétection urbaine dans les pays en développement. Revue de l'ISTED, 5 p.

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.

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.

DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987. L'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines. ORSTOM, Bulletin du Département H n° 12 consacré à l'Equateur, pp. 74-83.

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.

MICHEL A., LORTIC B., DUREAU F., BARBARY O., 1988. - Une nouvelle méthode de collecte de données démographiques à partir d'images SPOT. Paris, CNES - SPOT IMAGE, SPOT instrument de gestion et de décision, p. 26.

MICHEL A. et DUREAU F., 1989. - Teledetección aérea y espacial en medio urbano y observación demográfica. Avance de la investigación a través de la literatura francesa e inglesa. A paraître dans la revue du CIAF, 16 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.

. Communications à des colloques

- BARBARY O., 1988. - Développement d'une méthode de sondage démographique en milieu urbain intégrant l'information satellitaire. Présentation des principaux résultats obtenus à Marseille et à Quito. Communication au Colloque sur les sondages aréolaires dans les pays andins, Quito (Equateur), 2-7 mai 1988, 7 p.
- BARBARY O., DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., 1988. - Un nuevo método de recolección de datos demográficos a partir de imágenes de satélite. Un caso concreto de aplicación: Quito (Ecuador). Communication au Colloque CLIRSEN: El uso de los sensores remotos en la evaluación de los recursos naturales, Guayaquil (Equateur), 12-15 décembre 1988, 1 p.
- 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, 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, 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, 29 p.
- DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1988. - Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (Equateur). Communication au colloque Gestion urbaine et développement ISTED, Lyon (FRANCE), 20-22 septembre 1988, 6p.
- 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, 17 p. A paraître dans la Collection Colloques et séminaires, ORSTOM.
- DUREAU F., MICHEL A., LORTIC B., BARBARY O., SOURIS M., 1989. - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique: suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Communication présentée au colloque ATP CNRS/CNES, Orléans, 14-17 janvier 1989, 4 p.
- DUREAU F., BARBARY O., MICHEL A., LORTIC B., 1989. - Producir rapidamente datos demográficos en las ciudades. Presentación del método de recolección desarrollado por el ORSTOM. Communication diffusée lors des séances de présentation de la méthode en Colombie et en Equateur. Quito, 3 p.
- MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987. - El uso de la teledeteccion 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.
- 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 au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 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. A paraître dans la collection Colloques et séminaires, ORSTOM.

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, 20 p.

. Notes de travail et rapports multigraphiés

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.

Equipe ORSTOM (UR I5 du département SDU, Unités de télédétection et d'infographie du LIA), 1988. - L'utilisation de l'imagerie SPOT pour l'observation démographique en milieu urbain. Rapport final CNES - Avril 1988. Paris, 22 p. + 195 p. ann.

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.

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, 204 p.

BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, EHESS, 382 p.+ 259 p. ann.

BARBARY O. et DUREAU F., 1989. - Documentation des procédures d'estimation sous SPSS pour l'exploitation de l'enquête Migrations (Quito, décembre 1987). (2 versions: français et espagnol). Quito, 14 p. + ann.

DUREAU F., 1984. - L'utilisation de l'imagerie aérienne et spatiale pour l'observation démographique en milieu urbain. Paris, 12 p.

DUREAU F., 1986. - Marseille: recalage géographique. Quito, 6 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. Enquête démographie/migrations. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 33 p.
- DUREAU F., 1988. - Eléments de calcul des coûts d'enquête à Quito. Quito, 13 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 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, 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, 99p.
- 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.
- 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. Thèse de doctorat, EHESS, 2 vol., 237 p. + 162 p. ann.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une méthode opérationnelle...

Les recherches effectuées depuis 1985 ont permis de mettre au point une méthode de production de données démographiques en milieu urbain utilisant l'information apportée par les satellites, adaptée aux caractéristiques de l'urbanisation dans les pays en développement et au contexte local d'information, d'équipement, de moyens financiers et humains.

Les travaux méthodologiques effectués sur Marseille et Quito dans le cadre des plans d'expérience décrits au chapitre 3 de ce rapport 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 LANDSAT TM permet de définir un plan de sondage rigoureux et performant. Ces travaux sont à l'origine de résultats importants, de portée générale, en sondage, télédétection urbaine et système d'information géographique, 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 la pertinence et l'efficacité de la méthode : 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 ; toutes les étapes de la sélection de l'échantillon ont été réalisées facilement, dans des délais très courts. A partir de cette expérience quiténienne, nous avons également évalué les coûts de mise en oeuvre de la méthode, et la précision des résultats.

La méthodologie que nous avons développée et dont l'expérience quiténienne a démontré l'opérationnalité, peut apporter dès maintenant des éléments de réponse aux problèmes posés par le suivi démographique des villes des pays en développement: cette technique de production de données démographiques pourrait être appliquée dès maintenant dans de nombreuses autres villes, en suivant les étapes décrites dans le manuel joint au présent rapport.

... pouvant être mise en oeuvre selon plusieurs scénarios.

Tout au long de ce programme, nous nous sommes efforcés de rechercher, quelle que soit l'étape considérée, plusieurs options en fonction tant des capacités financières et technologiques des éventuels utilisateurs, que du contexte d'information dont ils bénéficient.

Ainsi, en télédétection, qu'il s'agisse de la délimitation de la base de sondage ou de la stratification de l'espace urbanisé, il est possible de réaliser ces opérations à partir de tirages photographiques d'image satellite éventuellement adaptés (indice de végétation, par exemple), ou à partir d'images stockées sous forme de bandes magnétiques ou de disquettes traitées sur un équipement informatique léger (type micro-ordinateur IBM AT) ou plus lourd (type station de travail graphique SUN). Le gain de précision des résultats démographiques n'est pas directement proportionnel à la complexité des traitements d'image satellite retenus pour stratifier la base de sondage: la stricte optimisation du plan de sondage (rapport coût/gain de précision) passe plus par l'utilisation des connaissances empiriques sur la ville permettant d'améliorer la stratification et par l'augmentation du taux au premier degré avec allègement au second degré, que par la sophistication des traitements numériques de l'image satellite.

Les techniques de sélection de l'échantillon qui ont été développées sont applicables sur image satellite s'il l'on ne dispose d'aucune autre base de sondage utilisable, mais aussi sur des documents cartographiques à jour ou des photographies aériennes, s'il en existe sur la ville à enquêter. La fiche 1 du manuel ci-joint détaille, sous forme d'un tableau, les cheminements adaptés aux différents contextes de données: d'éventuelles informations "exogènes" (c'est à dire ne provenant pas de l'image satellite) peuvent être utilisées avec profit pour les différentes étapes de la sélection de l'échantillon, qu'il s'agisse de la délimitation de la base de sondage, de la classification de l'image, de la stratification de la base ou de la gestion des taux aux différents degrés et de l'allocation aux strates.

Les possibilités d'amélioration de la méthode par de nouvelles recherches.

Si la méthode développée peut d'ores et déjà être utilisée en appliquant les schémas proposés dans le manuel de formation, elle est aussi, bien évidemment, perfectible. Les améliorations dont elle serait susceptible de faire l'objet pourraient venir de recherches dans les trois directions suivantes:

- améliorer la stratification morphologique à partir d'image satellite, en développant de nouvelles méthodes d'extraction d'information. D'après l'expérience acquise en télédétection urbaine depuis 1985, les voies les plus prometteuses semblent être: la prise en compte d'éléments rendant compte de la hauteur et de l'agencement des bâtiments à l'intérieur d'une zone, la mise au point d'indicateurs synthétiques, performants et rapides à calculer, décrivant la texture à l'intérieur d'une zone.

- intégrer dans les estimateurs l'information morphologique issue des images satellite. L'intégration dans les estimateurs démographiques de la seule information morphologique que nous sachons actuellement extraire d'une image satellite, la densité du bâti, ne présente pas d'intérêt. Mais, au fur et à mesure des développements méthodologiques en télédétection, il deviendra sans aucun doute très intéressant, en termes de précision, d'utiliser des estimateurs par le ratio, la différence ou la régression, intégrant une information morphologique plus fine.

- parvenir à une gestion plus performante de la probabilité d'inclusion des îlots dans l'échantillon. Cet objectif suppose d'une part d'extraire de l'image satellite une mesure de taille des îlots mieux corrélée aux variables démographiques que leur surface totale (par exemple: la surface construite), et d'autre part d'obtenir une liste des îlots par segmentation automatique de l'image satellite. Il est certain que ces résultats nécessiteront des recherches beaucoup plus longues que celles suggérées au premier point, ci-dessus.

ANNEXE

**MANUEL DE FORMATION AUX SONDAGES AREOLAIRES
SUR IMAGE SATELLITE POUR DES ENQUETES
SOCIO-DEMOGRAPHIQUES EN MILIEU URBAIN¹**

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

¹ Version provisoire du manuel, utilisée lors des ateliers de formation de Quito (décembre 1988) et Bogota (janvier 1989), en cours de correction pour une édition trilingue (français, espagnol, anglais) en 1989.

PLAN

TEXTE INTRODUCTIF

- A. Les travaux ayant permis le développement de la méthode
- B. Un exemple d'application de la méthode : l'enquête Migrations à Quito
- C. Eléments de bibliographie fondamentale
- D. Bibliographie sélective de l'équipe ORSTOM

FICHES DECRIVANT LA MISE EN OEUVRE DE LA METHODE

- 1 La méthode de sondage: description générale, options, coûts
- 2 Introduction à la télédétection spatiale
- 3 Acquisition d'une image satellite SPOT ou TM
- 4 Collecte d'informations sur l'occupation du sol
- 5 Eléments pour la définition du plan de sondage
- 6 Tracé de la limite urbaine
- 7 Classification de l'image satellite
- 8 Stratification de la base et mesure de superficie des strates
- 9 Calcul des taux de sondage et des tailles des grilles de tirage
- 10 Sélection des îlots de l'échantillon à l'aide de grilles
- 11 Recensement des ménages dans les îlots de l'échantillon
- 12 Mesure de la surface des îlots de l'échantillon
- 13 Sélection des ménages dans les îlots de l'échantillon
- 14 Calcul des estimations et intervalles de confiance. 1: formulaire
- 15 Calcul des estimations et intervalles de confiance. 2: mise en oeuvre informatique

A. LES TRAVAUX AYANT PERMIS LE DEVELOPPEMENT DE LA METHODE

Depuis 1985, une équipe pluridisciplinaire¹ travaille à la mise au point d'un système d'observation permanente des populations urbaines intégrant l'information apportée par les satellites SPOT et THEMATIC MAPPER sur la morphologie des villes. Au départ de cette recherche, il y a le constat des limites auxquelles se heurte l'application des méthodes classiques d'observation démographique aux villes des pays en développement à forte croissance: les recensements sont des méthodes trop lourdes et trop longues à exploiter pour répondre à la demande croissante d'information démographique; quant aux méthodes de sondage traditionnelles (sur liste), elles sont le plus souvent inapplicables du fait de l'absence d'une liste de ménages fiable et complète.

Face à ce constat, nous avons tenté de développer une méthode de collecte qui remplisse les conditions de souplesse et rapidité nécessaires à l'observation démographique des villes à croissance rapide. L'idée centrale est **d'utiliser l'image satellite comme base de sondage et d'exploiter l'information morphologique que fournissent ces images sur le milieu urbain pour optimiser un plan de sondage spatial applicable à une enquête démographique.**

La réalisation de l'objectif général du programme de recherche a impliqué des travaux dans deux directions principales: l'interprétation des images satellite en milieu urbain, et les sondages aréolaires à objectif démographique en milieu urbain. Nous avons également été amenés à travailler sur l'intégration des données de télédétection dans des bases de données géographiques.

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 l'image satellite SPOT de Quito.

La définition du plan de sondage de cette enquête, consacrée aux migrations, repose sur deux phases de la recherche:

- l'expérience menée sur la ville de Marseille: cette ville disposant dès 1985 des informations de référence nécessaires à une première phase de développement méthodologique (image satellite Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, et recensement de la population exploitable au niveau de l'îlot), nous avons pu, non seulement développer, mais encore tester la validité de méthodes de sondages spatiaux et d'interprétation d'image satellite à haute résolution;

- les recherches effectuées sur le site de Quito: l'exploitation de deux enquêtes préliminaires a permis de préciser et de compléter les résultats méthodologiques obtenus sur la ville de Marseille.

Une première collecte d'information (octobre-décembre 1986) a consisté à relever de manière précise l'occupation du sol de 199 îlots de Quito, afin d'initialiser et tester la fiabilité des traitements des images satellite; en matière de sondages, l'exploitation des données démographiques recueillies en avril 1987 sur un sous-échantillon de 55 îlots choisis parmi les 199 enquêtés sur le plan morphologique est à l'origine de résultats complémentaires à ceux obtenus sur la ville de Marseille.

B. UN EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE: L'ENQUETE MIGRATIONS A QUITO

L'enquête Migrations constituant la première application de notre méthode de sondage, elle se devait de répondre à un double objectif, méthodologique et thématique. Elle devait permettre de vérifier que la méthode mise au point possède bien les caractéristiques de rapidité, faible coût et précision que nous lui attribuions au terme de la phase d'expérience; il importait également de savoir si la technique de sondage employée demeure efficace en dehors du domaine thématique restreint des indicateurs démographiques les plus classiques (structures par sexe, âge, activité,...etc). L'enquête avait aussi pour fonction de produire une information fiable sur les deux grands thèmes abordés dans le questionnaire: caractéristiques démographiques générales de la population quiténienne et analyse des systèmes de résidence et pratiques économiques.

L'échantillon sélectionné comprend 432 îlots répartis dans l'ensemble de la ville de Quito, y compris dans ses extensions les plus récentes puisque la limite de l'agglomération retenue pour le sondage correspond

¹L'équipe ORSTOM comprend F. DUREAU (géographe-démographe, responsable du programme de recherche), O. BARBARY (statisticien), A. MICHEL (urbaniste spécialisé en télédétection), B. LORTIC (télédétection). Les travaux liés à l'infographie ont été réalisés par M. SOURIS (informaticien) et F. PELLETIER (infographie), les travaux photographiques par A. AING et I. RANNOU (photographes).

non pas à des critères administratifs mais à un critère physique (continuité de l'espace bâti) issu de l'image satellite.

Seize enquêteurs, encadrés par trois superviseurs, ont réalisé le travail de collecte des données sur le terrain entre le 23 novembre 1987 et la fin du mois de décembre 1987 ; 3157 ménages ont été enquêtés.

Cinq des enquêteurs ayant participé aux opérations de collecte ont eu la charge de la codification des données ; ils ont achevé leur tâche en trois mois de travail à temps partiel, de février à avril 1988.

La saisie sur IBM AT a été réalisée au fur et à mesure de l'avancement du travail de codification ; la saisie a donc été terminée peu après la codification, en mai 1988. L'étape de contrôle des données a débuté en mars 1988, dès la réception du premier fichier saisi, c'est-à-dire le fichier concernant les conditions d'occupation des 3157 logements de l'échantillon, maintenant complètement apuré et dont l'exploitation est en cours. Les corrections sont effectuées à l'aide du logiciel SPSS PC+, principalement le module Data Entry. La phase de production de données par extrapolation (programme écrit sous SPSS+ par O. BARBARY) a commencé en juillet 1988, et progresse au fur et à mesure de l'avancement des travaux de correction des fichiers.

Puisque nous réalisons à Quito la première application en vraie grandeur de la méthode de sondage à partir d'image satellite, nous avons tenu à utiliser tous les documents disponibles pour valider les différentes étapes du tirage de l'échantillon, et les résultats démographiques finals.

En ce qui concerne le plan de sondage, nous avons procédé aux vérifications suivantes:

- détermination de la limite urbaine sur image SPOT : comparaison avec la limite déterminée par analyse visuelle de la couverture photographique de novembre 1987 à l'échelle du 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 ;
- mesure des 432 îlots : comparaison, sur un échantillon d'îlots, avec les mesures obtenues par planimétrie sur les plans au 1/ 2 000 de l'Institut Géographique Militaire.

La mesure de la précision des différentes étapes du tirage de l'échantillon nous conduit à conclure à la **validité des techniques adoptées** : elles ont permis une mise en oeuvre correcte du plan de sondage.

