

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

**STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN A PARTIR
D'IMAGES SATELLITE POUR REALISER UN
SONDAGE A OBJECTIF DEMOGRAPHIQUE.**

**Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images
SPOT et LANDSAT TM en milieu urbain.**

Thèse de doctorat

Soutenue le

par

Alain MICHEL

Direction de thèse :
Jean Pierre RAISON, EHESS

Membres du jury :

Une double tutelle a permis la réalisation de ce travail ; je tiens donc à remercier J.P. RAISON du Département d'Etude Africaine de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales qui m'a fait l'honneur d'accepter la direction de cette thèse, et E. LE BRIS qui m'a cordialement accueilli dans le département 'Urbanisation et socio-systèmes urbains' de l'ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Ma gratitude va de même à J.P. GILG du Centre d'Analyse et de Mathématiques Sociales de l'EHESS qui m'a encadré tout au long de ces trois années, ainsi qu'à Ph. ANTOINE et J.P. DUCHEMIN de l'ORSTOM qui n'ont jamais douté du bien fondé de notre démarche.

~~~~~

Remerciements et sympathie vont à l'ensemble des membres de l'équipe de recherche au sein de laquelle cette thèse a été réalisée : F. DUREAU initiatrice du programme de recherche qui a su m'insuffler un plaisir de travailler qui ne s'est pas encore éteint, B. LORTIC qui par ses incessantes et pertinentes critiques a constamment veillé à m'éloigner des sentiers battus de la télédétection, O. BARBARY qui a poussé son sens de l'hospitalité jusqu'à mêler pédagogiquement conseils statistiques et initiation à la 'salsa', F. PELLETTIER et M. SOURIS qui m'ont apporté conseil et assistance dans le domaine complexe des bases de données localisées, et enfin A. AING et I. RANNOU qui ont effectué un exceptionnel travail photographique dans des délais toujours records.

~~~~~

J.F. PARROT et M. POUGET de l'Unité de Télédétection puis C. MULLON du Laboratoire d'Informatique Appliquée m'ont témoigné leur confiance en mettant, entre autres, à ma disposition des moyens informatiques conséquents, je les en remercie vivement.

MM M. RAKOTO-RAVALONTSALAMA et D. REMY m'ont constamment apporté un solide soutien tant informatique qu'amical, qu'ils en soient ici chaleureusement remerciés.

N. DELARBRE, M.T. MIGUET et L. ZURETTI ont participé chacune suivant leurs compétences à la qualité de mon travail, qu'elles soient assurées de ma profonde reconnaissance. Je n'oublie pas non plus les autres membres du L.I.A aux côtés desquels j'ai travaillé avec plaisir au cours de ces trois années et qui ont par ce biais contribué à la qualité de mon travail.

Enfin, que tout ceux qui, bien que non cités, ont coopéré à cette thèse en prodiguant conseils ou encouragements, soient ici sincèrement remerciés.

AVERTISSEMENT

Comme on le verra dans l'introduction, ce travail s'inscrit dans un projet de recherche pluridisciplinaire commencé à l'ORSTOM en 1985. Intégré dès cette date à l'équipe constituée autour de ce projet ¹, j'ai mené toutes mes recherches dans ce cadre. Etant donnée l'étroite imbrication des domaines sur lesquelles travaillait chacun des membres de l'équipe, cette thèse ne pouvait se concevoir sans l'intégration de certains textes présentant les travaux et les résultats des autres chercheurs participant au projet. De ces travaux et résultats dépendait l'avancement de nos propres recherches, nous y ferons constamment référence dans la suite. On trouvera donc dans cette thèse, des paragraphes construits à partir des éléments que nous ont fournis les autres participants au projet ou même directement repris de leurs textes. Il nous a en effet semblé inutile, lorsque la synthèse de certain travaux été faite par leur auteur même de réécrire moins bien que lui le contenu de son texte. Dans tous les cas, emprunts d'idées, d'éléments de résultats ou de textes déjà écrits, nous nous sommes efforcé de donner, dans le texte ou en note, la référence précise permettant de se reporter à l'écrit original de l'auteur.

¹L'équipe ORSTOM comprend, F. DUREAU (géographe-démographe), O. BARBARY (Statisticien), B. LORTIC (télédétection) et moi-même. 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).

STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN A PARTIR D'IMAGES SATELLITE POUR REALISER UN SONDAGE A OBJECTIF DEMOGRAPHIQUE.

MISE AU POINT ET EVALUATION DES METHODES D'ANALYSE DES IMAGES DES SATELLITES A HAUTE RESOLUTION SPOT ET LANDSAT EN MILIEU URBAIN.

Introduction.

.Lacunes des systèmes pour collecter des données démographiques dans les villes des pays en voie de développement - Comment y remédier : des éléments de réponse?

.Objectifs du programme de recherche de l'ORSTOM.

.Contexte de la recherche .

.Présentation de l'équipe de recherche.

1) ACQUIS METHODOLOGIQUES, SITUATION DE LA RECHERCHE ET PRATICABILITE DE LA METHODE.

1.1) EXPOSÉ DU PLAN DE THESE - DÉFINITION DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL- AXES DE RECHERCHE.

Rappel : l'objectif central du programme de recherche.

Exposé du plan de thèse.

Définition de la méthode de travail.

Axes de recherche.

1.2) PERTINENCE DE L'UTILISATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE POUR COLLECTER DES DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES - ACQUIS MÉTHODOLOGIQUE ISSUS DE L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION AÉROPORTÉE ET SATELLITAIRE POUR RECUEILLIR DES DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES.

1.3) POSITIONNEMENT DU PROBLEME PAR RAPPORT À LA BIBLIOGRAPHIE DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE EN MILIEU URBAIN.

1.3.1) DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE.

1.3.2) IMAGES LANDSAT MSS.

1.3.3) IMAGES LANDSAT THEMATIC MAPPER.

1.3.4) COMPARAISON THEMATIC MAPPER / MSS / SPOT / PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES.

1.3.5) IMAGES HRV DE SPOT.

SYNTHESE ET PERSPECTIVES.

1.4) PRATICABILITÉ FACE AUX CONTRAINTES MÉTÉOROLOGIQUES.

1.4.1) ETUDE SUR LE SITE DE QUITO (EQUATEUR).

1.4.1.1)Thématique et météorologie.

1.4.1.2) Probabilité d'obtenir une image.
Comparaison SPOT / Thematic Mapper.

CONCLUSION.

1.4.2) POLITIQUE D'ACQUISITION D'IMAGES À TRAVERS LE CATALOGUE DES COMPAGNIES SPOT IMAGE ET LANDSAT - QUELQUES EXEMPLES AFRICAINS : DAKAR, BOUAKÉ ET GAO.

CONCLUSION

2) MISE AU POINT DE LA MÉTHODE À PARTIR D'UN MODELE EXPÉRIMENTAL - MARSEILLE -

2.1) INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES ET DONNÉES SATELLITAIRES : RÉPERCUSSIONS MÉTHODOLOGIQUES ET MISE EN OEUVRE DE L'INTÉGRATION.

2.1.1) INTÉGRER INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET TÉLÉDÉTECTION: UNE NÉCESSITÉ?

2.1.1.1) Comment réaliser l'intégration des données.

2.1.1.2) Spécificités du Système de Gestion de Base de Données Localisées SAVANE.

- a) *Restriction spatiale.*
- b) *Jointure spatiale.*
- c) *Passer du mode vecteur au mode raster.*

2.1.2) TYPOLOGIES URBAINES ET TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE.

2.1.2.1) Quel individu ou unité spatiale retenir? Comment définir cette entité ?

- a) *Les signatures spectrales.*
 - *Le "mixel".*
 - *Le pixel pur.*
- b) *Individu : Le pixel?*
 - *Une typologie du tissu urbain ou une classification des matériaux de construction?*
 - *Raisonnement par pixel - Quelles contraintes ou sous entendus?*
 - *Une typologie fonctionnelle, socio-économique, juridique ou culturelle? Une typologie inadaptée par rapport à l'outil de mesure?*
 - *Base de données localisées et système d'information géographique. Quelle entité pour croiser les informations?*
 - *Résultats des classifications - Quelle validité ?*

2.1.2.2) Plaidoyer pour une nouvelle approche dans l'élaboration des typologies urbaines.

2.1.2.3) Méthode d'élaboration d'une typologie.

- a) *Problématique.*
- b) *Délimitation et partitionnement de l'univers d'étude.*
- c) *Echelle de l'analyse.*
- d) *Outils de mesure, variables.*
- e) *Méthode de classement.*
- f) *Elaboration des types et thématique.*

CONCLUSION ET PERSPECTIVES.

2.1.3) PRÉSENTATION DES DONNÉES INTÉGRÉES DANS LA BASE.

2.1.3.1.) Préparation des fonds cartographiques à numériser.

- . *La précision du tracé sur le document à numériser.*
- . *L'échelle des documents à numériser.*
- . *Le système de projection géographique des documents à intégrer dans la base.*

2.1.3.2) Numérisation des fonds de cartes.

2.1.3.3) Intégration de l'information graphique.

2.1.3.4) Intégration de l'information thématique.

- . *L'information sur la morphologie urbaine.*

EN CONCLUSION, DE NOUVELLES PERSPECTIVES EN TÉLÉDÉTECTION?

2.2) ESTIMATION DE LA "DENSITÉ DU BATI" À PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

Déroulement de l'étude.

2.2.1) STATISTIQUES DESCRIPTIVES CONCERNANT LE DESCRIPTEUR "DENSITÉ DU BATI" OBSERVÉ SUR LA MOSAÏQUE PHOTOGRAPHIQUE AU 1/23.000.

2.2.1.1) Rappel des caractéristiques statistiques des 6 canaux de Thematic Mapper.

2.2.1.2) Statistiques descriptives sur les variables radiométriques

- a) *Valeurs radiométriques brutes.*
- b) *Indice de végétation $(TM4-TM3) / (TM4+TM3)$.*
- c) *Néo-canaux $(4-5), (4+5), (4-5)/(4+5)$.*
- d) *Composantes principales ACP1, ACP2.*

Conclusions partielles.

2.2.1.3) Etude sommaire de la texture des zones morphologiquement homogènes

- a) *Ecart type local et moyenne locale*
- b) *Matrices de cooccurrences de niveaux de gris*
 - *Etude des matrices de cooccurrences*

Radiométrie et densité du bâti : un lien effectif.

2.2.2) ECHANTILLON DE TRAVAIL.

2.2.2.1) Principe de tirage des îlots échantillon.

2.2.2.2) Enquête sur le terrain (Marseille - Juin 1986).

2.2.2.3) Analyse des photographies aériennes.

- a) *Superposition d'images générées par SAVANE.*
- b) *Fiche de saisie - Méthode de calcul - Mesures.*
- c) *Problèmes d'interprétation des photographies aériennes.*

2.2.2.4) Comparaison des méthodes de mesure de surface des îlots de l'échantillon morphologique.

2.2.2.5) Statistiques sur la densité du bâti.

a) *Etude de la distribution du coefficient densité du bâti bâti.*

b) *Répartition du coefficient de densité du bâti par modalité.*

PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES ET ENQUETE SUR LE TERRAIN : DEUX IMPÉRATIFS POUR INTERPRÉTER UNE IMAGE SATELLITE EN MILIEU URBAIN.

2.2.3) RÉGRESSIONS ENTRE VARIABLES RADIOMÉTRIQUES ET COEFFICIENT DE DENSITÉ DU BATI.

2.2.3.1) Régressions dans les sous-îlots.

a) *Matrices de corrélations*

b) *Régressions simples, multiples et polynomiales.*

c) *Etude des résidus.*

. *Etude des résidus de la régression simple avec l'indice de végétation.*

. *Etude des résidus de la régression polynomiale avec l'indice de végétation.*

. *Etude des résidus de la régression multiple $BATI/IND1, ACP1$.*

. *Etude de la régression multiple $BATI/IND1, ACP1, IVG$.*

DENSITÉ DU BATI ET MOYENNE DES LUMINANCES : UNE CORRÉLATION ÉTABLIE.

2.2.4) CLASSIFICATIONS D'IMAGES SATELLITE SUIVANT LA DENSITÉ DU BATI.

• *Précisions sur l'évaluation de la fiabilité de ces classifications.*

2.2.4.1) Seuillage de la régression multiple la plus intéressante

a) *Seuillage des pixels.*

b) *Seuillage des îlots.*

• *Seuillage des classes à l'aide des nuées dynamiques.*

• *Seuillage à partir de valeurs extrêmes appartenant à des îlots typiques de leur modalité initiale.*

• *Seuillage à partir de valeurs extrêmes appartenant à des îlots typiques de leur modalité initiale.*

Prise en compte de la zone : une nette amélioration de la performance des classifications radiométriques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

2.3) MISE AU POINT D'UNE TYPOLOGIE DE L'OCCUPATION DU SOL EN MILIEU URBAIN À PARTIR D'UNE IMAGE SATELLITE.

a) *Rappel.*

b) *Comment caractériser la distribution radiométrique des îlots. Calcul des quantiles.*

c) *Seuils et effectifs théorique des quantiles par canal.*

d) Pourquoi une analyse factorielle des correspondances (AFC) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH)?

2.3.2) ANALYSE DES VARIABLES RADIOMÉTRIQUES DES SOUS-ILOTS PEU DENSÉMENT BATIS.

2.3.2.1) Analyse Factorielle des Correspondances des variables brutes de Thematic Mapper.

- a) Généralités- Pourcentage de variance des axes factoriels.*
- b) Etude des axes factoriels.*

2.3.2.2) Classification Hiérarchique Ascendante des sous-îlots peu densément bâtis en fonction des variables radiométriques.

. Remarques et premières constatations.

DIFFÉRENCIATIONS ACQUISES : PAVILLONNAIRE, GRANDS ENSEMBLES DE BATIMENTS ET ESPACES AGRICOLES.

2.3.3) ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES DES SOUS-ILOTS DENSÉMENT BATIS.

- a) Généralités. Variance des axes factoriels.*
- b) Etude des axes factoriels*

2.3.3.2) Classification Hiérarchique Ascendante des sous-îlots densément bâtis en fonction des variables radiométriques (quantiles).

DIFFÉRENCIATIONS ACQUISES : PAVILLONNAIRE DENSE, CENTRE VILLE ET GRANDS BATIMENTS.

2.3.4) TYPOLOGIE DU TISSU URBAIN À PARTIR DES IMAGES DU SATELLITE THEMATIC MAPPER.

IMAGE ET STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN : PREMIERS CONSTATS.

3) STRATIFICATION DE LA VILLE DE QUITO (EQUATEUR) À PARTIR D'IMAGES SPOT : PREMIERE MISE EN OEUVRE DE LA MÉTHODE DE SONDAGE

Introduction.

- *Situation du problème par rapport à l'expérimentation effectuée à Marseille.*
- *Présentation du plan d'expérimentation.*

3.1) ENQUETE MORPHOLOGIE URBAINE. (OCTOBRE-DÉCEMBRE 1986). COLLECTE ET EXPLOITATION DES DONNÉES.

3.1.1). OBJECTIFS DE L'ENQUETE.

3.1.2) MISE EN OEUVRE DE L'ENQUETE "MORPHOLOGIE"

3.1.2.1) Sélection de l'échantillon.

3.1.2.2) Elaboration des documents d'enquête.

3.1.2.3) Collecte des données.

- . *Temps de collecte.*
- . *Conditions de collecte.*

3.1.3) INTÉGRATION DES DONNÉES DE L'ENQUETE

3.1.3.1) Codification.

3.1.3.2) Saisie.

3.1.3.3) Contrôles de cohérence ; redressement des mesures de bâtiments.

- . *Redressement des mesures de bâtiments.*
- . *Recodage.*

3.1.4) ÉVALUATION DE LA PRÉCISION DES MESURES DE SURFACES DES ÎLOTS.

3.1.4.1) Sélection des îlots de l'échantillon.

3.2.4.2) Différentes méthodes de mesure de la surface.

- a) *Méthode de mesure sur écran.*
- b) *Méthode de mesure sur tirage photographique.*
- c) *Méthode de mesure sur le terrain.*
- d) *méthode de mesure de la surface de référence.*

3.2.4.3) Résultats comparatifs des 3 méthodes de mesure.

- a) *Remarques liminaires.*
- b) *Influence de la taille des îlots sur la précision de la mesure de surface.*
- c) *Influence de la pente sur la précision de la mesure de surface.*

Précision de la mesure de la surface des îlots : 10%.

3.2) SEGMENTATION DE L'IMAGE FONDÉE SUR L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE.

• Présentation de la méthode d'extraction de la voirie à l'aide d'algorithmes de morphologie mathématique

3.2.0) PRÉLIMINAIRES - PRÉTRAITEMENTS SUR LES IMAGES : RECTIFICATION GÉOMÉTRIQUE INTER-BANDES.

3.2.1) DÉFINITION DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT CHOISIE POUR EXTRAIRE LA VOIRIE.

3.2.1.1) Transformation "chapeau haut de forme".

a) Extraction des vallées. Éléments théoriques.

b) Choix des paramètres. Aspects pratiques.

3.2.1.2) Amincissement du réseau par itération successives.

3.2.2) AMÉLIORATION DE L'EXTRACTION DE LA VOIRIE.

3.2.2.1) Fermeture des contours.

Présentation de la méthode.

3.2.2.2) Suppression des zones contenant 1 pixel.

3.2.2.3) Ebarbulage et suppression des pixels isolés

LA CRÉATION DE ZONES PLUTÔT QUE L'EXTRACTION RÉELLE DE LA VOIRIE.

3.3) CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES SUR LE SITE DE QUITO

3.3.1) MISE EN ŒUVRE DE LA MINI-BASE DE DONNÉES.

3.3.1.1) Préparation des documents cartographiques.

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

3.3.2) CORRECTION GÉOMÉTRIQUE DES IMAGES SPOT À PARTIR DU SUPPORT CARTOGRAPHIQUE.

3.3.3) ÉVALUATION DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE BASÉE SUR LES ALGORITHMES DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE.

3.4) PREMIÈRE CLASSIFICATION SUR "LA DENSITÉ DU BATI".

3.4.1) DÉTERMINATION VISUELLE DE LA LIMITE URBAINE.

3.4.1.1) Documents utilisés.

3.4.1.2) Mise en œuvre et règles de décision.

3.4.1.3) Validation.

3.4.2) DÉTERMINATION AUTOMATIQUE DE LA LIMITE URBAINE À L'AIDE DE L'INDICE DE VÉGÉTATION ET DE L'ÉCART-TYPE LOCAL CALCULÉ SUR LE CANAL PANCHROMATIQUE.

3.4.2.1) Choix des néo-canaux.

3.4.2.2) Choix des seuils.

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

• Commentaires.

UNE AIDE À LA DÉLIMITATION DE L'AIRE URBAINE À PARTIR D'UN TRAITEMENT SIMPLE D'UNE IMAGE SATELLITE.

3.4.3) STRATIFICATIONS VISUELLES À PARTIR D'UNE CLASSIFICATION "DENSITÉ DU BATI" CALCULÉE PAR PIXEL.

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

3.4.3.2) Evaluation classique de la classification.

3.4.3.3) Elaboration de la stratification, premiers résultats en terme de gain de précision des estimateurs démographiques.

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

3.5.1). RÉGRESSION POLYNOMIALE DE L'INDICE DE VÉGÉTATION.

a) Validation de la régression polynomiale.

b) Critique de la référence.

3.5.2) ANALYSE DISCRIMINANTE SUIVANT LA DENSITÉ DU BATI.

. Validation

UNE JUSTIFICATION DE L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE : L'AMÉLIORATION SENSIBLE DE LA CLASSIFICATION SUIVANT LA DENSITÉ DU BATI.

3.6) TYPOLOGIE DES ESPACES BATIS À PARTIR DES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES.

3.6.1) PRÉSENTATION.

3.6.1.1) Présentation des deux échantillons - Nature des individus.

3.6.1.2) Présentation des quantiles radiométriques - Nature des variables

3.6.1.3) Corrélation entre les différentes variables soumises à l'analyse.

3.6.1.4) Type de classification.

3.6.2) TYPOLOGIE DES ILOTS DENSÉMENT BATIS

3.6.2.1) Analyse factorielle des correspondances des îlots densément bâtis.

. Interprétation des axes factoriels.

3.6.2.2) Classification hiérarchique ascendante des îlots densément bâtis.

3.6.3) TYPOLOGIE DES ILOTS PEU DENSÉMENT BATIS.

3.6.3.1) Analyse factorielle des correspondances des îlots peu densément bâtis.

. Interprétation des axes factoriels.

3.6.3.2) Classification hiérarchique ascendante des îlots peu densément bâtis.

3.6.4) COMPARAISON AVEC D'AUTRES NOMENCLATURES ISSUES DE TYPOLOGIES DIVERSES.

LES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES RENDENT COMPTE DE CERTAINS MODÈS D'OCCUPATION DU SOL.

STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN QUITÉNIEN : QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONCLUSION.

a) Les outils de travail.

b) Détermination de l'espace urbanisé et évaluation de la densité du bâti.

c) Mise au point d'une typologie du tissu urbain.

d) Apport des stratifications élaborées à partir d'images satellite.

e) Éléments de comparaison SPOT-HRV / LANDSAT Thematic Mapper.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Mise en oeuvre de la méthode de collecte de données démographiques.

Traitement d'images satellite haute résolution : des retombées sur l'étude de la morphologie des villes.

Perspectives.

TABLE DES MATIERES

1

**ACQUIS METHODOLOGIQUES,
SITUATION DE LA RECHERCHE ET
PRATICABILITE DE LA METHODE.**

INTRODUCTION.

Lacunes des systèmes de collecte démographique dans les villes des pays en voie de développement : des éléments de réponse pour y remédier ?

Les populations urbaines des villes des pays en développement posent des problèmes spécifiques d'observation du fait des caractéristiques de l'urbanisation dans ces pays, des modes particuliers de résidence des habitants (systèmes complexes de pluri-résidences), et de la rareté des éléments de connaissance habituels tels que cartes, plans cadastraux, ou fichiers administratifs. De plus, les rythmes de croissance démographiques très élevés ainsi que les modifications rapides du tissu urbain rendent nécessaires des observations répétées et fréquentes de ce milieu complexe à appréhender. 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, ce qui, compte tenu des délais inhérents aux traitements informatiques et à l'exploitation des données, rend les résultats caducs dès leur publication. D'autre part, les enquêtes par sondage, **sans cartographie fidèle et exhaustive**, sans stratification spatiale ne permettent pas d'obtenir des résultats fiables et localisés.

Il apparaît donc que "seul un système basé sur la technique des sondages peut remplir les conditions de souplesse et de rapidité nécessaires dans les ville à croissance démographique rapide"¹. Cependant, ces enquêtes ne peuvent aboutir à des extrapolations fiables que s'il existe une base de sondage complète et à jour et utiles pour les aménageurs si les résultats peuvent être spatialisés.

Compte tenu essentiellement des carences dans les cartographies des villes des pays en développement, ces conditions ne sont quasiment jamais remplies.

Une connaissance précise de l'espace urbain nous semble constituer un élément fondamental d'optimisation des techniques d'enquête par sondage. Connaître de façon approfondie la morphologie² du tissu urbain³ permet de réaliser **une stratification de l'espace urbanisé** qui ne peut qu'améliorer le résultat d'une enquête effectuée sur une base de sondage stratifiée et exhaustive.

Comparativement aux possibilités offertes récemment par les satellites d'observation de la terre LANDSAT et SPOT, les missions aériennes deviennent de plus en plus rares, **spatialement restreintes et onéreuses** (à surface égale environ 15 fois le prix d'une image). Par contre, ces satellites récemment mis sur orbite délivrent des images dont la résolution spatiale est de plus en plus précise (10 et 20 mètres pour SPOT-HRV, 30 et 120 mètres pour Landsat Thematic Mapper. Leur **répétitivité** (16 jours pour LANDSAT TM et 3 à 4 jours pour SPOT), ainsi que la **richesse des informations** (multiples fenêtres radiométriques, panchromatique, visible, infra-rouge proche, moyen et thermique, possibilité de vision stéréoscopique,...) qu'ils enregistrent rendent leur utilisation attractive. De plus, le caractère numérique de ces données permet d'envisager des traitements (recalage géographique, amélioration d'image, composition colorée, superposition multitudes, création de néo-canaux "thématiques" (Indice de végétation), classifications multispectrales...) susceptibles d'aider à mettre en évidence de façon plus objective ce que l'on recherche.

¹ A propos du traitement informatique des données localisées. Une expérience en cours : télédétection et observation des populations urbaines, F. DUREAU, bibliographie.

² Nous reprenons, pour l'étude du tissu urbain, la définition exact du terme morphologie que propose le Grand Larousse de la langue française "étude de la forme et de la structure des êtres vivants".

³ "Le tissu urbain est l'expression physique de la forme urbaine. Il est constitué par l'ensemble des éléments physiques qui contribuent à celle-ci -- le site, le réseau viaire, la division parcellaire, le rapport entre les espace bâtis et non bâtis, la dimension, la forme et le style des bâtiments -- et par les rapports qui relient ces éléments." P. MERLIN, F. CHOAY, Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, PUF, Paris, 1988.

Néanmoins, l'interprétation de ces images nouvelles en milieu urbain est plus délicate que celle des photographies aériennes auxquelles nous sommes désormais habitués, et de plus, les traitements classiquement utilisés en milieu naturel doivent être réadaptés en fonction des spécificités des espaces urbanisés : essentiellement le caractère hétérogène et structuré du tissu urbain, ainsi que la taille des éléments le constituant en comparaison avec le milieu "naturel".

.Objectifs du programme de recherche de l'ORSTOM.

Depuis 1985, le département D de l'ORSTOM a débuté un programme de recherche sur "l'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines". L'objectif principal assigné au programme de recherche est de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines utilisant l'information apportée par les satellites à haute résolution (SPOT et LANDSAT) sur la morphologie urbaine.

Deux hypothèses centrales sous-tendent ce programme :

- "1) il existe des relations étroites entre les caractéristiques morphologiques du milieu urbain et les caractéristiques démographiques et socio-économiques des habitants ;
- 2) on peut identifier sur les images satellite de type SPOT ou Thematic Mapper les caractéristiques morphologiques pertinentes pour l'observation démographique en ville."

C'est à partir de ces deux hypothèses que l'on peut envisager de mettre au point un système d'observation intégrant la télédétection spatiale qui produise des données démographiques spatialisées en milieu urbain⁴.

Il s'agit donc, pour ce qui nous concerne, d'utiliser l'information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, **par sondage** des données relatives aux populations urbaines.

La stratification de l'espace sera obtenue après traitement des images Thematic Mapper ou SPOT de façon à faire apparaître les différents descripteurs de la morphologie urbaine pertinents pour une observation démographique.

Ce travail se fonde sur un "pré-supposé" vérifié maintenant par plusieurs équipes, et que nous posons donc comme postulat : "l'hypothèse de base de la recherche qu'il existe des **relations internes au milieu urbain, notamment entre les données morphologiques et les données socio-économiques** sort confortée de l'expérience"⁵. Le chapitre 1.1 qui suit fait le point des différentes recherches effectuées à partir de documents photographiques ou satellitaires pour collecter des données démographiques.

Contexte de la recherche .

Ce projet s'inscrit dans une dynamique scientifique particulière au sein de l'ORSTOM. En effet, outre des chercheurs du département D, il implique des membres de l'Atelier de Télédétection et de l'Unité d'Infographie travaillant à la mise au point d'un système d'information géographique". Ces programmes se rejoignent sur une application commune : "l'Atlas Informatisé de Quito" (AIQ, fin des travaux prévue pour l'année 1990) qui comprend, outre la production classique d'un recueil de cartes, un volet de recherches sur la mise au point d'un observatoire urbain informatisé, géré par le système d'information géographique SAVANE, dont une partie des données serait actualisée à l'aide de la télédétection

⁴ F DUREAU et O. BARBARY, 1987. Pour une méthode de collecte démographique en ville intégrant la télédétection spatiale. Article à paraître dans informatique et sciences humaines, EHESS, 42P.

⁵ IAURIF, ROC, SIDAU, SEEE, 1983 - Les données urbaines. Système permanent de production rapide et économique. Recherche. Volume de synthèse, p 64.

. Présentation de l'équipe de recherche.

L'équipe ORTSOM comprend :

- F.DUREAU, géographe-démographe, responsable du programme de recherche, département Société Développement Urbanisme (S.D.U), ORSTOM.
 - O. BARBARY, statisticien, allocataire de recherche du Ministère de la Recherche et de la Technologie, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (E.H.E.S.S).
 - B. LORTIC, spécialiste en télédétection, unité télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliqué (L.I.A), ORSTOM.
- et moi même.

Les travaux photographiques ont été réalisés par :

- I. RANNOU, photographe spécialisée en télédétection, (L.I.A), ORSTOM.
- A.AING, photographe spécialisée en télédétection, (L.I.A), ORSTOM.

Les travaux liés à l'infographie ont été menés par :

- M. SOURIS, informaticien, (L.I.A), ORSTOM.
- F. PELLETIER, infographie, (L.I.A), ORSTOM.

Sur la partie du projet relative à Marseille, nous avons collaboré avec A. CHATELAIN, géographe de l'EHESS Marseille.

1.1) EXPOSÉ DU PLAN DE THESE - DÉFINITION DE LA MÉTHODE DE TRAVAIL- AXES DE RECHERCHE.

*Rappel : l'objectif central du programme de recherche.*¹

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

Les satellites renseignent de manière continue sur l'occupation du sol en milieu urbain : il s'agit donc, dans la méthode que nous développons, d'utiliser cette information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, **par sondage**, des données relatives aux populations urbaines.

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

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

Le volet consacré à l'interprétation des images des capteurs haute résolution tels que HRV de SPOT et Thematic Mapper de LANDSAT dans le cadre d'une étude démographique constitue le corps central de cette thèse.

Exposé du plan de thèse.

Ce travail, réalisé sur une période de trois ans, se scinde en trois parties d'inégale importance.

Dans la première, nous posons et vérifions les hypothèses de base en nous fondant sur les expériences déjà réalisées dans les domaines de l'utilisation de photographies aériennes ou d'images satellite pour des estimations démographiques (*Chap 1.2*), la prise en compte des **différenciations morphologiques internes à la ville** constituant l'une des nouveautés méthodologiques.

Une revue bibliographique sur l'état de l'art en télédétection urbaine (*Chap 1.3*) est l'occasion de vérifier le bien-fondé de notre recherche et de dégager les axes prioritaires de développement de méthodes concernant plus spécifiquement le traitement d'images satellite haute résolution en milieu urbain.

La faisabilité de la méthode, qui nécessite l'acquisition d'images satellite, par rapport à la météorologie, est évaluée (*Chap 1.4*) d'une façon statistique à Quito où nous avons bénéficié des données adéquates (nébulosité toutes les demi-heures), puis abordée de manière plus générale à travers l'analyse de cas de quelques exemples africains.

La seconde partie est consacrée à la **mise au point de la méthode** d'expérimentation que nous avons menée à Marseille. Cette phase s'est déroulée dans une ville pour laquelle nous disposons de trois types d'informations récentes et concomitantes, conditions indispensables pour cette étape de mise au point, une image satellite haute résolution, un recensement démographique et des données précises et complètes sur la morphologie urbaine.

Toute cette phase de mise au point et d'évaluation a pris place dans un contexte privilégié, puisqu'une **base de données localisées** gérée par le système d'information géographique SAVANE a été générée en intégrant à des niveaux géographiques distincts des informations aussi différentes que les données du recensement, des paramètres

¹ F. DUREAU, Rapport intermédiaire ATP CNRS/CNES.

décrivant la morphologie urbaine à partir de photographies aériennes et des images satellite (*Chap 2.1*). L'intégration de l'information issue des images satellite dans un tel système qui permet, entre autre, la localisation précise des sites-tests, pose des problèmes techniques, mais promet des répercussions méthodologiques, en remettant en cause l'individu classiquement considéré en télédétection, "le pixel" pour le remplacer par une nouvelle entité plus adaptée au milieu urbain : "la zone".

La densité de l'espace bâti constitue sans conteste le paramètre prépondérant pour étudier des caractéristiques démographiques. C'est donc ce critère que nous mettons prioritairement en évidence sur une image satellite (*Chap 2.2*) en nous basant sur un échantillon d'îlots INSEE repérés sur photographies aériennes et vérifiés à l'occasion d'une enquête réalisée sur le terrain.