Les coefficients de variation des estimateurs, dont le tableau ci-dessous donne quelques exemples, fournissent une première mesure de la précision des estimations que permet le plan de sondage adopté pour cette enquête. Enfin, les premiers résultats montrent une forte cohérence avec ceux du recensement réalisé en 1982 par l'INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

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

Indicateur démographique	Estimation (ensemble de la base)	Estimation du coefficient de variation de l'estimateur (%)
Nombre total de personnes	1 120 991	6,73
Taille moyenne du ménage	4,535	1,10
Age moyen du chef de ménage	43,96	1,02
% ménages de 7 pers. et plus	9,84	6,80
% ménages propriétaires	46,01	2,49
Sex ratio	0,959	1,50
% plus de 60 ans	5,77	5,40
% nés à Quito	63,22	1,38
% nés à l'étranger	1,94	14,69

Bien entendu, la précision de la méthode doit être comparée à celles obtenues par des méthodes de sondage plus traditionnelles.

Par rapport au sondage équiprobable sur liste, méthode la plus répandue, les comparaisons que nous avons effectuées permettent de conclure que le sondage que nous proposons possède plusieurs avantages:

- sa précision est au moins équivalente à celle du sondage aléatoire simple; elle est meilleure dès que le caractère estimé est bien corrélé à la morphologie;
- la méthode est directement applicable à d'autres bases de sondage spatiales que l'image satellite ; elle est donc beaucoup plus souvent praticable qu'un sondage sur liste;
- enfin, si le coût d'actualisation de la liste nécessaire à la mise en œuvre d'un sondage équiprobable "traditionnel" est variable et peut être prohibitif dans bien des villes, le coût lié à l'application du sondage aréolaire sur image satellite possède en revanche une borne supérieure fixe, quelle que soit la ville à laquelle on s'intéresse.

C. ELÉMENTS DE BIBLIOGRAPHIE FONDAMENTALE

1. Statistique et théorie des sondages (ouvrages généraux)

ASSELIN L.M., 1984. Techniques de sondage avec application à l'Afrique. GAETAN MORIN, Québec.

COCHRAN W.G., 1977. Sampling techniques (3^e édition). J. WILEY, New York.

GROSBRAS J.M. 1987. Méthodes statistiques des sondages, ECONOMICA, Paris

LEBART L., MORINEAU A., FENELON J.P., 1982. Traitement des données statistiques, méthodes et programmes. DUNOD, Paris.

YATES F., 1981. Sampling methods for censuses and surveys (4^e édition). GRIFFIN, Londres.

2. Collecte des données démographiques

INED, INSEE, ORSTOM, SEAE, 1973. Source et analyse des données démographiques. Application à l'Afrique d'expression française et à Madagascar. Première partie: source des données. Paris, 415 p.

NATIONS UNIES, 1971. Methodology of demographic sample surveys. New York.

TABUTIN D., 1984. La collecte des données en démographie. ORDINA EDITIONS, Liège.

3. Télédétection spatiale

American Society of Photogrammetry, 1986. Manual of remote sensing. SHERIDAN PRESS. Fall Church, 2 vol.

CNES, SPOT Image, 1986. Guide des utilisateurs de données SPOT. 2 volumes: 1: Manuel de référence, 2: Guide pratique.

D. BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE DE L'EQUIPE ORSTOM

Tous les textes cités ci-après peuvent être consultés:

- à la mission ORSTOM de Quito:

390 calle Whimper, Quito, EQUATEUR - Tel: 238 216

- à la documentation du LIA de l'ORSTOM:

70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy, FRANCE - Tel: 48 47 31 95

- à la bibliothèque du CEDID:

ORSTOM, 213 rue Lafayette, 75480 Paris Cedex 10, FRANCE- Tel: 48 03 77 77

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.

Communications à des colloques

BARBARY O., 1988. - Développement d'une méthode de sondage démographique en milieu urbain intégrant l'information satellitaire. Présentation des principaux résultats obtenus à Marseille et à Quito. Communication au Colloque sur les sondages aérolaires dans les pays andins, Quito (Equateur), 2-7 mai 1988, 7 p., (2 versions: français et espagnol)

DUREAU F., 1988. - A propos de l'analyse des systèmes résidentiels. Présentation de l'enquête Migrations réalisée à Quito (EQUATEUR) en décembre 1987. Communication pour les Journées Démographiques de l'ORSTOM, "Migration, changements sociaux et développement", 20-22 septembre 1988, Paris, 17 p. multigr.

DUREAU F. et GUILLAUME A., 1985. - La population dans l'espace. Télédétection et observation démographique des villes des pays en développement. Communication au XX^e congrès général de l'Union Internationale pour l'Etude Scientifique de la Population, Florence (Italie), 5-12 Juin 1985, 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, 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, 29 p., (2 versions: français et espagnol).

DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1988. - Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (EQUATEUR). Communication au colloque Gestion urbaine et développement, ISTED, Lyon (FRANCE), 20-22 septembre 1988, 6p.

MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987. - El uso de la teledetección para la observación de las poblaciones urbanas. Investigacion en curso en Quito (ECUADOR). Communication au II Simposio Latinoamericano sobre sensores remotos, Colombia, Bogota, 16-20 Novembre 1987, 34 p., (2 versions: français et espagnol).

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

MICHEL A., LORTIC B., BARBARY O., DUREAU F., SOURIS M., 1988. - Segmentation et classification d'une image satellite SPOT en milieu urbain. Application à la ville de Quito (Equateur). Communication au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 p.

Principaux rapports non publiés

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.

Equipe ORSTOM (UR 15 du département SDU, Unités de télédétection et d'infographie du LIA), 1988. - L'utilisation de l'imagerie SPOT pour l'observation démographique en milieu urbain. Rapport final - Avril 1988. Paris, 22 p. + 195 p. ann.

BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 641 p.

DUREAU F. et MICHEL A., 1986. - Quito : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 19 p.

DUREAU F., 1987. - Quito. Enquête démographie/migrations. Instructions aux enquêteurs. (2 versions : français et espagnol). Quito, 33 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, 49p. (2 versions: français et espagnol).

MICHEL A., 1988. - Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellite pour réaliser un sondage à objectif démographique. Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images SPOT et THEMATIC MAPPER en milieu urbain. Thèse de Doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.

1 . LA METHODE DE SONDAGE: DESCRIPTION GENERALE, OPTIONS, COUTS

La méthode de sondage développée (fiche 5) consiste en un sondage aréolaire à 2 degrés:

- au **1er degré**: les aires sélectionnées (unités primaires) sont des **îlots**. La base de sondage correspond à l'ensemble des îlots inclus dans la zone urbanisée; une bonne répartition géographique des îlots de l'échantillon est assurée par le tirage systématique à l'aide d'une grille de points. En utilisant une information sur la morphologie des quartiers pour stratifier la base de sondage, on améliore la précision des estimations.

- au **2ème degré**: les unités enquêtées (unités secondaires) sont des **ménages**. La sélection des ménages à enquêter se fait de façon systématique sur une liste des ménages de chaque îlot de l'échantillon.

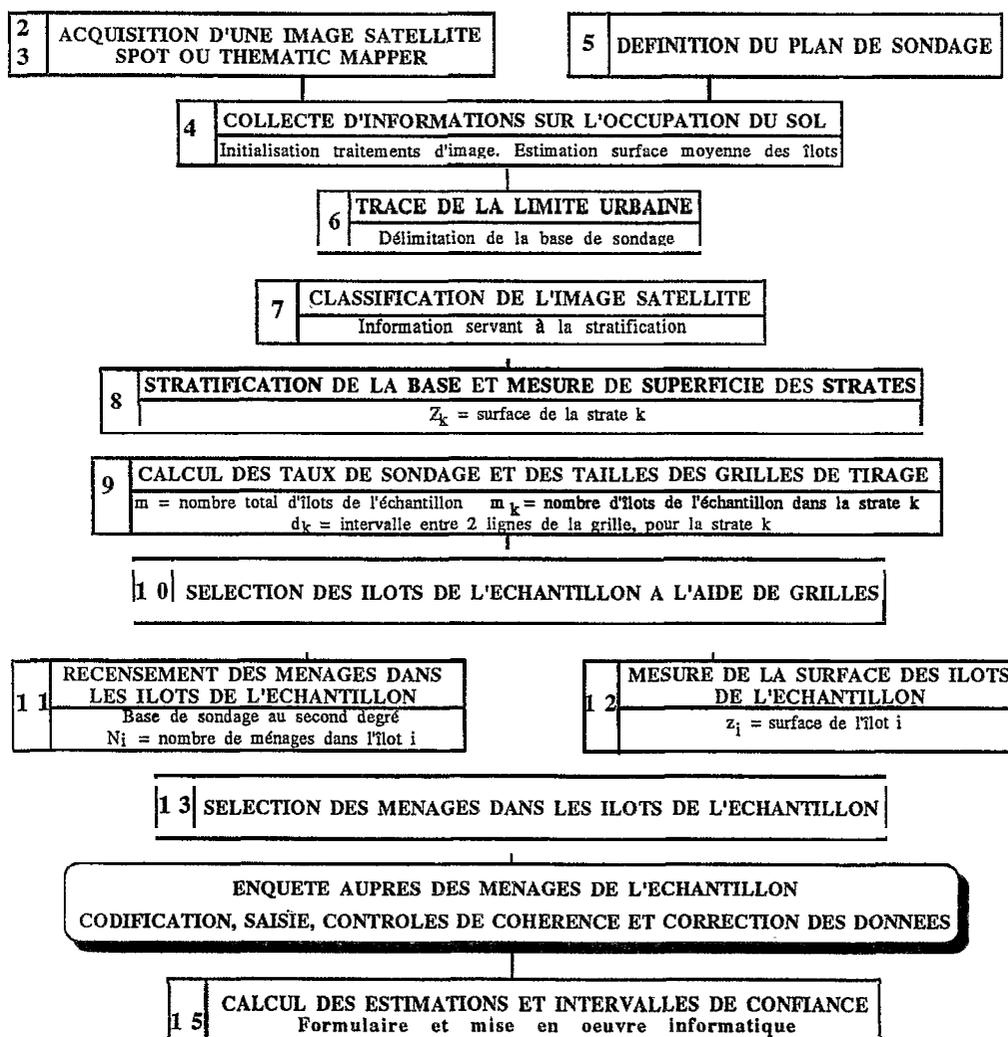
Du fait du caractère marginal de la variance intra-îlots au regard de la variance inter-îlots, il y a intérêt à pratiquer le plus fort taux possible au premier degré, en n'enquêtant qu'une faible fraction des ménages au sein de chaque îlot.

L'image satellite sert:

- à la **définition de la base de sondage**: tracé de la limite urbaine;

- 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 la densité du bâti.

L'utilisation d'images satellite permet un échantillonnage rigoureux et efficace pour réaliser une enquête démographique dans une ville qui ne disposerait d'aucune base de sondage classique: dans ce cas, les étapes à suivre sont celles indiquées dans le graphique ci-dessous. Cette démarche ne correspond qu'à une des applications possibles de la méthode (il s'agit là de son application intégrale); en effet, le degré d'utilisation des images satellite varie selon le contexte de données disponibles dans la ville à enquêter. Le tableau de la page suivante suggère les cheminements adaptés à d'autres contextes de données.



L'équipement nécessaire à la mise en oeuvre de la méthode

Coûts 1988, valables à
Quito

L'application de la méthode réclame l'équipement **minimum** suivant:

- 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. Exemple: SPSS/PC+ (module de base et Data Entry)	12 300 FF
- Logiciel TIMOR de traitement d'image satellite sur IBM AT développé par l'ORSTOM	600 FF
- Boussole, clinomètre et décimètre	2 500 FF
- Planimètre manuel	1 500 FF

Cette configuration minimale peut être améliorée en recourant à des solutions plus coûteuses, mais aussi plus performantes:

- Mesurer les superficies des strates et des îlots avec un planimètre électronique (6000 FF)
- Calculer les surfaces d'îlots à partir des mesures de terrain avec un logiciel de dessin (5 000 FF)
- Réaliser les traitements d'image satellite sur station SUN (3/110C, disque dur 140 Mo, 200 000 FF) avec le logiciel PLANETES développé par l'ORSTOM
- Réaliser l'exploitation de l'enquête démographique avec un logiciel statistique spécialisé dans l'exploitation des enquêtes par sondage.

Les coûts de mise en oeuvre de la méthode

Nous nous plaçons dans le cas de figure suivant: il n'existe ni matériel informatique, ni logiciel, ni image satellite, fond de plan ou carte thématique. L'allocation aux strates est réalisée avec un taux constant dans toutes les strates. Sont inclus tous les salaires, à l'exception de celui du personnel qualifié pour la sélection de l'échantillon, l'encadrement de la collecte, de la codification et de la saisie de l'information collectée (total = environ 6 mois).

Postes fixes de dépense (équipement minimum)	Postes de dépense variant selon la taille de l'échantillon et le questionnaire												
<table border="0"> <tr> <td>Équipement informat.</td> <td>15 000 FF</td> </tr> <tr> <td>Logiciels</td> <td>12 900 FF</td> </tr> <tr> <td>Équipement de mesure</td> <td>4 000 FF</td> </tr> <tr> <td>Achat image satellite SPOT (Bandes XS et Pa, film Pa)</td> <td>36 000 FF</td> </tr> <tr> <td>Collecte d'informations sur l'occupation du sol</td> <td>6 000 FF</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>73 900 FF</td> </tr> </table>	Équipement informat.	15 000 FF	Logiciels	12 900 FF	Équipement de mesure	4 000 FF	Achat image satellite SPOT (Bandes XS et Pa, film Pa)	36 000 FF	Collecte d'informations sur l'occupation du sol	6 000 FF	TOTAL	73 900 FF	<p>Mesure surface des îlots: 9,36 FF/îlot</p> <p>Recensement des ménages, collecte démographique sur l'échantillon de ménages, codification et saisie de l'information collectée:</p> <ul style="list-style-type: none"> - questionnaire court: 11,81 FF/ménage - questionnaire long: 16,65 FF/ménage
Équipement informat.	15 000 FF												
Logiciels	12 900 FF												
Équipement de mesure	4 000 FF												
Achat image satellite SPOT (Bandes XS et Pa, film Pa)	36 000 FF												
Collecte d'informations sur l'occupation du sol	6 000 FF												
TOTAL	73 900 FF												

Si l'on considère que l'on enquête, en moyenne, 7,5 ménages par îlot (observation faite à Quito), et m étant le nombre d'îlots sélectionnés, les fonctions de coûts sont donc:

- pour un questionnaire court: coût = $73\,900 + 9,36\,m + (7,5 \times 11,81)\,m = 73\,900 + 97,94\,m$
- pour un questionnaire long: coût = $73\,900 + 9,36\,m + (7,5 \times 16,65)\,m = 73\,900 + 134,24\,m$

La fonction de précision (intervalle de confiance à 95%) est évaluée par : $278 / \sqrt{m}$.

Ces fonctions de coûts et de précision aboutissent donc aux évaluations suivantes:

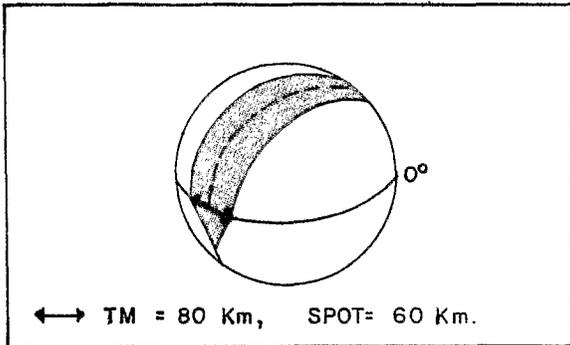
Nombre d'îlots enquêtés (m)	Nombre ménages enquêtés	Coût questionn. court (FF)	Coût questionn. long (FF)	Précision: intervalle de confiance à 95 % (en % de la pop totale)
100	750	83 694	87 324	+/- 27,8
500	3 750	122 870	141 020	+/- 12,4
1000	7 500	171 840	208 140	+/- 8,8
2000	15 000	269 780	342 380	+/-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

Les frais fixes constituent une part non négligeable du coût d'enquête. De ce fait, si l'on est obligé d'effectuer l'ensemble des dépenses d'équipement et d'achat de données, il est peu rentable d'appliquer cette méthode à des enquêtes trop légères (moins de 250 îlots environ). Pour la même raison, lorsqu'un échantillon compte moins de 1000 îlots, le passage d'un questionnaire court à un questionnaire long ne fait pas croître très sensiblement le coût global de l'enquête.