On recense de nombreuses typologies en milieu urbain, la plupart sont inadaptées compte tenu de l'outil de mesure que constitue le radiomètre des satellites, sensible entre autre à la réflectance des matériaux des toitures des bâtiments mais indifférent à leur fonction dans la cité. L'élaboration d'une typologie propre à l'outil télédétection et décrivant des zones urbaines à l'aide de statistiques radiométriques fait l'objet de cette dernière partie (*Chap 2.3*)

La troisième étape consiste en une application opérationnelle en vraie grandeur à Quito (Equateur) de la méthode mise au point et évaluée à Marseille; la première application de notre méthodologie de collecte a eu lieu au cours du dernier trimestre 1987 à Quito (EQUATEUR), où nous avons réalisé une enquête démographique (Démographie / migrations) sur un échantillon d'îlots tiré de l'image SPOT (*Annexe A.3.8*).

Notons que cette application s'est déroulée dans un contexte différent de celui de la phase de développement méthodologique sur Marseille : nous travaillons sur le capteur SPOT-HRV et non plus LANDSAT TM, et sans base de données localisées.

Cette étape comprend deux parties, la première est consacrée à la mise au point des outils méthodologiques, alors que la seconde récapitule l'ensemble de résultats obtenus. L'enquête morphologie sur le terrain (*Chap 3.1*) demeure, dans la plupart des pays en développement, la solution incontournable pour interpréter et valider des traitements sur image satellite, ainsi que pour évaluer la précision des mesures de la surface des zones mesurée sur documents satellitaire, information déterminante pour extrapoler les résultats de "l'enquête Démographie/migrations".

En l'absence de zones pré-définies, il est indispensable de segmenter l'image satellite (*Chap 3.2*) afin d'obtenir des zones, entités les plus semblables possible à celles considérées dans la phase de mise au point de la méthode à Marseille, et dont la prise en compte s'est avérée comme la solution la plus pertinente tant au niveau conceptuel qu'en terme plus pragmatique de fiabilité de classification radiométrique.

La réalisation d'une mini-base de données localisées (*Chap 3.3*) n'a pour objectif que de permettre une évaluation de la fiabilité de l'extraction de la voirie utilisée pour définir les zones. C'est cependant l'occasion de recenser les difficultés auxquelles nous sommes confrontés compte tenu de la topographie chaotique de Quito, lorsque l'on désire superposer des images multi-dates et multi-capteurs (HRV et Thematic Mapper) ou différentes (image générée par le système de gestion de la base de données).

Les premiers résultats concernent la détermination de la limite urbaine uniquement à partir d'image satellite SPOT (*Chap 3.4.2*). Compte tenu d'impératifs de calendrier, une première stratification a été élaborée (*Chap 3.4.3*), suivant la densité du bâti, à partir d'une classification de pixels, l'image des zones n'ayant pas été générée à cette époque. C'est cette stratification qui a été utilisée pour la continuation du travail strictement démographique.

Reprenant la méthode développée à Marseille, nous avons ensuite classé les zones de l'image segmentée toujours suivant le critère de la densité du bâti en nous fondant sur l'indice de végétation (*Chap 3.5*) qui présente une forte corrélation avec la densité du bâti calculée sur échantillon à partir des résultats de l'enquête morphologie.

L'élaboration d'une typologie de l'espace urbanisé (*Chap 3.6*) en fonction des principes définis à Marseille est l'occasion de tester une nouvelle stratification et de comparer les

mérites respectifs des satellites SPOT et LANDSAT dans leur aptitude à discriminer les différents tissus urbains.

Le dernier chapitre (*Chap 3.7*) de cette partie quiténienne est consacré à une brève estimation des coûts qu'entraînent cette méthode de collecte de données démographiques

Définition de la méthode de travail.

Pour l'ensemble de nos travaux, nous avons opté pour une méthode basée sur l'analyse quantitative des images satellite, c'est à dire faisant largement appel à la statistique descriptive et à l'analyse des données.

Remarque importante : les données que nous avons traitées correspondent à des "**comptes numériques**" directement issus des bandes magnétiques, sans traitements radiométriques destinés à les transformer en réflectances vraies. Il s'agit donc de valeurs de luminance comprises entre 0 et 255.

En ce qui concerne le travail sur image satellite, nous privilégions le travail sur 2 échantillons d'individus distincts, le premier pour initialiser les classifications et le second pour valider les traitements. Le tirage de ces échantillons s'effectue de façon systématique ou aléatoire afin de pouvoir raisonner en terme statistique, ce qui permet de considérer comme valide et extrapolables, les résultats de fiabilité calculés sur échantillon.

La validation de tous les traitements d'image satellite est évaluée par rapport à une référence vérifiée sur le terrain et dont la fiabilité est éventuellement discutée.

Une stratification découle généralement de chacune des classifications réalisées sur image, la mesure de l'apport de cette stratification, en terme de gain de variance des estimateurs démographiques, est considérée comme la sanction terminale, puisque l'ensemble de ces travaux trouve sa justification dans une méthode de collecte de données démographiques.

La littérature consacrée à la télédétection nous a appris que, si les photographies aériennes constituent un apport d'informations très riche, l'enquête sur le terrain demeure cependant l'étape indispensable pour corroborer et vérifier l'ensemble de ces données quelquefois "anciennes". C'est pourquoi, nous avons apporté un soin tout particulier lors de cette étape déterminante.

Axes de recherche.

Les principaux axes de cette recherche à plusieurs niveaux sont les suivants :

- Enquête "morphologie", Tirage des échantillons - Quelle unité spatiale enquêter, Quelles informations collecter?
- Images satellite et système d'information géographique - Une répercussion méthodologique : quelle entité classer sur l'image satellite?
- Délimitation de la base de sondage ou comment ne conserver, sur une image satellite, que l'espace construit ? - Quelle validité attendre d'une telle détermination?
- Classification suivant une mesure de la densité de l'espace bâti - Quelle méthode pour quelle fiabilité?
- Typologie de l'espace urbain - Vers une nomenclature physico-fonctionnelle?
- Stratification de l'espace à partir de quelques classifications des images satellite - Quel est le gain apporté par les différentes stratifications ?
- Collecte des données démographiques et résultats - Quelle précision?

En termes plus généraux, l'observation de la ville à partir des satellites permet une remise en question ou une re-définition de certains concepts comme la limite urbaine, la

densité de l'espace bâti, ou la typologie du tissu urbain, et c'est en ce sens, que **l'analyse quantitative** de la ville à partir de données satellite favorise une vision novatrice de la ville dont nous tentons ici de mesurer les implications.

1.2) ACQUIS MÉTHODOLOGIQUE ISSU DE L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION AÉROPORTÉE ET SATELLITAIRE POUR RECUEILLIR DES DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES¹.

Se fondant sur la bibliographie publiée depuis les années 30 et mise en application depuis les années 50 (Tableau 1.2.1), F. DUREAU dégage l'hypothèse principale qui conditionne ce type d'étude : **il existe des relations entre les caractéristiques morphologiques du tissu urbain et les caractéristiques démographiques et socio-économiques des habitants**. Partant de cette hypothèse plus ou moins précisée, de nombreux auteurs ont développé des méthodes d'estimation de population à partir de photographies aériennes, puis d'images satellite (Tableau 1.2.2). De telles méthodes paraissent particulièrement adaptées aux pays en développement pour lesquels le manque de données démographiques et socio-économiques exhaustives est particulièrement sensible.

On peut dégager trois grandes familles de travaux différents quant aux méthodes, objectifs et moyens mis en oeuvre :

- **dénombrer les logements** et, connaissant par le dernier recensement le nombre moyen d'habitants par logement, extrapoler à l'ensemble de la ville,
- **interpréter les photographies aériennes** pour :
 - **recueillir par sondage**, des données relatives aux populations urbaines avec, pour avantage, un allègement de l'échantillon d'enquête et une spatialisation des résultats,
 - **actualiser l'effectif de population** d'une ville ayant fait l'objet antérieurement d'un recensement de population, ce qui suppose une permanence temporelle des densités démographiques par strate,
- **modéliser l'effectif de population** en se fondant sur la superficie de la tache urbaine; cette superficie peut être mesurée sur une image satellite.

Une des conclusions principales à laquelle aboutissent la plupart des chercheurs, est que **"l'amélioration de la précision de l'estimation passe par la prise en compte des différenciations internes à la ville"**. Cette différenciation longtemps basée sur l'interprétation de photographies aériennes est remise en question dans les pays en développement où elles sont coûteuses et rares. De tels inconvénients n'apparaissent évidemment pas si l'on travaille sur des images satellite, ce qui pose cependant d'autres problèmes dont le principal est l'interprétation de ce nouveau type de documents. En effet, la caractérisation et la différenciation fine du tissu urbain en plusieurs strates requiert une résolution spatiale importante et une richesse radiométrique que seuls les derniers capteurs Thematic Mapper et HVR sont en mesure d'apporter. En conséquence, vu le caractère récent de ces deux systèmes, des méthodes novatrices d'interprétation de ces images restent à développer.

¹Ce chapitre est constitué dans sa plus grande partie par un résumé actualisé du travail achevé par F.DUREAU en décembre 1986 "Le point sur l'utilisation de la télédétection aérienne et spatiale pour l'observation des populations citadines à travers la littérature française et anglo-saxonne", in Rapport ATP CNRS/CNES, pp 29-37.

Tableau 1.2.1 - Utilisation de données de télédétection aérienne et spatiale pour des estimations démographiques -

Auteur	Année	Ville (PAYS)	Document utilisé
GREEN	1956	Birmingham (USA)	Photo. aériennes N/B 1/7500
PORTER	1956	LIBERIA	Photo. aériennes N/B
HADFIELD	1963	Chicago (USA)	Photo. aériennes N/B 1/4800
BINSELL	1967	Chicago (USA)	Photo. aériennes Couleur 1/5240
HOLZ et al	1969	40 villes du Tennessee (USA)	Photo. aériennes Haute Altitude
MURET (CRU)	1969	Auxerre (FRANCE)	Photo. aériennes N/B 1/2000
LINDGREEN	1970	Boston (USA)	Photo. aériennes IRC 1/20000
COLLINS et al	1971	Leeds (Angleterre)	Photo. aériennes N/B 1/10000
DUEKER et al	1971	Washington (USA)	Photo. aériennes Haut. Alt. 1/50000
HSU	1971	Atlanta (USA)	Photo. aériennes N/B 1/5000
ANDERSON et al	1973	23 villages du Kansas (USA)	Photo. aériennes 1/20000
VERNIERE	1973	Pikine (SENEGAL)	Photo aériennes N/B 1/5000
KRAUS et Al	1974	4 villes de Californie (USA)	Photo. aériennes IRC 1/60000
HORTON	1974	Washington (USA)	Photo. aériennes 1/50000
ALLAN et al	1975	Wolaneo (ETHIOPIE)	Photo. aériennes
D'ALLEUX	1975	Lagos (NIGERIA)	Photo. aériennes
HENDERSON et al	1975	Albany (USA)	Photo. aériennes N/B 1/24000
OGROSKY	1975	18 villes, Puget Sound Region	Photo. aériennes IRC Ht Alt 1/135000
THOMPSON	1975	Washington (USA)	Photo. aériennes Haute Altitude
DAYAL et al	1976	AFGHANISTAN	Photo. aériennes
SUJARTO	1978	Bandung (INDONESIE)	Photo. aériennes
HENDERSON	1979	USA	Photo. aériennes 1/25000
LO	1979	Hong Kong	Photo. aériennes
LO et CHAN	1980	Sheuna Shui-Fan (HONG KONG)	Photo aériennes
CLAYTON et al	1980	Goleta Valley, St. Barbara (USA)	Photo. aériennes IRC 1/63360
ADENIYI	1983	Lagos (NIGERIA)	Photo. aériennes 1/20000
IAURIFet Al	1983	Niamey (NIGER)	Photo aériennes 1/15000
NEVES et Al.	1984	S José Dos Campos (BRESIL)	Photo aériennes N/B 1/10000
OLORUNFEMI	1984	Ilorin (NIGERIA)	Photo. aériennes N/B 1/8000
POLLE	1984	Teheran, Colombo (SRI LANKA)	Photo. aériennes 1/10000 et 1/9000
WATKINS	1985	Boulder, Colorado (USA)	Photo aériennes N/B 1/20. et 60.000
LO	1986	Athens, Georgia (USA)	Photo aériennes N/B 1/12 000
IAURIF	1987	Bouaké (COTE D'IVOIRE)	Photo. aériennes
SABOL	1968	USA	Image radar
WELLAR	1969	San Antonio et Houston (USA)	Image du satellite GEMINI
REINING	1973	NIGER et HAUTE VOLTA	Image LANDSAT
MURAI	1974	Tokyo (JAPON)	Image LANDSAT
LO et al	1977	Villes de 500000 à 2500000 Hbts	Image LANDSAT

(D'après ADENIYI P.O., 1983, Table 1, Page 546, recherche bibliographique de F.DUREAU et complément A.MICHEL)

Tableau 1.2.2 - Quelques exemples d'estimations de population à partir de photographies aériennes et images satellite

Auteur	Ville	Niveau Géo.	Source d'infor.	Référence	Méthodologie	Résultats
HSU (1971)	Atlanta (USA)	Populations urbaine et rurale de la circonscrip.	<u>Photographies aériennes</u> N/B 1/5000 <u>Recensement :</u> Nombre moyen de personnes par logement	Recensements démographie	Comptage des logements sur les photo. aériennes Estimation de la population en appliquant une équation linéaire intégrant Nb de log. et Nb moyen de pers. par log.	Erreur relative sur la population totale : +/- 3 %
WATKINS (1985)	Boulder (USA)	3 quartiers de 2800 à 6200 H. en 1970 et 1980	<u>Photo.aériennes:</u> N/B 1970 : 1/20 000 1980 : 1/6000 <u>Rect :</u> Taux de logements vides et Nbre moyen de pers. par logement (Taux uniques pour les 3 quartiers, cal- culés pour l'habitat indiv. et le collectif)	Recensements dém. 1970 et	Comptage des logements des 3 quartiers aux 2 dates sur les photo. aériennes Estimation de la population en appliquant une équation linéaire intégrant Nb de log, Taux de log. vides, Nb moyen de pers. par logement (pour l'habitat individuel et pour l'habitat collectif) sur photographies aériennes	Erreur relative sur le nombre de logements : entre 4,91% et -0,37%, par quartier -0,79 % et -3,36 %,total 3 quartiers. Erreur relative sur la population : entre -6,64% et +16,57%, par quartier -1,98% et + 8,54%,total des 3 quartiers <u>Conclusions</u> Bon dénombrement des logements Habitat individuel : 1/20000 à 1/40000 Habitat collectif : 1/6000 à 1/10000 <u>Facteur d'amélioration</u> calculer les taux de log. vides et le Nb moyen de pers. par logement, par quartier de la ville

VERNIERE (1973)	Pikine (Sénégal)	Zones morpho homogènes de la banlieue de Dakar (Pop. Tot 135.000 Hab.)	<u>Photo. aériennes</u> N/B1/5000 (1961, 1963, 1967, 1970) <u>Enquête démo</u> sur échantillon de 8 carrés de sondage (1970-71) : effectifs de population	Recensements OMS, ISEA, administratif Enquête stat. nationale	Zonage en espaces homogè- nes sur photo. aériennes de 1970 (morphologie urbaine) Calcul des Coef. de surface bâtie habitable (CSBH) pour 38 carrés de sondage, sur les photo. aériennes de 1970. Pour les 8 carrés où la pop. est connue, calcul du coef. Densité de pop/CSBH. En supposant que de coef. est constant dans chaque zone homogène, estimation des densités et des effectifs par zone en 1970 et pour les années antérieures.	<u>Bilan</u> Erreur relative sur la population totale : entre -5,6 % et + 3 %, selon les années. <u>Facteurs d'amélioration</u> 3 intérêts de la méthode : 1) Spatialiser les résultats d'une enquête démo. globale 2) Actualiser des chiffres globaux de population entre 2 recensements 3) Moyen de connaissance autonome en l'absence de toute autre données, base pour une enquête par sondage.
KRAUS et al. (1974)	4 villes de Californie (USA)	Villes entières de 58.000 à 259.000 Hab.	<u>Photo. aériennes</u> IRC 1/60.000 <u>Rect:</u> densité de population pour 3 types de quartier: Habitat individuel Habitat collectif Caravanes	Recensement démo.	Délimitation sur photo. des 3 types de quartier, pour chaque ville. Calcul des surfaces corres- pondantes. Calcul de la densité moyenne de chaque type de quartier (par ville) : moyenne des résultats obtenus sur une série de sondages aléatoires Estimation de la population de chaque ville en appliquant l'équation : Pop. totale d'une ville = moyenne des densités par types de quartier pondérée par la surface de ceux-ci	<u>Bilans</u> Erreur relative sur la population totale : entre -9,17% et +7%, selon les villes -4,51%, pour le total des 4 villes <u>Facteurs d'amélioration</u> 1) Utiliser des photo. aériennes à une échelle > 20.000 2) Ne pas exclure les quartiers à vocation industrielle et commer- ciale 3) Affiner la classification selon le type d'occupation du sol

WELCH (1977)	30 villes chinoises	Villes entières > 500.000 Hab.	<u>Images LANDSAT</u> : compositions colorées (C5 et C7) <u>Cartes et recens.</u> de 150 villes de Taïwan : calcul des équations linéaires et log. entre pop. et surf. des villes(1951-66)	Recensements dém. des 30 villes de Chine	Mesure de la superficie de chaque ville sur l'image LANDSAT au 1/500.000 Estimation de la population de chaque ville en appliquant les 2 séries d'équations mises au point sur Taïwan	Bonne concordance entre résultats calculés par les modèles et ceux des recensements démographiques. <u>Facteurs d'amélioration</u> 1) Utiliser une image au 1/250.000 2) N'appliquer le modèle qu'aux villes couvrant une surface > 10 Km ² 3) Utiliser un modèle linéaire pour les villes >2500.000 Hab., et logarithmique pour les villes plus petites
IAURIF et Al 1987	Bouaké Cote d' Ivoire	Ville entière 250 000 Habs	<u>Photo aérienne</u> Ech 1/10 000 Plan 1/10 000 Projet lotissement Ech 1/2 000 Plan Topo 1/20 000	Recensement dém. (1985)	Enquête par sondage à 2 niveaux.(parcelle,ménage) et 2 degré (pour niveau 2) tirage aléatoire sur liste Estimation de la population par pondération, par régres- sion Typologie des îlots issue de * l'interprétation des P.A * C.A.H sur variables P.A	2 % (population totale)-pondération de -14 à 84% suivant les quartiers - 1,6 % (population totale)-régression de - 39 à 48 % suivant les quartiers <u>Facteurs d'amélioration</u> 1) Prendre en compte la localisation 2) Intégrer beaucoup de variables pour optimiser la typologie automatique des îlots
LO 1986	Athens Georgia U.S.A	Ville entière 50 000	<u>Photo aérienne</u> 1/12 000 N et B Vue stéréoscopie	Projection recensement de 1980	Idem article précédent Comptage des logements après photo-interprétation 3 types de logements : - pavillonnaire - résidentiel - collectif	- 9,2% (nombre de logements) - 1,7 % (population totale) <u>Facteurs d'amélioration</u> 1) Regrouper les petites unités 2) Affiner la photo-interprétation

*synthèse des articles de HSU (1971), VERNIERE (1973), KRAUS et al. (1974), LO et WELCH (1977), WATKINS (1985), LO (1986), IAURIF (1987) de F.DURE.
complétée par A.MICHEL)*

Mettre en oeuvre une méthode complète d'observation démographique par sondage, intégrant la morphologie du tissu urbain observable sur image satellite, est donc envisageable en s'inspirant des travaux menés sur photographies aériennes. Le développement de cette nouvelle méthode infère donc 3 axes de recherche principaux :

- l'interprétation des images satellites à haute résolution en milieu urbain :
 - * quelles sont les informations contenues dans ces images?
 - * comment et à quel niveau extraire les informations concernant la morphologie urbaine?
 - * quelle fiabilité obtient-on?
- l'étude des relations bâti / population et des sondages spatiaux en démographie urbaine :
 - * quels sont les descripteurs de la morphologie urbaine pertinents pour observer des caractères démographiques?
 - * quelle unité spatiale enquêter?
 - * quelle est la stratégie de sondage la plus efficace?
- le développement de modules spécifiques aux données de télédétection, qui rejoignent le système d'information géographique SAVANE mis au point par l'Unité d'Infographie de l'ORSTOM :
 - * pour localiser les zones d'étude,
 - * pour mettre en relation et croiser les données issue de l'image satellite, les informations morphologiques et démographiques afin de favoriser l'interprétation des images satellite et la compréhension des relations entre morphologie et démographie.

Le premier axe fait plus particulièrement l'objet de cette thèse.

1.3) SITUATION DU PROBLEME PAR RAPPORT À LA BIBLIOGRAPHIE DE LA TÉLÉDÉTECTION EN MILIEU URBAIN.

Le milieu urbain, caractérisé par l'hétérogénéité et la petitesse de ses éléments constituants, n'a que très peu fait l'objet de recherches dans le domaine de l'imagerie satellitaire. Jusqu'à ces derniers temps, la faible résolution spatiale des capteurs (57*79 m pour Landsat MSS) par rapport aux dimensions des éléments urbains (bâtiments, voiries,...) n'incitait pas au développement de méthodes d'interprétation. Cependant, l'apparition d'une nouvelle génération de satellites à haute résolution (SPOT-HRV et LANDSAT-Thematic Mapper) relance l'intérêt pour ces techniques qui permettent d'envisager une étude plus fine de la ville et de sa complexité. Au cours de cette revue bibliographique, nous avons choisi de confronter les expériences et les résultats des chercheurs qui se sont penchés sur l'étude du milieu urbain en **regroupant les articles par capteur**. Un tel choix favorise l'émergence des conclusions et des perspectives communes, toutes problématiques confondues et indique donc les axes de recherche à explorer, la finesse de la résolution spatiale étant un des critères clefs de l'interprétation des images en milieu urbain.

Un exemplaire de la fiche de synthèse qui a été utilisée pour dépouiller tous ces articles, ainsi que des commentaires comparatifs concernant les pré-traitements, les typologies utilisées, et les méthodes de classification peuvent être consultés en **Annexe A.1.3**.

1.3.1) LES DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE.

En ce qui concerne la procédure par enquête, on regrettera le manque de détails caractérisant la méthode d'échantillonnage suivie, qui ne figure que dans peu d'articles dépouillés, ainsi que le petit nombre d'informations concernant le nombre de zones ou de pixels composant l'échantillon de vérification ou d'entraînement. De telles indications hypothèquent pourtant fortement la validité des mesures de fiabilité des classifications. FORSTÉR B., 1980 insiste sur l'importance fondamentale de la précision de la localisation sur l'image et sur le terrain des zones d'entraînement (pour initialiser la classification) et des zones test (pour quantifier la fiabilité de celle-ci), d'où la nécessité de corriger géométriquement les images. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu urbain comparativement au milieu naturel ou agricole, il affirme "**par conséquent, les vérités terrain doivent être spatialement mises en relation avec les images Landsat à un niveau inférieur au pixel si l'on veut procéder à un examen fructueux de la corrélation entre l'occupation du sol et l'image**".

Les indications relatives aux cartes, échelle, date, organisme sont souvent incomplètes. Par contre, la date de prise des photographies aériennes (IRC ou Panchromatique) est généralement très proche de la date d'acquisition des images satellite.

1.3.2) IMAGE LANDSAT MSS.

Objectifs.

Cinq grands objectifs sont au centre des préoccupations des auteurs:

- Tester les potentialités du satellite pour une classification des différents modes d'occupation du sol.
- Evaluer les capacités de MSS à détecter les changements d'affectation pour, éventuellement, actualiser une banque de données géographiques.
- Mettre au point une typologie, de préférence basée sur des critères radiométriques, qui réponde à la fois aux besoins des aménageurs et des télédéTECTEURS.
- Déterminer l'influence de traitements (filtres, ACP, indices, etc...) ou l'apport de paramètres texturaux sur l'amélioration des classifications, et comparer la fiabilité des différents types de classifications.

- Réaliser de façon automatique une carte thématique de l'occupation du sol.
- Produire une estimation de la population par corrélation directe avec les variables radiométriques.

Conclusions.

Les informations recueillies à l'aide de la télédétection sont de nature bio-physique et cela pose des problèmes fondamentaux de correspondance avec les typologies urbaines usuelles qui sont de nature essentiellement fonctionnelle [BALLUT et al, 1980] ; il est donc urgent de définir une nomenclature adaptée à la télédétection et à l'urbanisme.

La définition spatiale de MSS est inadaptée à l'étude des villes. Compte tenu de la taille moyenne des éléments urbains, se pose le problème d'interprétation de la valeur du pixel : "est ce la valeur moyenne générale du pixel ou bien la moyenne de la réflectance de deux objets très contrastés ?" [BALLUT A., 1979].

La pollution urbaine introduit un facteur perturbant la réflectance [BOZET et al, 1978], mais ce type de contradiction urbaine est analysable par télédétection au même titre que les micro-climats ou l'état de la végétation [BARDINET C., 1982].

Le choix des sites d'entraînement est plus important que le choix de la classification [LO C.P., 1985]; cependant la classification selon la distance euclidienne semble la plus fiable, et c'est, de plus, la moins coûteuse. L'analyse diachronique de données multispectrales est à conseiller car elle permet de lever certaines ambiguïtés dans l'interprétation [SOYER et al, 1982].

Perspectives

Tenir compte de la texture dans le processus de classification, à l'aide de paramètres texturaux [BALLUT A, 1979], [CARTER et al, 1980] ou de filtres spatiaux [BOZET et AL, 1980]. DINSTEIN (et al, 1973) dressait déjà à l'époque un bilan positif de l'apport des paramètres texturaux pour les classifications, confirmé par [JENSEN J.R., 1979], mais constatait aussi qu'un travail d'amélioration restait à fournir en particulier pour déterminer la taille idéale des fenêtres.

Utiliser le canal infra rouge thermique de TM [BALLUT A., 1979] ou les bandes radar [FERIER et al, 1979].

Mettre au point et calculer un indice de minéralisation [BALLUT A., 1979].

1.3.3) IMAGE THEMATIC MAPPER

Objectifs

Cinq objectifs principaux se dégagent de la littérature :

- Tester l'influence du filtrage / lissage sur la précision de la classification.
- Etudier les caractéristiques des 7 canaux de Thematic Mapper.
- Rechercher les combinaisons optimales pour classer ou cartographier l'espace urbain.
- Estimer l'utilisation, l'apport des données multispectrales pour la description du milieu urbain.
- Extraire d'une image une classification détaillée de l'occupation du sol en milieu urbain.

Conclusions.

QUATTROCHI (1983) obtient, après classification, des résultats qui lui permettent d'affirmer qu'il est possible de discriminer les habitats pavillonnaires des autres types d'habitats. On retiendra surtout l'amélioration de la classification due à l'utilisation de filtres spatiaux [CUSHNIE J.L., 1984], en particulier du filtre médian qui réduit la proportion de pixels non classés. L'originalité de sa méthode tient au fait qu'il intègre lors de la classification, un canal filtré avec des canaux TM intacts, ce qui combine les avantages d'un filtrage avec une perte moindre de résolution. IOKA M. et al concluent que "l'amélioration de la résolution spatiale n'implique pas nécessairement un accroissement de la précision des classifications", ils préconisent donc la prise en compte de l'aspect spatial des données.

TOLL (1985) constate qu'il existe une redondance à l'intérieur des zones spectrales, et que l'on peut sans perte significative de précision supprimer les canaux TM2 et TM7.

1.3.4) COMPARAISON THEMATIC MAPPER /MSS /SPOT /PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

Tout d'abord, en ce qui concerne la *comparaison entre TM et MSS*. Selon [ANUTA et al., 1984], la classification des données TM est meilleure, quelle que soit la classe choisie. Des classes inexistantes ou inséparables sur une image MSS peuvent être prises en compte avec TM (plages, routes, etc...). Cette affirmation est quelque peu tempérée par TOLL D.L. (1985) qui, s'il s'accorde à constater un gain de 8,9% dû à l'addition des canaux TM1,5 et 7, ainsi qu'un gain de 5,2% dû à la quantification sur 8 bits de TM, constate aussi une perte de précision due à l'augmentation de la résolution spatiale qui augmente la variance intra-classe lors du processus de classification. Il note, de plus, que les canaux TM 1, 2, 3 sont suffisants pour discriminer l'habitat urbain, mais rappelle l'intérêt du canal TM6 (infra rouge thermique) pour différencier les commerces des industries.

Les conclusions de l'article de KENNARD et al, 1984 sont très semblables en ce qui concerne *SPOT*. En effet si la meilleure résolution spatiale de SPOT réduit les problèmes de pixels frontières ou mixtes, elle augmente sensiblement la variance intra-classe et de ce fait accroît à la fois le nombre de pixels mal classés et le nombre de pixels non classés. Par contre si les logiciels de classification tiennent compte de la répartition spatiale des pixels, ou de la texture, cet inconvénient devient un avantage.

Se fondant sur des critères uniquement visuels pour retrouver sur leurs photographies (SPOT, TM, MSS, et CIR échelle 1/24 000) un certain nombre d'éléments, COLWEL R.N. (et al 1985) remarquent les meilleures possibilités d'interprétation des images SPOT (comparables en précision aux photographies aériennes) par rapport aux images TM ou MSS pour les grandes échelles. Les auteurs concluent leur article en rappelant la nécessité de mettre au point une typologie hiérarchisée (6 niveaux) commune à tous les télédéTECTEURS C'est aussi l'avis de DOLAN G.M. et al 1984 qui concèdent que les données SPOT ou TM peuvent offrir une alternative aux photographies aériennes pour l'actualisation des cartes au 1/24 000, et que les images SPOT sont comparables aux photographies aériennes IRC pour l'interprétation du niveau 3 de l'USGS Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data.

1.3.5) IMAGE SPOT

Objectifs

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

- Evaluer les potentialités de SPOT ; quel type d'information est-il possible d'extraire des données SPOT, en particulier pour cartographier l'utilisation / couverture du sol [BOUILLOT et al, 1984], [NGUYEN P.T., 1984], pour dégager une typologie de l'espace urbain [MADEC et al, 1984], [SOUDOPLATOFF S., 1984] ou encore comme source d'informations géographiques [BOQUET E., 1987].
- Evaluer les capacités de ce satellite pour détecter les changements d'occupation du sol [DEANGELIS R.M., 1984].
- Etudier précisément les signatures spectrales et leurs correspondances fonctionnelles [PEBAYLE J., 1986].

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

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

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

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

Conclusions

La plupart des auteurs s'accordent à affirmer que les données SPOT sont utilisables, visuellement, au même titre que des photographies aériennes à condition toutefois de ne pas descendre à l'échelle du bâtiment; aussi, dans un premier temps l'interprétation visuelle des images, méthode bien connue et fiable, peut apporter plus d'informations que ne le ferait un traitement sophistiqué [SOUDOPLATOFF S., 1984].

Il est donc raisonnable de dresser une typologie de l'espace urbain à l'intérieur de la commune [MADEC et al, 1984] ou de constituer une classification fiable des unités d'une taille supérieure à 1,25 Ha pour le niveau II de l'USGS voire même ponctuellement pour les niveaux III et IV [DEANGELIS et al, 1984]. RIMBERT S. (1982) introduit la notion de "mixels", pixels mixtes dont les signatures sont identifiables, et qui résultent, pour le type pavillonnaire par exemple, de l'association tuile + jardin + rue + lotissement. Elle signale que ces signatures ne bénéficient pas de la stabilité dans le temps que l'on pourrait espérer (variations diachroniques), ce qui lui permet d'aborder "l'étude des cycles et des processus" en fonction des variations saisonnières ou horaires.

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

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

PERSPECTIVES.

L'objectif principal qui ressort de l'étude de la littérature sur la télédétection en milieu urbain demeure les classifications de l'espace le plus souvent en fonction d'une typologie pré-établie et reconnue par les aménageurs (centre-ville, pavillonnaire, grands-ensembles, industrie, etc). Ces classifications sont caractérisées par des évaluations en terme de fiabilité généralement intéressantes.

Il ne semble donc pas utopique de vouloir réaliser une stratification de l'espace, issue d'une classification d'images satellite, en fonction de certains descripteurs physiques de la morphologie de l'espace urbain (et donc détectable sur image satellite) liés à des caractéristiques démographiques.

1.4) PRATICABILITÉ FACE AUX CONTRAINTES MÉTÉOROLOGIQUES.

1.4.1) ETUDE SUR LE SITE DE QUITO, EQUATEUR.

Le but de ce chapitre est de vérifier que la probabilité d'obtenir une image satellite SPOT ou LANDSAT Thematic Mapper, dans un délai imparti, est suffisamment importante pour que puisse aboutir une application opérationnelle telle que celle que nous menons qui nécessite impérativement une image satellite. De plus, une stricte concomitance entre l'enregistrement de l'image satellite et l'enquête sur le terrain constitue une des conditions de réussite relevées dans l'étude bibliographique précédente : aussi est-il vital de déterminer l'époque de l'année météorologiquement la plus propice.

Trois axes structurent notre problématique de façon plus précise :

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

1.4.1.1) Thématique et météorologie.

En milieu urbain, l'espace interstitiel végétal, dont la prise en compte est indispensable pour discriminer les différents types d'espaces bâtis, est sensible aux changements induits par certains facteurs météorologiques. Certaines périodes de l'année apparaissent donc comme privilégiées. Lors du passage du satellite, l'importance de la nébulosité ambiante est le facteur essentiel qui détermine la proportion d'image utilisable. On pourra consulter en **Annexe A.1.4**, les indications concernant les données recueillies ainsi que les tableaux établissant des statistiques mensuelles de nébulosité, de pluviométrie, etc.

Cependant, de multiples impératifs inhérents à la réalisation d'enquêtes fixent une date à ne pas dépasser pour obtenir une image. Il importe donc de concilier ces considérations, ce qui nous amène à exprimer le problème dans les termes suivants : **quelle est la probabilité, pour un mois arrêté thématiquement intéressant (ou indispensable) d'obtenir une image comportant une quantité de nuages inférieure à un maximum donné?** Une telle probabilité doit tenir compte des caractéristiques propres de chacun des satellites (répétitivité et heures de passage pour SPOT et LANDSAT 4, possibilité de visée oblique pour SPOT).

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

1.4.1.2) Probabilité d'obtenir une image.

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

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

$$1 - (N/100)^P$$

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

P: nombre moyen¹ de passages mensuel du satellite pour un angle maximum fixé.

P prend comme valeur :

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

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

Les **Tableaux 1.4.1** et **1.4.2** expriment cette probabilité en pourcentage. Pour une tolérance maximum de 2/8 de ciel couvert, la probabilité maximum d'obtenir une image est :

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

Comme nous l'indique la **Figure 1.4.1**, les probabilités d'obtention d'une image SPOT et Thematic Mapper sans aucune nébulosité sont du même ordre si l'on accepte un angle de visée au plus égale à 10°. Cette affirmation peut être maintenue quelle que soit la nébulosité maximum tolérée.

En ce qui concerne les images verticales², SPOT est à la fois pénalisé par sa périodicité plus faible (tous les 26 jours contre tous les 16 jours pour Thematic Mapper) et, dans une moindre mesure, par son heure de passage plus tardive.

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

¹ Ces nombres ont été calculés en divisant le nombre de passages annuels par 12. Tous les mois sont affectés d'un coefficient identique; il n'est donc pas tenu compte de la différence de leur nombre de jours.

² En milieu urbain, et pour des applications spécifiques comme l'extraction automatique de la voirie, il est quasi-nécessaire d'acquérir une image dont l'angle de prise de vue se rapproche le plus possible de la verticale.

PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM DONNEE									
9H30 TTT									
NEBULOSITE en	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1/8 de ciel couvert									
JANVIER	17	31	49	57	72	77	81	91	100
FEVRIER	11	20	29	39	48	60	83	95	100
MARS	3	3	11	19	31	39	51	81	100
AVRIL	7	15	27	37	56	71	86	89	100
MAI	17	29	45	53	62	76	85	91	100
JUIN	15	20	43	60	69	84	93	99	100
JUILLET	32	52	67	75	86	94	97	98	100
AOUT	31	49	59	75	84	89	95	99	100
SEPTEMBRE	27	42	59	72	87	92	94	98	100
OCTOBRE	7	24	45	60	68	81	86	93	100
NOVEMBRE	29	46	57	65	75	81	87	96	100
DECEMBRE	3	29	43	57	66	75	87	96	100

Tableau 1.3.1 - Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image LANDSAT Thematic Mapper pour une nébulosité maximum donnée -

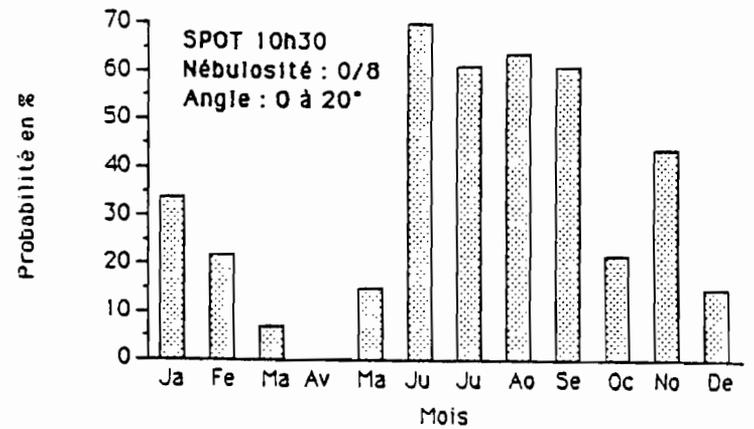
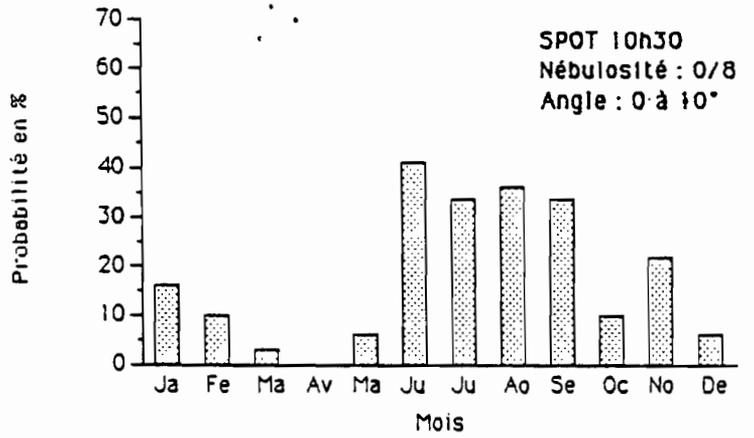
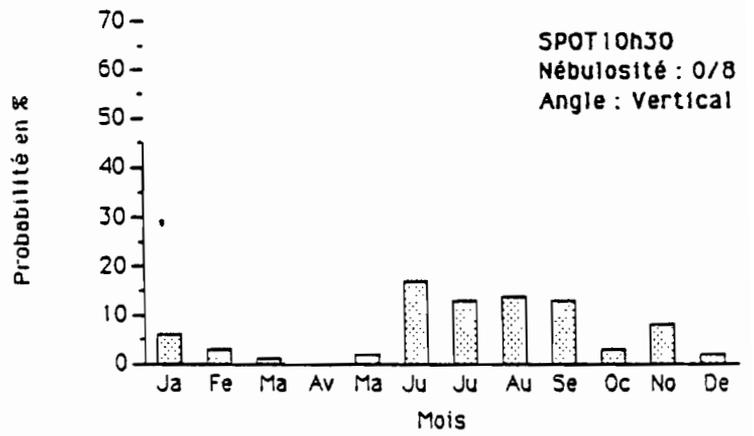
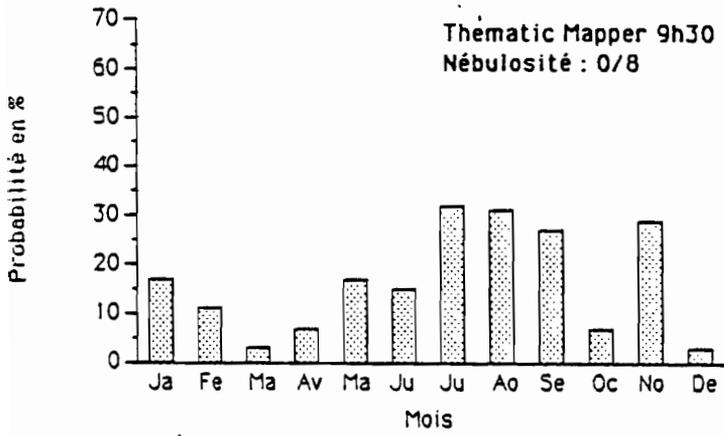
PROBABILITE (en %) D'OBTENIR AU MOINS UNE IMAGE POUR UNE NEBULOSITE MAXIMUM ET UN ANGLE DE VISEE MAXIMUM DONNE									
Nébulosité en 1/8	0		1		1		2		2
de ciel couvert									
Angle de visée SPOT	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	> 10°	VERTICAL	1 A 10°	
JANVIER	6	16	34	14	36	64	20	48	
FEVRIER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

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

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

Tableau 1.3.2 - Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image SPOT pour une nébulosité maximum donnée -

Figure 1.4.1 - Probabilité en pourcentage d'obtention d'une image de 0/8 de ciel couvert.
 Comparaison SPOT / LANDSAT Thematic Mapper -



Conclusion.

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

- un indicateur de végétation, apte à rendre compte de l'intensité de l'activité chlorophyllienne, est précieux pour séparer les quartiers populaires situés sur les franges urbaines des quartiers résidentiels; une même densité de verdure caractérise ces deux types, seul les différencie l'état des "espaces verts" en **période sèche** : constamment arrosés dans les quartiers aisés, ils sont laissés en l'état ailleurs. La discrimination de ces deux types d'espaces exige donc au moins 2 images multispectrales, une pendant la phase humide durant laquelle peuvent être repérés tous les espaces non minéraux (**novembre** semble le mois le plus approprié), une autre en saison plus sèche (**août** ou **juillet** sont satisfaisants) pour opérer une distinction à l'intérieur de l'espace végétal (état de la végétation **basse** et **arborée**),
- un indicateur de la densité de l'espace bâti est sensible à la densité de végétation ; une période à forte activité photo-synthétique est donc privilégiée,
- une extraction automatique de voirie, une caractérisation de la structure ou de la texture réclament une image en mode panchromatique (résolution spatiale : 10 m) enregistrée avec un angle de visée proche de la verticale.

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

1.4.2) POLITIQUE D'ACQUISITION D'IMAGES DES COMPAGNIES SPOT IMAGE ET LANDSAT À TRAVERS QUELQUES EXEMPLES AFRICAINS : DAKAR, BOUAKÉ ET GAO.

Afin de compléter le panorama concernant la faisabilité de notre méthode d'enquête démographique par sondage sur image satellite, il nous a semblé important de préciser le nombre d'images (avec leurs caractéristiques de qualité, angle de prise de vue et nébulosité) enregistrées par les capteurs SPOT-HRV et LANDSAT Thematic Mapper qu'un praticien peut avoir à sa disposition sur son terrain. Il avait initialement été prévu de procéder de la même manière que pour Quito : calculer une probabilité théorique d'obtention d'une image en fonction de la nébulosité, en prenant comme exemple quelques villes d'Afrique de l'Ouest où notre méthode serait susceptible d'être utilisée. Malheureusement, les données météorologiques de même type que celles que nous avons recueillies à Quito concernant ces villes ne sont pas disponibles en France avec la finesse qui nous est indispensable (nébulosité demi-heure par demi-heure)¹.

La méthode d'investigation que nous avons suivie afin d'évaluer la probabilité d'obtenir une image avec un pourcentage de nuages acceptable est simple. Nous avons consulté les listings répertoriant les images enregistrées et disponibles sur bande magnétique **depuis le lancement** des satellites SPOT et LANDSAT TM (4 et 5) sur des villes africaines dont le site et le climat diffèrent sensiblement. Il s'agit de Dakar (Sénégal), Bouaké (Côte d'Ivoire) et Gao (Mali).

¹ L'ASECNA, organisme qui centralise en France les données météorologiques sur l'Afrique de l'Ouest à des fins d'aviation n'a pas pu compiler à temps les données nécessaires à notre étude.

Tableau 1.4.3 - Evaluation de la fréquence des acquisitions d'image en fonction de la nébulosité -

Villes	SPOT* (depuis Mars 1986) Nébulosité maximum en %				Landsat TM (depuis Juin 1984) Nébulosité maximum en %**			
	0 à 9	10 à 25	> 26	Total	0 à 9	10 à 25	> 26	Total
DAKAR	10	0	4	14	7	9	13	29
BOUAKE	4	2	24	30	1	0	9	10
GAO	3	2	0	5	7	6	5	18

* Les chiffres concernant les images SPOT mélangent panchromatique et multispectral tous angles de prise de vue confondus. En cas de prise de vues concomitantes en mode panchromatique et multispectral, une seule scène est comptabilisée.

** A des fins d'homogénéisation, nous avons dégradé le niveau de précision de l'information concernant la nébulosité indiquée sur les listings délivrés par Landsat (en pourcentage de nébulosité tous les 10%) au niveau indiqué par SPOT IMAGE (modalités de nébulosité par quartant)

Au vu de ces résultats exprimés dans le **Tableau 1.4.3**, et sur des critères d'ordre météorologique, nous pouvons conclure à la praticabilité de la méthode à :

- Gao : 13 images TM et 5 images SPOT disponibles présentant un niveau de nébulosité acceptable (moins de 25 % de nuage), soit 72% et 100 % des images enregistrées depuis 4 ans par Landsat TM et depuis 2 ans par SPOT-HRV.
- Dakar : 16 images TM et 10 images SPOT disponibles présentant un niveau de nébulosité acceptable (moins de 25 % de nuage), soit 55% et 71% des images enregistrées depuis 4 ans par Landsat TM et depuis 2 ans par SPOT-HRV.

Par contre, appliquer la méthode à Bouaké requiert une part de chance non négligeable, mais reste du domaine du réalisable (1 image utilisable enregistrée en 4 ans par Landsat TM et 6 en 2 ans par SPOT, toutes prises à la même époque).

CONCLUSION.

Les résultats de ces différentes estimations ou compilations de données incitent plutôt à l'optimisme quant à la praticabilité de la méthode face aux problèmes soulevés par la nébulosité. Cependant, il convient de rester prudent et de pratiquer un bref contrôle météorologique avant de lancer une opération de cette envergure. Estimer la probabilité de disposer d'une image dans des délais raisonnables reste fonction des aléas du climat local. Les données nécessaires pour effectuer ce type de calculs sont habituellement centralisées dans les aéroports.

2

**MISE AU POINT DE LA METHODE
À PARTIR D'UN MODELE
EXPERIMENTAL - MARSEILLE -**

INTRODUCTION.

Le premier chapitre de cette partie consacrée à la mise au point de la méthode sur la ville de Marseille débute avec l'analyse des implications induites par l'utilisation conjointe d'un système de gestion de base de données localisées et d'informations d'origine satellitaire.

La mise en relation de l'information satellitaire avec les données localisées gérées par un système d'information géographique (système *SAVANE* de l'ORSTOM) s'avère en effet nécessaire à plusieurs niveaux :

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

Cependant, un tel système doit posséder des fonctions algébriques et de manipulations graphiques rendues nécessaires par un croisement de données issues de sources différentes et présentant des implantations géographiques a priori difficilement compatibles (vecteur et pixel).

En raison de la résolution insuffisante des images LANDSAT MSS seules disponibles jusqu'à ces dernières années, la télédétection est restée peu employée en milieu urbain, caractérisée par une forte hétérogénéité et la faible taille des éléments constitutifs ; l'analyse précise de l'information apportée par les capteurs à haute résolution comme Thematic Mapper et SPOT, et les méthodes d'extraction de cette information n'en sont qu'à leurs débuts. Il nous a donc semblé opportun, bénéficiant d'un système d'information géographique capable de traiter des individus et des variables divers, d'évaluer les possibilités et les implications méthodologiques, tant au niveau conceptuel qu'au niveau pratique, d'une nouvelle approche en télédétection basée sur la prise en compte de zones urbaines plus proches des conceptions urbanistiques que les éléments de l'image satellite (pixel) usuellement considérés.

Comme l'a montré l'étude bibliographique de la littérature, dans l'état actuel de la télédétection en milieu urbain, il est primordial de pouvoir confronter spatialement les données satellitaires avec des données rendant compte précisément de l'occupation du sol. **Dans notre cas, la base de données sur la morphologie urbaine issues d'observations terrain et de photographies aériennes à grande échelle constituée à Marseille, s'avère être l'outil de base sur lequel s'appuie l'ensemble de notre démarche d'analyse de l'image.**

Nous avons posé comme hypothèse de départ qu'un système de relations étroites existe entre la morphologie urbaine et la démographie. Dans l'optique d'une stratification à objectif démographique, la **densité de l'espace bâti** constitue sans nul doute un critère important d'explication des relations bâti / population. L'axe central de la problématique de notre second chapitre est alors simple, **est-il possible d'extraire d'une image LANDSAT Thematic Mapper des informations pertinentes pour rendre compte de la densité du bâti?** Les questions qui en découlent immédiatement sont les suivantes :

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

C'est à toutes ces questions que nous tenterons d'apporter une réponse au cours du chapitre 2.2.

L'évaluation de la densité du bâti constitue une première étape indispensable dans la description d'une ville sur la base d'une image satellite. Cependant, la prise en compte des différenciations internes du tissu urbain passe par la discrimination à partir d'une nomenclature adaptée à la télédétection des individus (ici des îlots INSEE) décrits par des variables radiométriques. La détermination des différents types urbains accessibles à partir d'une image Thematic Mapper est achevée à l'issue de trois étapes maintenant classiques :

- l'étude du lien existant entre les variables radiométriques et l'occupation du sol,
- la classification des îlots de l'échantillon en fonction de leur distribution radiométrique,
- la détermination de la finesse de la typologie et de la pertinence de la stratification résultante.

La comparaison des gains de variance de quelques estimateurs démographiques résultant de ces stratifications réalisées sur images satellite, qui constitue une évaluation fiable de l'efficacité de la méthode et des résultats enregistrés, clôturera cette seconde partie expérimentale consacrée à Marseille.

2.1) DONNÉES GÉOGRAPHIQUES ET DONNÉES SATELLITAIRES : MISE EN OEUVRE DE L'INTÉGRATION ET RÉPERCUSSIONS MÉTHODOLOGIQUES ¹

2.1.1) INTÉGRER INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET TÉLÉDÉTECTION : UNE NÉCESSITÉ?

Classiquement, l'analyse des données de télédétection s'effectue soit sur toute l'image, soit sur un échantillon de l'image par tirage systématique, soit sur des portions d'image constituant des zones d'entraînement dont les limites sont sans rapport avec le contenu de la zone elle-même. Le fait de caractériser le pixel par son appartenance à une zone géographique nous ouvre de nouvelles voies d'investigation pour l'analyse des images. La localisation des données est une information fondamentale : seule clé commune, c'est elle qui permet de comparer et de croiser les différentes données entre elles, avec des traitements qui conservent la pertinence spatiale des résultats. A l'heure actuelle, étant donné la complexité du milieu étudié et l'état des connaissances en télédétection urbaine, ne pas recourir à une base de données gérée par un système d'information géographique limiterait sérieusement les interprétations de l'image satellite, tant sur le plan thématique que sur le plan spatial. De plus, comme l'écrit justement A. BALLUT à propos de la télédétection urbaine, le fait de prendre en compte la localisation peut constituer un atout important : "Il faudrait, dans les algorithmes de traitement, faire intervenir des notions relatives à la répartition géographique". L'intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique tel que celui développé à l'ORSTOM favorise les recherches dans cette direction, pour la mise au point de méthodes de classification en télédétection intégrant la localisation ; de même, la localisation peut constituer un paramètre discriminant d'un point de vue démographique, au même titre que des variables décrivant la morphologie urbaine. L'exemple des travaux réalisés sur Marseille, démontre que l'intégration de données localisées favorise l'émergence de nouvelles méthodes d'analyse en télédétection urbaine.

Dans la deuxième phase du programme, sur Marseille, nous abordons le second aspect de l'intégration information géographique et télédétection : la télédétection, source d'information privilégiée pour l'actualisation d'une base de données gérée par un système d'information géographique. Tout en utilisant certaines données de la base pour initialiser l'extraction d'information sur image satellite, il s'agit d'intégrer dans la base les informations issues des traitements des images satellites (ici la densité du bâti) : elles pourront alors être croisées avec l'ensemble de l'information déjà disponible dans la base de données géographiques.

2.1.1.1) Comment réaliser l'intégration des données.

Que l'on considère les recherches réalisées sur la ville de Marseille ou celles menées sur Quito, les travaux à réaliser font appel à des informations de différents types :

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

¹ Cette partie est constitué par d'extraits de la communication présentée par 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.

Pour traiter cette information, nous disposons à l'ORSTOM de deux systèmes complémentaires :

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

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

* l'unité de traitement des images satellitaires de Bondy.

Si le système *SAVANE* se présente comme un logiciel intégré, l'Atelier de télédétection de l'Orstom Bondy (ATO) a développé d'abord sur MINI-6 (expérience sur Marseille), puis sur station de travail SUN (développement du logiciel *PLANETES* qui coïncide avec le début des traitements sur l'images SPOT de Quito) un ensemble de programmes réalisant les principaux traitements sur les images satellites:

- visualisation couleur par composition,
- analyse statistique,
- indices, filtres, opérateurs de texture,
- classification supervisée ou non,
- sorties graphiques et cartographie,
- interpréteur *morpholog*.

L'idée principale consiste à pouvoir traiter indifféremment données de télédétection et données géographiques, à pouvoir les comparer et les croiser pour les analyser et créer de nouvelles données localisées.

La classification d'une image doit pouvoir se faire en fonction de la radiométrie, mais aussi en fonction des variables exogènes qui peuvent exister dans la base, comme, par exemple, l'altitude ou l'ensoleillement. Cela signifie que la valeur d'une variable exogène doit pouvoir être affectée à chaque pixel d'une image satellite. De même, un indice radiométrique, calculé par exemple sur un district de recensement, doit pouvoir être comparé à une variable exogène à l'image satellite, et ensuite intégré comme nouvelle variable de ce district.

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

2.1.1.2) Spécificités du Système de Gestion de Base de Données Localisées SAVANE¹.

Notre propos n'est pas ici de décrire en détail le système SAVANE qui permet de gérer et de manipuler des données localisées, mais plutôt de rappeler les spécificités de ce système, et plus particulièrement celles auxquelles on a fait appel pour les applications de télédétection. Pour ce faire, il est nécessaire de préciser quels sont les apports de SAVANE, par rapport aux systèmes existants, et en particulier ceux touchant à la complémentation de l'algèbre relationnel classique qui est rendu possible par la prise en compte la localisation comme nouvel attribut.

a) Restriction spatiale.

Cette opération consiste à sélectionner les objets en relation avec un domaine de l'espace que l'on détermine. Le fenestrage est une opération de restriction spatiale puisque l'on considère dans ce cas que l'on choisit les objets présentant une **intersection non nulle** avec la fenêtre d'étude. On pourrait de même considérer que sont retenus, les objets **entièrement inclus** dans la fenêtre, ou encore des objets dont le **centroïde appartient** à la fenêtre d'étude. La restriction spatiale ne crée donc pas de nouvelle entité.

En ce qui concerne les opérations de télédétection, la détermination des zones (districts de recensement INSEE ou pâtés de maison) intersectant notre fenêtre d'étude se fait donc simplement par choix des coordonnées géographiques (longitude et latitude) une fois les tailles du pixel et de la fenêtre fixées.

b) Jointure spatiale.

C'est une opération de jointure portant sur la localisation des entités en fonction de leur distance. Elle s'exprime formellement de la façon suivante :

$$a \leq d(\text{loc } 1, \text{loc } 2) \leq b$$

$a = b = 0$ est la distance la plus couramment employée dans notre cas, et l'opération de jointure spatiale correspond alors à l'intersection des zones (entités). De nouvelles entités sont alors créées.

Ainsi, la jointure spatiale entre l'ensemble des îlots d'un échantillon et les zones définies par les modalités d'une relation aboutit à la création de nouvelles entités redécoupés en fonction des limites des zones et des limites des îlots de l'échantillon.

Cette opération met en lumière les dangers d'un croisement lorsqu'existe une différence d'échelle de saisie des documents (qui conditionne la validité des résultats

c) Passer du mode vecteur au mode raster.

La réalisation de ces opérations algébriques est rendue possible par le passage en **structure matricielle** (image pixel) suivant une projection choisie, des données graphiques stockées en coordonnées géographiques sous une **forme vectorielle**. Ces facilités sont aussi utilisées lorsqu'il s'agit d'intégrer des images provenant de la télédétection à l'intérieur de la base de données.

La possibilité, qui consiste à intégrer les données satellitaires dans le système SAVANE

¹ Cette partie est inspirée des écrits de M. SOURIS, et en particulier de "Systèmes d'information géographique et bases de données", Traitement des données localisées, l'infographie à l'ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, p 29-87 Paris 1986, et de "A geographic information system with relational architecture : Principle and exemple of use of the TIGER system", communication au colloque XXXX, 1987.

sous leur forme matricielle, est inhérente au système, du fait de la phase de transformation temporaire vectoriel-matriciel utilisée pour un certain nombre de traitements : le système crée des images numériques de pixels associées à des fichiers descriptifs, la résolution de la matrice étant paramétrable. Cette double structure (stockage vectoriel, manipulation matricielle) est un des éléments importants du système *SAVANE* : c'est elle qui permet la facilité de manipulation de la structure matricielle sans en subir les inconvénients majeurs, comme la réduction initiale d'information pour intégrer toute les données dans un maillage de taille fixe. On peut ainsi croiser des données tout en les conservant dans la base dans leur propre mode d'implantation spatiale.

Découlant de notre objectif de stratification et profitant des spécificités du système d'Information Géographique *SAVANE*, la nécessité de traiter des données d'origine et de découpage divers nous conduit à développer une méthode résolument novatrice dans le domaine de la télédétection urbaine en considérant une entité nouvelle : **la zone urbaine**. Sa prise en compte nous amène à exposer dans le chapitre suivant, les remises en question qu'une telle démarche implique.

2.1.3) TYPOLOGIES URBAINES ET TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE - LA NOTION DE ZONES EN MILIEU URBAIN.

Nombreuses sont les typologies du tissu urbain, et comme le soulignent très justement P. ANTOINE et Al¹, "le choix d'une typologie relève toujours d'un certain arbitraire plus particulièrement dans le domaine de l'habitat où, bien souvent, la caractérisation du bâti prend en compte divers éléments d'analyse, juridiques, économiques, morphologiques, sociologiques. Les praticiens sont conscients des imperfections présentées par ces différentes typologies qui, par essence, sont réductrices de la réalité, mais permettent cependant de répondre à certains objectifs opérationnels précis." Compte tenu de notre objectif à finalité démographique, quelles sont justement les typologies définissables à partir des images de télédétection, en quoi se différencient-elles, en existe-t-il une meilleure que les autres, c'est en ces termes qu'apparaissent les objets de notre débat.

Le terme typologie est un néologisme datant du XXI^{ème} siècle signifiant étymologiquement la science du type, et plus particulièrement selon P. PANERAI et Al, "la science de l'élaboration des types facilitant l'analyse d'une réalité complexe et la classification". C'est aussi "l'ensemble des types et de leurs relations"².

Selon le "Robert", dictionnaire de la langue française, le type se définit comme "l'ensemble des caractères organisés en un tout, constituant un instrument de connaissance par abstraction relationnelle et permettant de distinguer des catégories d'objets ou de faits". Nous retiendrons plus précisément ici, les notions d'organisation et de relation.

2.1.3.1) Quel individu ou unité spatiale retenir? Comment définir cette entité?

La plupart des études réalisées en milieu urbain à partir de l'imagerie satellitaire considère comme individu le pixel, et comme variables ses réflectances dans les différentes fenêtres radiométriques du spectre visible ou infra-rouge. C'est une option parmi d'autres, qui a le mérite de la simplicité de sa définition (élément de surface fixe au sol), et qui bénéficie de l'habitude et des facilités issues des antécédents de l'analyse des milieux naturels par télédétection. La résolution spatiale des capteurs, qui définit la représentativité (au sens de contenance) de ces individus varie de 30*30 mètres (soit 900 M²) pour Thematic Mapper de LANDSAT (sauf pour le canal thermique où elle est égale à 120*120 mètres), 20*20 mètres (soit 400 M²) pour les HRV de SPOT en mode multispectral et 10*10 mètres (soit 100 M²) en mode panchromatique.

Les premiers espaces analysés par télédétection satellitaire ont été les milieux naturels ou agricoles, qui, sauf exceptions, peuvent être considérés comme relativement homogènes par rapport aux villes. Les classifications opérées sur les milieux "naturels" ont été longtemps fondées sur la notion de **signature spectrale**, les notions de texture, voire de formes, n'intervenant que plus récemment. Une signature spectrale est l'ensemble de valeurs radiométriques que prend un élément de l'occupation du sol dans les différentes fenêtres du spectre électromagnétique.

¹ P. ANTOINE, A. DUBRESSON., A. MANOU-SAVINA, 1987 - Abidjan «côté cours», 267 P, Ed KARHALA-ORSTOM, Paris

² PANERAI P., CASTEX J., DEPAULE J.C., 1975 - Principe d'analyse urbaine, Tome 2, Rapport de recherche, 127 P.

a) Les signatures spectrales.

Une **classification fiable** n'est envisageable que s'il s'établit une relation **bijective** entre classes et signatures spectrales. L'univocité n'est possible que s'il existe au moins un canal à l'aide duquel les classes peuvent être distinguées deux à deux. Générer une **classification intéressante** n'est possible que s'il existe une relation forte entre thématique et signatures spectrales; n'oublions pas que ces dernières ne peuvent rendre compte, *a priori*, que d'une réalité physique (mesures de luminance).

Par ailleurs, les résultats sont d'autant meilleurs que les différents éléments appartenant à une même classe sont **spatialement regroupés** de telle sorte que la valeur radiométrique n'est due qu'à ce seul élément connu et repéré.

Ces conditions, favorables ou obligatoires, ne se retrouvent que peu lorsque l'on s'intéresse aux villes. Nous allons tenter de comprendre pourquoi les "modèles" de raisonnement en vigueur pour analyser les milieux "naturels" apparaissent inadaptés en milieu urbain, et c'est pourquoi il est nécessaire de **mettre au point une méthodologie d'analyse adaptée à ce contexte particulier.**

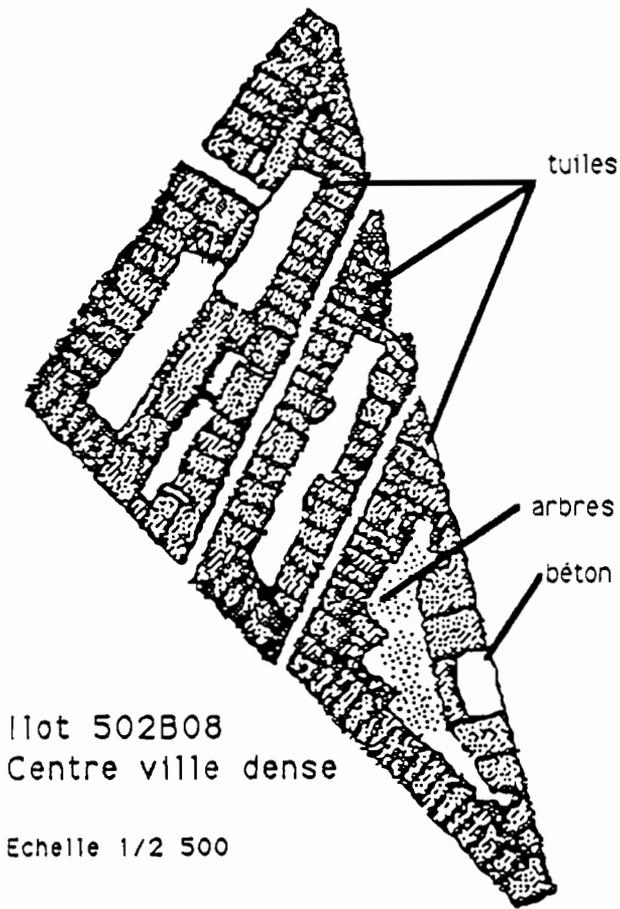
Signature spectrale et milieu urbain, deux cas se présentent :

. *le pixel mixte ("mixel"¹)* (se rencontre avec Thematic Mapper sur l'ensemble de la ville et avec SPOT multispectral en milieu pavillonnaire et centre ville; relativement rare dans le canal panchromatique). En admettant que l'on connaisse avec précision la signature spectrale de **tous** les différents composants de l'espace urbain (en tenant compte de sa texture, de son âge, de son exposition, de sa couleur), désirer connaître la composition exacte de l'occupation du sol à l'intérieur d'un pixel revient à essayer de résoudre un système avec plus d'inconnues que d'équations, "Il n'est pas possible de déterminer pour un pixel si la valeur énergétique enregistrée est la valeur moyenne générale du pixel ou la moyenne de réflectance de deux objets très contrastés"². A Quito, par exemple, plus de 10 types de bâtiments sont recensés en **moyenne** par îlot; et il ne s'agit là que des différences découlant uniquement des matériaux constituant la toiture. Associer signature spectrale "mixte" et type de tissu urbain sous-entend donc qu'il existe **une** association de matériaux majoritaire, et très stable (en qualité de matériaux et en proportion de ces matériaux) pour un type de tissu urbain donné, ce qui ne nous semble pas évident. Par contre, il nous semble plus vraisemblable de dire que certaines associations sont **préférentiellement** rencontrées dans certains types de tissus urbains, ce qui n'est pas exactement la même chose.