DONNEES existantes.		FPU : Fond de Plan actualisé des Unités primaires (flots) CTM : Carte Thématique Morphologique actualisée (sans identification des unités primaires c'est-à-dire les flots) MPA : Mosaïque de Photographies aériennes récentes (ou FPU + CTM) IVI : Information sur les Variances Intra-strates des caractères démographiques à estimer							
		Coût	Néant	IVI	FPU	CTM	MPA (ou FPU + CTM)	IVI + FPU	IVI + CTM
LIMITE	M i n i m u m	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan ou mosaïque photo à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan ou mosaïque photo à grande échelle (1/ 15 à 30 000) 2-3 4 5 6 7 8-15
	M a x i m u m	Collecte informations sur occupation du sol Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT d'après image satellite SPOT (XS + Pa.) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT d'après image satellite SPOT (XS + Pa.) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol. Tracé sur fond de plan d'après image satellite (XS + Pa de SPOT, ou canaux 3 et 4 TM) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT d'après image satellite SPOT classée (XS + Pa.) 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan ou mosaïque photo. d'après image satellite (XS + Pa. de SPOT, ou TM) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol Tracé sur fond de plan d'après image satellite (XS + Pa de SPOT, ou canaux 3 et 4 TM) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur tirage du canal panchromatique SPOT d'après image satellite (XS + Pa de SPOT ou canaux 3 et 4 TM) classée 2-3 4 5 6 7 8-15	Tracé sur fond de plan ou mosaïque photo. d'après image satellite (XS + Pa. de SPOT, ou canaux 3 et 4 TM) classée 2-3 4 5 6 7 8-15
STRATIFICATION	M i n i m u m	Stratification d'après connaissance de la ville. Tracé et mesure des strates sur tirage du canal panchromatique SPOT 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après connaissance de la ville. Tracé et mesure des strates sur tirage du canal panchromatique SPOT 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après connaissance de la ville. Tracé et mesure des strates sur fond de plan à grande échelle 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après carte thématique. Tracé et mesure des strates sur tirage du canal panchromatique SPOT 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après carte thématique ou interprétation photo. aériennes. Tracé et mesure des strates sur fond de plan ou sur mosaïque photo 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après connaissance de la ville. Tracé et mesure des strates sur fond de plan à grande échelle 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après connaissance de la ville. Tracé et mesure des strates sur tirage du canal panchromatique SPOT 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après carte thématique ou interprétation photo. aériennes. Tracé et mesure des strates sur fond de plan ou sur mosaïque photo 2-3 4 5 6 7 8-15
	M a x i m u m	Collecte informations sur occupation du sol Stratification d'après image satellite SPOT (XS + Pa.) classée. Mesure des strates sur l'image SPOT Pa. 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol Stratification d'après image satellite SPOT (XS + Pa.) classée. Mesure des strates sur l'image SPOT Pa. 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol Stratification d'après image satellite (XS + Pa.SPOT, ou 3,4,5TM) classée. Report et mesure des strates sur le fond de plan. 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après image satellite SPOT (XS + Pa) classée et autres informations sur la morphologie. Report et mesure des strates sur l'image SPOT Pa. 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après image (XS + Pa. SPOT, ou TM) classée et autres informations morpho. Report et mesure des strates sur le fond de plan ou la mosaïque photo 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations sur occupation du sol Stratification d'après image (XS + Pa. SPOT, ou 3, 4, 5 TM) classée. Report et mesure des strates sur le fond de plan 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après image satellite SPOT (XS + Pa) classée et autres informations sur la morphologie. Report et mesure des strates sur l'image SPOT Pa. 2-3 4 5 6 7 8-15	Stratification d'après image (XS + Pa. SPOT, ou 3,4,5 TM) classée et autres informations morpho. Report et mesure des strates sur le fond de plan ou la mosaïque photo 2-3 4 5 6 7 8-15
AUXILIAIRES	M i n i	Taux constant dans toutes les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Taux constant dans toutes les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Taux constant dans toutes les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Taux constant dans toutes les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15
	M a x i	Collecte informations démographiques. Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations démographiques. Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations démographiques. Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Collecte informations démographiques. Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15	Allocation optimale: taux variable selon les strates 2-3 4 5 6 7 8-15
Image à acquérir pour la solution préconisée		Bande SPOT (XS + Pa.) Film SPOT Pa	Bande SPOT (XS + Pa.) Film SPOT Pa	Bande SPOT (XS + Pa.) ou, à défaut, TM	SPOT (Pa.) Film	Pas d'image satellite	Bande SPOT (XS + Pa.) ou, à défaut, TM	SPOT (Pa.) Film	Pas d'image satellite

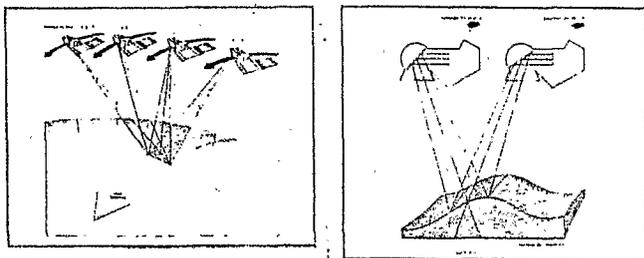
2 . INTRODUCTION À LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE

La télédétection spatiale peut se définir simplement comme l'ensemble des techniques d'observation de la terre à partir de satellites, qui utilisent les propriétés du rayonnement électromagnétique. Dans cette fiche, nous limiterons notre propos à la présentation des satellites SPOT et LANDSAT Thematic Mapper puisqu'ils sont à ce jour les plus performants dans le domaine urbain.



Tournant autour de la terre à une distance de plus de 800 Km, LANDSAT comme SPOT, sont deux satellites d'observation de la terre à défilement héliosynchrones (c'est à dire qu'une région quelconque du globe est toujours survolée à la même heure solaire locale).

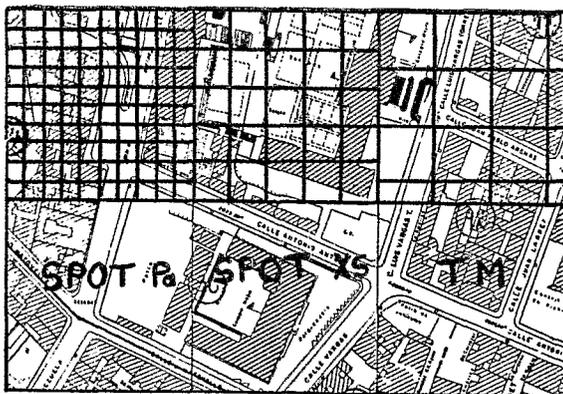
LANDSAT observe une bande de 185 Km de large et couvre l'ensemble du globe en 18 jours.
 SPOT enregistre une bande de 60 Km (en visée verticale) à 80 Km (en visée de 27°/verticale) et repasse à la verticale du même point tous les 26 jours.



Grâce aux possibilités de visée latérale de SPOT (+ ou - 27°/verticale), il est possible d'observer des zones situées dans une bande de 950 Km de large à la verticale de la trace. Deux propriétés en découlent:

- pendant une période de 26 jours, la possibilité d'observer une même zone 7 fois (à l'équateur) ou 11 fois (à une latitude de 45°),
- l'obtention de couples stéréoscopiques dont le traitement permet l'appréhension du relief.

Les capteurs embarqués sur les satellites mesurent une **grandeur physique**, appelée **luminance spectrale**, qui après avoir été codée entre 0 et 255, est transmise au sol. Les images reçues par les stations de réception sont stockées sur support magnétique sous forme d'image matricielle; elles peuvent être aisément reproduites sur film photographique. La mesure de luminance est globale au sein d'une surface au sol de taille fixe : à cette unité de surface correspond une unité élémentaire de l'image appelée **pixel**.



La résolution spatiale est définie par la taille de la surface élémentaire au sol :

SPOT :

panchromatique : 10 x 10 m soit 100 m²

multispectral : 20 x 20 m soit 400 m²

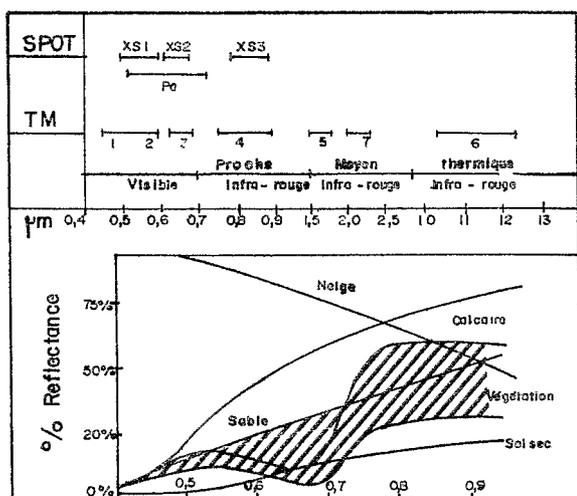
Thematic Mapper :

- infra-rouge thermique : 120 x 120m soit 1440 m²

- autres canaux 30 x 30 m soit 900 m²

La **luminance** est mesurée à l'intérieur de plusieurs bandes du spectre visible ou infra-rouge, dont les bornes varient selon le capteur. Ces bornes sont soigneusement choisies pour **minimiser l'absorption due à l'atmosphère terrestre**, et éviter la **redondance de l'information**.

La **résolution spectrale** d'un capteur est définie par le nombre et les caractéristiques des fenêtres à l'intérieur desquelles les mesures sont effectuées; pour chaque pixel, il y a donc autant de mesures que de bandes.



SPOT

Deux modes de fonctionnement
 - mode panchromatique : 1 bande
 - mode multispectral : 3 bandes

LANDSAT TM

- mode multispectral : 7 bandes.

L'interprétation d'image satellite est fondée sur l'hypothèse qu'il est possible de reconnaître un certain nombre d'éléments présents à la surface de la terre à partir essentiellement des valeurs de luminance de ces objets dans les différentes fenêtres du spectre électromagnétique : **signature spectrale**.

Pré-traitements standards

Les images reçues par les stations de réception ne sont pas directement utilisables; avant d'être diffusées, elles doivent faire l'objet de corrections géométriques et radiométriques.

Les corrections **géométriques** sont destinées à corriger les effets du mouvement secondaire du satellite dans les trois dimensions (lacet, roulis, tangage)

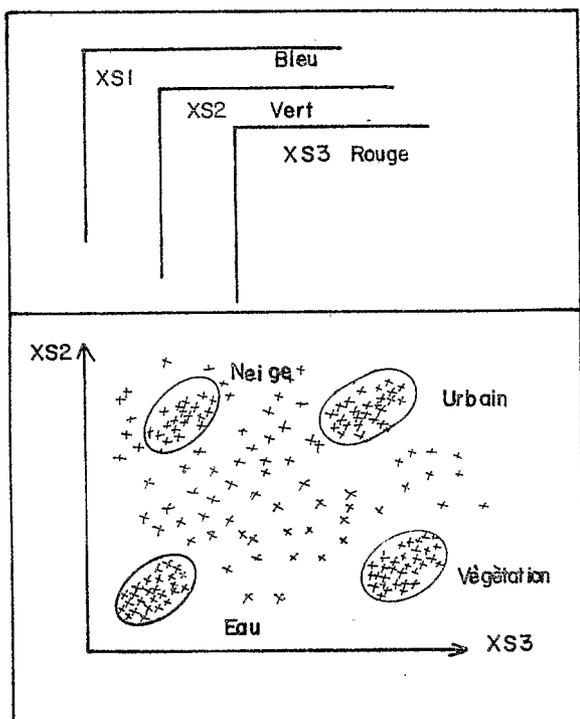
Les corrections **radiométriques** sont fondées sur le réétalonnage du radiomètre, qui permet une égalisation relative des mesures de ses détecteurs.

Les images SPOT (niveau 1B) et TM, nécessaires à l'application de la méthode décrite dans ce manuel, font systématiquement l'objet des corrections citées ci-dessus. A ce niveau de correction géométrique, les images ne sont pas superposables à une carte; ce résultat ne peut être obtenu que par un traitement particulier nécessitant une information sur le relief de la zone (carte topographique, modèle numérique de terrain).

Exploitation thématique de l'image

Pour extraire de l'information thématique à partir d'une image, deux types de traitements peuvent être mis en oeuvre:

- traitements photographiques, à partir des films. Exemples: amélioration de contraste, composition colorée;
- traitements numériques à partir des bandes magnétiques. Exemples: calcul d'indices, classifications.



Compositions colorées .

Une couleur primaire est affectée à chacun des trois canaux en respectant l'ordre du spectre visible (ex pour SPOT, XS1 : bleu, XS2 : vert, XS3 : rouge) ; puis, les trois canaux sont superposés afin d'obtenir une représentation en couleur qui allie ainsi les propriétés discriminantes de chacun d'eux. Pour SPOT, un tel traitement fait apparaître la végétation en rouge, couleur affectée au canal infra-rouge, dans lequel la végétation possède une valeur de luminance forte.

Classification automatique

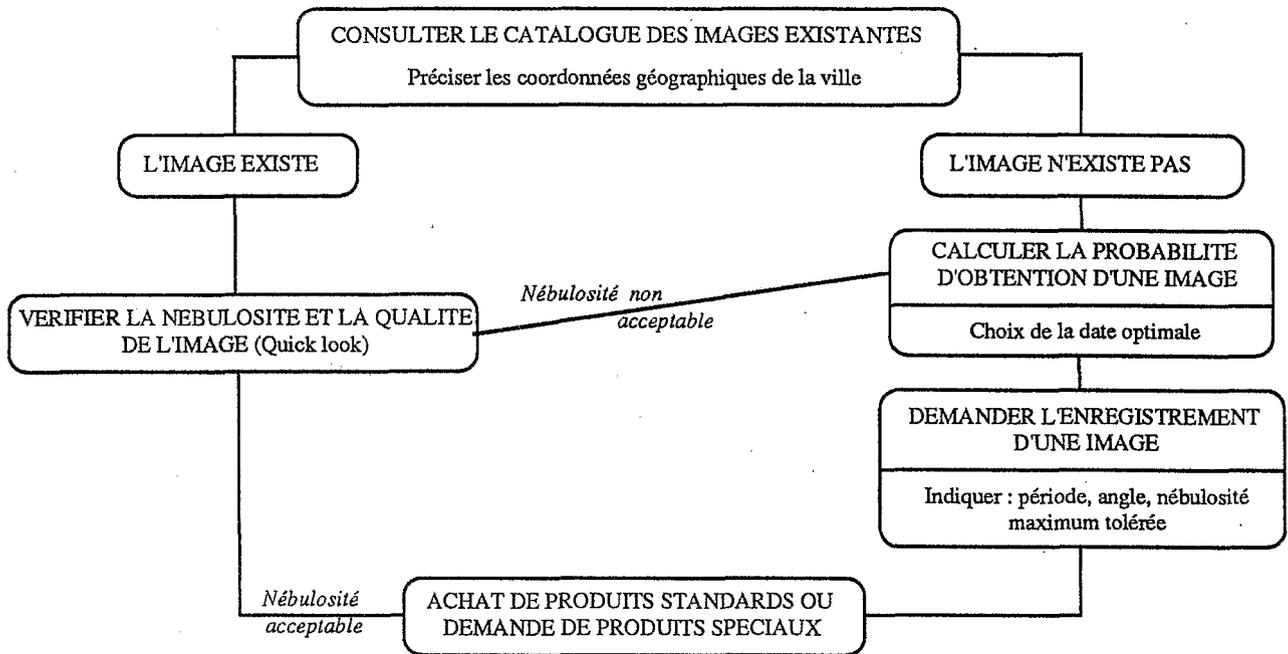
L'étude statistique des signatures spectrales permet la discrimination des grands types d'occupation du sol en faisant appel à des techniques classiques de classification.

Par exemple, l'utilisation conjointe des canaux XS2 et XS3 conduit à une première différenciation en 4 classes d'occupation du sol.

3 . ACQUISITION D'UNE IMAGE SATELLITE SPOT OU TM

Quelle est la démarche à suivre?

Les satellites SPOT et LANDSAT (TM) n'enregistrent pas de façon continue: l'enregistrement est programmé par les sociétés exploitant les satellites en fonction des commandes et de leurs propres impératifs. Il existe donc, pour SPOT comme pour TM, un catalogue des images enregistrées, avec leurs caractéristiques (date d'enregistrement, pourcentage de nuages sur l'image, qualité de l'image, angle de visée pour SPOT).



A qui s'adresser pour connaître les images existantes, ou commander une image?

Images SPOT: distributeur local, ou
SPOT IMAGE - Service clientèle
16 bis avenue Edouard Belin - BP 4359
31030 - Toulouse Cedex - FRANCE
Te: (33) 61 53 99 76
Telex: 532 079 F SPOTIM
Telefax: (33) 61 27 46 05

Images TM: distributeur local ou
EOSAT
4300 Forbes Blvd - Lanham
Maryland 20706 - USA
Te: 1800 367 2801
Telex: 277 685 LSAT UR
Telefax: 605 594 6589

SPOT ou TM?

La réponse à cette question est fonction du contexte local d'informations : la fiche 1 précise, pour quelques situations typiques, quel doit être le type d'image à acquérir. L'élément décisif est la résolution différente de TM (30 mètres) et de SPOT (10 et 20 mètres) (fiche 2).

La stratification de l'espace urbain sur un critère comme la densité du bâti est possible aussi bien à partir de TM que de SPOT (le traitement décrit fiche 7 est toutefois plus facile à réaliser avec SPOT); par contre, seule l'image SPOT permet de repérer le réseau de voirie, et donc de localiser et délimiter les îlots de l'échantillon d'enquête. S'il n'existe pas de cartographie à jour, la seule solution est donc d'utiliser une image SPOT pour sélectionner un échantillon d'îlots; s'il existe une cartographie, on a le choix entre acquérir une image SPOT ou, à défaut, une image TM, qui sert alors uniquement pour délimiter et stratifier la base de sondage.

Quelle est la probabilité d'obtention d'une image sur la ville à enquêter?

Pour statuer sur le degré de praticabilité d'un plan de sondage bâti sur image satellite dans une ville donnée, et sur la période de l'année la plus favorable pour obtenir une image, il est nécessaire de calculer la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou TM sur cette ville.

Cette probabilité dépend : de la nébulosité, du rythme de passage du satellite, de l'angle de visée souhaité (pour SPOT).
 Connaissant, pour chaque mois de l'année, le nombre de jours ayant, à l'heure de passage du satellite, une nébulosité maximum donnée, on calcule la probabilité d'obtenir une image pour un mois donné, une nébulosité maximum donnée et un angle de visée maximum fixé en appliquant la formule suivante:

$$1 - (1 - f)^P$$

f = Fréquence relative moyenne (sur la période de référence des statistiques disponibles, 10 ans par exemple) des jours du mois vérifiant la condition de nébulosité fixée.

P = Nombre moyen de passages du satellite pendant un mois

Valeurs de P à l'équateur:

TM: P= 2;

SPOT: P=1,25 pour une image verticale, P=3,58 pour un angle inférieur à 10°,

P= 8,17 pour un angle quelconque.

Exemple de calcul:

Si, en janvier, durant les dernières années, on a observé les statistiques de nébulosité suivantes, à 9h30, heure de passage du satellite TM : 9% des jours sans nuage et 48 % des jours avec une nébulosité < 50 % .

La probabilité d'obtenir une image TM sans nuage est de: $1 - (1-0,09)^2 = 1-0,91^2 = 17 \%$

La probabilité d'obtenir une image TM avec une nébulosité < 50 % est de: $1 - (1-0,048)^2 = 1-0,952^2 = 73 \%$

Quel est le prix des images?

Type de produit	SPOT (niveau 1B)	THEMATIC MAPPER
FILM NEGATIF		
Scène entière	11 000 FF panchro 1/400.000 8 000 FF 3 can. XS 1/400.000	976 FF par canal 1/1.000.000
1/4 scène (au choix)	14 000 FF panchro 1/200.000 11 000 FF 3 can. XS 1/200.000	Pas de film pour 1/4 de scène
BANDE MAGNETIQUE		
Scène entière	14 000 FF panchro 11 000 FF 3 canaux XS	20 130 FF 7 canaux
1/4 scène (au choix)	Pas de bande 1/4 de scène	10 065 FF 7 canaux
Demande programmation	3 000 FF (en sus prix scène)	9 760 FF (en sus prix scène)
Contrainte nébulosité	Pas de maximum a priori	1 678 FF (en sus prix scène)
Redécoupage le long de la trace	3 000 FF (en sus prix scène)	Pas de possibilité de redécoupage

4 . COLLECTE D'INFORMATIONS SUR L'OCCUPATION DU SOL

La collecte d'informations sur l'occupation du sol dans un certain nombre d'îlots de la ville est indispensable pour interpréter l'image satellite devant servir de base de sondage à l'enquête démographique. La réalisation de cette opération est décrite dans le tableau suivant:

Date de la collecte sur le terrain	Concomitance maximale avec la date d'enregistrement de l'image satellite
Nombre d'îlots	Environ 100 îlots pour une ville d'une superficie de 15 à 20 000 hectares.
Sélection des îlots	Tirage systématique par grille superposée à l'image satellite, ou à un plan de la ville (si ancien, ajouter des îlots localisés dans les extensions récentes non cartographiées) Introduction éventuelle d'une stratification basée sur des informations exogènes à l'image.
Données à collecter terrain	Doivent correspondre aux critères de stratification sur le à extraire de l'image satellite. Par exemple, pour une stratification sur la densité du bâti, on doit recueillir pour chaque îlot: - la surface occupée par les bâtiments - la surface totale de l'îlot.

Au dos de cette fiche 4, figure un exemple de fiche d'enquête à utiliser pour des relevés terrain relatifs à la densité du bâti ainsi qu'à la nature et à la couleur des toits. Le principe de remplissage de la fiche est le suivant.

L'enquêteur recherche un point surplombant l'îlot (terrasse d'immeuble, relief) afin d'en avoir une vision d'ensemble; il dresse un schéma des bâtiments de l'îlot et les numérote. Il remplit, éventuellement, les questions relatives aux toits des bâtiments.

L'enquêteur se rend ensuite sur l'îlot lui-même et procède à la mesure des bâtiments et de l'îlot. La précision d'une mesure en nombre de pas est suffisante, à condition de connaître la taille moyenne du pas de l'enquêteur (on répètera les mesures au pas et au décimètre durant les deux premiers jours d'enquête).

La densité du bâti dans l'îlot est calculée au bureau: somme des surfaces des bâtiments/ surface de l'îlot (l'élévation des bâtiments n'est pas prise en compte: c'est-à-dire que l'on ne cumule pas les surfaces correspondant aux différents étages d'un même bâtiment). De même, sont calculés les indicateurs sur les toits: nature ou couleur dominante...etc.

Durée de la collecte sur le terrain (densité du bâti+nature et couleur des toits) : 4 îlots/ enquêteur/ jour
--

Numéro d'îlot : 48

DESCRIPTION DES BATIMENTS

Date : 1/10/88 Heure : 15 h

Numéro du bâtiment correspondant au repère porté sur le plan

1

2

DIMENSIONS

Bâtiment Terminé
En construction

Dimensions au sol: Côté a
Côté b

15 m

12 m

5 m

6 m

(Indiquer ces côtés sur le plan)

TOIT

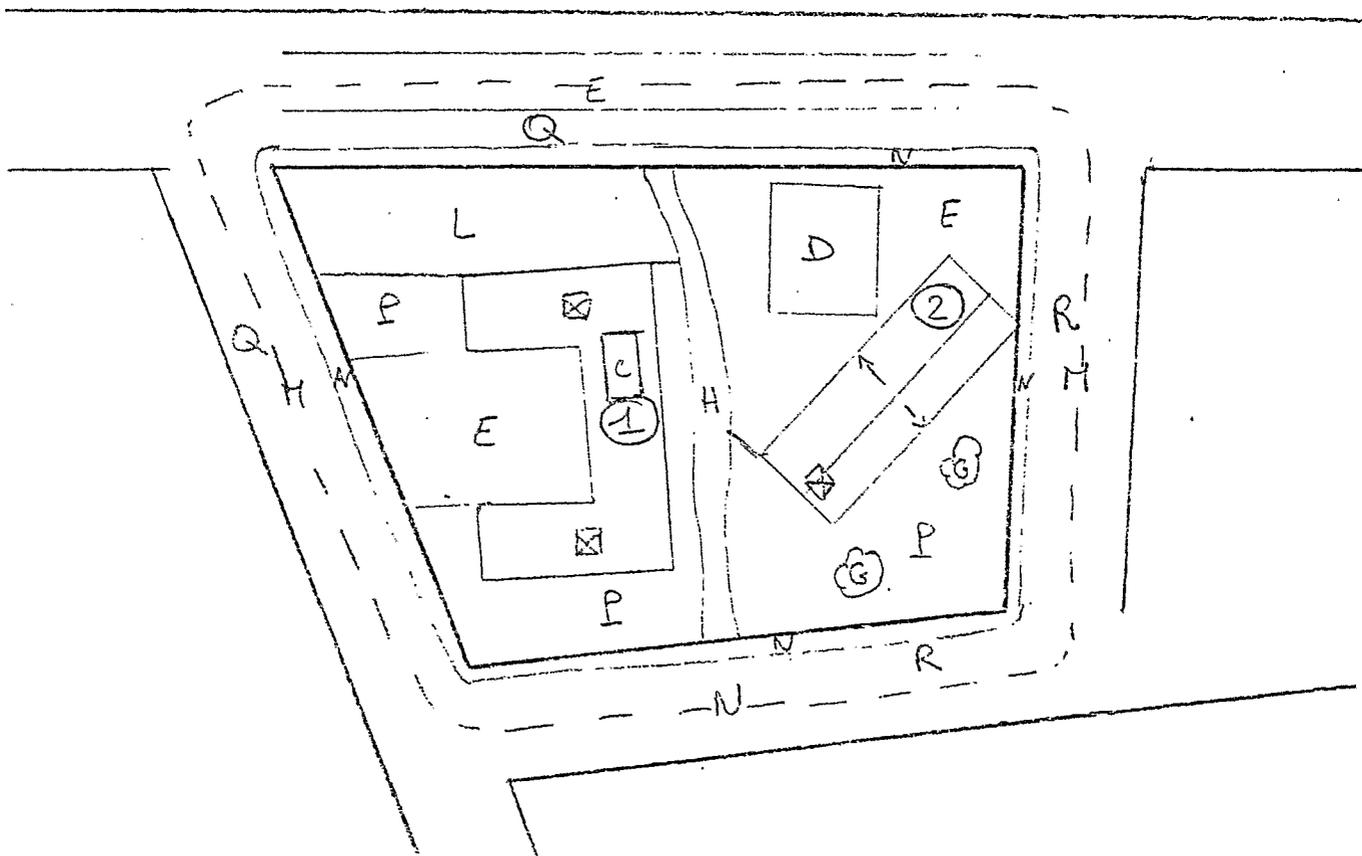
Couleur prédominante du toit

(Blanc, Marron foncé, Marron clair, Gris, Brique, Noir, Rouge, ou Vert)

Rouge

Gris

SCHEMA DES BATIMENTS DE L'ÎLOT



5. ELEMENTS POUR LA DEFINITION DU PLAN DE SONDAGE

Dans la fiche 1, la méthode de sondage est décrite dans ses grandes lignes. Ce sondage est, comme nous l'avons dit, l'aboutissement de la recherche menée à l'ORSTOM et a été testé lors de la première application de la méthode à Quito. C'est lui qui sert de base à ce manuel mais sa définition n'est pas pour autant totalement figée; l'utilisateur de la méthode peut être amené à y apporter certaines modifications, en prenant en compte les spécificités du site et les informations qu'il possède. Comme toujours s'agissant de sondage, la réflexion doit rechercher un bon compromis entre les contraintes liées au site, aux données existantes et au budget disponible d'une part et l'amélioration de la précision des estimations d'autre part. Pour faciliter cette recherche, cette fiche examine les deux étapes de la définition du plan de sondage pour lesquelles des adaptations sont possibles sans qu'il soit nécessaire d'effectuer d'autres recherches méthodologiques.

1. Définition de la base et de la structure du sondage

Ces définitions résultent principalement de l'utilisation d'une base de sondage spatiale (image satellite SPOT, photo aériennes ou plan) et de la définition de l'objet de l'enquête. Lorsque l'on s'intéresse aux caractéristiques d'unités statistiques du type "logement", "ménage", "individu", etc..., il n'existe le plus souvent pas de liste complète et à jour pouvant servir de base à la sélection directe d'un échantillon d'unités statistiques. En revanche, divers documents sur lesquels on peut identifier sans ambiguïté les pâtés de maisons de la ville peuvent constituer des bases de sondage pour le tirage d'un échantillon d'unités spatiales (îlots): image satellite, mosaïque aérienne récente ou plan détaillé actualisé du site urbain. La situation que nous venons de décrire débouche donc nécessairement sur un plan de sondage comprenant au moins deux degrés, c'est-à-dire que la sélection de l'échantillon s'effectuera en deux temps : sélection des îlots, puis sélection des ménages dans les îlots.

La définition des unités secondaires (logements, ménages, individus, etc...) dépend bien sûr de l'objet fixé à l'enquête.

On peut avoir intérêt, pour des raisons pratiques ou pour améliorer la précision des estimations, à introduire des degrés intermédiaires dans le plan de sondage (par exemple, sélectionner dans chaque îlot un échantillon d'immeubles, puis un échantillon de ménages ou d'individus dans chaque immeuble sélectionné).

Enfin, pour définir complètement la structure du sondage, il reste à fixer les taux aux différents degrés, c'est-à-dire, dans le cas simple à deux degrés, le nombre d'unités statistiques à enquêter dans chaque îlot (fiche 9). C'est là un des principaux paramètres sur lequel on peut agir pour améliorer la précision d'un sondage à deux degrés, le nombre total d'unités statistiques enquêtées étant fixé. En effet, dans ce cas, l'erreur d'échantillonnage comprend deux termes, l'un est fonction de la variabilité du caractère à estimer entre les unités primaires (c'est à dire entre îlots distincts) et l'autre est fonction de la variabilité de ce même caractère au sein des unités primaires (c'est à dire entre les ménages appartenant à un même îlot).

L'un des résultats fondamentaux des recherches menées pour développer la méthode est que le premier terme de l'erreur (variance intra-unités primaires) détermine presque entièrement l'erreur d'échantillonnage. C'est donc ce terme qu'il faut minimiser: pour cela, on cherchera à enquêter un maximum d'unités primaires (îlots) en réduisant en conséquence le nombre d'unités statistiques échantillon (ménages) enquêtées dans chacune d'elles.

2. Stratification

Nous reviendrons (fiche 8) sur l'exposé du principe de la stratification et des modalités de sa réalisation en utilisant les différentes sources d'information disponibles. Il faut seulement souligner que le gain de précision permis par cette opération dépend de deux facteurs:

- d'une part du niveau d'homogénéité que présentent les îlots appartenant à une même strate relativement aux variables à estimer;
- d'autre part, pour une stratification donnée, de la répartition de l'échantillon entre les strates (ce qu'on appelle l'allocation aux strates).

Concernant la **définition proprement dite des strates**, les variables à estimer étant inconnues a priori, la règle générale est d'utiliser conjointement **toutes les sources d'information disponibles** concernant des variables que l'on suppose bien corrélées au thème de l'enquête, afin d'aboutir aux strates les plus homogènes possible (fiche 8).

Une fois définie la stratification, deux types d'allocation aux strates sont possibles :

- **l'allocation proportionnelle** consiste à répartir l'échantillon en adoptant le même taux dans toutes les strates de la base de sondage. Cette solution, dont la mise en œuvre est très simple (fiche 9), sera retenue en l'absence d'informations numériques sur les variances des caractères à estimer au sein des strates. Elle permet un gain de précision appréciable si les critères de stratification sont pertinents, et même si ce n'est pas le cas, cette solution ne risque pas de donner un moins bon résultat qu'un sondage non stratifié.

- **les allocations "optimisées"** reposent sur le principe qu'il faut augmenter le taux de sondage dans les strates "hétérogènes". Etant donné le plan de sondage pratiqué, la probabilité d'inclusion des unités primaires est proportionnelle à leur surface. C'est donc la quantité S_{ky} suivante qui mesure l'hétérogénéité de la strate k relativement au caractère y à

$$S_{ky} = \left(Z_k \sum_{i=1}^{M_k} \left(\frac{y_i}{z_i} \right)^2 - Y_k^2 \right)^{1/2}$$

Où h est le nombre de strates dans l'univers et M_k le nombre d'unités primaires (îlots) total dans la strate k . Alors, si m est le nombre d'unités primaires à sélectionner dans l'échantillon complet (toutes strates confondues), le nombre d'unités primaires optimal dans la strate k (m_k) est donné par la formule suivante :

$$m_k = m \cdot \frac{S_{ky}}{\sum_{k=1}^h S_{ky}}$$

La définition, à partir de cette formule, d'une allocation "optimisée" pose donc deux problèmes :

1. comment disposer, pour chaque strate, d'une information numérique concernant S_{ky} ?
2. l'allocation optimale fournie par la formule étant valable pour un caractère y donné, comment concilier plusieurs allocations différentes (chacune optimale pour une variable importante du questionnaire) pour définir une allocation "optimisée" qui améliorera la précision d'un ensemble d'estimations ?