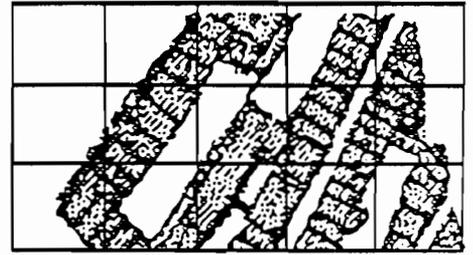
De toutes façon, comme le montre la **Figure 2.1.1**, même lorsque l'on considère le capteur TM de Landsat, il existe des pixels "purs" rendant compte d'espaces minéraux et végétaux que l'on peut considérer comme homogènes dans certains milieux (tissus industriels, grands ensembles (minéral) ou pavillonnaire (végétal)).

¹ Voir les écrits de S. RIMBERT et de son équipe à l'Université de Strasbourg.

² BALLUT A., MONTASTIER G., 1979 - Analyse de données du satellite "Landsat" sur l'agglomération parisienne (11 Juillet 1976), Etude OPIT et IAURIF, Paris, 95 P. Cette affirmation, bien que fondée sur l'étude d'image enregistrée par Landsat MSS (pixel : 57m*79m) demeure toujours d'actualité.



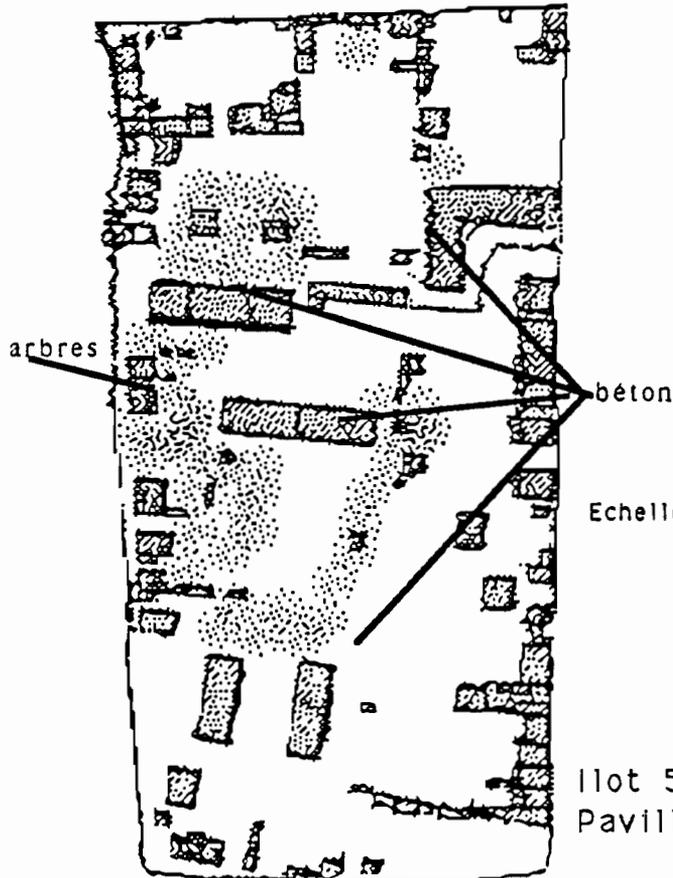
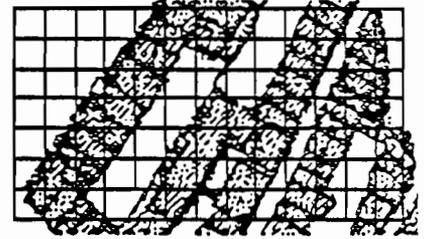
Pixel Thematic Mapper 30 Mètres



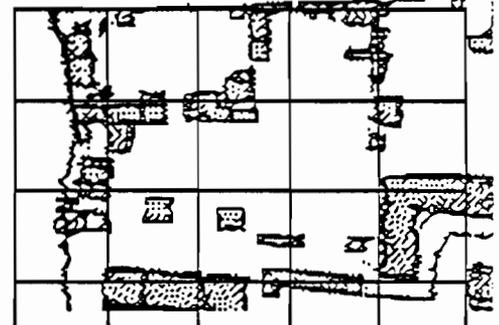
Pixel SPOT Multispectral 20 Mètres



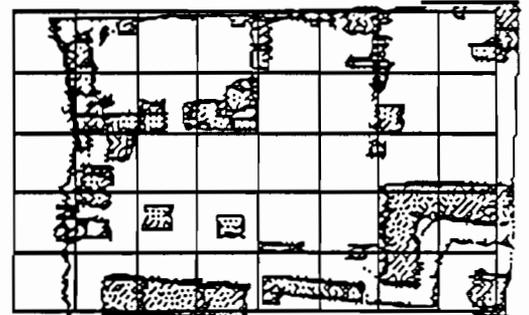
Pixel SPOT Panchromatique 10 Mètres



Pixel Thematic Mapper 30 Mètres



Pixel SPOT Multispectral 20 Mètres



Pixel SPOT Panchromatique 10 Mètres

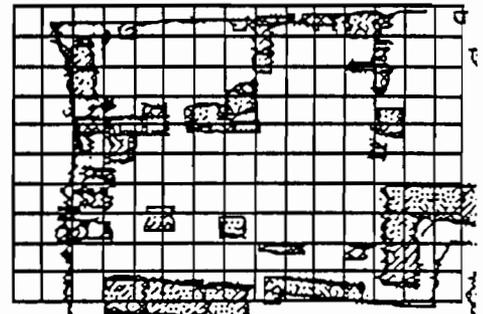


Figure 2.1.1 - Superposition d'un quadrillage SPOT et Thematic Mapper sur une cartographie 1/2 500. Centre ville. Tissu mixte pavillonnaire et immeubles d'habitation -

. *Le pixel pur*¹: les pixels enregistrés en mode panchromatique sont très probablement **majoritairement** purs par rapport aux éléments basiques urbains² quel que soit le type de tissu urbain; ceux enregistrés en mode multispectral le sont certainement dans une large mesure si l'on considère les zones industrielles récentes, les grands ensembles résidentiels, ou encore les espaces pavillonnaires peu densément construits (**Figure 2.1.2**). Cependant, se pose alors le problème de l'affectation de ce pixel à une classe, pré-définie ou pas. Comment alors correctement affecter un pixel "pur" de verdure au tissu urbain auquel il appartient (pavillonnaire, grand ensemble ou pavillonnaire) en se fondant uniquement sur sa signature spectrale, voire en tenant compte de la texture de son voisinage immédiat? Qu'est ce qui différencie le toit terrasse blanc du grand ensemble avec la toiture Eternit de l'usine, le parking de l'usine de celui du grand ensemble et ces derniers de la place bétonnée du centre ville. Les exemples de Marseille et de Quito nous l'ont montré : **en tout état de cause, il n'existe pas de relation univoque entre matériaux de la toiture seuls, ou mode d'occupation des espaces interstitiels seuls (qui explique la plus grande partie du signal) et les types de tissu urbain** auxquels ont fait appel les télédéTECTEURS qui s'intéressent aux villes. Même en se cantonnant aux villes de France, un pavillon, un immeuble d'habitation et un entrepôt peuvent être couverts par le même matériau (la tuile). La signature spectrale même dans le cas où elle peut être reconnue avec certitude ne peut à elle seule déterminer le type de tissu urbain. **Il existe donc au minimum une inadéquation qu'il convient de réduire entre individu et nomenclature de classification.**

b) Individu : Le pixel ?

. *Une typologie du tissu urbain ou une classification des matériaux. de construction?*

Effectivement, si l'on considère (après calcul) que la proportion de pixels "purs" est prépondérante, une classification des différents types de matériaux de construction ou éléments de revêtement du sol peut aboutir à une bonne statistique des matériaux utilisés. Si est vérifiée l'hypothèse qu'il existe **une relation forte entre association spatiale des matériaux et des types de revêtement de sol et un mode d'occupation du sol**, il ne reste plus alors qu'à effectuer des regroupements tenant compte de l'agencement spatial de ces classes. Il est donc éventuellement possible d'aboutir à une **véritable typologie de l'espace urbain**. On conviendra aisément qu'une synthèse, sous la forme de regroupements faisant intervenir la notion d'agencement à l'intérieur d'une zone pour interpréter l'information, demeure à un moment ou à un autre inévitable.

. *Raisonnement par pixel - Quelles contraintes ou sous-entendus ?*

C'est segmenter de façon **arbitraire** (couper un immeuble en plusieurs parties, traiter dans le même temps un morceau de gazon et un bout de trottoir) et le plus souvent **non maîtrisée** l'espace urbain, alors que justement, la ville, le quartier, l'îlot ne se conçoivent et ne se définissent que globalement en "opposition/comparaison" par rapport à l'espace contigu. "La recherche sera donc structurée par les différentes catégories de découpage

¹ On notera que la notion de pureté se définit à partir de ce que l'on considère comme élément de base, qui sont eux mêmes indissociables d'une thématique. En ville, ils varient donc de 2 (minéral, végétal) à l'infini...

² On considère comme éléments basiques urbains, les différents postes que l'on a retenus dans notre nomenclature d'enquête au sol (voir donc les bulletins de relevés terrain). Bien évidemment, ces éléments ne sont pas invariants et dépendent de la ville que l'on observe.

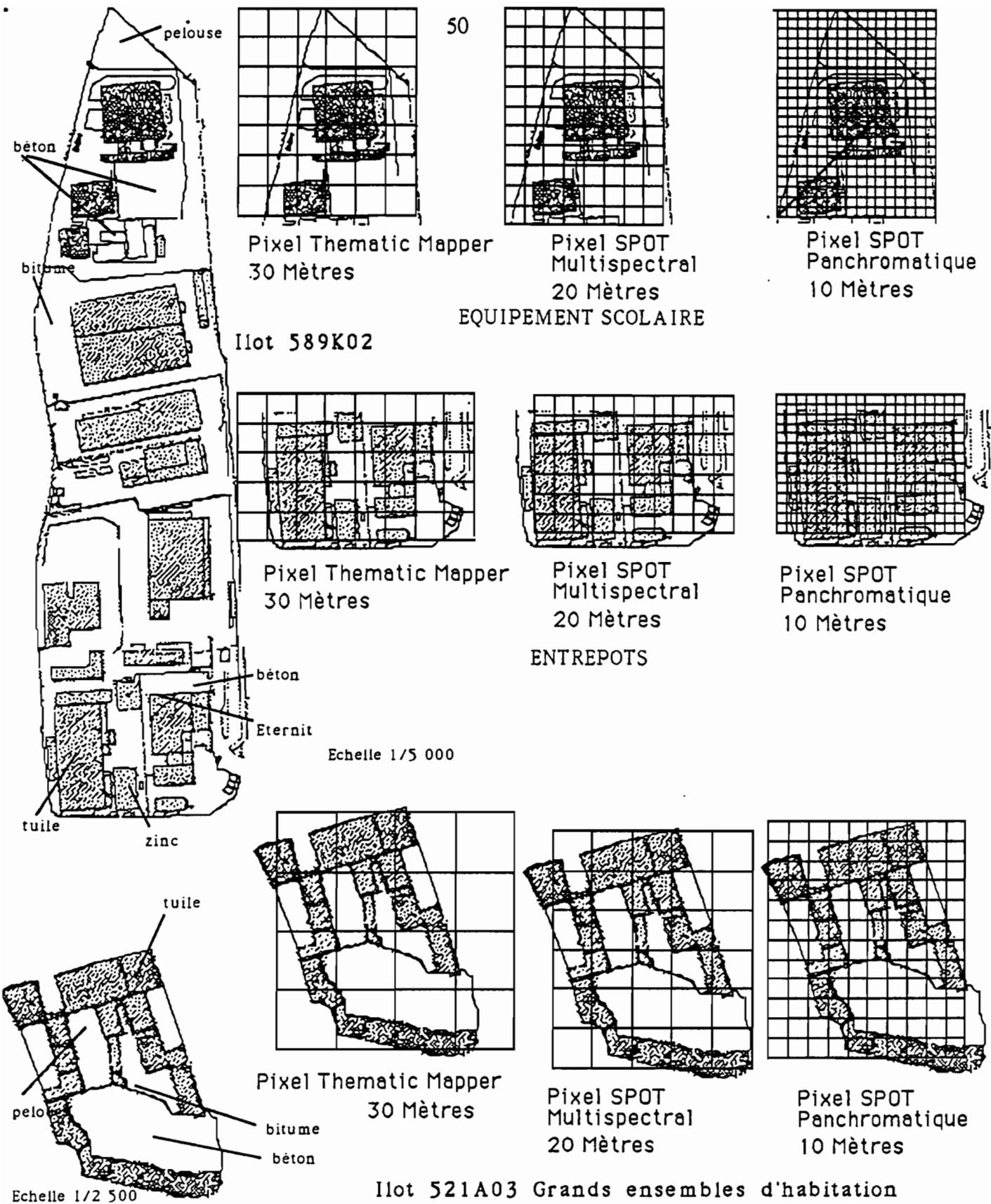


Figure 2.1.2 - Superposition d'un quadrillage SPOT et Thematic Mapper sur une cartographie 1/5 000 et 1/2 500. Industrie et équipements. Grands ensembles d'habitation -

observées" affirment HAMBURGER et Al¹, on a donc intérêt à connaître avec précision de quelle manière on découpe l'espace, et ce à quoi correspond ce découpage d'un point de vue thématique, voire stratégique, afin de définir des postes de classification qui correspondent à une réalité que l'on peut effectivement mesurer, analyser et décrire. **Contrairement au milieu naturel, le pixel ne définit pas intrinsèquement son type.** Ici apparaît alors une différence fondamentale : le pixel ne permet qu'une description fondée sur la juxtaposition des différents composants physiques de l'espace urbain, alors que la zone autorise une approche analytique du **tissu urbain**.

Une typologie fonctionnelle, socio-économique, juridique ou culturelle? une typologie inadaptée par rapport à l'outil de mesure.

Comment une mesure physique peut-elle rendre compte d'une fonction urbaine, d'une notion socio-économique, d'une culture²? "Chaque définition du type renvoie donc à un champ disciplinaire et à une théorie"³. En milieu urbain, une mesure physique de luminance ne peut renvoyer au mieux qu'à un matériau, d'où la nécessité d'introduire des informations de type textural ou topologique qui peuvent éventuellement être caractéristiques d'une fonction, ou rendre compte d'un état socio-économique. En toute circonstance, cette typologie quelle qu'elle soit, ne peut avoir de sens que ramenée à une zone délimitée précisément en raison de cette fonction, de cet état, de cette culture, ou alors, elle doit se cantonner à la stricte observation et énumération des types de matériaux et combinaison de matériaux utilisés dans la construction ou rencontrés sur le sol de la ville.

. Localisation et système d'information géographique.

La compréhension du signal qui constitue une étape obligée de l'interprétation classique des images satellite quelque soit le milieu, n'est possible que si l'on est capable de mettre en correspondance valeurs radiométriques et informations précises concernant l'occupation du sol. Dans le cas d'une démarche "pixel" en milieu urbain, comment réaliser cette performance? Comment repérer, avec précision, la limite au sol du pixel que l'on a déterminé sur l'écran? Les milieux naturels, de par leur relative homogénéité rendent sans fondement ces interrogations, puisqu'il suffit de délimiter un polygone à l'intérieur d'un espace homogène.

Dans le cas de notre étude de Marseille, l'apport du système d'information géographique SAVANE gérant à la fois les îlots de recensement et les images satellite Thematic Mapper a été déterminant, puisqu'il nous a permis de définir sur l'image satellite avec une précision connue, les contours de nos échantillons d'initialisation et de validation. A Quito, cette correspondance s'effectue au niveau d'une zone, clairement délimitée par la voirie sur une image panchromatique SPOT, ce qui limite les risques d'une mauvaise mise en correspondance et minore les effets de bordure, puisque l'on considère une zone de surface non négligeable. A l'inverse, cela revient donc à ne pouvoir choisir, pour des raisons de localisation précisément, que des sites d'entraînement et de validation

¹ HAMBURGER B., VENARD J.L., 1977 - Partition et infléchissement, 120 P.

² " Le mouvement de l'architecture urbaine (S. MURATORI, C. AYMOMINO, A. ROSSI, G.GRASSI) met en évidence les structures de la forme urbaine comme composante essentielle de la culture et comme méthode du projet d'aménagement urbain " P.MERLIN, F. CHOAY., 1988 - Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, pp 676-678.

³ P.MERLIN, F. CHOAY., 1988, op cités.

homogènes d'un point de vue spatial, ce qui n'est évidemment pas souhaitable pour des raisons de représentativité statistique.

Sans un système d'information géographique, il est délicat, voire impossible de localiser précisément sur le terrain le contour des sites test tracé sur une composition colorée LANDSAT Thematic Mapper.

Les systèmes d'information géographique localisés apparaissent de plus en plus comme les outils privilégiés de croisement de l'information en milieu urbain. Une liaison avec de tels systèmes gérant les données renseignant sur la ville ne peut s'effectuer que sur une zone, entité significative d'un point de vue aménagement de la ville (îlots, quartiers etc...), reconnue et pratiquée d'un point de vue collecte de l'information. Affecter une quelconque partie de cette somme d'information sociale, juridique, économique, démographique à une *partie élémentaire de l'image* ou pixel qui n'est pas du même ordre que son entité de collecte apparaît incongru, tant au niveau opérationnel que thématique.

. Résultats , quelle validité ?

Malgré toutes ces questions posées et ces problèmes, non résolus, comment expliquer les bons résultats généralement publiés dans la littérature¹? Cela s'explique aisément, lorsque l'on observe de quelle manière a été souvent effectué l'échantillonnage pour l'initialisation et la validation des classifications. Généralement, l'échantillon déterminé est constitué de polygones précautionneusement **choisis** (échantillonnage raisonné) sur une composition colorée. L'apparence identique et homogène des polygones appartenant à une même classe assure une classification sans problème (du fait du rapport variance inter-classe / intra-classe élevée) quel que soit le mode de classification choisi, et une validation sans surprise. Malheureusement, le mode de tirage de l'échantillon, étranger à une quelconque loi régissant les probabilités, interdit une extrapolation à l'ensemble de l'univers observé. Ces excellents chiffres ne sont évidemment valables que pour et dans cet échantillon particulier.

2.1.3.2) Plaidoyer pour une nouvelle approche dans l'élaboration des typologies urbaines.

Visuellement sur une photographie aérienne, sur le tirage à grande échelle d'une image panchromatique SPOT ou d'une composition colorée (SPOT ou TM), seul un regard sur l'ensemble des éléments constituant la ville (bâtiments, espace interstitiel, voirie) permet de caractériser les différents tissus urbains. "La ville est un tout. C'est en effet l'assemblage d'éléments isolables, parfaitement identifiables : voiries, parcellaire, bâtiments, espaces vides, etc... **Mais en même temps, l'assemblage de toutes ces parties donne au tout une dimension supplémentaire qui n'est pas perçue dans chacune des parties et qui relève justement de l'urbain.**"² Identifier visuellement, à coup sûr, un type de tissu urbain à partir d'images satellite fait appel à tous les aspects de l'image, **texture, structure, topologie, organisation de l'espace** autant de notions qui n'ont une signification que ramenées à une zone et non à un point. Alors, quel individu choisir lorsque l'on s'intéresse à une typologie de l'espace bâti? Bâtiment, parcelle, îlot, et quartiers constituent par ordre croissant les différents niveaux de lecture que pratiquent habituellement les urbanistes. Le problème, si problème il y a, réside

¹ Voir la revue bibliographique en première partie.

² Extrait de BONNADONNA S., 1985 - Formes urbaines, Etude menée dans le cadre de l'ENPC, 280 P. Dans cette étude, l'auteur tente de dégager une relation entre forme et fonction en se fondant sur l'analyse du parcellaire urbain préalablement mesuré et quantifié.

donc dans le choix du niveau. D'un point de vue de télédéteur, l'individu doit posséder plusieurs qualités, principalement pouvoir être détecté et individualisé sur une image et constituer un ensemble cohérent d'un point de vue urbain. Du point de vue du télédéteur, on voit que le choix ne peut se faire qu'entre îlot (au sens pâté de maisons physique) et quartier (au sens de zone homogène et dont l'homogénéité constitue le principal critère de distinction). Deux orientations sont alors possibles, soit un découpage de l'espace en fonction de zones homogènes (exemple : lissage de l'image dans la direction de variance locale minimum, filtres de NAGAO), soit une segmentation utilisant la voirie pour définir les individus que sont alors les espaces (pâtés de maison) délimités par la voirie. Ces deux conceptions possèdent chacune avantages et inconvénients dont il convient de faire rapidement l'inventaire.

La méthode de zones homogènes propose un découpage qui a de fortes probabilités de correspondre effectivement à un espace "simple". L'apparence définit alors l'objet. On perd ici une dimension de la complexité de la ville qui veut qu'un grand ensemble soit constitué d'une partie consacrée aux bâtiments, d'une autre réservée au parking, et quelquefois d'un espace vert (ces parties pouvant être spatialement séparées) qui concourent à la définition des types reconnus par les praticiens de l'espace urbain.

A l'inverse, la seconde conception s'expose aux inconvénients d'un découpage fondé sur une limite qui n'a pas de rapport avec le contenu et qui peut donc inclure à l'intérieur d'un même individu plusieurs espaces bien distincts d'un point de vue urbain (fonctions, usage, culture, etc...). **Il s'agit alors d'un espace "composite" dont la complexité même peut être significative d'un type urbain ou d'un tissu instable en cours d'évolution.** La Photo 2.1.1, image panchromatique SPOT, plaide en faveur de cette conception; terrain industriel (zone 105), franges urbaines (zones 104 et 102), pavillonnaire dense (zone 264) et centre ville (zone 259) se différencient sans ambiguïté lorsque l'on porte un regard global (prenant en compte la notion d'agencement) sur le paysage urbain. Par contre, la prise en compte des seules valeurs de pixels ne peut qu'aboutir au mieux qu'à une typologie des matériaux de construction, des matériaux recouvrant le sol et leur combinaison.

C'est cette dernière vision globale de l'espace urbain que nous reconnaissons et qui reflète la réalité urbaine telle qu'elle existe, avec sa complexité et ses contradictions. C'est donc cette définition de l'individu qui sera retenue. "Plus précisément, c'est la dimension physique de la ville qui nous préoccupe, cette logique des espaces qui est contenue dans l'expression tissu urbain, et dont l'îlot constitue un élément déterminant"¹. L'un des avantages immédiats qui découle de ce choix réside dans la somme souvent importante des informations collectées ou regroupables à ce niveau et permettant une description très ouverte (au sens de : non dirigée vers une problématique précise) de cet individu. En particulier, l'objectif démographique du programme de recherche s'accommode volontiers de ce découpage qui correspond à celui majoritairement² choisi par les différents instituts de recensement, mais aussi à l'individu du premier degré du sondage simulé à Marseille et réalisé à Quito.

¹ CASTRE J., DEPAULE J.C., PANERAI P., 1977 - Formes urbaines : de l'îlot à la barre, Dunod, Paris, 230 P.

² Le découpage INSEE et le découpage pâté de maisons correspondent dans plus de 90% des cas.

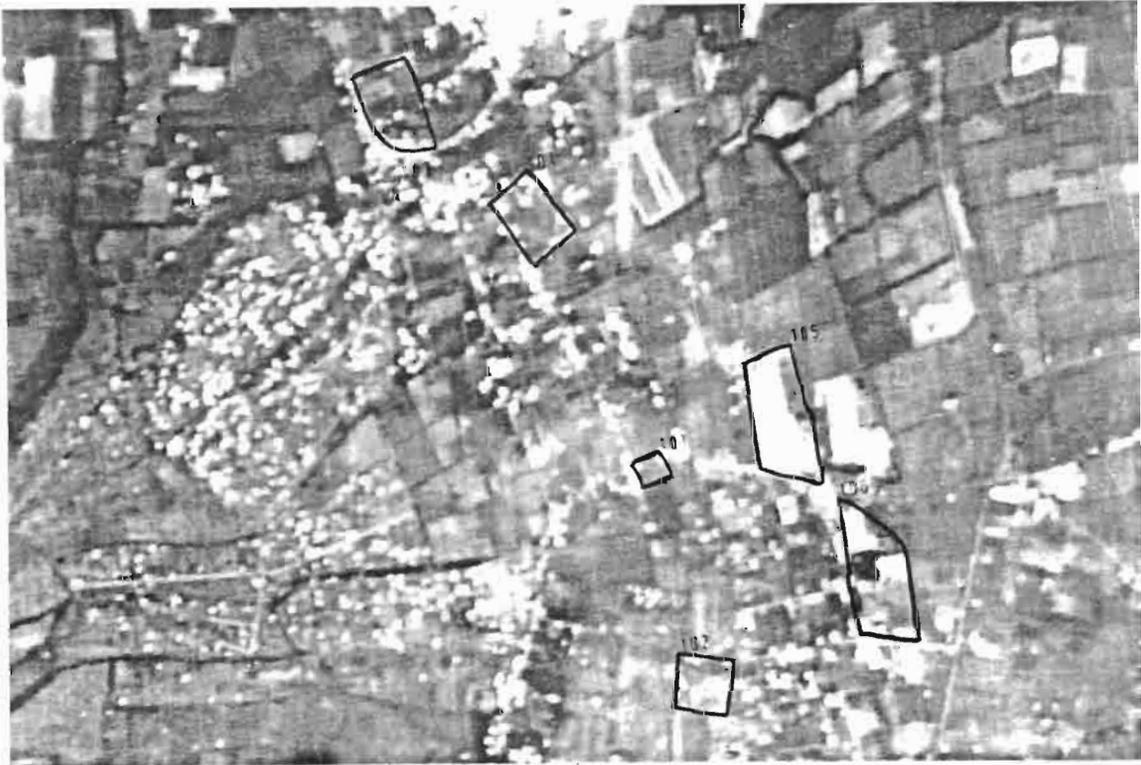


Photo 2.1.1- Limites de quelques îlots de l'échantillon morphologie reportées sur l'image panchromatique SPOT de Juin 1986 de Quito -

2.1.3.3) Méthode d'élaboration d'une typologie¹

Nous allons maintenant suivre les différentes étapes que nécessite l'élaboration d'une typologie, étant bien entendu qu'il s'agit ici d'une **élaboration**, aucune nomenclature n'étant en principe adaptée à décrire des types et leur relation, compte tenu de l'aspect novateur de l'instrument de mesure (donc des variables), et de l'individu. Cette élaboration ne peut se faire que sur échantillon, le regroupement des individus ne pouvant être contrôlé et interprété que dans le cas d'effectif limité.

a) Problématique.

La problématique est très simple bien qu'à plusieurs niveaux : quel type de tissu urbain peut-on définir à partir des variables que nous retenons ? Quelles autres variables (informations) faudrait-il prendre en compte pour aboutir à une typologie plus communément utilisée par les aménageurs ? Est-il possible d'extraire de telles informations d'une image satellite et à quel prix² ?

b) Délimitation et partitionnement de l'univers d'étude.

En ce qui nous concerne, l'univers est délimité par la surface urbanisée couverte par la base de données intégrées à Marseille, et de façon automatique à partir d'images satellite à Quito. Dans ces deux cas, cet univers inclut tous les types de tissu urbain usuellement déchiffrés.

La délimitation précise du territoire d'étude conditionne très fortement les types de variables issus de l'analyse d'images satellite et aptes à décrire les individus. De même, il est conseillé de réduire le domaine d'étude en fonction des spécificités des différents types d'individus. Une première pré-classification grossière ne peut que favoriser une discrimination plus subtile ultérieurement. En effet, ce ne sont pas les mêmes paliers ni les mêmes canaux qui sont les plus discriminants, suivants que l'on s'intéresse à un milieu à dominante plutôt urbaine ou plutôt agricole.

c) Echelle de l'analyse

La taille du pixel (100, 400, 900 m²) fixe un seuil minimum de finesse de la nomenclature en dessous duquel il est illusoire de travailler, compte tenu de la taille des objets urbains que l'on peut distinguer. **En fait, le choix de l'échelle à laquelle on observe les individus influence considérablement le genre de type que l'on peut définir** (il en interdit certains, en favorise d'autres). Pratiquement, il est délicat de travailler à une échelle supérieure à 1/15 000 lorsque l'on a acquis une image panchromatique SPOT. On notera avec intérêt, que cette échelle correspond à celles des documents graphiques utilisés dans le cadre des Schémas Directeurs.

¹ Cette partie est très largement inspirée de l'ouvrage de P.PANERAI, Principes d'analyse urbaine, Op cité.

² Au sens de durée de développement de programmes informatiques appropriés ou de temps calcul

d) Outils de mesure et variables.

L'outil de mesure est ici le capteur (TM de Landsat ou HRV de SPOT) qui mesure la luminance des objets regroupés dans un pixel.

A chaque individu (pâté de maisons), on peut donc associer un histogramme des valeurs radiométriques dans les différents canaux du spectre.

De plus, l'agencement spatial des pixels constituant le pâté de maisons doit être pris en compte. On parle alors de **texture**.

Certains éléments urbains comme les bâtiments possèdent des formes et se répartissent dans l'espace d'une façon souvent caractéristique et peuvent aider à attribuer une fonction à la zone qui les inclut. Il est donc souhaitable de chercher à caractériser les pâtés de maisons à l'aide de variables qui décrivent précisément morphologie et topologie. Les possibilités de visées obliques du satellite SPOT laissent présager, dans un avenir proche la disponibilité d'une information concernant la hauteur des bâtiments. Une évaluation de la hauteur du bâti en seulement trois postes permettrait sans aucun doute de lever l'ambiguïté quant à la fonction du bâtiment, et par conséquent faciliterait une détermination du type de tissu urbain auquel il appartient.

De ces trois grands types d'informations (luminance, texture-structure, topologie-volume) certains ne peuvent évidemment prendre cohérence qu'au niveau où ils sont détectables visuellement, c'est à dire au minimum (spatialement parlant) au niveau d'une zone. Le premier type d'information est généralement considéré comme le mieux connu, cependant peu de travaux considèrent comme individu une zone. Ils n'ont donc pu résoudre le problème de sa caractérisation. Pour notre part, nous avons opté pour une caractérisation de la distribution des valeurs radiométriques dans les différents canaux en faisant appel aux **quantiles** qui sont définis sur la base d'une équipopulation à un niveau global¹. Cette caractérisation constitue à nos yeux un juste milieu entre une information trop riche et donc trop lourde à manipuler (problèmes informatiques) et une information trop floue pour espérer classer nos individus de façon thématiquement intéressante.

Plusieurs paramètres ont été mis au point pour rendre compte de la texture (matrice de cooccurrences de niveaux de gris, autocorrélation spatiale, variogramme, transformée de FOURIER,...), cependant ces variables, qui possèdent un fort pouvoir discriminant, font appel à des méthodes d'élaboration trop lourdes à mettre en oeuvre dès lors qu'il s'agit de caractériser autant d'individus (plusieurs milliers), ici les pâtés de maisons. Aucune réponse satisfaisante n'a pu être apportée à ce sujet. Nous nous contenterons donc, pour apprécier la texture d'un individu, d'indications concernant la distribution (quantiles) de l'écart-type local dans le canal panchromatique.