Les réponses à ces questions dépendent bien entendu du **contexte de données** disponibles dans lequel on se trouve, et suivant ce contexte on pourra juger opportun ou non de tenter d'optimiser l'allocation (**une allocation mal optimisée pouvant donner de moins bons résultats que l'allocation proportionnelle**).

Deux observations peuvent aider l'utilisateur à prendre cette décision :

- L'information concernant les S_{ky} au sein des différentes strates peut provenir de sources existantes (recensement ou enquêtes récents concernant les mêmes thèmes) ou d'une opération préliminaire légère de collecte démographique. Il faut prendre garde que pour estimer avec une fiabilité minimum la variance intra-strate de certains caractères démographiques liés à des événements rares (comme des taux de mortalité ou fécondité), l'échantillon correspondant à l'enquête préliminaire devra être assez important.

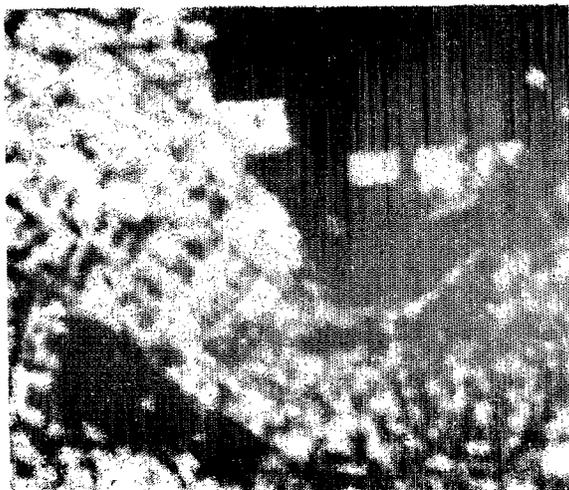
- L'allocation ne peut être optimale à la fois pour toutes les variables du questionnaire, cependant, on constatera très souvent, à cause des corrélations existant entre variables ayant trait à un même thème, qu'une tendance commune se dégage lorsque l'on compare les allocations optimales propres à une série de variables distinctes. La définition d'une allocation "optimisée" est alors possible.

6 . TRACE DE LA LIMITE URBAINE

Cette étape est particulièrement importante, puisqu'elle détermine les limites de la base de sondage.

Rappelons que l'on ne peut extraire d'une image satellite ou d'une photographie aérienne qu'une limite traduisant un **phénomène physique**. Une limite de type administratif ne peut en aucun cas être détectée sur ce type de document. Il convient impérativement de préciser clairement le concept d'agglomération urbaine retenu pour délimiter la base de sondage. Une solution praticable, décrite dans cette fiche, est de définir la ville comme une **zone continue d'espace bâti**.

Quelle que soit la définition retenue et le document servant de support au tracé (plan, mosaïque de photographies aériennes, tirage du canal panchromatique SPOT), quelques règles minimales doivent être suivies :



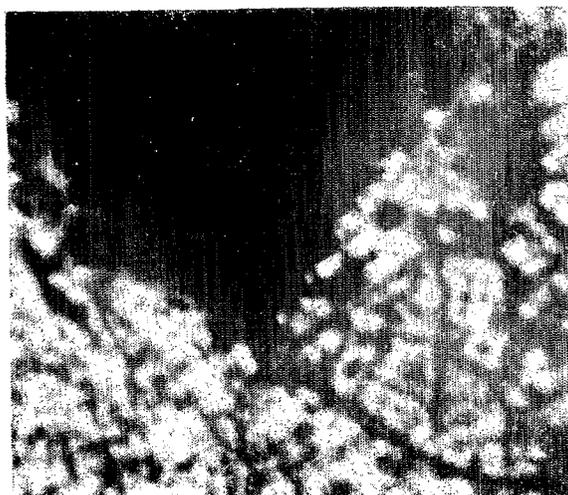
S'efforcer d'emprunter une **limite naturelle** (rivière, ravin, ...) ou artificielle (voirie,...) **repérable** sans ambiguïté à la fois sur l'image satellite et sur le terrain.

Exclure de la base les zones non bâties occupant une surface importante à l'**intérieur** de la ville. Ces exclusions permettront une meilleure précision des estimations.

Il faut **contrôler sur le terrain** la limite urbaine extraite de l'image, surtout s'il existe un décalage de temps important entre la date d'enregistrement de l'image et l'enquête démographique.

Si on dispose seulement d'un film du canal panchromatique SPOT.

Globalement, la végétation apparaît sur le tirage photographique d'autant plus foncée que l'activité chlorophyllienne est importante. L'espace urbain (minéral) apparaît en plus clair, à l'exception des centres villes très denses recouverts de toitures très foncées (type tuile canal) ou des espaces bitumés. De plus, la prise en compte de critères autres que les seules teintes de gris, comme l'agencement général, la structure ou la texture apportent une information intéressante.



Deux photo-interprètes tracent de façon indépendante les limites de la ville sur un tirage de ce canal (échelle 1/15 000 à 1/30 000).

Les limites obtenues sont ensuite confrontées afin de retenir une délimitation unique; les endroits où les tracés divergent fortement devant faire l'objet d'un soin tout particulier.

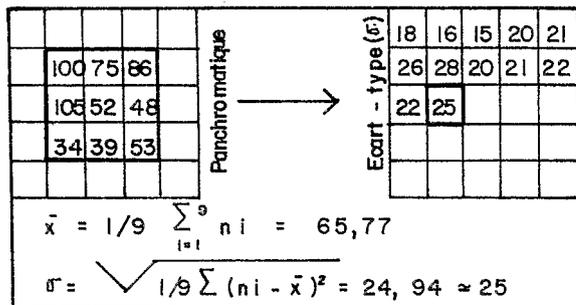
Si on dispose d'une bande magnétique SPOT XS et Pa, ou d'une bande TM.

Les traitements numériques à effectuer sont simples mais en revanche, ils ne constituent qu'une aide à la détermination de la limite urbaine, qui sera établie sur un tirage du canal panchromatique ou un plan (échelle 1/15 000 à 1/30 000). L'hypothèse de base est que la zone urbaine correspond à un espace à dominante minérale et fortement hétérogène (compte tenu de la résolution spatiale du panchromatique).

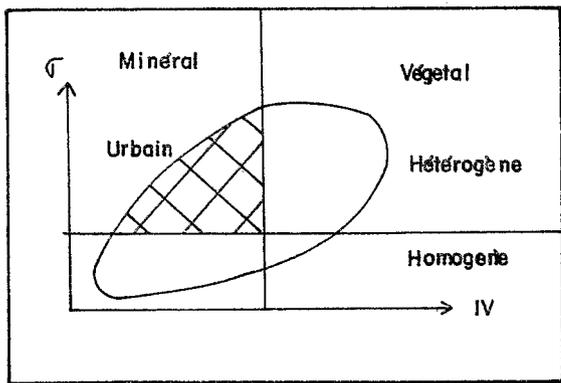
$$\text{SPOT : } (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2)$$

$$\text{TM : } (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$$

Calcul de l'indice de végétation



Calcul de l'écart-type local sur le canal panchromatique de SPOT ou sur le canal 4 de TM.



Recherche des seuils pertinents de l'indice de végétation et de l'écart-type local sur des zones test bien connues.

Réalisation d'un histogramme bidimensionnel sur des fenêtres échantillon; 4 classes sont alors définies suivant le croisement minéral/végétal homogène/hétérogène. Vérification sur l'histogramme de la pertinence des seuils.



Classification de l'ensemble de l'image par segmentation selon les seuils retenus.

Tracé de la limite sur le tirage du canal panchromatique ou le plan, en utilisant la classification, et en suivant les règles citées au début de cette fiche.

Durée du tracé de la limite urbaine : environ 2 jours pour une ville de 15 à 20 000 Hectares

7 . CLASSIFICATION DE L'IMAGE SATELLITE

La classification supervisée de l'image satellite va servir de fondement pour stratifier la base de sondage. La méthode de classification choisie, selon la densité de l'espace bâti, est d'ores et déjà opérationnelle ; aisément modélisable à partir des images satellite, la densité du bâti est d'autre part fortement liée aux informations de type démographique ou socio-économique que l'on désire collecter.

Il est nécessaire de posséder une information précise sur la densité du bâti, dans un certain nombre de zones test pour **initialiser** la classification. Cette connaissance *a priori* provient d'une collecte d'informations sur un échantillon d'îlots (fiche 4).

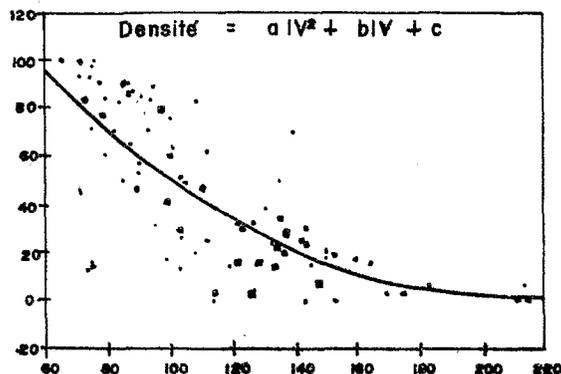
Pour réaliser une classification selon la densité du bâti à partir d'une bande magnétique SPOT XS et Pa ou d'une bande magnétique Thematic Mapper, il faut effectuer les opérations suivantes :



Localisation des îlots appartenant à l'échantillon sur l'image du canal panchromatique SPOT ou d'un canal 4 TM. Si l'on utilise une image TM, cette opération est délicate à réaliser.

Îlot	SPOT I. V.	TM3	TM4	TM5
1	154,1	22,1	30,2	36,2
2	167,9	18,7	34,2	40,3
3	133,8	25,4	30,39	37,38
4	123,5	26,7	29,5	38,3

Calcul de la moyenne radiométrique de l'indice de végétation (SPOT) ou de chacun des canaux 3, 4 et 5 (TM) à l'intérieur de chacun des îlots appartenant à l'échantillon enquêté.

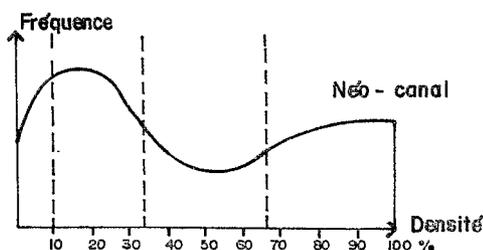
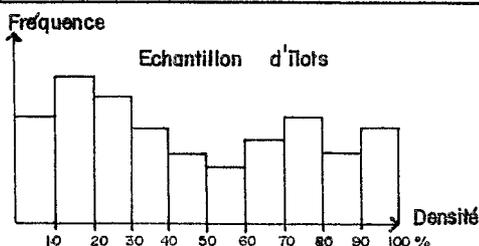


Modélisation de la relation densité du bâti/ image satellite : recherche des coefficients de la meilleure régression polynomiale simple (SPOT) ou multiple (TM) entre la densité du bâti calculée sur le terrain et la(les) moyenne(s) radiométrique(s). Dans un cas comme dans l'autre, le coefficient de corrélation prévisible se situe aux alentours de 0,75.

0	18	22	20	34	74	90	100	100	100
15	20	25	42	53	61	70	85	95	98
7	25	27	38	48	51	55	66	80	100
8	26	31	40	60	58	65	74	87	55
10	10	30	18	30	49	59	75	80	80

Image du néo - canal

Création du néo-canal "densité du bâti" à partir des coefficients de la régression sur l'ensemble de la base. L'image ainsi obtenue possède des valeurs variant entre 0 et 100 et constitue une approximation en pourcentage de la densité du bâti par pixel¹.



Seuillage de l'histogramme des fréquences du néo-canal "densité du bâti" en fonction de trois éléments :

- sa forme (nombre de pics et de creux);
- l'histogramme des fréquences de la densité du bâti calculée d'après l'information recueillie au sol sur un échantillon d'îlots;
- l'information exogène liant densités du bâti et types de bâti.

Le nombre N de classes dépend de la forme de l'histogramme (nombre de pics et de creux); pratiquement, il peut varier entre 3 et 5 classes.



Segmentation de ce néo-canal en fonction de ces seuils.

On obtient alors une classification de l'espace urbanisé en N classes de densité du bâti.

Il est évidemment possible de stratifier l'espace urbanisé en fonction d'autres critères éventuellement plus liés avec les données socio-démographiques que l'on désire collecter. Dans ce cas, il est impératif de recueillir l'information adéquate lors de l'enquête (fiche 4) puis de modéliser la relation entre ce critère et la (ou les) variable(s) radiométrique(s) correspondante(s).

Durée de la classification de l'image: environ 8 jours pour une ville de 15 à 20 000 Hectares

¹ Si l'on dispose d'un logiciel de traitement d'image satellite complet, on peut envisager les étapes suivantes : extraction de la voirie sur image panchromatique à partir d'opérateurs de morphologie mathématique, segmentation et labellisation des zones obtenues à partir de la voirie, classification des zones. Pratiquement, la seule différence notable réside dans l'individu à classer, soit le pixel, soit une zone se rapprochant du pâté de maisons.

8 . STRATIFICATION DE LA BASE ET MESURE DE SUPERFICIE DES STRATES

Qu'est-ce qu'un sondage stratifié, et quel intérêt a-t-on à stratifier ?

Un sondage stratifié est un sondage où les opérations de sélection de l'échantillon et d'inférence à partir de cet échantillon se font **séparément et indépendamment dans plusieurs sous-populations** distinguées à l'avance dans l'univers.

La stratification peut satisfaire deux types d'objectifs:

- d'une part, puisqu'elle permet de contrôler la taille de l'échantillon dans chaque strate, elle est souvent utilisée pour produire des **estimations séparées dans des sous-populations** particulières;
- d'autre part, si les sous-populations définies présentent des particularités importantes par rapport à l'enquête, et sont chacune relativement homogènes, le fait de stratifier le sondage permettra une **réduction importante de l'erreur d'échantillonnage** pour une même taille de l'échantillon.

Quelles sources de données utiliser pour réaliser une stratification?

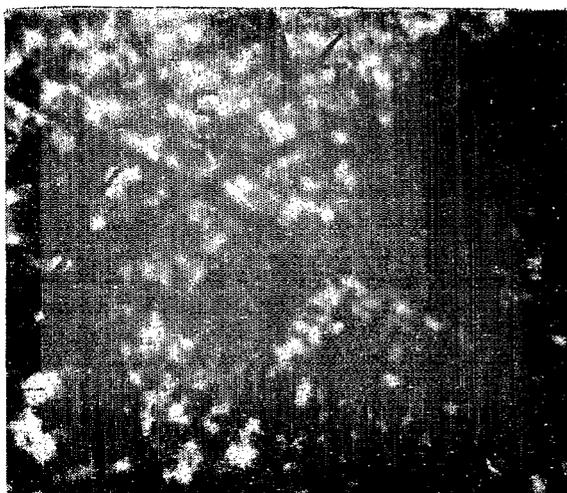
La stratification de la base de sondage peut venir:

- de l'interprétation d'une classification de l'image satellite: par exemple, la classification selon le niveau de densité du bâti, et/ou
- d'un zonage de la ville fondé sur des informations exogènes: par exemple, une typologie du bâti issue d'une photo-interprétation ou d'une enquête sur le terrain.

Quelles sont les règles de base à respecter pour réaliser une stratification à partir d'une image satellite classée?

L'élaboration de la stratification consiste à établir un zonage, c'est à dire délimiter des zones le plus homogènes possibles au regard du critère de stratification. Selon le document dont on dispose, le zonage est tracé sur un plan, ou sur un tirage à grande échelle du canal panchromatique SPOT.

Quelques règles importantes doivent être suivies:



Les limites des zones doivent emprunter des frontières naturelles (rivières, par exemple) ou artificielles (rues) de façon à ne pas couper les pâtés de maisons, qui constitueront l'unité de base de l'échantillon.

Les plages homogènes ne doivent être détournées que si elles contiennent un nombre entier d'îlots.

Deux interprètes réalisent, indépendamment, le zonage; les résultats sont ensuite confrontés pour établir une synthèse, qui servira de stratification. Ce procédé permet de réduire la subjectivité du zonage.

Il est utile de confronter, et éventuellement modifier, la stratification ainsi obtenue avec d'autres informations (résultats d'études spécifiques, connaissance personnelle) pouvant permettre de l'améliorer.