Quant aux informations susceptibles de renseigner sur la forme, l'agencement ou la hauteur d'objets urbains (bâtiments essentiellement), la littérature n'en fait à notre connaissance aucunement écho. Dans ce domaine, tout reste encore à définir et à développer...

e) Méthode de classement.

Dans un premier temps, il serait hasardeux de mettre en oeuvre une méthode de classification qui soit supervisée. En effet, une telle démarche supposerait qu'il existe une vision privilégiée de l'espace urbain, quelle que soit l'approche ou la méthode suivie, ce qui serait pour le moins réducteur, voire même faux. Le "nouvel" instrument de mesure que constituent les capteurs HRV ou TM, la définition d'un individu complexe, permettent d'envisager une approche fondée sur des concepts à priori différents,

¹ Cela signifie que, **tous individus confondus**, les effectifs de chaque quantile sont égaux. Ce n'est certes pas une définition optimum des seuils des quantiles, et il serait préférable de fixer ces seuils en tenant compte de valeurs radiométriques significatives d'un point de vue thématique, prenant alors en compte les signatures spectrales des matériaux.

mais qu'il reste justement à définir. Pour, ce faire, il convient de regrouper tous les individus qui se ressemblent le plus suivant des critères au préalable clairement définis (une distance par exemple), en opposition avec ceux dont ils se distinguent le plus, ce qui permet de définir un certain nombre de critères de différenciation (ou propriétés). Il est conseillé de mettre de côté les individus qui semblent n'appartenir à aucune des familles qui apparaissent ou qui, à l'inverse peuvent appartenir à plusieurs de ces familles.

f) Elaboration des types et thématique.

Aucune nomenclature précise ne peut être fixée dès le départ, "l'objet urbain n'est pas abstrait, universel, idéal typique, mais concret localisé et spécifique¹", seules demeurent les limites imposées à la fois par les variables (et donc l'outil de mesure) et le type d'individus. Compte tenu du choix que nous avons effectué (individus, variables), c'est bien à une description du **tissu urbain** que nous désirons aboutir.

Décrire précisément, puis énumérer de façon la plus exhaustive possible les propriétés communes aux individus qui appartiennent à un même groupe, essayer de définir un archétype pour chaque classe, telles sont les étapes obligatoires de la définition des types qui débouchera alors logiquement sur la présentation de la nomenclature retenue. Cette nomenclature orientera donc les axes thématiques qu'il sera alors possible d'explorer. Cependant, même lorsque l'on s'appuie sur un instrument de mesure précis, il ne faut pas oublier que "toute typologie de l'habitat demeure empreinte de subjectivité et que les frontières entre les différents types d'habitat demeurent très floues"².

CONCLUSION.

L'exploration méthodologique que nous préconisons, classement de pâtés de maisons décrits par des variables caractérisant leurs distributions radiométriques, n'est pas contradictoire avec une étude poussée des signatures spectrales des matériaux utilisés en milieu urbain. Les deux conceptions qui semblent s'affronter (pixel et zone) sont plus complémentaires que contradictoires. En effet, une meilleure connaissance des signatures spectrales des matériaux ne peut que préciser les seuils thématiquement pertinents dans les différentes bandes spectrales; une étude des rapports entre matériaux de construction et usage du sol oriente favorablement et aide à la constitution de la typologie définissable, de même que l'étude des distributions spectrales des pâtés de maisons tend à améliorer la connaissance de l'organisation spatiale des îlots détectable par imagerie satellitaire.

Par contre, il devient urgent de mettre au point des mesures précises et peu coûteuses de texture-structure et d'indications topologiques à partir d'images satellite et plus particulièrement à partir d'images panchromatiques SPOT particulièrement bien adaptées à la description de zones urbaines.

¹ P. MERLIN, F. CHOAY, Op cité.

² P. ANTOINE et Al., Op cité.

L'intégration des données dans la base a été réalisée en trois phases que nous aborderons successivement : la préparation des fonds cartographiques avant numérisation, la numérisation de ces fonds sur table à digitaliser, et l'intégration de l'information thématique s'y rapportant.

Ces différentes étapes ont été franchies avant mon intégration dans l'équipe ORSTOM, je n'ai donc pas participé à ces différents travaux. Cependant, il est nécessaire d'énumérer brièvement les informations constituant cette base, et de rappeler les quelques problèmes tant conceptuels que pratiques, que soulève la création d'une base de données géographique en milieu urbain. Nous nous attacherons plus particulièrement à l'intégration des données graphiques.

2.1.3) PRÉSENTATION DES DONNÉES INTÉGRÉES DANS LA BASE DE DONNÉES SUR MARSEILLE ET GÉRÉE PAR LE SYSTÈME SAVANE.¹

Nous avons déterminé la zone d'étude de façon à intégrer les 3534 districts de recensement INSEE que compte la ville de Marseille (**Figure 2.1.3**). Le cadre a été choisi de manière à inclure les différents types de tissus urbains marseillais : les quartiers industriels et les grands ensembles d'habitation du nord, les quartiers résidentiels du sud, le vieux centre, et les zones pavillonnaires de l'est.

Les données intégrées dans la base gérée par le système *SAVANE* et qui couvrent l'ensemble de notre zone d'étude ont été recueillies ou élaborées dans un laps de temps très court :

- les données démographiques issues du recensement de population de mars 1982 (**Photo 2.1.2**),
- les caractéristiques morphologiques observées sur photographies aériennes² de 1983 (**Photo 2.1.3**) et confortées par une enquête sur le terrain (1986),
- l'image satellite Thematic Mapper de Février 1983 (**Photo 2.1.4**).

Comme nous l'avons précisé précédemment, le système *SAVANE* conserve le mode d'implantation propre de chaque type d'information.

2.1.3.1) Préparation des fonds cartographiques à numériser.

L'intégration des fonds de cartes dans la base gérée par le système *SAVANE* se fait par numérisation sur table à numériser BENSON 1601.

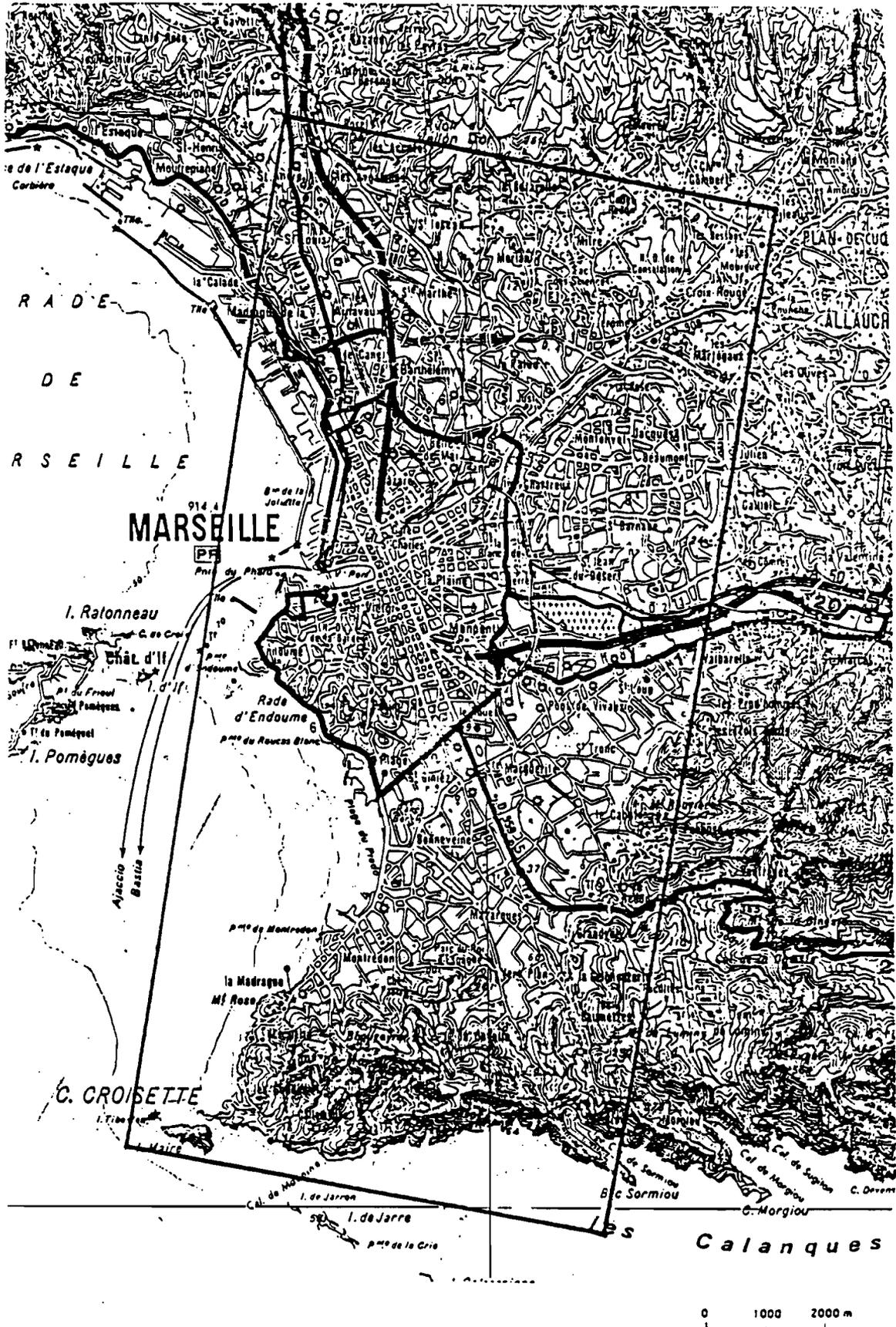
Dans le cas de Marseille, la précision des fonds de carte est d'autant plus importante que l'on veut croiser à grande échelle les différentes informations, et que les limites de zones sont significatives et objets d'étude : par exemple, nous utilisons le tracé de la voirie, issu de la carte des limites d'îlots, pour tester la qualité géométrique du recalage des images satellite.

Trois paramètres doivent être considérés : la précision du tracé sur le document à numériser, l'échelle de numérisation, et le système de projection géographique de la carte à numériser ; nous évoquerons brièvement ces trois points et les questions qui en découlent.

¹ Cette partie constitue une synthèse des écrits de F. DUREAU inclus dans le rapport ATP CNRS/CNES et répertoriés en Annexes 7 et 8.

² ces photographies aériennes ont été réalisées en Août 1983 dans le cadre de la couverture systématique du littoral français (mission IPLI, lot n°23, échelle voisine de 1/23 000, panchromatique noir et blanc)

Figure 2.1.3 - Localisation de la zone d'étude sur Marseille -



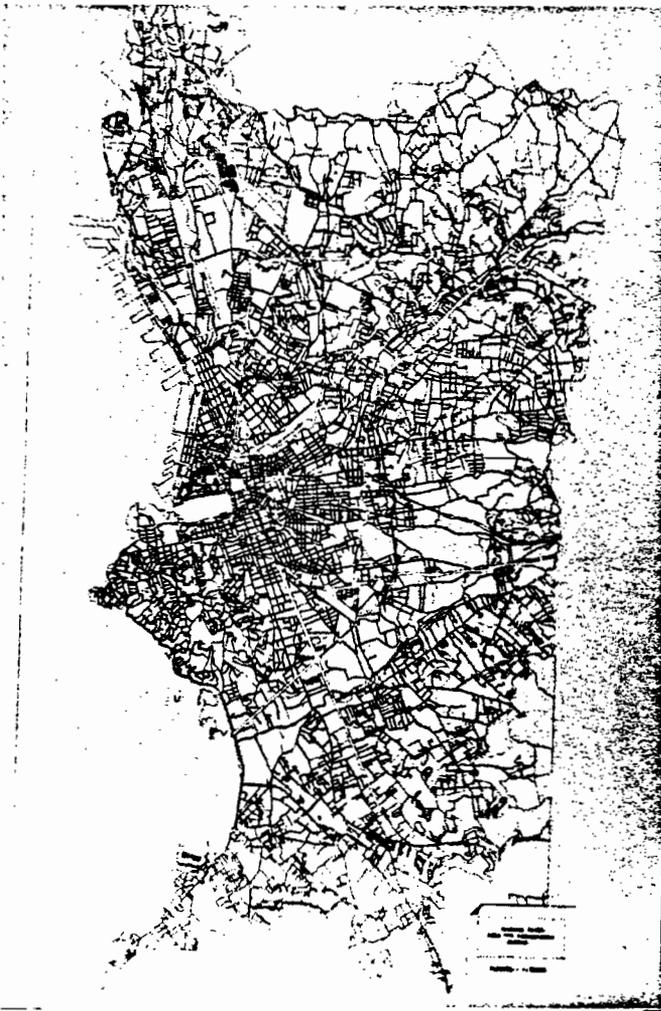


Photo 2.1.2 - Contours des districts de recensement INSEE, projection Lambert 3 -

Photo 2.1.3 - Détail du zonage morphologique sur la mosaïque de photographies aériennes -



Photo 2.1.4 - Canal 4 (infra-rouge proche) de LANDSAT Thematic Mapper -

. La précision du tracé sur le document à numériser.

Le tracé très approximatif de la cartographie INSEE ne permet pas une numérisation directe des contours des districts de recensement. Il est donc indispensable de redessiner les fonds de carte sur un support géographiquement exact. La commune de Marseille est presque entièrement couverte par une cartographie à grande échelle (1/5000 ou 1/2000), réalisée par l'ICOREM à partir de la fin des années 70. C'est donc sur ces cartes que le tracé des 3354 districts INSEE composant notre zone d'étude marseillaise a été reporté.

Le zonage morphologique a été réalisé sur une mosaïque de photographies aériennes non contrôlée, il comporte par conséquent de nombreuses déformations géométriques, et ne correspond à aucune projection cartographique. Le zonage ne pouvait donc pas être digitalisé sous cette forme. C'est pourquoi, avant numérisation, il a été nécessaire de reporter ces zones sur un fond de carte géographiquement correct : nous avons choisi la carte IGN au 1/25 000, dont l'échelle est proche des documents photographiques utilisés pour ce zonage morphologique, et qui comporte les principaux éléments du réseau de voirie.

. L'échelle des documents à numériser.

L'échelle de numérisation est un paramètre important à considérer : même si, techniquement, le système SAVANE permet de créer des images à n'importe quelle échelle à partir d'un fond numérisé à une échelle donnée, l'échelle de numérisation est un facteur limitant qu'il faut prendre en considération, pour deux raisons :

- l'une est d'ordre purement cartographique : le degré de précision d'un tracé cartographique est directement lié à son échelle.
- l'autre est d'ordre conceptuel : toute information a un domaine de validité propre, que l'on ne doit pas dépasser. **Ainsi, une typologie de l'occupation du sol est directement liée à l'échelle à laquelle elle a été établie et ne sera pas la même si on la bâtit au 1/1 000 ou au 1/40 000** : un changement d'échelle n'est pas une simple opération géométrique, mais influe directement sur la nature des phénomènes observés. En milieu urbain un faible changement d'échelle modifie sensiblement l'objet d'observation et la perception de l'organisation spatiale.

Sur Marseille, les données démographiques issues du recensement correspondent à une cartographie numérisée au 1/5000 (et 1/2000 sur une petite partie de la zone d'étude, non couverte par les cartes ICOREM au 1/5000) ; quant aux données relatives à la morphologie urbaine, leur fond de carte a été saisi au 1/25.000.

L'écart entre les échelles de saisie des deux informations n'est pas négligeable (rapport de 1 à 5 dans la majeure partie de la zone d'étude, et de 1 à 12 parfois) : dans l'opération de jointure spatiale entre zones INSEE et zones morphologiques, il est nécessaire de prendre en considération cette différence d'échelle de saisie, qui se traduit par une imprécision relative plus importante dans le tracé des zones morphologiques que dans celui des zones INSEE.

On ne peut donc pas exploiter les résultats relatifs à la morphologie à une échelle trop différente de celle à laquelle on a fait la photo-analyse : ce serait une erreur de vouloir exploiter la typologie que nous avons établie pour travailler au 1/500, où, d'ailleurs, on perdrait la perception du tissu urbain pour ne plus observer que le bâtiment en tant qu'objet bien individualisé à cette très grande échelle.

. Le système de projection géographique des documents à intégrer dans la base.

L'information graphique décrivant le découpage INSEE (contours des districts de recensement) et le découpage morphologique (contours des zones morphologiquement homogènes) est saisie et conservée sous forme vectorielle dans le système *SAVANE*. Après la numérisation, les coordonnées table des périmètres de zones sont transformées en coordonnées géographiques à partir des coordonnées géographiques connues pour les trois ou quatre points de calage saisis en même temps que le fond cartographique. Cette transformation suppose bien évidemment que l'on connaisse le système de projection du fond de carte numérisé.

Dans le cas de Marseille, les districts INSEE sont cartographiés en projection LAMBERT III, puisque le tracé a été repris sur les plan ICOREM, qui sont tous en LAMBERT III. De même, le zonage morphologique est en LAMBERT III, puisque c'est la projection utilisée par l'IGN pour sa carte au 1/25 000. Quant à l'image satellite, l'IGN a effectué un recalage géographique selon une projection de même type, LAMBERT III.

2.1.3.2) Numérisation des fonds de cartes.

La numérisation des cartes des districts de recensement et du découpage morphologique a été réalisée par l'Unité d'Infographie en une période de six mois environ (y compris contrôles et corrections). Etant donné la surface occupée par la cartographie des districts de recensement et le nombre de zones qu'elle comporte, la zone d'étude a été digitalisée par parties, en 26 feuilles différentes.

2.1.3.3) Intégration de l'information graphique.

Après la phase de numérisation, les coordonnées table des périmètres de zones sont transformées en coordonnées géographiques (longitude, colatitude par rapport à un point de référence propre à la base), à partir des coordonnées géographiques connues pour les points de calage saisis en même temps que le fond cartographique.

Les 26 feuilles digitalisées décrivant les districts de recensement ont ainsi été intégrées dans la base : elles constituent l'information graphique de la relation "Population" de la base "Marseille".

Concernant le zonage morphologique reporté sur carte IGN au 1/25 000, il a été digitalisé en une seule feuille. L'intégration de cette information graphique de la relation "morphologie" et sa comparaison avec l'information décrivant le découpage INSEE a tout de suite révélé une incohérence sensible entre les deux découpages.

Etant données l'échelle de digitalisation (1/5000 et 1/2000 pour le découpage INSEE, 1/25 000 pour la morphologie), la bonne cohérence interne du fichier graphique décrivant le découpage INSEE, et la stabilité du support papier des cartes ICOREM (bien meilleure que celle de la carte IGN au 1/25 000), on peut affirmer sans aucun doute que l'information graphique décrivant le découpage INSEE est bien plus fiable que celle relative à la morphologie : nous avons donc procédé à une correction des points de calage du zonage morphologique pour rendre cohérents les deux fichiers graphiques, INSEE et morphologie.

C'est donc selon ces points de calage corrigés qu'a été réalisée l'intégration dans la base de l'information graphique décrivant le découpage morphologique.

2.1.3.4) Intégration de l'information thématique.

L'information thématique relative aux fonds de carte numérisés constitue les "attributs", pour reprendre le vocabulaire des bases de données relationnelles : dans le cas de Marseille, on peut distinguer deux relations (morphologie et population), avec deux séries d'attributs, l'une correspondant au zonage morphologique, l'autre aux districts du recensement.

Tableau 2.1.1 - Relation morphologie. Liste des attributs -

- 1 . Numéro de zone morphologique
- 2 . Densité
- 3 . Surface minimum de l'élément bâti
- 4 . Surface maximum de l'élément bâti
- 5 . Forme de l'élément bâti majoritaire
- 6 . Longueur de l'élément bâti majoritaire
- 7 . Largeur de l'élément bâti majoritaire
- 8 . Valeur dominante du bâti
- 9 . Valeur sous-dominante du bâti
- 10 . Valeur dominante du non bâti non voirie
- 11 . Valeur sous-dominante du non bâti non voirie
- 12 . Hauteur du bâti
- 13 . Surface de l'élément bâti majoritaire
- 14 . Rapport longueur/largeur de l'élément bâti majoritaire
- 15 à 24 : Attributs 2 à 4, et 8 à 14 seuillés et recodés
- 25 . Type morphologique (8 types + non bâti)

Tableau 2.1.2 - Relation population. Liste des attributs -

- 1 . Population municipale
- 2 . Population sans double compte
- 3 . Nombre de ménages ordinaires
- 4 . Nombre de ménages collectifs
- 5 . Population comptée à part
- 6 . Nombre de résidences principales
- 7 . Nombre de résidences secondaires
- 8 . Nombre de logements vacants
- 9 . Nombre d'immeubles
- 10 . Pourcentages d'étrangers (Hommes + femmes)
- 11 . Pourcentage d'étrangers (Hommes > 19 ans)
- 12 . Pourcentage de chômeurs (Hommes > 19 ans)
- 13 . Taille moyenne des ménages
- 14 . Pourcentage de ménages d'une personne
- 15 . Pourcentage de ménages de 6 personnes et plus
- 16 . Pourcentages de 0-4 ans révolus (Hommes + femmes)
- 17 . Pourcentage de 60 ans et plus (Hommes + femmes)

La liste des attributs a été définie par notre application dans le cadre de ce programme de recherche :

- *morphologie* (voir **Tableau 2.1.1**) : vingt cinq variables décrivant analytiquement la morphologie, et un indicateur synthétique du type morphologique. Ont été intégrées dans la base les variables brutes, telles qu'elles ont été produites par la photo-analyse, les variables dérivées (exemple : rapport longueur / largeur) ainsi que les variables seuillées et recodées. Nous avons donc une certaine redondance

d'information, une même variable pouvant apparaître trois fois dans la base, à des stades différents de recodage.

- *population* (voir **Tableau 2.1.2**) : pour chaque district INSEE, neuf variables décrivant les nombres de logements et les effectifs de population selon différentes définitions liées à des critères de résidence, ainsi que huit variables décrivant quelques aspects importants des structures de population

La base de données sur Marseille comporte donc les données morphologiques et démographiques nécessaires au programme de recherche ; l'intégration des données satellitaires (image TM recalée) vient compléter le dispositif. Cette intégration a nécessité des travaux de développement informatique sur les deux systèmes.

. L'information sur la morphologie urbaine.

La connaissance de la morphologie urbaine sur l'ensemble de la zone d'étude repose sur l'analyse visuelle d'une mosaïque de photographies aériennes au 1/23 000 (mission IGN d'Août 1982), avec contrôle terrain. L'analyse de la mosaïque photographique a été réalisée, classiquement, en deux étapes¹ : zonage en unités homogènes, puis description des 542 zones ainsi dégagées selon des caractères morphologiques (taille et forme des éléments bâtis, valeur dominante et sous dominante du bâti, valeur dominante et sous dominante de l'espace interstitiel, hauteur et densité du bâti).

Les traitements d'analyse des données sur le fichier descriptif des zones et les vérifications sur le terrain ont permis de définir une typologie morphologique synthétique en huit postes.²

A l'issue de l'analyse visuelle et des traitements d'analyse des données, nous disposons donc d'une information homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, décrivant la morphologie urbaine en 1982, de façon synthétique (typologie en 8 postes), et analytique (onze descripteurs pour chacune des zones) ; le découpage spatial dans lequel s'inscrit cette information lui est propre, et ne tient aucunement compte du découpage établi par l'INSEE, ni de celui des îlots. Il est néanmoins certain que le tracé des rues introduit une discontinuité sur la photographie aérienne, et a donc tendance à influencer sur le tracé des zones homogènes.

Comme le montre la **Figure 2.1.4**, les trois types de données localisées à intégrer dans la base s'inscrivent dans des découpages géographiques différents, ce qui justifie le recours au système *SAVANE* pour les mettre en relation et les gérer sans obligation de se ramener à un découpage unique.

Ainsi que l'analyse des informations à intégrer dans la base de données sur Marseille l'a mis en évidence, ces différents découpages résultent bien sur du mode d'implantation spatiale propre à un phénomène, mais aussi de la méthode de collecte et d'exploitation de l'information décrivant ce phénomène. Ce deuxième facteur déforme nécessairement la réalité des faits que l'on cherche à observer : les données à intégrer dans la base correspondent à un certain niveau de médiatisation, donc à une certaine modélisation du réel, que nous maîtrisons plus ou moins selon la source d'information dont elles sont issues. Cette modélisation est complétée par les choix qui sont faits au niveau des modalités d'intégration des données dans la base, notamment les choix de l'échelle de

¹ Voir J.P. GILG, 1976 - Aperçu d'une expérience de télé-analyse et photo-analyse. Informatique et sciences humaines N° 30, pp 21-38.

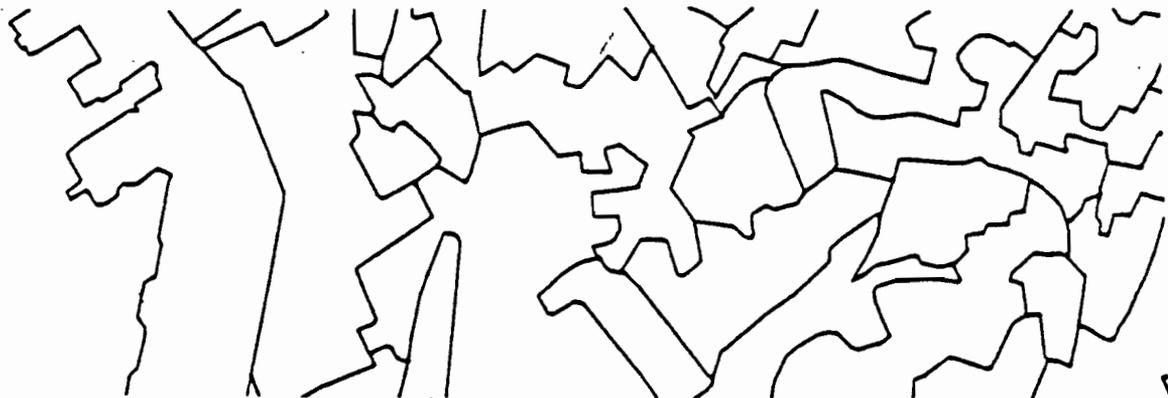
² Voir à ce sujet la thèse de O. BARBARY et les écrits de F. DUREAU.

Figure 2.1.4 - L'implantation géographique des trois types d'information à intégrer dans la base de données géographiques sur Marseille -



Découpage INSEE en districts de recensement

0 250 500 m



Zonage morphologique

0 250 500 m

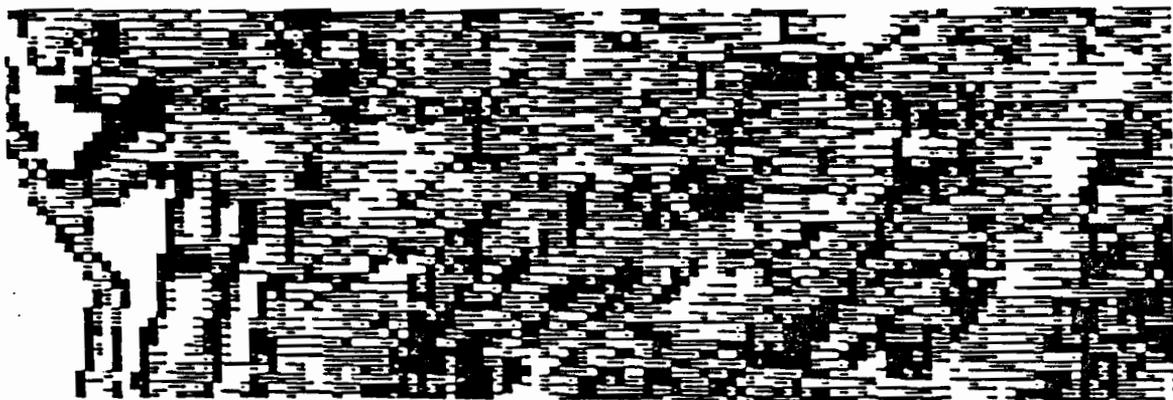


Image Thematic Mapper

0 250 500 m

saisie, du découpage géographique, des relations et des attributs (au sens des bases de données relationnelles).

2.1.3.5) Intégration des données satellitaires.

L'image satellite de Marseille que nous utilisons a été enregistrée en Février 1983 par le capteur Thematic Mapper. Cette image a été recalée géographiquement par l'IGN, selon une projection LAMBERT III : ce recalage s'appuie sur une dizaine d'amers (points caractéristiques de la surface terrestre bien identifiés sur l'image satellite et localisés sur une carte topographique à grande échelle).

Dans le système *SAVANE*, les données graphiques sont structurées et stockées sous forme vectorielle : comment intégrer dans ce système des données de télédétection qui sont, par nature, sous forme matricielle ?

De par l'existence de la phase de transformation temporaire des données de la base en structure matricielle, l'intégration des images matricielles comme celles produites par les satellites ne pose aucun problème de fond. Le seul problème technique est la mise en cohérence des paramètres définissant la matrice de pixels sur laquelle sont projetées les données (initialement sous forme vectorielle), et de la matrice de pixels de l'image satellite. Connaissant les paramètres spatiaux de l'image satellite (taille du pixel, système de projection géographique, et coordonnées du pixel SW de l'image), il suffit de créer dans *SAVANE* des images de mêmes paramètres : les modules d'interrogation de *SAVANE* donnent la possibilité à l'utilisateur de faire ces choix sous forme interactive.

EN CONCLUSION, DE NOUVELLES PERSPECTIVES EN TÉLÉDÉTECTION?

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

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

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

- considérer le pixel par rapport à une stratification de l'espace (par exemple l'altitude, la pente, la pluviométrie...), car on sait très bien qu'une même valeur d'un indice radiométrique peut correspondre à des objets différents, de même qu'une classe d'occupation du sol peut avoir plusieurs réponses suivant les strates spatiales considérées,
- considérer des objets prédéfinis (la maison, l'îlot, le quartier, la parcelle...) et enrichir la connaissance de ces objets par une approche contextuelle de la radiométrie (par exemple, agencement géométrique et radiométrique dans la zone, calcul de la valeur d'un indice pour la zone...).

Sortir le pixel de son ghetto radiométrique, permettre la création et l'actualisation rapide d'une cartographie thématique : telles sont les voies qui nous semblent aujourd'hui ouvertes en télédétection par l'utilisation d'un système d'information géographique.

Les travaux traitant de l'évaluation de la densité de l'espace bâti que nous présentons dans la partie suivante, se situent dans le prolongement direct de ces considérations théoriques. L'exposé ci-après de la méthode de travail adoptée à ce propos sur l'image T.M. de Marseille constitue un bon exemple des nouvelles voies de recherches permises par l'utilisation d'un système d'information géographique.

2.2) ESTIMATION DE LA "DENSITÉ DU BATI" À PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

A l'évidence, lorsque l'on cherche à stratifier l'espace urbanisé pour optimiser une enquête démographique par sondage, le premier critère qui vient à l'esprit est la prise en compte de la densité de cet espace. De plus, les résultats des tests opérés par O.BARBARY concernant les stratifications indiquent "que la contribution du descripteur *densité du bâti*, au gain qu'apporte une stratification morphologique synthétique varie entre 30 et 80 % du gain total et se situe, pour la plupart des variables démographiques étudiées au dessus de 50 %".

Ce sont donc les étapes de la mise au point de cette stratification, du moins la mise en évidence sur images satellite du premier de ces descripteurs, la *densité de l'espace bâti*, que nous exposons dans cette partie. Le but de ce travail est donc de générer, à partir d'images LANDSAT Thematic Mapper 6 canaux, une image qui rende compte de la densité du bâti observée sur mosaïque, et vérifiée sur le terrain. De façon plus pragmatique, il s'agit donc de classer les images LANDSAT TM afin de se rapprocher le plus possible de l'interprétation visuelle de la densité du bâti réalisée sur la mosaïque photo-aérienne qui constitue notre référence.

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur un fichier image généré par SAVANE¹ (Photo 2.2.1) qui décrit la zone d'étude en fonction des 6 modalités du descripteur *densité du bâti* tel qu'il a été déterminé sur photographies aériennes. A chacune des différentes zones est affectée la valeur de sa modalité. Des **statistiques descriptives classiques** sont alors calculées pour chaque modalité et dans chacun des 6 canaux de LANDSAT Thematic Mapper. Cette première étape, de "dégrossissage", vise à déterminer les canaux, les combinaisons de canaux (indices) et les opérateurs spatiaux (indices de texture) qui apparaissent les plus discriminants. Aucun résultat statistique issu de cette partie de l'étude ne sera pris en compte pour calculer des coefficients de régression ou pour initialiser une classification. En effet, la démarche choisie consiste à initialiser le processus de classification à partir d'un **échantillon** (de travail) et à comparer les résultats obtenus soit à l'ensemble de la zone d'étude, soit à un autre **échantillon** (de vérification).

Après le tirage des 80 îlots appartenant à l'échantillon, une nouvelle image, multithématique cette fois, a été générée par SAVANE (Photo 2.2.3), en croisant l'image de la *densité du bâti* avec celle des **îlots échantillon** (Photo 2.2.2), ce qui constitue une jointure spatiale (avec $d=0$). Dans l'image résultante, l'entité n'est plus l'îlot, mais le sous-îlot. En effet, compte tenu de la taille de certains îlots ou de la complexité du tissu urbain, il arrive que les îlots INSEE ne soient pas entièrement compris dans des zones morphologiques de même modalité.

Une enquête "**morphologique**" sur le terrain (Annexe A.2.2.2.2) a eu lieu en juin 1986 afin de tenir compte des éventuelles constructions ou démolitions intervenues entre la date de prise de vue des photographies aériennes et celle de l'enregistrement de l'image TM. De plus, il s'est avéré nécessaire de se déplacer sur le terrain afin de pouvoir caler les informations que l'on a recueillies sur la photographie aérienne avec la réalité terrain (nature du toit, hauteur du bâti, etc...). La superficie de l'élément bâti a pu être déterminée, ainsi que le rapport (surface bâtie/surface totale de l'îlot) qui est noté **coefficient de densité du bâti** dans ce texte.

¹Système de gestion de base de données localisées mis au point par l'Unité d'Infographie de l'ORSTOM.



Photo 2.2.1 - Image du descripteur densité du bâti sur l'ensemble de la zone d'étude -

Photo 2.2.2 - Image des îlots de l'échantillon -

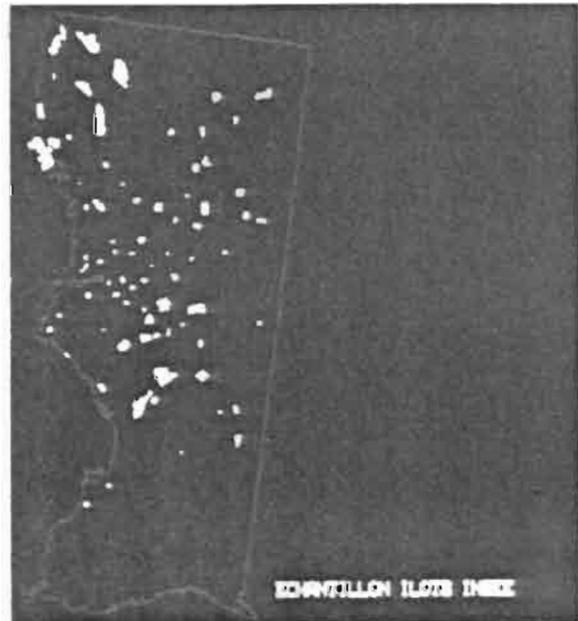


Photo 2.2.3 - Image de la jointure spatiale entre la densité du bâti et les îlots de l'échantillon -

Les statistiques issues des indices qui nous ont paru les plus discriminants ont alors été calculées pour chaque sous-îlot de l'échantillon.

Afin de quantifier le pouvoir de discrimination des différents canaux, néo-canaux (combinaisons de canaux bruts) et opérateurs spatiaux, diverses **régressions simples, multiples et polynomiales ont été tentées avec le coefficient de densité du bâti** calculé précédemment. Les plus performantes sont présentées accompagnées d'une analyse des résidus, indispensable pour mieux comprendre la raison des écarts constatés.

Plusieurs algorithmes ou méthodes de **classification** initialisés sur l'échantillon de travail et testés sur l'ensemble de la zone ou sur un échantillon de vérification ont alors été expérimentés; une discussion sur leur fiabilité comparée, leurs avantages et inconvénients s'ensuivra. Les individus classés sont soit des pixels, soit des îlots. En télédétection, classer des zones pré-définies et non des pixels est peu courant; nous verrons pourquoi cette façon de procéder améliore nos résultats.

Nous aborderons alors les problèmes qu'induit la résolution d'un pixel LANDSAT Thematic Mapper de 30 m de côté en milieu urbain et nous concluons sur la nécessité **d'adapter les méthodes classiques de classification à ce fait particulier ainsi qu'à notre problématique spécifique.**

La véritable conclusion de ce travail sera en fait énoncée à l'issue de la présentation des résultats, en terme de **gain de variance des estimateurs démographiques, que permet l'utilisation de la stratification élaborée sur la base de la meilleure classification de l'image satellite.**

2.2.1) STATISTIQUES DESCRIPTIVES CONCERNANT LE DESCRIPTEUR "DENSITÉ DU BÂTI" OBSERVÉ SUR LA MOSAÏQUE PHOTO-AÉRIENNE AU 1/23 000.

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer quels sont les canaux bruts ou indices qui sont le plus liés au descripteur de densité *du bâti*. Peu de chercheurs travaillant sur le milieu urbain se sont intéressés à la densité du bâti et la plupart d'entre eux suivent une thématique soit fonctionnelle, soit physique (matériaux de construction). Leurs principaux postes de classification sont les suivants : pavillonnaire, grands ensembles, usines et commerces, etc.... Contrairement au cas des milieux naturels ou agricoles, aucun indice ne s'est imposé dans la littérature, et ce, quelle que soit la problématique choisie. En conséquence, nous testerons successivement les canaux bruts, les indices les plus couramment utilisés, ainsi que les composantes principales.

Dans une deuxième partie, nous étudierons de façon sommaire la texture à l'intérieur des zones de même modalité, abordée sous l'angle des matrices de cooccurrences, ainsi que des opérateurs spatiaux les plus classiques.

2.2.1.1) Rappel des caractéristiques statistiques des 6 canaux sur l'image TM de Marseille de Février 1983 ¹.

Les canaux de Thematic Mapper sur lesquels nous travaillons (le canal 6 de Landsat TM n'a pas été étudié dans ce rapport) présentent des étalements et des distributions très divers (Figure 2.2.1). Ces histogrammes ont été calculés en masquant les valeurs radiométriques sur le canal 4 entre 0 et 9 afin que les réponses dues à la mer ne soient pas prises en compte. Ces distributions sont unimodales.

Les données du tableau 2.2.1 ont été calculées sur l'ensemble de la zone d'étude ; elles tiennent compte de l'ensemble de l'image (y compris la mer, contrairement à l'histogramme de la Figure 2.2.1).

Tableau 2.2.1 - Moyenne et écart-type des canaux TM -

CANAL	FENETRE	MOYENNE	ECART-TYPE
TM 1	(bleu : 45-52 μm)	58.70	6.79
TM 2	(vert : 52-60 μm)	22.41	4.88
TM 3	(rouge : 63-69 μm)	23.08	7.84
TM 4	(IR proche : 76-90 μm)	24.49	10.90
TM 5	(IR moyen 1 : 1.55-1.75 μm)	28.88	16.95
TM 7	(IR moyen 2 : 2.08-2.35 μm)	17.14	10.01

Compte tenu du peu d'informations que nous possédons sur les traitements qui ont été effectués en amont, c'est-à-dire lors de la réception des images, il serait inopportun et risqué d'en tirer des conclusions a priori sur la valeur intrinsèque de tel ou tel canal. En particulier, il est excessif de conclure que le canal 5 est le meilleur pour l'unique raison

¹ Extrait du rapport ATP intermédiaire, Bibliographie.

Figure 1 - Histogrammes unidimensionnels. Image TM Février 1983. Marseille.

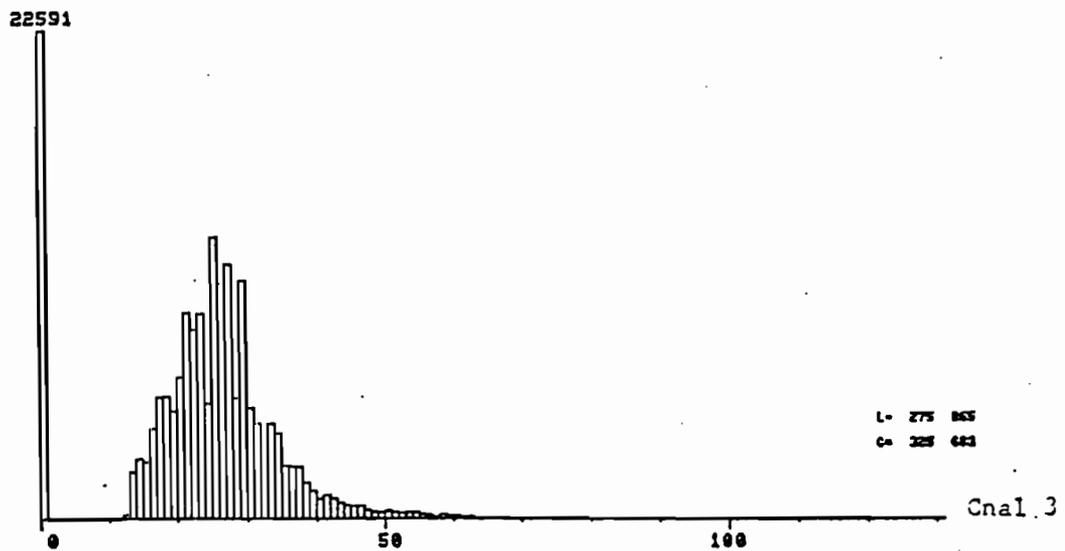
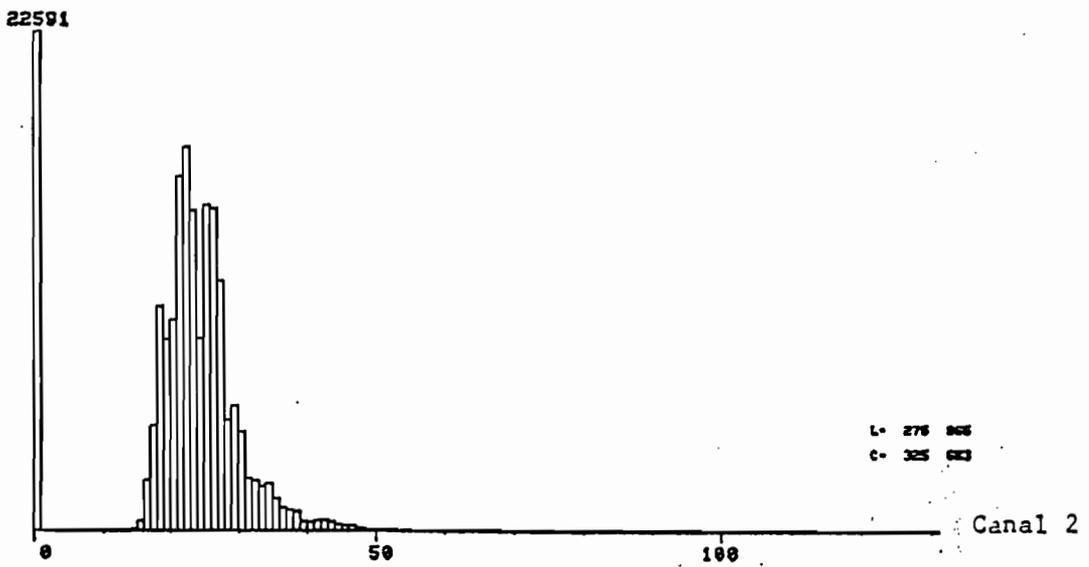
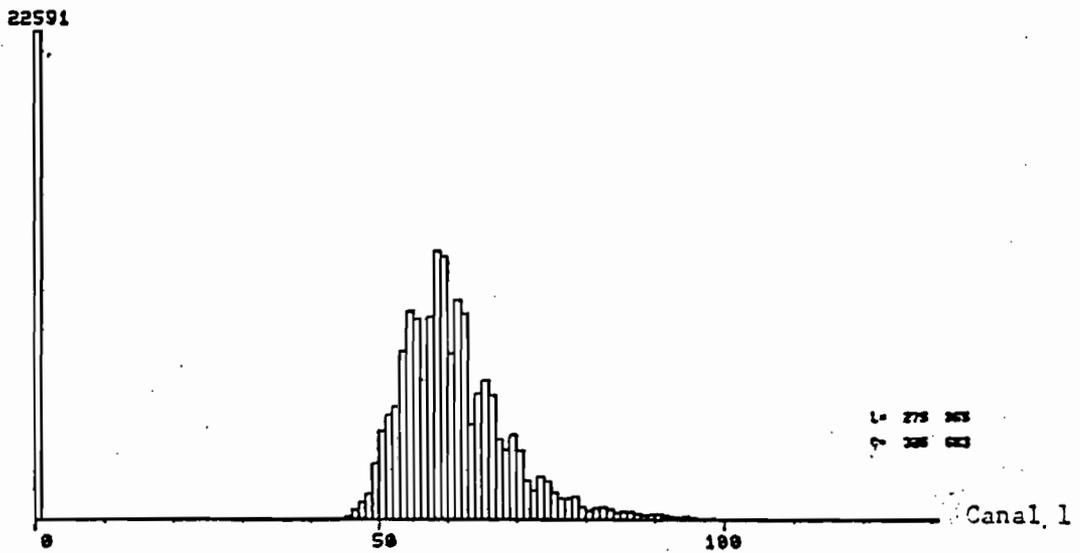
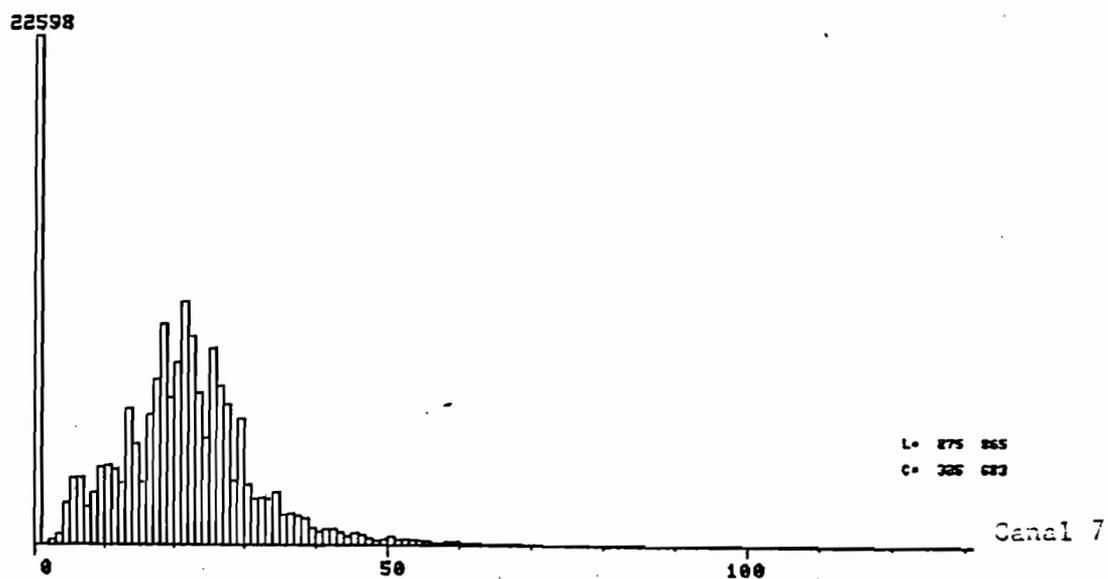
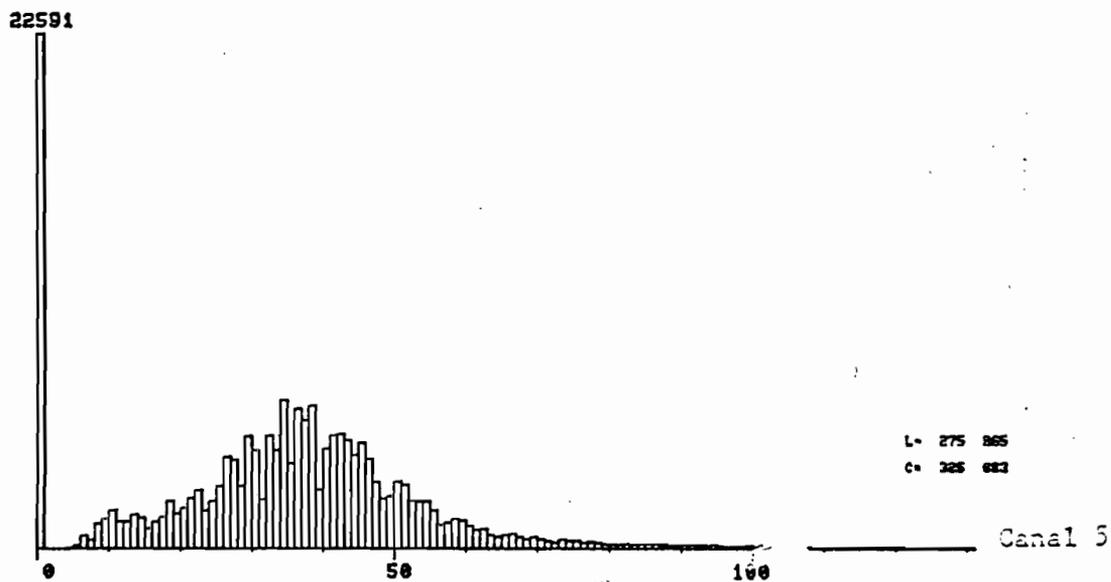
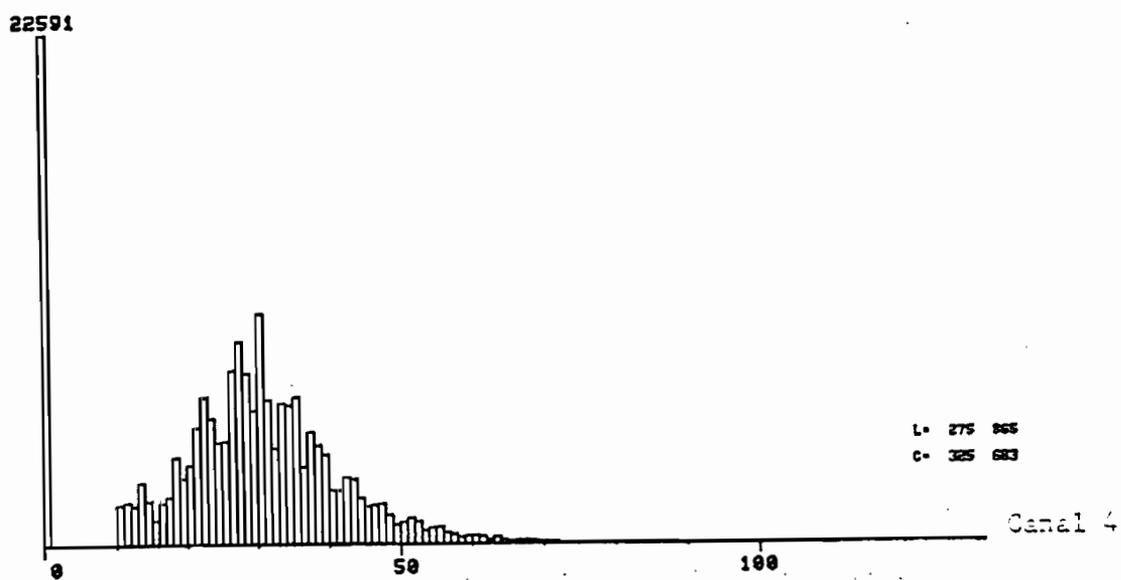


Figure 2.2.1- Distributions radiométriques des canaux bruts -



qu'il offre globalement un écart type plus important que les autres. Néanmoins, la faible valeur des écarts-type dans tous les canaux laisse augurer certaines difficultés quant à la discrimination de nos différents thèmes à l'intérieur de la ville.

Nous avons effectué une analyse en composantes principales sur un fichier image dans lequel la mer est masquée. Les différents canaux ont été centrés et réduits lors des calculs. Nous avons pu en tirer les indications suivantes:

- les canaux sont fortement corrélés entre eux (**Tableau 2.2.2**); la corrélation la plus faible (0.65) est obtenue entre les canaux de l'infra-rouge proche TM4 et du bleu TM1.
- les 3 premiers axes expliquent **98.2 %** de la variance totale (respectivement 86.4%, 8.0% et 3.7%).
- tous les canaux contribuent dans des proportions équivalentes à la formation de la première composante principale, qui s'apparente donc à un canal "brillance".
- la seconde composante oppose les canaux du visible (TM1, TM2, TM3) aux autres canaux (TM4, TM5, TM7) de l'infra-rouge proche et moyen (canal "végétation").
- la troisième composante est imputable à l'opposition entre l'infra-rouge proche (TM 4) et les deux infra-rouge moyens (TM5 et TM 7).

Tableau 2.2.2 - Coefficients de corrélation entre canaux -

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 7
C 1	1.00					
C 2	0.95	1.00				
C 3	0.95	0.97	1.00			
C 4	0.65	0.74	0.75	1.00		
C 5	0.77	0.81	0.84	0.85	1.00	
C 7	0.82	0.85	0.88	0.76	0.95	1.00

Au vu des ces résultats, nous avons conclu à intérêt des combinaisons de canaux (1,4,7) ou (1,5,7) dont la signification thématique restait à déterminer. Une composition colorée de chacune des deux combinaisons a été tirée sur papier. En première approche, la combinaison (1,4,7) distingue plus particulièrement les espaces végétaux contrairement à la seconde (1,5,7) qui renseigne plus spécifiquement sur les espaces minéraux.

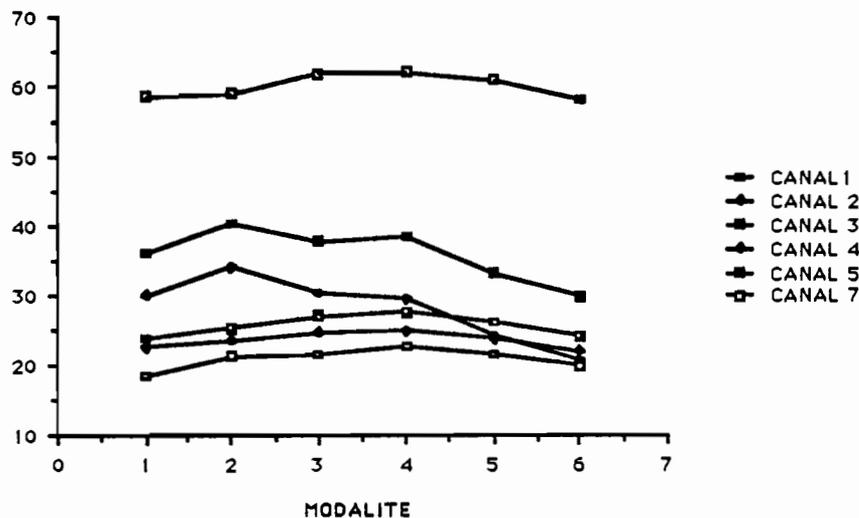
2.2.1.2) Statistiques descriptives sur les variables radiométriques.

Ces statistiques, valeurs radiométriques brutes, indice de végétation et néo-canaux, ont été calculées sur des zones morphologiquement homogènes délimitées sur photographies aériennes à l'échelle 1/23.000, numérisées, puis intégrées dans le système de gestion de base de données SAVANE. L'image de la densité ainsi obtenue (**Photo 2.2.1**) a été superposée aux 6 images correspondant aux 6 canaux de Thematic Mapper. Existe-il des variables radiométriques qui soient liées à la densité du bâti ? Telle est la question à laquelle nous allons tenter de répondre au cours de ce paragraphe.

a) *Les valeurs radiométriques brutes.*

Nous avons effectué des statistiques sur 6 des canaux de Landsat TM, le 7 ième canal (TM 6 infra-rouge thermique) étant provisoirement mis de côté. Dans toutes les figures qui vont suivre, les moyennes de valeurs radiométriques par modalité sont portées en ordonnée, et les modalités sont indiquées en abscisse par ordre croissant de densité.

Figure 2.2.2- Variation des canaux bruts en fonction des modalités du descripteur densité du bâti -



(Présentation par densités croissantes)

1: *Non bâti*, 2: *Très faible*, 3: *Faible*, 4: *Moyenne*, 5: *Forte*, 6: *Très forte*

La modalité N° 1 regroupe toutes les zones non bâties. Les numéros (de modalité) suivants correspondent aux zones de plus en plus denses.

Il apparaît clairement que seuls les canaux 4, infra-rouge proche (**Photo 2.2.4**) et le canal 5, infra-rouge moyen, varient en fonction de la modalité du descripteur retenu. On s'aperçoit que dans ces deux canaux, à partir de la modalité *faible* (voir **Tableaux A.2.2.1** et **A.2.2.2** en **Annexe A.2.2**), la moyenne radiométrique décroît lorsque la densité augmente.

La modalité N° 1 (*non bâti*) apparaît comme la plus disparate avec l'écart-type le plus important dans le canal 4. En effet, elle regroupe des zones très différentes: carrières, étendues agricoles, espaces boisés... De ce fait elle ne pourra certainement pas être mise en évidence à l'aide d'un seul canal TM et devra être traitée à part.

Les zones suivantes paraissent plus homogènes à mesure que l'on se rapproche de la densité maximum (écarts-type plus faibles) mais cela ne semble pas uniquement imputable à leur plus faible étendue, compte tenu des maxima et minima moins éloignés. On remarque une coupure importante surtout dans le canal 4, entre, d'une part, les moyennes des zones très faiblement, faiblement, et moyennement bâties et, d'autre part, celles des zones à forte et très forte densité. Cette coupure laisserait supposer l'existence d'un seuil important entre les modalités *moyenne* et *forte*.

L'analyse des coefficients de forme, asymétrie et aplatissement, dans les canaux 4 et 5 (Tableaux A.2.2.1 et A.2.2.2 en Annexe a.2.2) nous apporte les indications suivantes:

- les différentes modalités présentent une distribution légèrement dissymétrique vers les fortes valeurs,
- tous les coefficients d'aplatissement sont positifs, ce qui caractérise une distribution moins aplatie que la normale; c'est plus particulièrement le cas pour les modalités *très faible* et *très forte* où ce phénomène est plus accentué.

L'analyse des histogrammes des différentes modalités dans le canal 4 (Figure 2.2.3) met en relief quelques résultats intéressants :

- tous les histogrammes présentent des distributions unimodales; on note cependant quelques maxima locaux.
- les modalités *très faible* et *faible* possèdent des distributions quasi semblables, qui sont aussi très proches de celle de la modalité *non bâti*; cependant le caractère asymétrique de la répartition est plus accentué pour la modalité *non bâti*.
- les histogrammes se resserrent autour de la moyenne lorsque l'on considère les modalités les plus denses.
- les densités les plus fortes correspondent aux valeurs radiométriques les plus faibles.

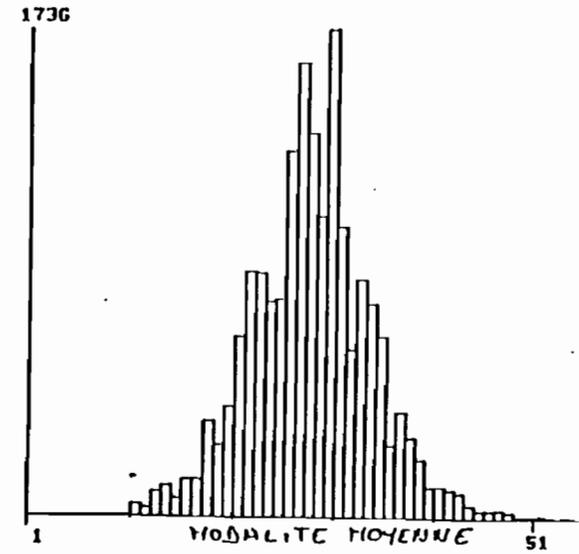
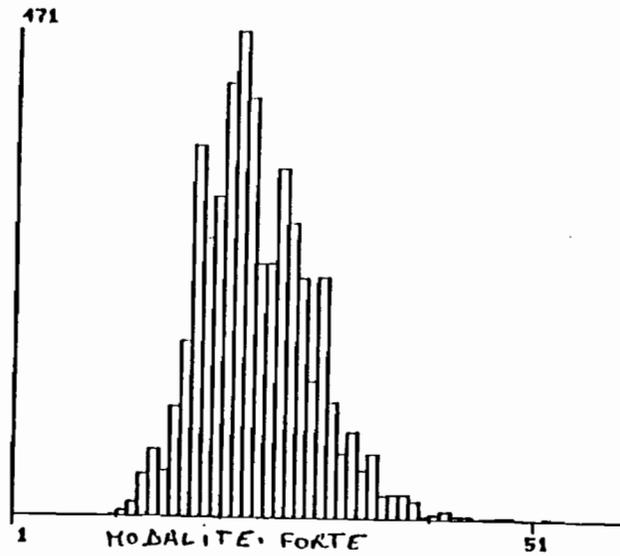
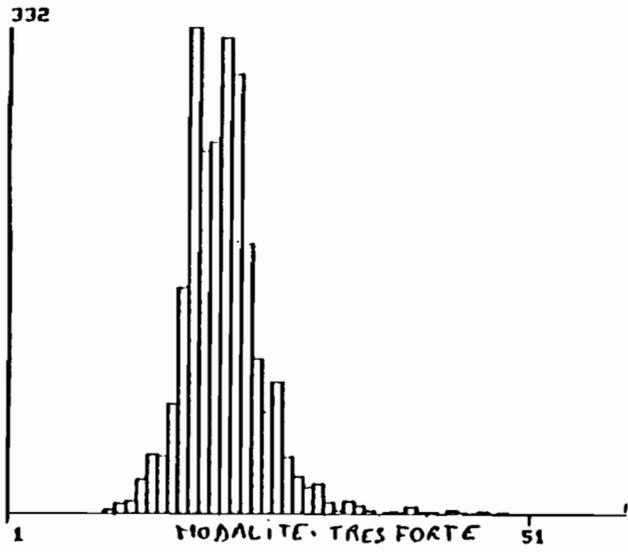
Les résultats de cette première opération nous incitent à travailler en priorité sur le canal 4, secondairement sur le canal 5, ainsi que sur des combinaisons de ces deux canaux.

b) L'indice de végétation $(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$.

Il peut paraître paradoxal de faire appel à un indice de végétation lorsque l'on étudie le milieu urbain. Cependant cet indice distingue bien les zones bâties des zones non bâties, ce qui s'avère être une propriété primordiale dans notre étude. On regrettera le mois d'enregistrement de l'image (février 1983) qui ne favorise pas les contrastes entre les zones urbaines et les zones rurales.