Pourquoi mesurer la superficie des strates?

Le calcul des estimateurs à partir des informations collectées par enquête sur échantillon fait appel à la superficie des strates dans la base de sondage (fiches 14 et 15).

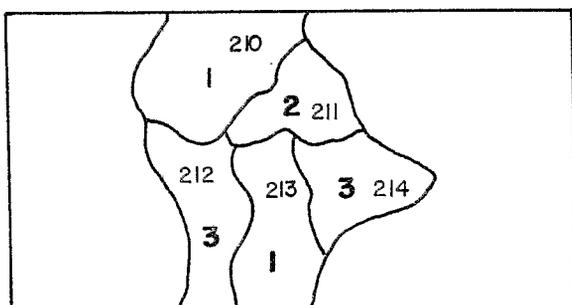
Comment réaliser la mesure de superficie?

Trois techniques de mesure peuvent être pratiquées:

- mesure au planimètre (manuel ou électronique);
- mesure avec un polyester millimétré;
- découpage de chaque zone et pesée sur une balance précise.

La mesure au planimètre semble être à la fois la plus rapide et la plus fiable.

Quelle que soit la technique de mesure, la démarche à suivre est la suivante:



Numéroter les zones sur le document où a été dessiné le zonage.

Zones	Strate 1	Strate 2	Strate 3
210	250 mm ²		
211		125 mm ²	
212			175 mm ²
213		200 mm ²	
214			150 mm ²

Mesurer la superficie de chaque zone.

Zones	Strate 1	Strate 2	Strate 3
360		550 mm ²	
361	280 mm ²		
Total	1.250.040 mm²	2.784.610 mm²	4.575.640 mm²

Sommer les superficies des zones appartenant à une même strate, pour obtenir la superficie de chacune des k strates de la base.

Strate 1	Strate 2	Strate 3	
1.250.040 mm ²	2.784.616 mm ²	4.575.640 mm ²	
TOTAL des strates			8.610.290 mm²

Sommer les superficies des strates (Z_k), pour obtenir la superficie totale de la base de sondage (Z).

La superficie des strates doit être cohérente avec celle des îlots appartenant à l'échantillon. Dans le cas où les îlots sont mesurés sur le terrain, il ne faut donc pas oublier de convertir les mesures de strates sur plan, en mesures de superficie sur le terrain, en utilisant l'échelle du document sur lequel ont été mesurées les strates.

Exemple: strate de 1600 mm² mesurés sur un document au 1/30 000

Surface de la strate sur le terrain = $1600 \times (30\ 000)^2 \text{ mm}^2 = 1\ 440\ 000\ 000\ 000 \text{ mm}^2 = 1\ 440\ 000 \text{ m}^2$, ou 144 Hectares.

9 . CALCUL DES TAUX DE SONDAGE ET DES TAILLES DES GRILLES DE TIRAGE

1. Calcul du nombre total de ménages à enquêter

Le budget global disponible (B) et le coût unitaire d'enquête par ménage (c) conduisent au nombre total de ménages que l'on peut inclure dans l'échantillon (n) : $n = B/c$.

2. Calcul du nombre total d'îlots à sélectionner

La **détermination du nombre de ménages à enquêter dans chaque îlot** est le résultat 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.

Le premier objectif est généralement largement prioritaire, ce qui conduit à adopter 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 des îlots contenant moins de n_1 ménages.

Etant fixés n et n_1 , pour calculer le nombre total d'îlots de l'échantillon (m), il faut connaître la proportion (p) de ménages de l'échantillon qui contiendront moins de (n_1) ménages et le nombre moyen de ménages (n_2) que l'on devra enquêter dans ces îlots; la formule donnant m est alors :

$$m = \frac{n}{pn_2 + (1-p)n_1}$$

Les quantités p et n_2 sont bien entendu inconnues *a priori*, il faut par conséquent les estimer soit à partir d'informations exogènes disponibles (recensement ou enquête antérieure par exemple), soit à partir d'une collecte démographique préliminaire (fiche 5).

En l'absence de toute information supplémentaire on appliquera la formule $m = n/n_1$ qui fournit un nombre n d'îlots légèrement insuffisant, tant que n_1 reste petit, pour enquêter le nombre m de ménages fixé par le budget.

3. Calcul des taux de sondage

Pour gérer correctement le taux de sondage au premier degré dans chaque strate (il y a h strates), il faut disposer d'une estimation du nombre d'îlots existant dans chaque strate (M_k , k variant de 1 à h). On l'obtient en divisant la surface totale de chaque strate (Z_k , connue d'après les mesures de surface faites sur l'image (fiche 8)) par la surface moyenne des îlots de cette strate \bar{z}_k , dont on a une estimation d'après la collecte d'information sur l'occupation du sol (fiche 4) ou d'après les mesures planimétrées sur une base cartographique éventuellement disponible (dans ce cas, on pourra procéder par comptage des îlots pour estimer directement M_k) :

$$M_k = \frac{Z_k}{\bar{z}_k} . \text{ On calculera donc ces } M_k \text{ pour chaque strate.}$$

Le taux global au premier degré (t) pour l'ensemble de la base de sondage est alors :

$$t = \frac{m}{h \sum_{k=1} M_k}$$

La répartition de l'échantillon entre les strates dépend bien sur du type d'allocation retenu :

- si l'allocation est **proportionnelle** (taux constant dans toutes les strates), l'application du taux global (t) aux tailles estimées de chaque strate (M_k) donne le nombre d'îlots à enquêter dans chaque strate (m_k);

- si l'étude des possibilités d'**optimisation de l'allocation** aux strates a pu être menée à bien, on a déterminé, en fonction des valeurs estimées des M_k et de l'information disponible sur les écarts type des caractères à estimer au sein des strates (S_{ky}), les nombres m_k d'îlots à sélectionner dans chaque strate (fiche 5).

4. Calcul des tailles des mailles dans chaque strate

Pour obtenir dans chaque strate la surface de la maille de la grille de tirage, il suffit de diviser la surface de la strate (Z_k , exprimée en mm^2 mesurée sur image ou plan) par le nombre d'îlots à sélectionner (m_k); la longueur du côté de la maille (d_k) s'obtient en prenant la racine carrée de la surface de la maille.

5. Exemple d'application

Pour une enquête donnée, le budget alloué permet d'enquêter environ 4 000 ménages et on choisit d'enquêter dix ménages dans chaque îlot sélectionné contenant au moins dix ménages et tous les ménages des autres îlots. La proportion d'îlots de moins de dix ménages attendue dans l'échantillon est de 22,7 % et ces îlots contiendront en moyenne à peu près 6,9 ménages (estimations faites d'après les sources d'information disponibles).

On a donc :

$$m = \frac{4000}{0.227 \times 6,9 + 0.773 \times 10} = 430$$

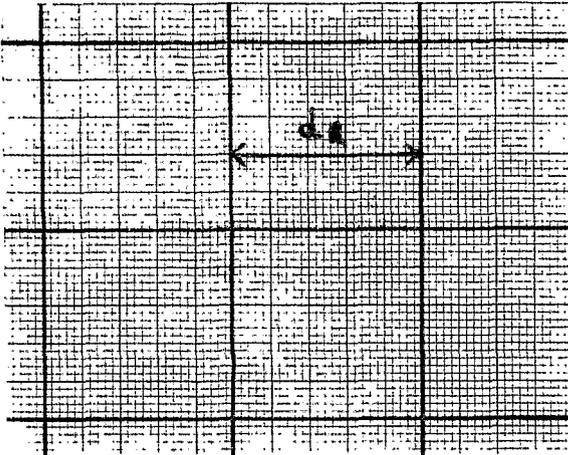
Les calculs effectués pour déterminer la taille de l'échantillon dans chacune des cinq strates et les tailles des grilles de sélection correspondantes sont résumés dans le tableau ci dessous :

Strates	1	2	3	4	5	Total
Z_k (mm^2)	161 963	151 408	152 757	149 033	48 186	663 347
\bar{z}_k (mm^2)	146,3	120,2	94,7	57,3	56,3	89,5
M_k	1 107	1 259	1 613	2 577	856	7.412
m_k (alloc. prop.)	64	73	94	149	50	430
m_k (alloc. opt.)	28	27	108	229	38	430
d_k (mm)	76,1	74,9	37,6	25,5	35,6	

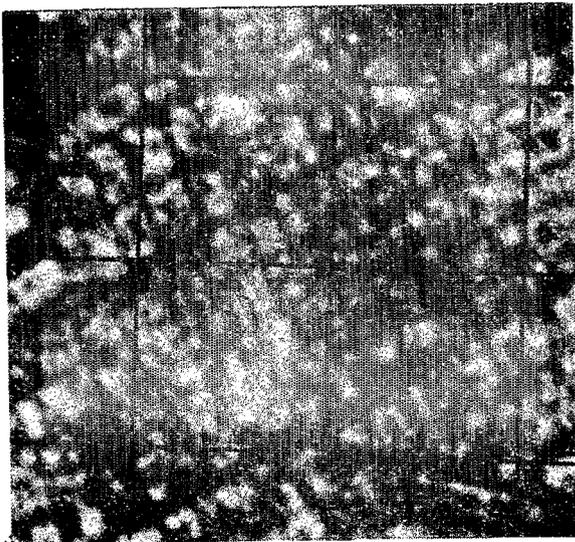
10 . SÉLECTION DES ILOTS DE L'ÉCHANTILLON A L'AIDE DE GRILLES

La sélection des îlots s'effectue indépendamment dans chaque strate à l'aide d'une grille calculée pour respecter le taux prévu dans la strate (fiche 9).

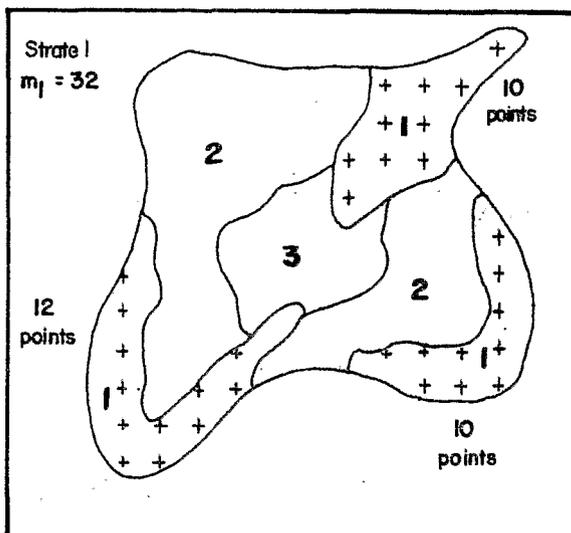
Pour chaque strate, les étapes du tirage sont les suivantes:



Construire la grille sur un support transparent millimétré ($d_k =$ intervalle entre 2 lignes de la grille, pour la strate k).



Superposer la grille à l'image satellite (tirage papier à une échelle voisine du 1/15 000) ou au plan, en choisissant le point de calage de la grille aléatoirement et en évitant d'orienter les axes principaux de la grille (horizontal, vertical ou diagonal) parallèlement à un axe principal du réseau de voirie.



Compter le nombre de points de la grille inclus dans la strate. Si ce nombre ne correspond pas au nombre d'îlots souhaité (m_k), répéter l'opération en positionnant différemment la grille, jusqu'à obtenir le nombre d'îlots défini dans le plan de sondage (fiche 9 pour le calcul du nombre d'îlots de l'échantillon par strate).



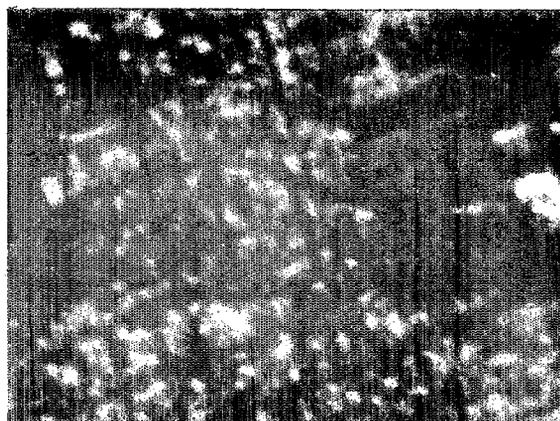
Identifier les îlots correspondant aux points de la grille:

- si le point est situé à l'intérieur d'un îlot, c'est l'îlot en question qui est sélectionné;

- si le point est situé sur la voirie, entre des îlots, appliquer une règle systématique pour la sélection de l'îlot: par exemple, l'îlot situé immédiatement au sud du point;

- si deux points de la grille appartiennent à un seul et même îlot, cet îlot est sélectionné, ainsi que son voisin, en appliquant une règle systématique pour rechercher l'îlot voisin: par exemple, l'îlot situé immédiatement à l'ouest de celui déjà sélectionné.

Selon le type de quartier et donc le degré de lisibilité de la voirie sur l'image satellite, les limites de chacun des îlots de l'échantillon sont déterminées



directement sur l'image satellite,

ou sur le terrain, avec le superviseur.

Pour les parties de la ville où existe une cartographie, il est intéressant de l'utiliser pour reporter les îlots de l'échantillon,



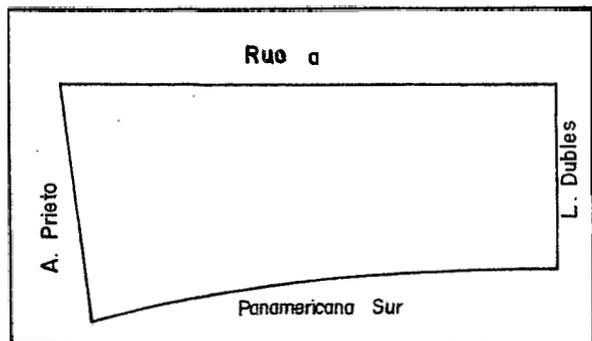
ainsi, les enquêteurs disposent d'un plan de situation des îlots à enquêter.

Dans les zones non cartographiées, ou pour les îlots aux limites complexes, le superviseur se rendra sur le terrain avec l'enquêteur pour lui définir précisément les îlots d'enquête.

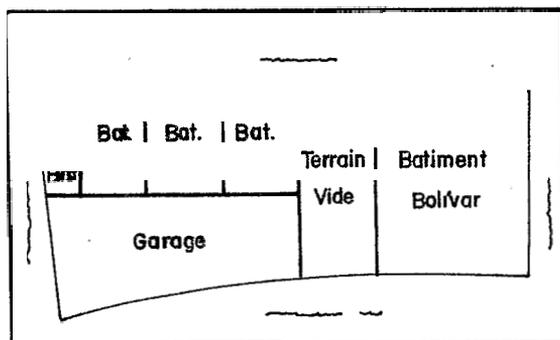
Durée de la sélection des 80 à 100 îlots d'une strate (inclus le report sur plan): 3 jours.