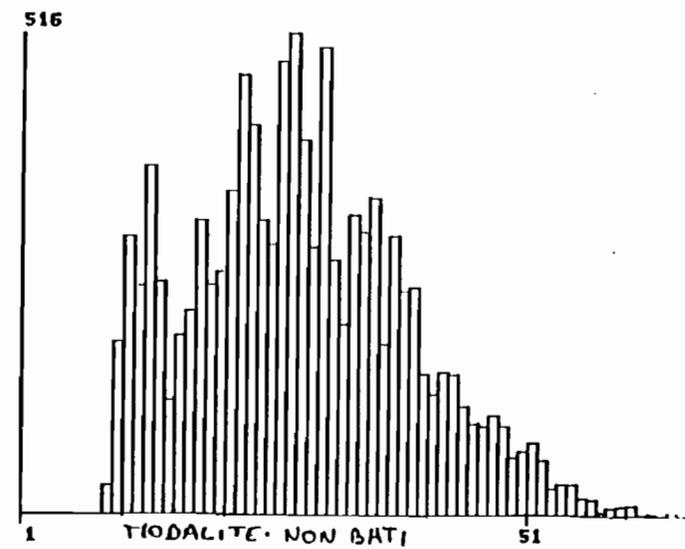
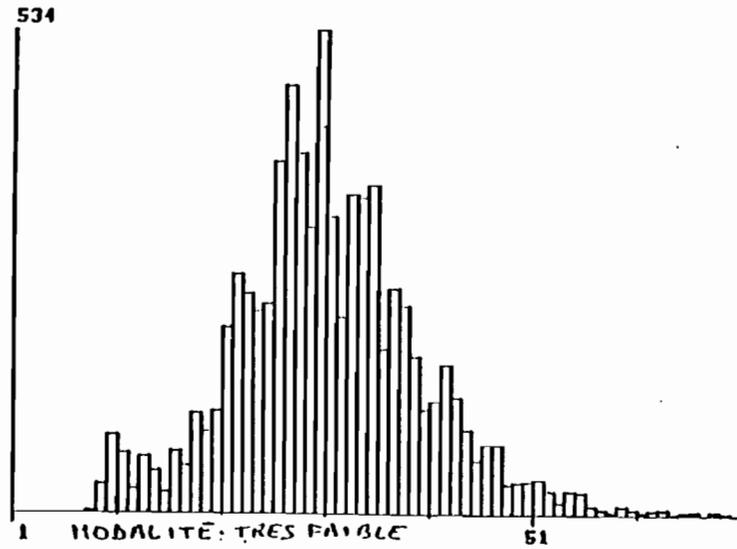
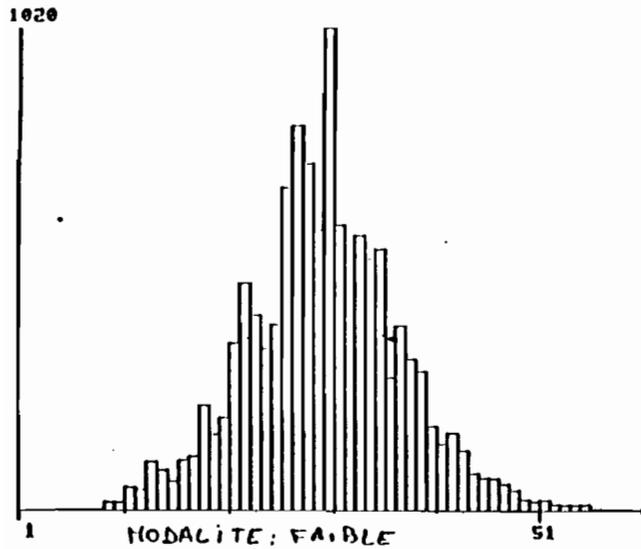
Les résultats des statistiques descriptives par zones de l'indice de végétation réétalé linéairement entre la moyenne et + ou - 2 écarts-type sont exposés dans la Figure 2.2.4. Le Tableau A.2.2.3 qui présente les statistiques peut être consulté en Annexe A.2.2. Compte tenu du mode de réétalement choisi, il ne faut pas s'étonner de la valeur importante des écarts-type comparativement à ceux calculés sur les canaux bruts que nous n'avions pas réétales. Ces écarts-type sont donc à comparer à la valeur 64.

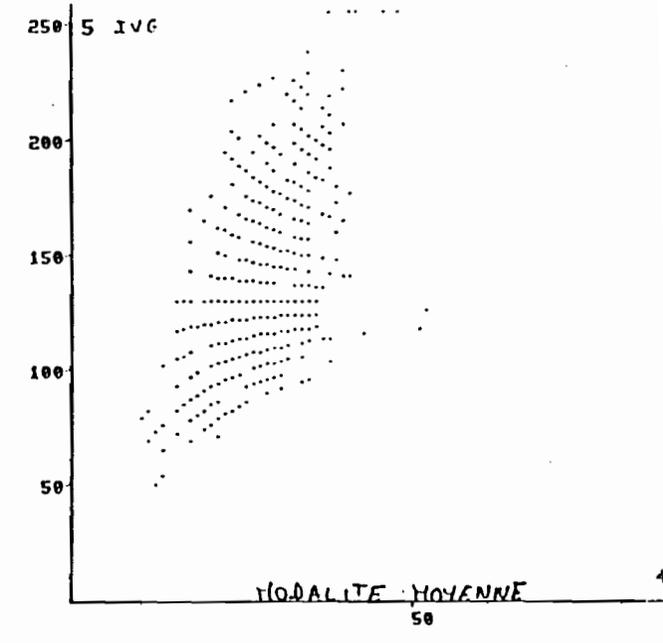
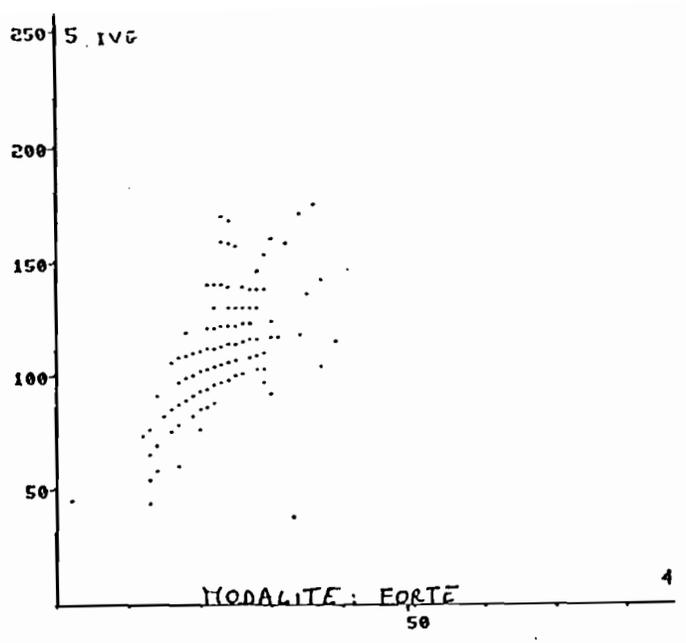
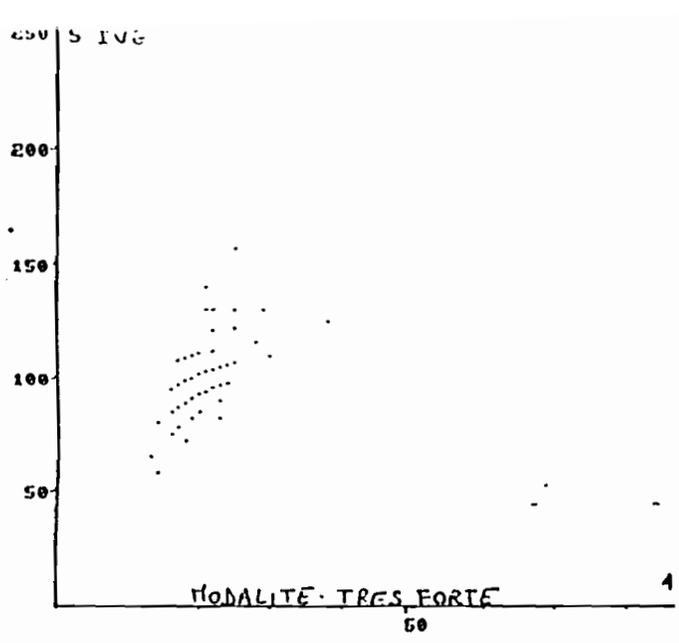
Les résultats obtenus avec cet indice sont intéressants, mais les écarts-type des différentes modalités sont très importants et ne permettent pas de séparer immédiatement les différents types de tissus urbains; néanmoins on note que cet indice varie de façon inversement proportionnelle à la densité (Photo 2.2.5). Seules les modalités *forte* et *très forte* semblent plus homogènes et se distinguent davantage; cela permet en particulier de mieux distinguer la transition entre espace urbain et espace non bâti ou très peu bâti (BOASSON et al, 1983).



77

Figure 2.2.3 - Histogramme du canal TM4 suivant les modalités du descripteur densité du bati -





78

Figure 2.2.5 - Histogrammes bidimensionnels par zone indice de végétation/canal 4-

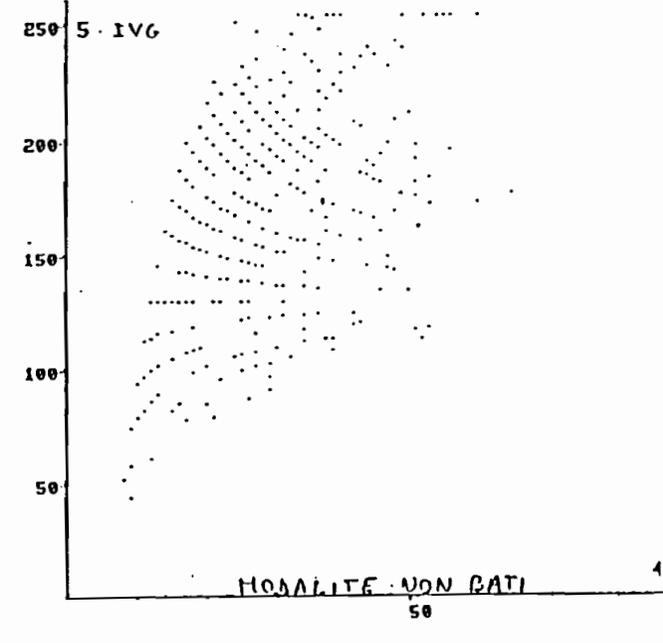
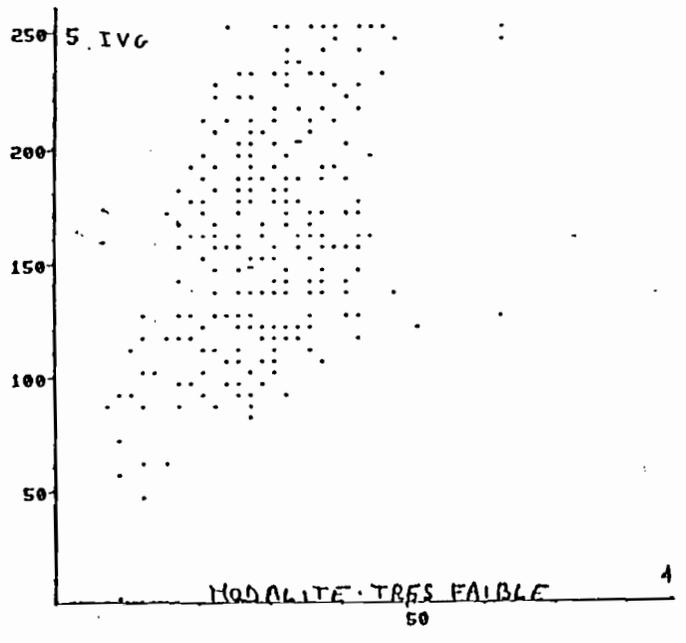
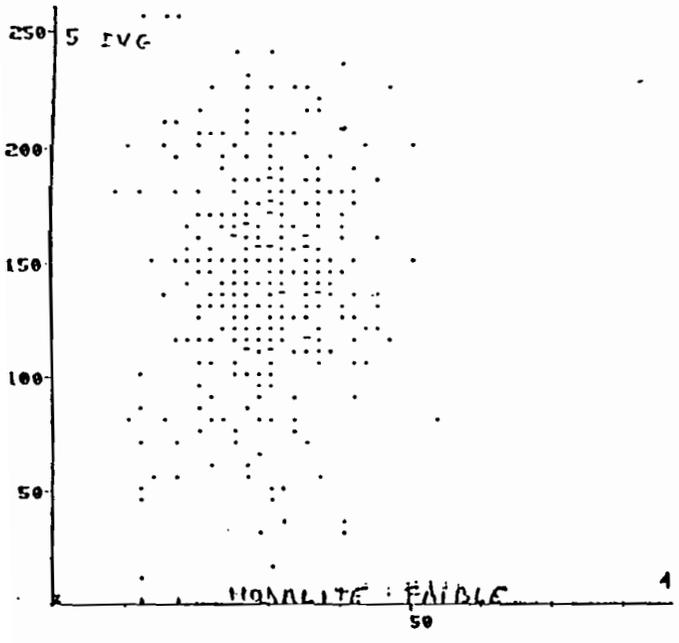




Photo 2.2.4 - Image du canal 4 de Thematic Mapper, fenêtre nord de la zone d'étude -



Photo 2.2.5 - Image Thematic Mapper de l'indice de végétation, zone d'étude -



Photo 2.2.6 - Image Thematic Mapper de l'indice $(TM4 - TM5)/(TM4 + TM5)$, zone d'étude -

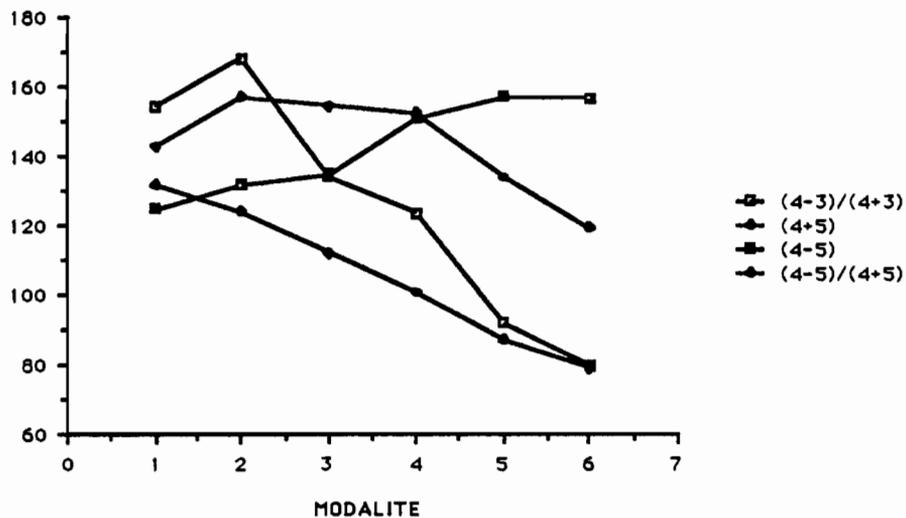
Comme il était prévisible, la **Figure 2.2.5** des histogrammes bidimensionnels par modalité nous confirme que l'indice de végétation et le canal 4 ne sont pas corrélés, il est donc probable que la combinaison du canal 4 et de l'indice de végétation accroît de façon très significative la discrimination des zones morphologiques. Les structures curvilignes que nous constatons sur certains histogrammes sont dues au mode de rééchantillonnage linéaire (+ ou - 2 écarts-type) effectué sur l'indice de végétation.

c) Les néo-canaux (4-5), (4+5) et (4-5)/(4+5).

Ces néo-canaux ont été élaborés selon la même technique que l'indice de végétation. Nous les avons étudiés car ils résultent de combinaisons des 2 canaux bruts de Landsat TM les plus liés au descripteur *densité du bâti*. Les résultats du néo-canal (4-5)/(4+5) sont présentés en **Annexe A.2.2 (Tableau A.2.2.4)**.

Tous ces néo-canaux sont liés plus ou moins fortement au descripteur *densité du bâti* (**Figure 2.2.4**); cependant l'importance de ces écarts-type rend l'emploi de ces néo-canaux délicat. Nous notons avec intérêt la remarquable liaison entre les modalités du descripteur *densité du bâti* et le néo-canal (4-5)/(4+5). Ce néo-canal, noté ultérieurement IND1, est le seul des indices créés à suivre précisément les variations de la densité du bâti telle qu'elle a été définie lors de l'interprétation de la mosaïque, et ce, quelle que soit la modalité considérée (**Photo 2.2.6**).

Figure 2.2.4 - Variation des néo-canaux suivant les modalités du descripteur densité du bâti -

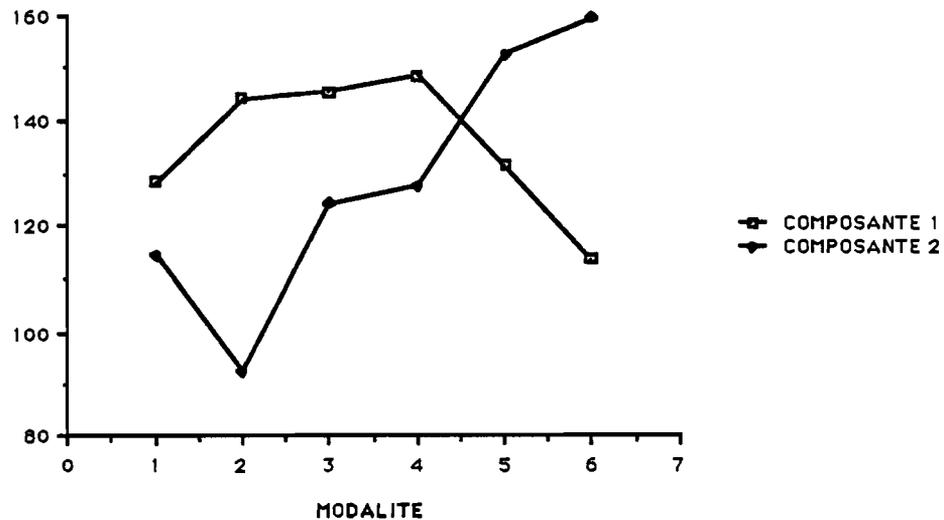


(Présentation par densités croissantes)

d) Composantes principales.

Compte tenu du pourcentage de variance expliqué par les deux premières composantes (94,4%), elles seules ont été retenues pour une étude plus approfondie (**Photo 2.2.7 et 2.2.8**).

Figure 2.2.6 - Variation des composantes principales en fonction des modalités du descripteur densité du bâti -



Ce graphique confirme ce que nous avons constaté visuellement, à savoir que la deuxième composante principale (Photo 2.2.8) est liée à la densité du bâti, c'est donc un néo-canal à conserver. Cependant, nous constatons que le minimum se situe une nouvelle fois dans la modalité *très faible* (comme pour l'indice de végétation) et non dans la modalité *non bâti*. Il apparaît donc une sorte d'anomalie qu'il nous appartiendra d'expliquer lors de l'analyse de l'échantillon de travail.

Les écarts-type intra-modalités demeurent malgré tout très importants.

Conclusions partielles.

Le mode de rééchantillonnage choisi (+ ou - 2 écarts-type) induit une distribution des différents indices ou indicateurs spatiaux quasi normale. L'analyse des coefficients de forme pour chacune des modalités indique que cette distribution est respectée, mis à part le cas de la modalité *très forte* qui présente une distribution dissymétrique importante vers les fortes valeurs, ainsi qu'un pic au niveau de la moyenne (voir Tableaux en Annexe 2.2).

L'enseignement que l'on peut tirer de l'analyse de ces néo-canaux est de chercher à discriminer, d'une part, le *non bâti*, d'autre part, les zones de densité modeste, et enfin les densités importantes. Les valeurs des densités permettant de seuiller avec efficacité ces 3 ou 4 "macro modalités" restent à déterminer.

Aucun "indice miracle" n'est apparu lors de cette analyse; la combinaison de plusieurs de ces indices semble donc une des voies les plus engageantes.

Les récentes publications à propos d'études urbaines font mention de l'intérêt qu'il faut porter à la texture qui constitue un indicateur discriminant les modes d'occupation du sol efficacement. C'est donc à l'étude de la texture dans les zones homogènes (modalités) que nous avons consacré la deuxième partie de ce paragraphe

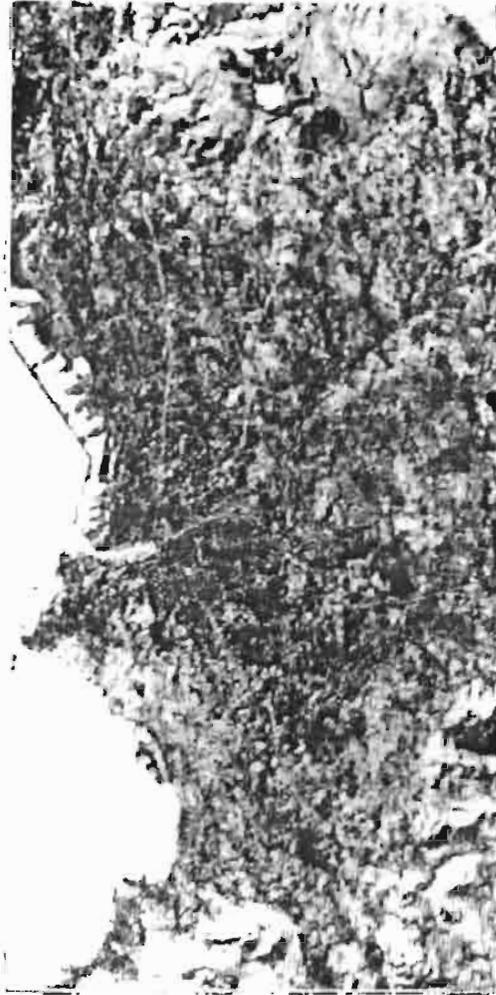


Photo 2.2.7 - Image Thematic Mapper de la première composante principale, zone d'étude -



Photo 2.2.8 - Image Thematic Mapper de la seconde composante principale, fzone d'étude -

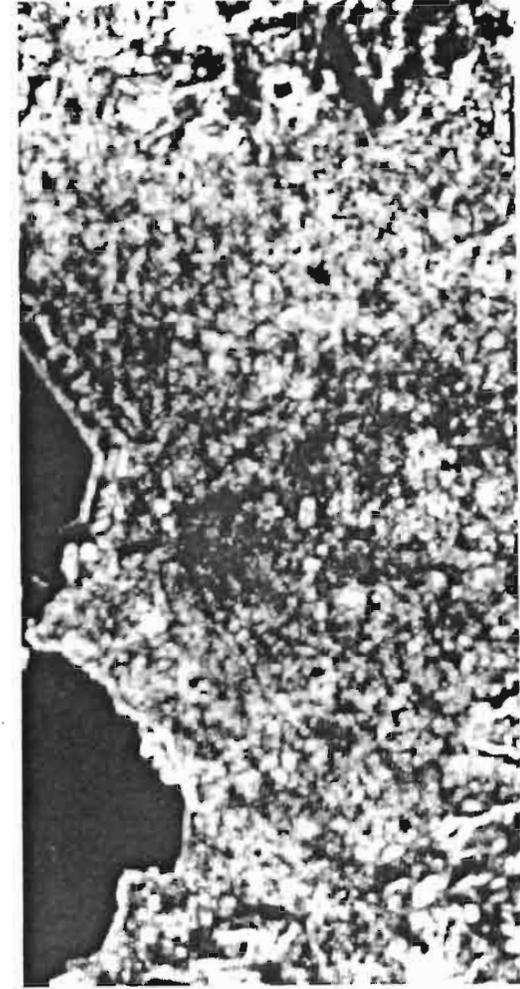


Photo 2.2.9 - Image Thematic Mapper de l'écart-type local calculé sur le canal infra-rouge proche (TM4), zone d'étude -

2.2.1.3) Etude sommaire de la texture des zones morphologiquement homogènes.

Compte tenu des résultats obtenus dans la partie précédente, l'étude de la texture des différentes modalités du descripteur *densité du bâti* paraît indispensable. Visuellement, les principales caractéristiques des **structures** de différents quartiers typés (centre ville dense, pavillonnaire lâche dans le Sud, ou grands ensembles en barres en périphérie Nord-Est) se remarquent sur les compositions colorées (voir **Photo 2.2.10** et **2.2.11**). Est-il possible de quantifier cette texture à l'aide d'un opérateur spatial performant ?

a) *L'écart type local et la moyenne locale.*

Nous avons testé des opérateurs locaux, (écart type et la moyenne), en les calculant sur des fenêtres de tailles différentes (3 et 5), sur des fichiers différents (canal 4, première et deuxième composantes principales) et en les rééchantillonnant différemment. Ces deux opérateurs ont des fonctions très différentes: la moyenne locale effectue un lissage et réduit de ce fait la variance à l'intérieur de chaque modalité (CUSHNIE J.L, 1984), (TOLL D.L., 1985), alors que l'écart-type local caractérise l'homogénéité à l'intérieur de la fenêtre de calcul (matrice 3*3 ou 5*5 glissante).

La principale conclusion à retenir de ces opérations est qu'en règle générale, les résultats obtenus avec les différents opérateurs décroissent lorsque la densité augmente (**Figure 2.2.7**). Un seuil important se situe entre les modalités *faible* et *moyenne*. Localement, les zones à densité importante apparaissent donc comme les plus homogènes. En outre, les fenêtres 5*5 paraissent plus adaptées pour effectuer des convolutions sur des images en milieu urbain, compte tenu de la résolution au sol de Thematic Mapper et des dimensions des bâtiments. A la suite de nos différents tests, il apparaît clairement que la plus importante amplitude entre les modalités est obtenue en choisissant une fenêtre 5*5.

Les écarts-type locaux calculés dans les 2 premières composantes principales indiquent une remontée pour la modalité *faible* où culmine le maximum des moyennes (voir **Tableaux A.2.2.5** et **A.2.2.9** en **Annexe A.2.2**). On peut expliquer ce phénomène par l'abondance et la proximité dans les zones de modalité *faible* de "pixels végétaux" et de "pixels minéraux" aux réponses radiométriques opposées. L'écart-type calculé sur le canal 4 (**Tableau A.2.2.6** en **Annexe A.2.2**) suit plus fidèlement les modalités de la *densité du bâti*. (**Photo 2.2.9**) Nous notons une remontée de la moyenne dans la modalité *très faible* qui constitue le maximum absolu des différentes modalités.



Photo 2.2.10 - Composition colorée des canaux 1, 4 et 7 de LANDSAT Thematic Mapper -

Photo 2.2.11 - Composition colorée des canaux 1, 2 et 3 de LANDSAT Thematic Mapper -

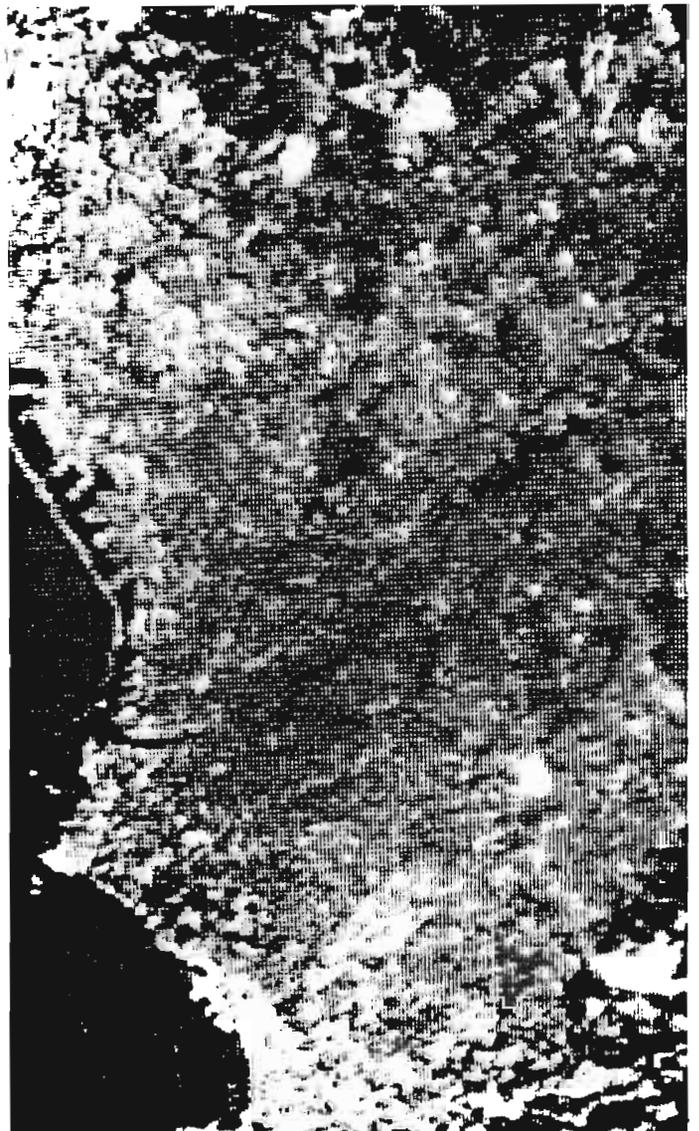
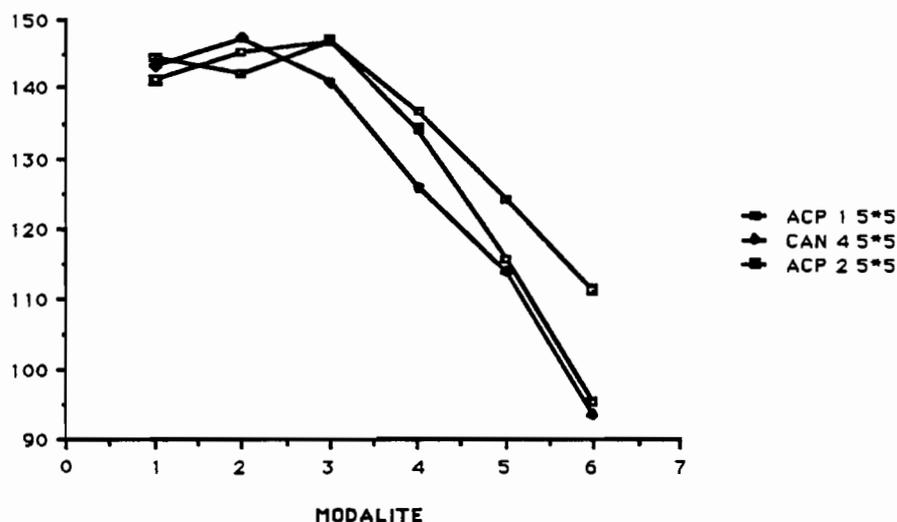


Figure 2.2.7 - Variation des écarts-type locaux en fonction des modalités du descripteur densité du bâti -



Ces opérateurs de texture présentent une remarquable homogénéité. Les valeurs obtenues dans les différents canaux ou néo-canaux sont très proches. Nous noterons une nouvelle fois l'anomalie que constitue la modalité *très faible* qui présente le maximum pour l'opérateur de texture calculé sur le canal 4, alors qu'il présente un minimum local pour ce même opérateur calculé sur la première composante principale. Ces indices sont plus fidèlement liés au descripteur *densité du bâti* à partir de la modalité *faible*.

Comparativement au canal 4 et dans une moindre mesure au néo-canal IND1 (4-5)/(4+5), les écart-type locaux calculés sur la première composante principale sont moins liés au descripteur *densité du bâti*. Ces opérateurs locaux semblent peu adaptés pour résoudre notre problème, les écarts-type résultants étant très importants (Tableaux A.2.2.5 à 2.2.9 en Annexe A.2.2). Cependant, ils trouveront leur intérêt lors d'une classification pour aider à classer les pixels non affectés [DUCROS-GAMBART. D et al, 1984].

Nous avons aussi testé les mêmes opérateurs de texture, mais en procédant à un réétalement de type Min-Max. On s'aperçoit que ces opérateurs sont moins sensibles que ceux exposés précédemment. Néanmoins, ce type de réétalement fait ressortir les transitions extrêmes (très faibles ou très fortes) qui peuvent être noyées lorsque l'on réétable la dynamique entre + ou - 2 écarts-types.

Il nous a paru plus intéressant d'étaler la dynamique autour de la valeur moyenne de l'écart-type local. Réétalement de la sorte les valeurs moyennes est préférable, quitte à regrouper les valeurs extrêmes aux bornes (1 et 255); les phénomènes que nous étudions se situent dans les valeurs moyennes.

b) Matrice de cooccurrences des niveaux de gris.

Le choix des matrices de cooccurrence pour caractériser la texture à l'intérieur des zones morphologiquement homogènes a été guidé par deux raisons majeures:

- c'est une des seules méthodes permettant de quantifier de manière synthétique et rapide la texture à l'intérieur d'une zone pré-définie.

- cette méthode privilégie une approche probabiliste qui paraît bien adaptée au type de texture des images satellite comme en témoignent les nombreux auteurs qui l'ont essayée (SLIMANI M., 1986), (LAPORTE J.M., 1983), (DESACHY J., 1980).

L'inconvénient majeur de ces matrices est la perte de la localisation, c'est pourquoi nous avons précédemment testé les écarts-type locaux.

Nous avons calculé la matrice de cooccurrence des niveaux de gris, ramenés à 128 niveaux par seuillage des valeurs extrêmes, pour chacune des 6 zones correspondant aux 6 modalités du descripteur *densité du bâti*. Il ne s'agit donc pas ici d'une fenêtre glissante calculant une nouvelle valeur pour chaque pixel.

La relation spatiale retenue est définie comme suit :

- distance d entre 2 pixels égale à 1,
- angle de $\theta = 0^\circ$ avec l'horizontale.

Le choix de cette relation est tout à fait arbitraire, mais il n'existe pas de direction privilégiée à l'intérieur de la zone d'étude, les divers réseaux n'ayant pas d'orientation majeure. Des essais ont été pratiqués dans les 4 directions sans différence sensible du résultat.