11 . RECENSEMENT DES MÉNAGES DANS LES ILOTS DE L'ECHANTILLON

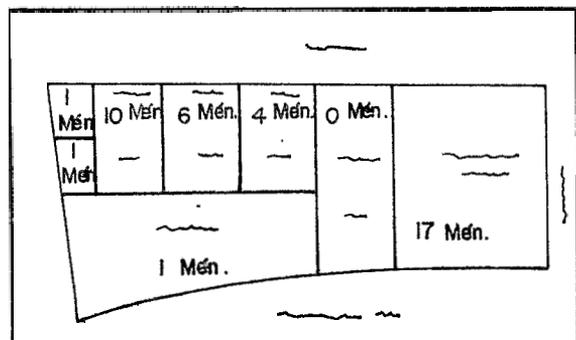
Pour chaque îlot de l'échantillon, les superviseurs établissent, sur une fiche du type de celle figurant au verso, un schéma simplifié du pâté de maisons sur lequel figurent:



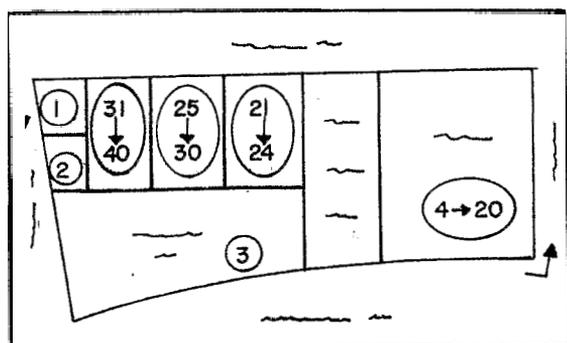
- les renseignements nécessaires à l'identification du pâté de maisons par l'enquêteur: noms des rues bordant l'îlot, éléments naturels servant de limites (ruisseau, ravin,...etc)



- le dessin de l'ensemble des bâtiments de l'îlot;



- le nombre de ménages dans chacun des bâtiments: pour obtenir cette information, les superviseurs interrogent les habitants de chacun des bâtiments;



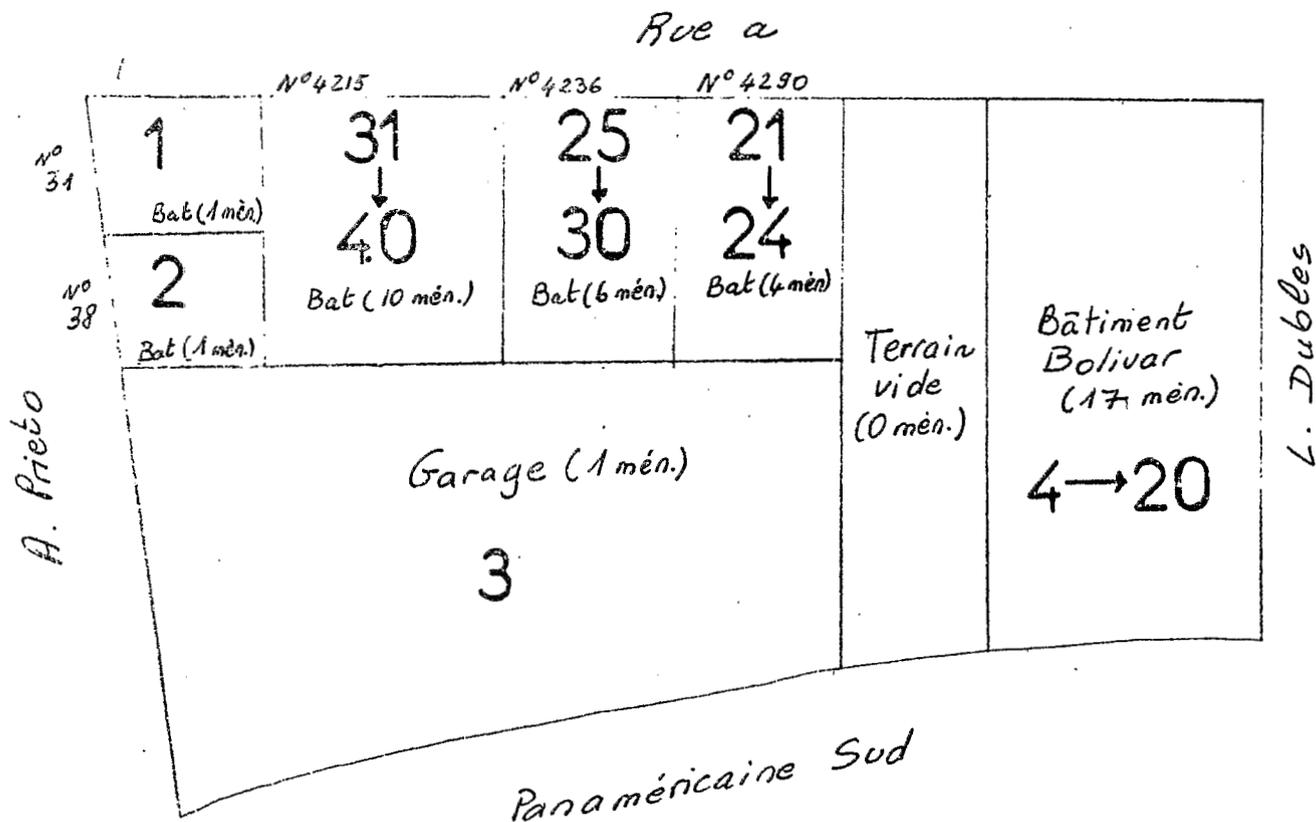
- la numérotation des ménages dans l'îlot, de 1 à N, par ordre croissant en suivant le tour de l'îlot

Durée du recensement (îlot moyen de 35 logements) : 5 îlots/jour/superviseur

FICHE ILOT

Nom SUPERVISEUR... <i>Heacy ALBAN</i>	N° Ilot 253
Nom ENQUETEUR... <i>Juan PUENTE</i>	Nombre de ménages : TOTAL 140

SCHEMA DE L'ILOT



ECHANTILLON DE MENAGES	Collecte / Codification
Liste des ménages	Enquête <input type="checkbox"/>
.....	Vérif. enquête (1) <input type="checkbox"/>
.....	Vérif. enquête (2) <input type="checkbox"/>
.....	Corrections question. <input type="checkbox"/>
Ménages de remplacement.....	Codification <input type="checkbox"/>
.....	Vérif. codification <input type="checkbox"/>

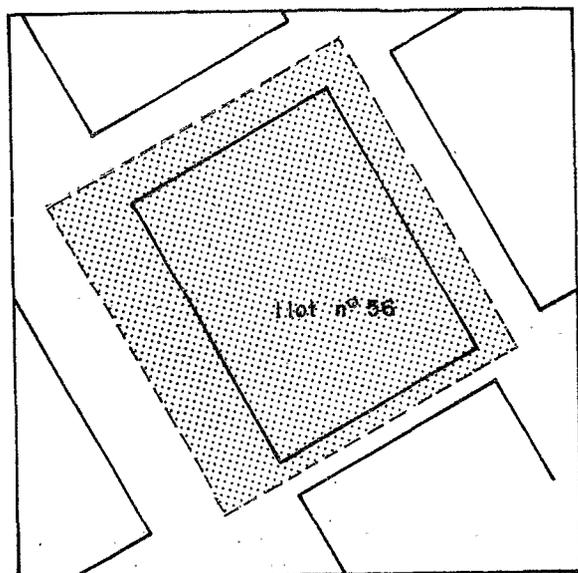
12 . MESURE DE LA SURFACE DES ILOTS DE L'ECHANTILLON

La mesure de surface des îlots peut être réalisée selon trois techniques:

- avec un support polyester millimétré superposé à un tirage papier de l'image satellite (canal panchromatique de SPOT) à une échelle voisine du 1/15 000;
- par programme informatique, calculant le nombre de pixels de l'image satellite (canal panchromatique de SPOT, pixel=10 m x 10 m, soit 100 m²) inclus dans chaque îlot;
- sur le terrain.

Les tests de précision effectués ont démontré que cette dernière solution est la plus précise (+/- 8%, pour une personne réalisant pour la première fois ce type de mesure); c'est donc cette méthode, expliquée dans cette fiche, qu'il est conseillé d'utiliser.

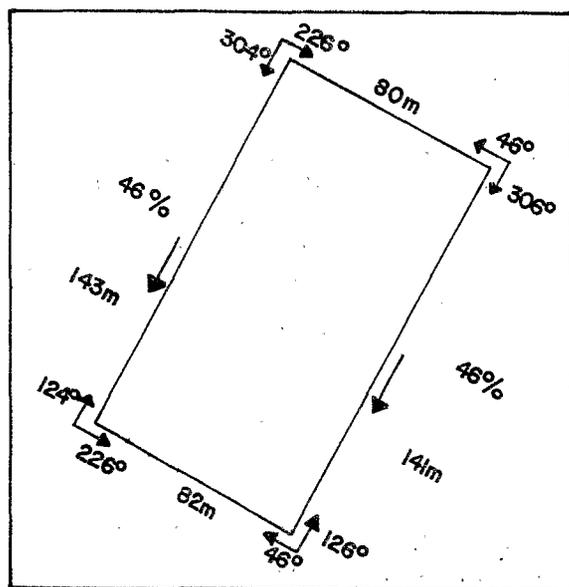
Pour éviter toute erreur d'identification des îlots, le travail de mesure doit être confié au même superviseur que celui qui effectue le recensement des ménages (fiche 11); l'organisation optimale du travail des superviseurs conduit ceux-ci à réaliser, lors d'une seule et même visite sur un îlot, le recensement des logements et la mesure de la surface de l'îlot. Ainsi, on s'assure que les deux informations correspondent au même îlot.



Afin d'être cohérent avec la mesure de surface des strates, effectuée sur document projeté (image ou plan) et incluant la voirie, la "surface de l'îlot" inclue la demi-voirie bordant l'îlot, et correspond à la surface projetée sur un plan.

Matériel nécessaire au superviseur: un décimètre, une boussole, un clinomètre.

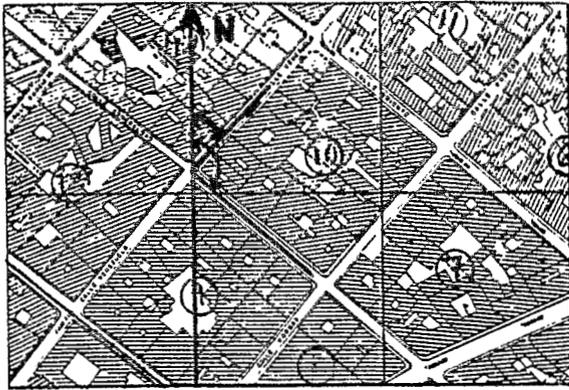
Sur le terrain, au verso de la fiche servant au recensement des logements, le superviseur fait un schéma de l'îlot comportant les informations suivantes:



Longueurs des côtés, décomposés, si nécessaire, en segments rectilignes et de même pente:

- sur terrain en pente, les longueurs sont mesurées au décimètre;
- sur terrain plat, les longueurs sont mesurées en nombre de pas; la longueur du pas est connue par la mesure simultanée en pas et au décimètre durant les deux premiers jours de travail du superviseur.

Pente de chaque segment: en cas de pente forte (> 30 %), la pente de chaque segment est mesurée au clinomètre, et reportée sur le schéma de l'îlot.



Angle entre les segments: à chaque extrémité d'un segment, le superviseur mesure, à la boussole, l'angle entre la direction du segment et le nord.

Au bureau, un opérateur réalise le calcul de la surface de l'îlot (z) à partir du schéma complet établi par le superviseur :

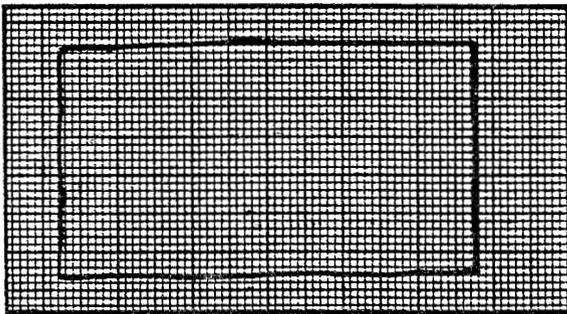
ETALONNAGE DES PAS
 Pénombre = 0,903 m
 Écart type = 0,0175



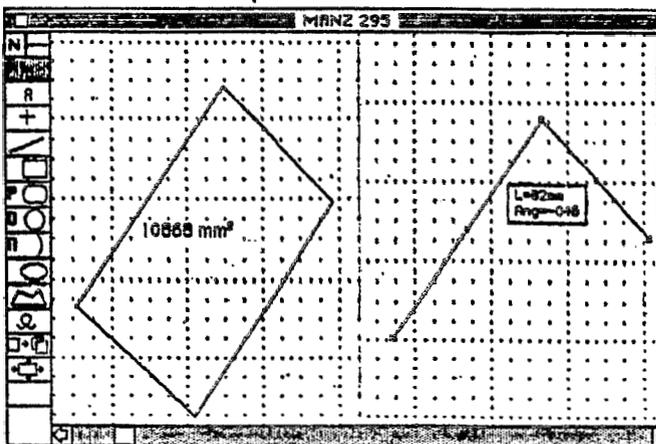
Transformation en mètres des longueurs mesurées en pas,

	A	B	C
1	LONG	PENTE	*VALEUR!
2	112	0,16	110,593351
3	108	0,14	106,956909
4	71	0,12	70,4942555
5	72	0,12	71,4871324
6	72	0,25	68,95026

Transformation des longueurs mesurées sur un terrain pentu en longueurs projetées sur un plan.



Réalisation manuelle du calcul de surface: dessin à l'échelle sur papier millimétré, planimétrie ou comptage du nombre de mm² inclus dans le polygone;



ou réalisation informatique: avec le programme Mac Draft sur Macintosh, ou tout autre programme de dessin équivalent sur micro-ordinateur.

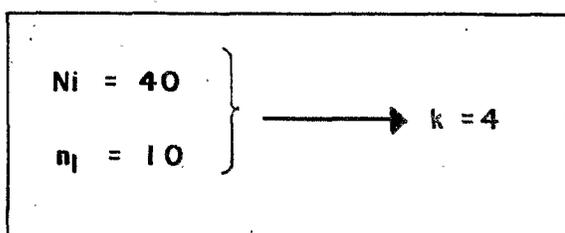
Avec MacDraft (exemple ci-contre), l'opérateur dessine le polygone composé des segments en respectant les longueurs et les angles prescrits par le schéma du superviseur; l'ordinateur affiche la surface du polygone ainsi défini.

Durée de la mesure des îlots sur le terrain: 8 îlots/jour/superviseur
 Durée du calcul de surface (inclus conversion des longueurs): 40 îlots/jour/opérateur

13 . SÉLECTION DES MÉNAGES DANS LES ILOTS DE L'ECHANTILLON

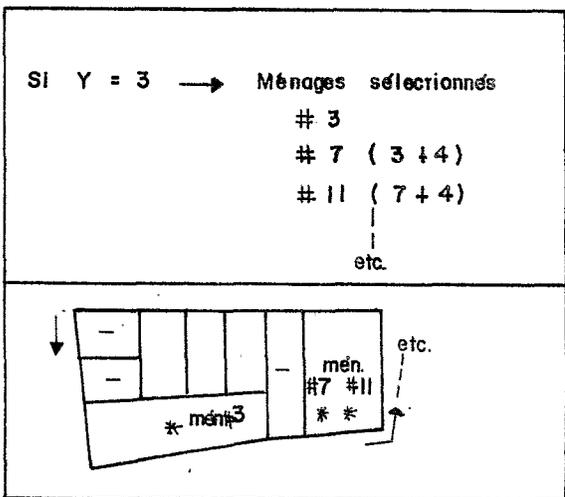
Les îlots de l'échantillon comptant **moins de n_1 ménages** (détermination de ce seuil n_1 , décrite fiche 9) font l'objet d'une enquête **exhaustive**: tous les ménages de l'îlot doivent être enquêtés.

Dans un îlot i comptant **n_1 ménages ou plus**, le superviseur doit établir une liste des n_1 ménages à enquêter. Il établit cette liste en appliquant la **procédure de tirage systématique suivante**:



Soit : N_i = nombre total de ménages de l'îlot i
 et : n_1 = nombre de ménages à enquêter

$k = \text{pas du tirage systématique} = N_i / n_1$



Tirage d'un nombre Y compris entre 1 et k , au hasard: le ménage portant ce numéro Y est sélectionné, ainsi que les ménages portant le numéro $Y+k, Y+2k, \dots$ etc

ECHANTILLON DE MENAGES

Liste des ménages

3, 7, 11, 15, 19, 23,

27, 31, 35, 39,

.....

.....

Dans la partie inférieure de la fiche îlot, le superviseur indique la liste des numéros des ménages sélectionnés.

L'enquêteur doit enquêter tous les ménages de la liste. Si, en dépit de plusieurs visites, l'enquêteur ne peut réaliser l'enquête dans un des ménages de la liste, il procède à l'enquête dans le ménage ayant le numéro immédiatement supérieur à celui qui n'a pas pu être enquêté, afin de respecter le nombre total d'enquêtes à réaliser dans l'îlot.

Durée de la sélection (îlot moyen de 35 ménages) : 30 îlots/superviseur/jour

FICHE ILOT

Nom SUPERVISEUR... *Heary*..... *ALBAN*...

N° Ilot

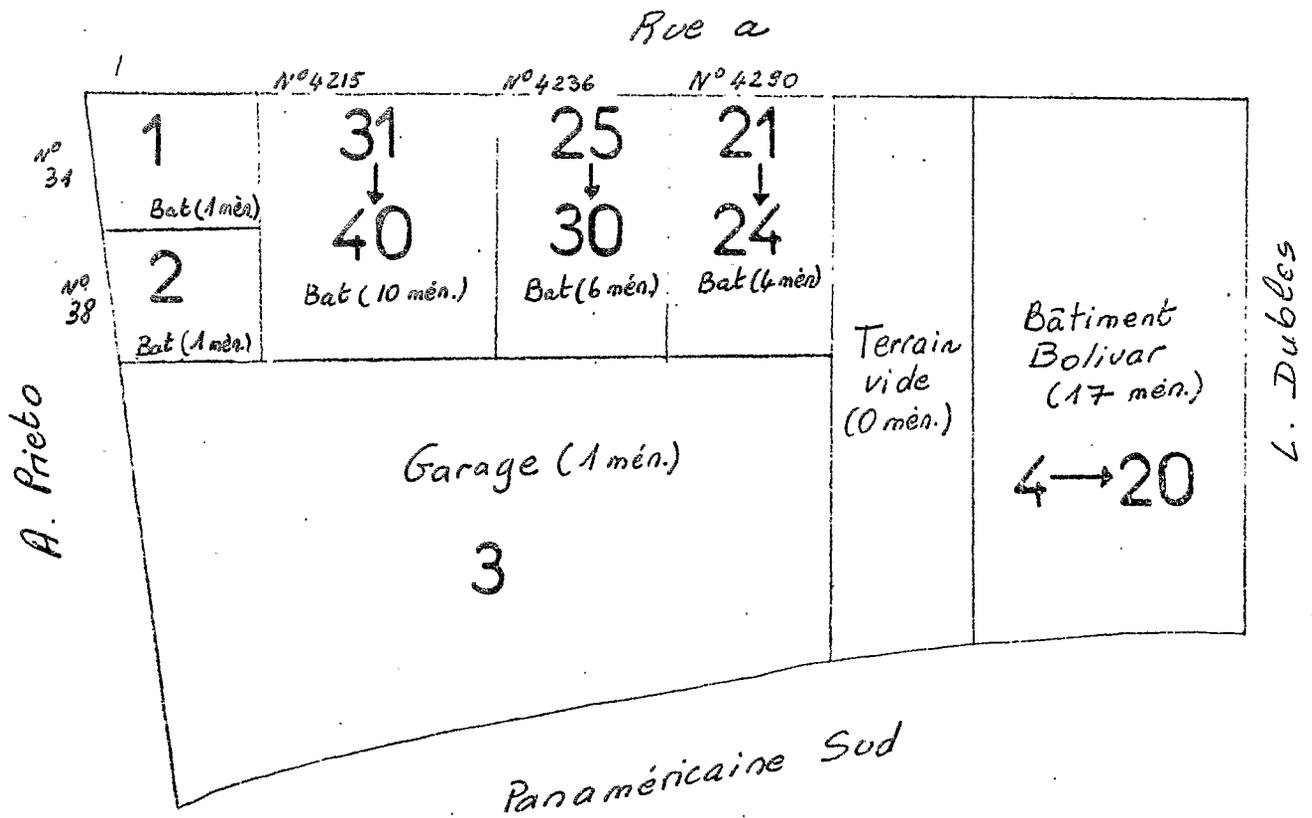
253

Nom ENQUETEUR... *Juan*..... *PUEENTE*..

Nombre de ménages : TOTAL

40

SCHEMA DE L'ILOT



ECHANTILLON DE MENAGES

Liste des ménages ...*3, 7, 11, 15, 19, 23, 27,*.....

31, 35, 39.....

Ménages de remplacement.....

Collecte / Codification

- Enquête
- Vérif. enquête (1)
- Vérif. enquête (2)
- Corrections question.
- Codification
- Vérif. codification

14 . CALCUL DES ESTIMATIONS ET INTERVALLES DE CONFIANCE (1. FORMULAIRE)

Notations adoptées dans le formulaire

Objets	Notations	Significations
1) Base de sondage et échantillon	N_i N_k n_i m_k	Nombre de ménages dans l'îlot i Nombre de ménages dans la strate k (inconnu) Nombre de ménages de l'îlot i appartenant à l'échantillon Nombre d'îlots de la strate k appartenant à l'échantillon
2) Variables dont on doit estimer le total ou la moyenne (y) ou intervenant au dénominateur du quotient à estimer (x)	y_j, x_j y_i, x_i \hat{y}_i, \hat{x}_i Y_k, X_k \bar{Y}_k, \bar{X}_k \hat{Y}_k, \hat{X}_k \hat{N}_k $\hat{\bar{Y}}_k, \hat{\bar{X}}_k$	Valeurs des caractères pour le ménage j Totaux des caractères dans l'îlot i Estimateurs des totaux dans l'îlot i Totaux des caractères dans la strate k Moyennes des caractères dans la strate k Estimateurs des totaux dans la strate k Estimateur du nombre de ménages dans la strate k Estimateurs des moyennes dans la strate k
3) Variable définissant la probabilité d'inclusion dans l'échantillon des unités primaires (z)	z_i Z_k	Surface totale de l'îlot i Surface totale de la strate k
4) Quotients à estimer	r_i \hat{r}_i R_k \hat{R}_k	Valeur du quotient pour l'îlot i ($r_i = y_i/x_i$) Estimateur du quotient dans l'îlot i ($\hat{r}_i = \hat{y}_i/\hat{x}_i$) Valeur du quotient pour la strate k ($R_k = Y_k/X_k$) Estimateur du quotient dans la strate k ($\hat{R}_k = \hat{Y}_k/\hat{X}_k$)
5) Sommations	n_i $\sum_{j=1}^s$ m_k $\sum_{i=1}^s$	Somme sur les ménages de l'îlot i appartenant à l'échantillon Somme sur les îlots de la strate k appartenant à l'échantillon
6) Erreurs d'échantillonnage et estimation des erreurs	$\hat{V}(\hat{Y}_k)$ et $\hat{V}(\hat{Y}_k)$ $\hat{E}(\hat{R}_k - R_k)^2$	Estimations des variances des estimateurs \hat{Y}_k et $\hat{\bar{Y}}_k$ dans la strate k (premier degré du sondage) Estimation de l'écart quadratique moyen de l'estimateur \hat{R}_k dans la strate k (premier degré du sondage)

Sondages, estimateurs, erreurs d'échantillonnage et intervalles de confiance

Le principe du **sondage** consiste, lorsqu'on veut recueillir une information sur une population considérée dans son ensemble, à n'observer qu'une fraction de cette population appelée **échantillon**. De cette information partielle, il faut ensuite déduire des indications sur les caractéristiques de la population entière.

Les formules mathématiques données dans les deux premières colonnes du tableau ci-dessous combinent les informations obtenues sur l'échantillon pour fournir des approximations des statistiques recherchées; ce sont les **estimateurs** de ces statistiques. Bien sûr la valeur fournie par l'estimateur n'est généralement pas exactement égale à la vraie valeur de la statistique sur l'ensemble de la population.

L'écart entre ces deux valeurs a deux composantes:

- la première, introduite lors de la mise en œuvre de l'enquête du fait des non réponses ou réponses fausses, etc..., s'appelle l'**erreur de mesure**; elle existe dans toute procédure de collecte d'information, qu'il s'agisse de sondages ou de recensements et c'est le soin apporté à l'organisation de la collecte sur le terrain qui permettra de la réduire;
- la seconde composante, appelée **erreur d'échantillonnage**, est celle qui résulte de l'observation partielle de la population. Elle est donc spécifique aux procédures de collecte par sondage et dépend du **plan de sondage**, c'est-à-dire de l'ensemble des règles adoptées pour sélectionner l'échantillon et du **choix des estimateurs**. La dernière colonne du tableau ci-dessous fournit une estimation de cette erreur pour le plan de sondage que nous préconisons ici.

Cette indication doit être interprétée de la façon suivante.

Elle permet de construire pour chaque estimation l'**intervalle de confiance** pour un **seuil de probabilité** donné. Par exemple, au seuil de probabilité de 95%, l'intervalle de confiance (appelé intervalle de confiance à 95%) est l'intervalle qui contiendra 95% des résultats d'estimation si l'on répète un grand nombre de fois l'expérience d'échantillonnage. Pour ce même seuil de probabilité (95%), l'intervalle de confiance, centré sur l'estimation obtenue, a pour amplitude totale quatre fois la racine carrée de l'estimateur de la variance donnée dans la dernière colonne du tableau formulaire.

Formulaire

Formulaire :	Estimateur dans l'ilot i	Estimateur dans la strate k	Estimateur de la variance de l'estimateur dans la strate k
Types de variable			
Totaux Y_k	$\hat{y}_i = N \sum_{j=1}^{n_i} \frac{y_j}{n_i}$	$\hat{Y}_k = \frac{Z_k}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{\hat{y}_i}{z_i}$	$\hat{V}(\hat{Y}_k) = \frac{1}{m_k(m_k-1)} \sum_{i=1}^{m_k} \left(\frac{Z_k \hat{y}_i}{z_i} - \hat{Y}_k \right)^2$
Moyennes $\bar{Y}_k = \frac{Y_k}{N_k}$	$\hat{\bar{y}}_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{y_j}{n_i}$	$\hat{\bar{Y}}_k = \hat{Y}_k / \hat{N}_k$ où, $\hat{N}_k = \frac{Z_k}{m_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{N_i}{z_i}$	$\hat{V}(\hat{\bar{Y}}_k) = \frac{1}{m_k^2 - m_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{Z_k^2}{\hat{N}_k^2} \left(\frac{\hat{y}_i - N_i \hat{\bar{Y}}_k}{z_i} \right)^2$
Ratios $\frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_j}{n_i}$ $\frac{\sum_{j=1}^{n_i} x_j}{n_i}$	$\hat{R}_k = \frac{\sum_{i=1}^{m_k} \frac{\hat{y}_i}{z_i}}{\sum_{i=1}^{m_k} \frac{\hat{x}_i}{z_i}}$	$E, \hat{R}_k - R_k)^2 = \frac{1}{m_k(m_k-1)} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{Z_k^2}{\hat{X}_k^2} \left(\frac{\hat{y}_i - \hat{R}_k \hat{x}_i}{z_i} \right)^2$	

15 . CALCUL DES ESTIMATIONS ET INTERVALLES DE CONFIANCE

(2. MISE EN ŒUVRE INFORMATIQUE)

Etant donné le grand nombre de calculs d'estimations différentes auxquelles peut conduire l'exploitation d'une enquête par sondage, il n'est en général pas possible d'appliquer complètement le formulaire d'estimation fourni dans la fiche 14 à l'ensemble des variables. C'est pourquoi nous allons proposer maintenant deux solutions de mise en œuvre informatique de ce formulaire pour exploiter les données recueillies lors de l'enquête. Elles sont praticables à l'aide de logiciels statistiques généraux (voir ci-dessous); mais l'utilisation d'un logiciel spécialisé d'exploitation d'enquête par sondage simplifiera énormément le travail de programmation.

1. Fichiers de données et programme informatique pour la production d'estimations et des intervalles de confiance associés

Il s'agit ici de programmer, généralement à l'aide des commandes d'un logiciel approprié (par exemple SPSS/PC, SAS/PC, voire Dbase III), l'ensemble du formulaire exposé dans la fiche 14. Cette solution permettra les calculs d'estimation des statistiques recherchées et l'évaluation de l'erreur d'échantillonnage associée à chacune d'elle.

Sur un micro-ordinateur, quel que soit l'environnement logiciel disponible, ces opérations exigeront des temps de calcul assez longs. Elles ne peuvent donc généralement pas être envisagées pour l'ensemble de l'exploitation de l'enquête mais nous ne saurions trop insister sur le fait que l'application d'une procédure de ce type à un nombre suffisant de variables peut seule fournir une évaluation de la fiabilité des informations recueillies.

Pour éviter les redondances d'information lors de la constitution des fichiers contenant les données issues de l'enquête et faciliter la programmation du formulaire, on constituera, à partir des fichiers issus de l'étape de saisie (fichiers ménages, individus, migrations, etc...), trois fichiers correspondant aux contenus suivants :

Fichiers	Contenu		Provenance des informations (fiches décrivant la collecte)
	Enregistrements	Variables	
Unités secondaires	Un enregistrement par ménage	1- Identification de l'îlot d'appartenance (i) 2- Variables à estimer (y_j)	Résultat de l'enquête après agglomération de l'information au niveau du ménage
Unités primaires	Un enregistrement par îlot	1- Identification de l'îlot (i) 2- Nombre de ménages présents dans l'îlot (N_i) 3- Surface de l'îlot (z_i) 4- Identif. de la strate d'appartenance (k)	Recensement des ménages (fiche 11) Mesures sur image, sur plan ou sur le terrain (fiche 12)
Strates	Un enregistrement par strate	1. Identification de la strate (k) 2. Surface de la strate (Z_k)	Mesures sur image ou plan (fiche 8)

Le principe du calcul informatique des estimateurs et de leurs variances est alors le suivant :

1. Sommation sur le fichier d'unités secondaires (ménages), calcul des \hat{y}_i (ou \hat{r}_i dans le cas de l'estimation d'un ratio) par application des formules (première colonne du tableau de la fiche 14).
2. Fusion horizontale (merge) des résultats de la première étape avec le fichier d'unités primaires.
3. Sommation sur le fichier d'unités primaires par strate, calcul des \hat{Y}_k ($\hat{\bar{Y}}_k$ ou \hat{R}_k dans les cas d'estimations de moyennes ou de ratios) par application de la seconde colonne du formulaire (fiche 14) et des $\hat{V}(\hat{Y}_k)$ ($\hat{V}(\hat{\bar{Y}}_k)$ ou $\hat{E}(\hat{R}_k - R_k)^2$ dans les cas d'estimation de moyennes ou de ratios) par application de la troisième colonne du formulaire (fiche 14).
4. Fusion horizontale (merge) des résultats de la troisième étape avec le fichier des strates.
5. Sommation sur les strates pour l'obtention des estimations et des variances sur l'univers entier et/ou les domaines d'étude. Les sommations sont directes dans le cas des totaux (estimation totale = somme des estimations par strate, variance totale = somme des variances par strate). Dans le cas des moyennes et ratios, les sommations doivent être effectuées indépendamment pour les quantités figurant au numérateur et au dénominateur des estimateurs.

Les personnes qui envisagent d'utiliser la méthode et disposant du logiciel SPSS/PC peuvent s'adresser à l'équipe de recherche ORSTOM pour obtenir à titre gratuit le programme d'estimation mis au point sous ce logiciel lors de l'exploitation des résultats de l'enquête réalisée à Quito.

2. Calcul d'estimations par pondération des enregistrements des fichiers de données

Comme on le constate immédiatement en examinant le formulaire de la fiche 14, l'estimateur du total d'une variable y sur l'ensemble de la population est une **combinaison linéaire des valeurs prises par y sur chacune des unités statistiques observée dans l'échantillon** : ménages si y est une caractéristique attachée aux ménages, individus si y décrit des individus, etc.

Si on laisse de côté l'estimation de la variance des estimateurs, il y a donc une façon simple et rapide de calculer un grand nombre d'estimations de totaux (et par conséquent d'estimer toutes les statistiques simples qui se déduisent de ces totaux : moyennes, quotients, etc.). En effet, si on **pondère chaque enregistrement du fichier de données original** (fichier ménage, individus, chefs de ménages, etc.) par le coefficient qu'aurait cette unité dans l'estimateur (coefficient que nous appellerons désormais "**pois**s" de l'unité statistique), l'estimation d'une statistique donnée sur l'ensemble de la population est alors égale à la valeur de cette même statistique sur le fichier "échantillon" pondéré.

Etant donné le plan de sondage pratiqué (lequel détermine la formule de l'estimateur), le poids d'une unité statistique quelconque de l'échantillon **ne dépend que de l'îlot et de la strate** auxquels elle appartient (ce poids sera donc le même quelle que soit l'unité considérée, ménage, individu, etc...). Le poids doit donc être calculé une fois pour toutes pour l'ensemble des unités primaires (îlots) de l'échantillon, et conservé dans un fichier "îlot". Il suffira ensuite d'attribuer, dans le fichier de données, le **même poids à toutes les unités appartenant à un même îlot**.

La formule donnant le poids p_i d'un îlot donné de l'échantillon (îlot i , appartenant à la strate k) est la suivante (avec les notations de la fiche 14) :

$$p_i = \frac{Z_k N_i}{n_i m_k z_i}$$

3. Estimations dans divers domaines

Quelle que soit la solution informatique retenue, les estimations (et leur précision dans le premier cas) peuvent être obtenues pour l'ensemble de l'univers étudié, par strate constituée lors du tirage de l'échantillon, ou pour un quelconque autre domaine d'étude, c'est à dire un sous ensemble géographique de l'univers de départ.

Le principe des calculs reste inchangé; ils s'appliqueront simplement à des fichiers de données où **toutes les unités exclues du domaine d'étude** prennent pour la variable à estimer la valeur zéro.