Nous avons décidé de choisir le canal 4 pour élaborer ces matrices, compte tenu des résultats encourageants que ce canal avait obtenus dans la représentation du descripteur *densité du bâti*, ainsi que des résultats des opérateurs locaux. Il est prévu d'opérer de la même façon avec la première composante de la transformée de KARHUNEN-LOEWE (analyse en composantes principales dans l'espace des 6 canaux).

. *Etude des matrices de cooccurrences* .

Les matrices de cooccurrence estiment la densité de probabilité conditionnelle d'un pixel de niveau I et d'un pixel de niveau J (notée $p_{d,\theta}(i,j)$). Les matrices exposées ne sont pas symétriques, les termes de la diagonale indiquent le nombre de pixels possédant comme voisin, au sens de la relation spatiale pré-définie, un pixel de même valeur (noté $P_{d,\theta}(i,j)$). On comprend donc qu'une texture fine sera représentée par une matrice où prédominera l'équiprobabilité (matrice pleine) alors qu'à l'inverse, une texture grossière présentera un regroupement des valeurs de cooccurrences autour de la diagonale (matrice diagonale).

La comparaison des matrices calculées dans les zones de même densité suscite quelques remarques d'ordre général :

- la taille des matrices (éléments non nuls uniquement) s'accroît lorsque la densité diminue. La texture est donc plus uniforme pour les zones de forte densité
- un histogramme de distribution des termes de la diagonale principale montrerait l'existence de pics multiples. On remarquera que les cooccurrences de faibles niveaux de gris croissent brusquement vers le maximum alors que celles de fortes valeurs de niveaux de gris décroissent plus doucement. On peut en déduire l'existence de sous-zones homogènes caractérisées par des niveaux de gris très proches :
 - * 18-22 pour la modalité très fortement bâti
 - * 20-24 pour la modalité fortement bâti
 - * 22-34 pour la modalité moyenne
 - * 26-32 pour la modalité faible
 - * 26-34 pour la modalité très faible
 - * 4 pics à 11, à 22, à 26 et à 30 pour la modalité non bâti.

Une première conclusion s'impose; les modalités définies lors du découpage morphologique ne correspondent pas à la distribution spatiale des valeurs radiométriques du canal 4. En effet, au vu de ces matrices de cooccurrences, on serait tenté de définir 2 classes de radiométrie pour décrire le bâti :

- [18,24] fortes densités.
- [25,34] faibles densités.

Nous avons généré 6 matrices de cooccurrences sous forme d'images 128 lignes par 128 colonnes en fausse couleur (voir **Photo 2.2.12**); nous avons donc obtenu une image par modalité. Le nombre de cooccurrences est symbolisé par une couleur. Cette couleur tend d'autant plus vers le rouge que le nombre de cooccurrences est important. A l'inverse, une couleur à dominante bleue représentera un nombre de cooccurrences peu élevé.

HARALICK a défini 14 paramètres calculés à partir des matrices de cooccurrences, LAPORTE J-M. a montré que certains d'entre eux sont très corrélés : aussi n'en avons nous retenu que 5 pour caractériser de façon synthétique les zones représentant les différentes modalités (**Tableau 2.2.3**).

* Le centre de gravité de la matrice de cooccurrence.

$$\sum_{i,j} p_{d,\theta} [i,j]$$

* Le moment angulaire du second ordre augmente lorsque la texture devient plus homogène; seule la modalité *très forte* se détache des autres modalités de façon sensible. A l'opposé, les valeurs de ce paramètre pour les zones les moins denses témoignent d'une texture très chahutée (la valeur de ce paramètre a été multipliée par 106 dans le **tableau 2.2.3**).

$$\sum_{i,j} p_{d,\theta} [i,j]^2$$

* Le degré d'organisation du nuage (ou entropie) mesure le désordre de la texture, sachant que ce désordre est maximum ($-2 \cdot \log 128$) lorsque la distribution est équiprobable (cas d'une texture très fine). Il n'est donc pas surprenant de constater que c'est la modalité *non bâti* qui se rapproche le plus de cet état.

$$-\sum_{i,j} p_{d,\theta} [i,j] \times \log p_{d,\theta} [i,j]$$

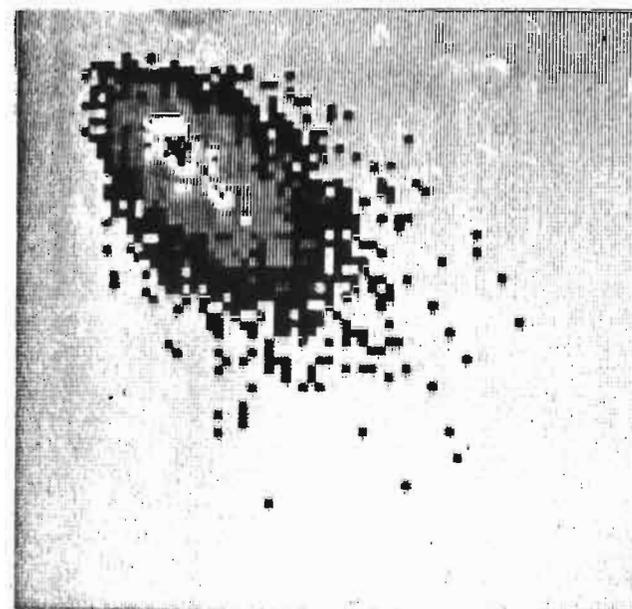
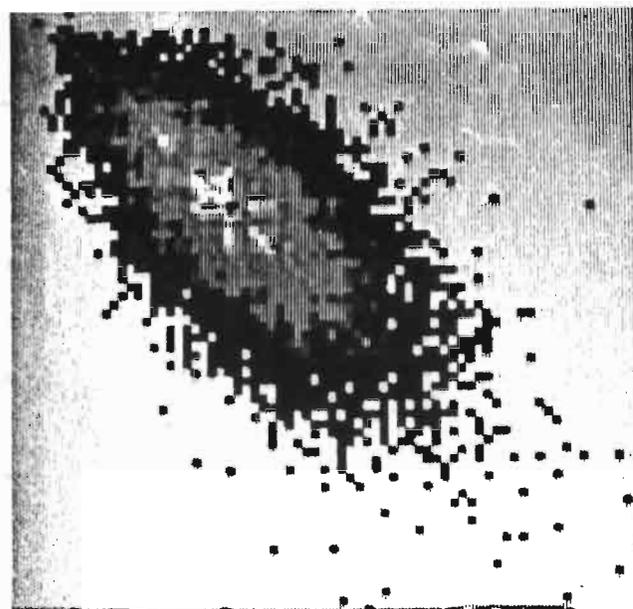
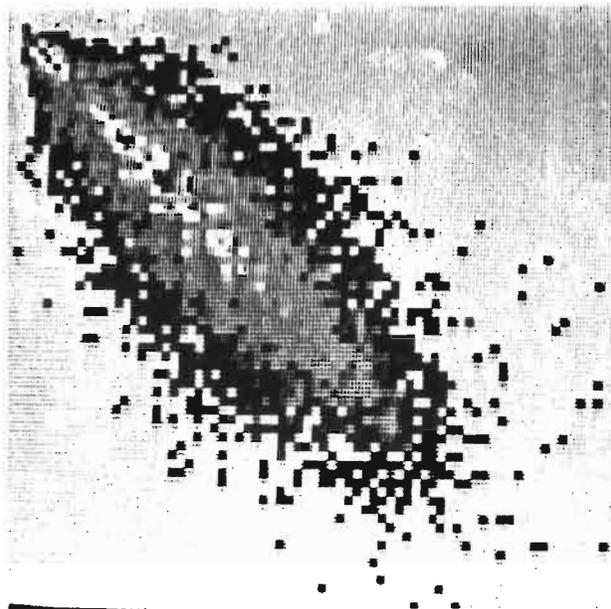
* L'homogénéité locale (ou moment inverse des différences) mesure l'importance de plages locales d'égal niveau de gris dans l'image. Comme sa formule l'indique, ce paramètre favorise les termes situés sur la diagonale principale et il tend vers sa valeur maximale (1) lorsque les cooccurrences se regroupent sur cette diagonale. La modalité *très forte* présente donc les plages d'équidensité de niveaux de gris les plus étalées et les plus proches de la diagonale.

$$\sum_{i,j} p_{d,\theta} [i,j] / (1+(i-j)^2)$$

Densité Non bâtie

Densité FAIBLE

Densité Forte



Densité Très Faible

Densité Moyenne

Densité Très Forte

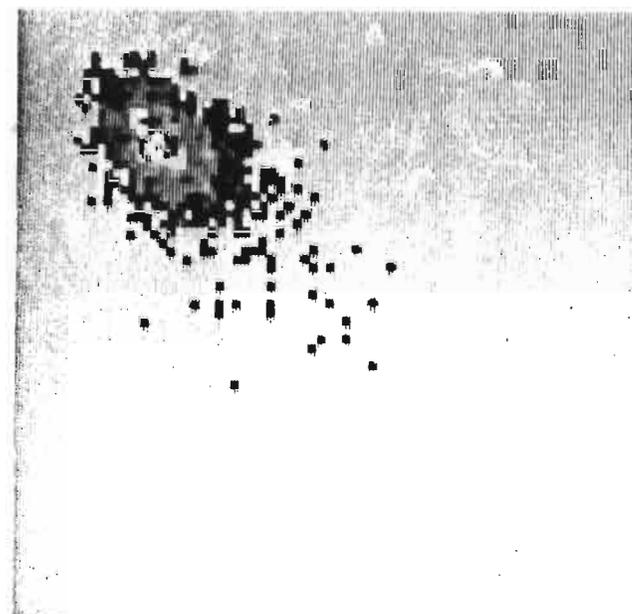
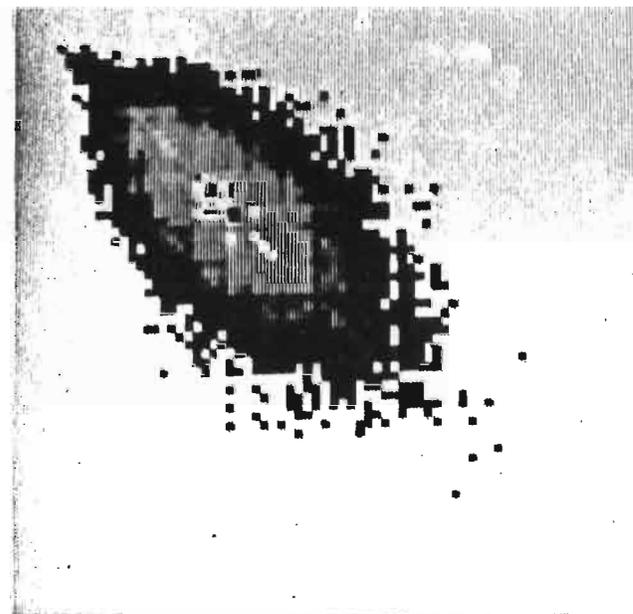
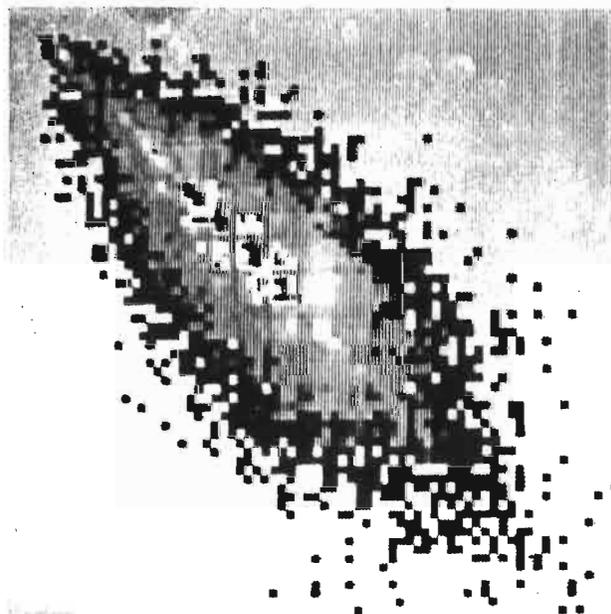


Photo 2.2.12 - Matrices de cooccurrences de niveaux de gris calculées sur le canal TM 4 en fonction des modalités du descripteur densité du bâti -

* L'inertie mesure l'étalement du nuage par rapport à la diagonale principale. Une modalité diffère nettement des autres, le très fortement bâti qui présente la plage de niveaux de gris la plus compacte.

$$\sum_{i,j} (i-j)^2 \times P_{d,\theta}(i,j)$$

Le **Tableau 2.2.3** ci-dessous des paramètres extraits des matrices de cooccurrences nous permet une nouvelle fois de constater que les trois premières modalités sont très proches, que la modalité *moyenne* recouvre un tissu urbain très diversifié, et que la modalité *très forte* est la plus homogène.

Tableau 2.2.3 - Statistiques descriptives par modalité du descripteur densité du bâti : Paramètres extraits des matrices de cooccurrences -

Modalité	Centre de gravité du nuage	Second moment angulaire *10 ⁶	Organisation du nuage	Homogénéité locale	Inertie
1	31.24	1945	2.89	0.281	35.22
2	35.20	1788	2.91	0.235	41.49
3	31.38	2608	2.79	0.237	36.32
4	30.50	3569	2.68	0.259	29.61
5	25.14	4544	2.53	0.275	24.10
6	22.00	9835	2.21	0.326	14.17

Radiométrie et densité du bâti : un lien effectif.

A l'issue de cette étude de quelques néo-canaux, nous en retiendrons deux qui paraissent les plus discriminants : l'**indice de végétation (IVG)** et le **néo-canal (TM4-TM5)/(TM4+TM5)** qui sera noté IND1 dans la suite de ce travail. Par ailleurs, l'écart-type local calculé sur le canal TM4 est l'opérateur spatial à retenir en priorité pour rendre compte de la densité du bâti.

L'étude des matrices de cooccurrences nous apprend qu'un seuillage semble possible sur le canal TM 4. Il faudra en préciser les bornes lors de l'étude de l'échantillon de travail.

Cette première approche se conclut donc de façon positive, puisqu'il apparaît que la **densité du bâti peut être évaluée à partir de certains néo-canaux de LANDSAT Thematic Mapper**. Il reste cependant à confirmer cette possibilité à travers l'étude plus poussée d'un **échantillon de travail** décrivant précisément l'occupation du sol. L'objectif du chapitre que nous allons maintenant aborder est consacré à la fabrication de cet outil d'analyse.

2.2.2) ECHANTILLON DE TRAVAIL.

Nous avons décidé de fabriquer un échantillon de travail, ou d'initialisation, afin de pouvoir interpréter et évaluer sur l'image satellite un certain nombre de critères pertinents pour estimer la densité du bâti. Travailler sur un tel échantillon, dans lequel sont représentés tous les types de bâti et dans lequel la représentativité de la densité du bâti est conservée, est l'unique méthode cohérente de procéder. Seule une telle stratégie est apte à quantifier les relations entre radiométrie et densité du bâti, à initialiser de façon raisonnée différents types de classifications et à valider la qualité des résultats sur un échantillon différent.

Il est fondamental de souligner ici qu'un tel procédé de mise en correspondance (par superposition d'image) de la radiométrie et des mesures sur le terrain n'est rendu possible que grâce à l'entremise d'un système de gestion de base de données spatialisées. Repérer avec certitude sur l'image satellite la localisation, les limites géographiques et conserver les attributs des zones de l'échantillon sont des prestations que seul un système comme SAVANE est en mesure de fournir. Il est en effet impensable de vouloir localiser avec précision sur l'image TM seule les limites des différents îlots INSEE de notre échantillon. De plus, les regroupements par modalité des ces différents individus, issus d'un croisement thématique, imposent l'utilisation d'un système de gestion de base de données localisées performant.

2.2.2.1) Principe de tirage des îlots de l'échantillon d'initialisation.

Les îlots appartenant à cet échantillon ont été tirés dans la base des 3466 îlots INSEE de Marseille selon la procédure suivante :

- La base de Marseille a été stratifiée selon des critères de morphologie urbaine¹. Neuf sous-fichiers (strates) correspondant aux neuf types morphologiques ont alors été obtenus.
- Les îlots ont été classés selon leur identifiant INSEE afin d'obtenir, lors du tirage, une dispersion géographique optimum.
- Le tirage des îlots de l'échantillon a été effectué de façon systématique (un pas de tirage de 44) pour chaque type morphologique.

Le taux de tirage est donc de 2,31%. Le nombre d'îlots de l'échantillon est égal 80.

2.2.2.2) L'enquête sur le terrain (Marseille - Juin 1986).

Cette enquête a été effectuée par quatre membres de l'équipe et a demandé quatre jours de travail sur le terrain². En effet, malgré la très bonne qualité des photographies aériennes en notre possession, il s'est avéré nécessaire de se déplacer sur le terrain, compte tenu de la différence importante existant entre la date d'acquisition de ces photographies aériennes (1979) et celle de l'enregistrement de l'image satellite (1983). Un minimum de deux fiches décrivant l'îlot devaient être remplies :

- une fiche concernant le bâti (Figure 2.2.8)
- une fiche décrivant les éléments non bâtis (Figure 2.2.9).

Par ailleurs, une fiche spéciale pouvant comporter un plan de situation était prévue pour reporter les modifications importantes intervenues entre temps, en particulier pour préciser la forme et les dimensions des nouvelles constructions. Des photos au sol ont été prises pour l'aide à la description des nouveaux bâtiments ainsi que des surfaces non bâties.

¹ in Rapport ATP Intermédiaire pp 16 à 79, se reporter à la bibliographie de l'équipe de recherche.

² in ANNEXE A.2.2.2 "Enquête morphologie urbaine (Marseille, 9-14 Juin 1986) : collecte et exploitation des données.

Figure 2.2.9 - Fiche d'enquête décrivant le non bâti -

MARSEILLE - CONTROLE TERRAIN JUIN 1986

Numéro INSEE : 543 Ro 1		Photo 1/8000 : 36		DESCRIPTION DU NON BATI				
Numéro de l'élément ou groupe d'éléments correspondant au repère porté sur le plan ou sur un croquis spécifique		18	19	20	21			
Pente du sol :		.....	.....	/	/	.....	.....
Présence de haies		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence de murs		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
EAU	Canal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Réservoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Piscine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Autre	.....	.....	.....	.....	.....	.....
VEGETATION	Pelouse simple	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Fleurs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Arbres (espèce)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	Arbustes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Potager	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Vergers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Autre végétation (préciser)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
VOIRIE	Bitume (couleur)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	Sans voitures	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Avec voitures	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Pavés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Gravier (couleur)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	Ciment ou béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Autre (préciser)	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Autre type de non bâti (préciser)		.....	.....	.....	.....	.....	.....

vis photo
18

Jardin
Potager

terre
taureau
Sécher
Sécher

Esine
roix et
gris

Le principal enseignement que l'on a pu tirer de cette enquête a été la confirmation de l'importance prépondérante et de la richesse des photographies aériennes à l'échelle 1/8 000 qui constituent un outil indispensable pour la collecte des données de terrain en milieu urbain. Nous avons en effet constaté sur place la difficulté d'accéder aux toitures ainsi qu'à l'intérieur de certains îlots denses.

Compte tenu de la résolution spatiale et spectrale du capteur Thematic Mapper, nous pouvons considérer que cette information constitue un apport totalement exogène à l'image satellite.

2.2.2.3) Analyse des photographies aériennes.

Nous disposons pour Marseille d'une couverture presque complète constituée par des photographies aériennes de 2 types prises à 2 dates différentes :

- photographies couleurs naturelles échelle 1/8 000 de l'IGN datant de 1979,
- photographies noir et blanc échelle 1 /15 000, datant de 1981, qui recouvrent surtout la partie Nord peu bâtie.

a) Superposition d'images générées par SAVANE.

Un report sur les photographies aériennes du contour de chacun des sous-îlots délimité sur la carte générée par SAVANE issue du croisement "îlots de l'échantillon de travail" avec le **descripteur densité du bâti** a permis de définir les limites des **93** individus constituant cet échantillon (Voir **Photo 2.2.3**).

Ce report n'a pas été automatique : en effet, même si la superposition de 2 images est de très bonne qualité³, ponctuellement il peut apparaître un léger décalage ayant pour conséquence la génération d'un sous-îlot sans raison d'être. Par ailleurs cette opération nous a donné l'occasion de vérifier à un niveau plus fin la pertinence du découpage morphologique. Vus à l'échelle 1/8 000, certains découpages d'îlots opérés à l'échelle du 1/23 000 ne se justifient plus. En conséquence, sur la base des **80** îlots tirés, **110** sous-îlots ont été générés par croisement avec le **descripteur densité du bâti**, et **93** individus ont été finalement retenus, résultant de la fusion de quelques "sous-îlots factices" (décalage résiduel entre le découpage du descripteur "densité du bâti" et le découpage des districts de recensement INSEE) .

b) Fiche de saisie (Figure 2.2.10) . Méthode de calcul. Mesures.

La mise au point de la fiche de saisie est le fruit de la concertation avec les autres membres de l'équipe. Les différents descripteurs analytiques retenus pour caractériser la morphologie du tissu urbain doivent pouvoir être déduits des différentes mesures présents dans cette fiche. Par ailleurs, le calcul de la densité du bâti dans les sous-îlots de l'échantillon sera utilisé pour étudier les relations bâti / population. De ce fait, un passage entre différents fichiers de données devait être aménagé au moyen d'identifiants adaptés.

³ Au maximum 1 pixel de décalage a été constaté lors des tests de superposition d'une image SAVANE sur une image TM.

CODIFICATION MARSEILLE

N° ilot INSEE		5 | 0 | 4 | C | 0 | 9		N° sous-ilot		6 | 2 | 6 | 1		N° zone morpho		2 | 6 | 1		
N° photo. aérienne		1 | 5 | 2		N° carte ICOREM		16 | 0 | 16 | 1		Echelle (en 1000)		18		
N° attribut Tigre		2	8	9	10	11	12	21	22	23	24	25
Modalité :		5	4	2	3	5	4	1	3	4	4	8
Surface TIGER m2(module surface) :						1 | 4 | 7 | 4 | 9		Surface STADEA (m2)		1 | 4 | 0 | 0 | 6		
Surf. ilot(mm²)						1 | 2 | 2 | 5		m2		1 | 4 | 4 | 0 | 0		
BATI : Total (mm2)										3 | 4		
COULEUR TOITS												
Brique										4		
Marron foncé								2		7		
Blanc												
Gris										3		
Noir												
Autre												
STRUCTURE												
										3		
								2		7		
										4		
Autre												
Cheminées						2						
<i>(Aucune =1, peu nomb. =2, très nomb.=3)</i>												
Hauteur du bâti												
Rdc et Rdc+1										9		
Rdc+2 à Rdc+4 inclus										4		
Rdc+5 à Rdc+7 inclus								1		9		
Rdc+8 et plus												
PENTES						3						
<i>(sans pente 0, N/S 1, E/W 2, NE/SW 3, NW/SE 4)</i>												
Pente du toit						3						
Pente du sol						1						
<i>(Aucune 1, Faible 2, Forte 3)</i>												
NON BATI Total (mm2)										1 | 9 | 1		
Eau												
Végétation												
Herbe										2 | 0		
Arbres										7 | 3		
Terre nue clai.										1 | 0		
Terre nue fon.												
Autre												
Voitures										2		
<i>(Aucune =1, peu nomb. =2, très nomb.=3)</i>												
Bande												
15m(mm2)						1 | 2 | 0		m2		1 | 7 | 6 | 8 | 0		
BATI : Total (mm2)										5 | 3		
COULEUR TOITS												
Brique										2 | 8		
Marron foncé												
Blanc										2 | 5		
Gris												
Noir												
Autre												
STRUCTURE												
										2 | 5		
										2 | 8		
Autre												
Cheminées						2						
<i>(Aucune =1, peu nomb. =2, très nomb.=3)</i>												
Hauteur du bâti												
Rdc et Rdc+1												
Rdc+2 à Rdc+4 inclus												
Rdc+5 à Rdc+7 inclus												
Rdc+8 et plus												
PENTES						3						
<i>(sans pente 0, N/S 1, E/W 2, NE/SW 3, NW/SE 4)</i>												
Pente du toit						3						
Pente du sol						1						
<i>(Aucune 1, Faible 2, Forte 3)</i>												
NON BATI Total (mm2)										16 | 7		
Eau												
Végétation												
Herbe												
Arbres												
Ter. nue clai.												
Ter. nue fo.												
Autre												
Voirie												
Bitume										1 | 0		
Béton												
Gravier										7 | 8		
Pavés												
Autre												
Voitures										2		
<i>(Aucune =1, peu nomb. =2, très nomb.=3)</i>												
Longueur de l'élément bâti majoritaire (mm)										5		
Largeur de l'élément bâti majoritaire (mm)										2		

Figure 2.2.10 - Fiche de codification de l'occupation de l'espace -

Cette fiche, une pour chaque individu de l'échantillon, est composée de 3 parties principales :

- les identifiants et les descripteurs
- les mesures à l'intérieur de l'îlot
- les mesures à l'intérieur d'une bande de 16 mètres entourant l'îlot.

Les différentes mesures effectuées et reportées sur ces fiches ont été calculées comme suit.

En ce qui concerne les variables quantitatives, nous avons superposé un plastique transparent carroyé et millimétré sur les photographies aériennes. Les différents modes d'occupation du sol présents à l'intérieur du sous-îlot, répertoriés dans une nomenclature pré-définie (voir paragraphes suivants), ont été mesurés en millimètres carrés, puis ventilés dans le poste approprié.

Les variables qualitatives ont été estimées par comparaison à un référentiel pré-établi et affectées à la modalité la plus proche.

Dans le même temps, il a été nécessaire de consulter les fiches remplies lors de l'enquête sur le terrain afin de tenir compte des éventuels changements d'affectation du sol et de préciser la nature des différents éléments bâtis ou non.

• *Les identifiants*

Chaque sous-îlot est repéré par son N° INSEE (alphanumérique) et un N° de SOUS-ILOT (numérique) qui permet de l'identifier, un certain nombre de logiciels de calcul statistique n'acceptant pas les identifiants alphanumériques. Sa **zone morphologique** d'appartenance est indiquée ainsi que sa **modalité de référence** pour chacun des descripteurs retenus. La connaissance de ces indicateurs permet un regroupement immédiat des sous-îlots homogènes pour un descripteur donné et facilite donc une quantification et une analyse statistique des modalités. Dans une optique plus pragmatique, nous avons réservé un emplacement pour y noter le N° de la **photographie aérienne** couvrant l'îlot, ainsi que le N° de la **carte ICOREM** à laquelle éventuellement se reporter.

• *Les indicateurs à l'intérieur des sous-îlots.*

Ces indicateurs, essentiellement des mesures (nombre de mm² constatés), se distribuent en deux parties :

* **Le bâti.** Il est caractérisé par 3 indicateurs :

- la couleur dominante du toit en 6 postes (brique, marron foncé, blanc, gris, noir et autre couleur)
- la structure des éléments constitutifs du toit (plat, type tuile canal, type tuile mécanique, type tôle ondulée, autre type)
- la hauteur du bâti répartie en quatre postes (RDC à RDC +1, de RDC + 2 à RDC + 4, de RDC + 5 à RDC + 7, RDC + 8 et plus)

En outre sont estimées la présence de cheminées, la présence régulière de voitures, et des indications sur la pente du toit (en 5 modalités de direction majoritaire) et du sol (en 3 modalités d'intensité de pente)

La somme des mm² faite à l'intérieur de chacun de ces 3 indicateurs est égale à la surface qu'occupent les éléments bâtis de l'îlot.

* **Le non bâti.** Il est ventilé en 2 postes :

- végétation (herbe, arbres, terre nue claire, terre nue foncée, autre)
- voirie (bitume, béton, gravier, pavé, autre)

La somme des rubriques de ces 2 postes est égale à la surface du non bâti.

La somme du bâti et du non bâti est égale à la surface totale de l'îlot.

- *les mesures à l'intérieur d'une bande de 16 mètres entourant l'îlot.*

Il nous a semblé qu'il était nécessaire, concernant un individu spatialisé, de tenir compte d'une bordure lorsque l'on met en relation une statistique radiométrique avec une statistique produite par une vérité terrain. Cette marge qui représente ici 16 mètres, soit légèrement plus de la moitié de la dimension d'un pixel TM, se justifie car il est peu probable que le découpage de l'image TM en pixels respecte celui décidé par l'INSEE ! Les différents postes ventilant ces mesures sont identiques à ceux décrits précédemment. Nous noterons qu'une partie importante des surfaces relevées concernent la voirie et son environnement (arbres en particulier). Nous avons également réservé un emplacement pour indiquer quelles sont les dimensions (largeur, longueur) du bâtiment majoritaire de l'îlot.

Cette nomenclature a fait l'objet d'un soin tout particulier. Elle résulte des constatations consignées sur le terrain quant à la fréquence d'apparition des différentes couleurs des matériaux, des différentes structures des matériaux ainsi que des différents seuils pertinents de hauteur des bâtiments.

L'importance de la relation entre le non-bâti et la localisation de l'îlot n'est pas non plus absente de notre réflexion. Un espace de verdure en centre ville et son homologue en périphérie n'ont pas la même signification lorsque l'on s'intéresse au mode d'occupation du sol et à la composition socio-professionnelle des habitants qui y résident.

Pendant l'élaboration de cette nomenclature, nous avons également tenu compte de la possibilité de l'utiliser pour servir de clef d'interprétation lors de l'analyse visuelle de l'image satellite.

c) Problèmes d'interprétation des photographies aériennes.

L'interprétation des photographies aériennes pose aussi un certain nombre de points délicats. Tout d'abord, si la distinction entre bâti et non bâti est relativement facile à discerner dans les quartiers pavillonnaires, elle l'est beaucoup moins dans le centre ville où il est ardu de séparer les cours intérieures des immeubles bas. En règle générale, les espaces cimentés non construits ne tranchent pas sur les toits en terrasse des immeubles principalement recouverts de graviers blancs. Seule l'ombre permet parfois de lever l'ambiguïté.

D'autres éléments entretiennent le doute. Par exemple, les serres qui ne se détachent pas toujours du milieu sur lequel elles sont élevées, ou bien les allées couvertes d'une toiture de béton que l'on ne distingue pas toujours de façon nette.

Les photographies prises sur le terrain se sont révélées précieuses pour discriminer les différents types de non-bâti dont la reconnaissance n'est pas toujours évidente, en particulier lorsque l'on se penche sur une photographie aérienne noir et blanc à petite échelle. Une confusion est souvent faite entre les espaces pavés et les espaces bitumés d'une part et entre les espaces recouverts de béton et ceux recouverts de graviers d'autre part. Les photographies prises lors de l'enquête sur le terrain sont alors indispensables pour décider de l'affectation des surfaces litigieuses.

2.2.2.4) Comparaison des méthodes de mesure de surface des îlots de l'échantillon morphologique.

Il n'a pas été possible de comparer les surfaces issues du calcul du module *Surface* de *SAVANE* avec celles obtenues sur photographies aériennes au 1/8 000, car les surfaces estimées par *SAVANE* ont été calculées sur les îlots entiers et non les sous-îlots (croisement des îlots avec le descripteur densité du bâti).

Une régression linéaire simple a été testée entre la surface calculée sur l'image Thematic Mapper et celle mesurée sur photographies aériennes (échelle 1/8 000 ou 1/15 000). Les résultats obtenus confirment une bonne estimation de la surface calculée à **partir du découpage défini par le système SAVANE** puisque la précision obtenue est de l'ordre de 10% ; les surfaces issues de l'image (taille des pixels : 7,5 m) étant en majorité légèrement supérieures à celles issues du calcul sur photographies aériennes. On notera que cette précision est directement liée à la taille du pixel généré par SAVANE et à la précision de la cartographie qui a servi à délimiter les pâtés de maisons.

La surface la plus fiable, considérée comme la référence, est celle produite par comptage des pixels sur image, car celle estimée sur photographie aérienne est entachée d'une erreur induite par 2 facteurs :

- l'imprécision due à la difficulté de limiter l'îlot, en particulier si celui-ci est segmenté en plusieurs sous-îlots; les contours des sous-îlots sont quelquefois très accidentés, et il est alors difficile d'évaluer précisément la surface de ces derniers. De plus, le report des limites des zones homogènes (au sens de la densité) sur les îlots est approximatif, en particulier pour les grandes zones très peu denses du Nord.
- les échelles des photographies aériennes (1/8 000 et 1/16 000) ne sont pas constantes suivant que l'on se situe au centre ou à l'une des extrémités de la photo (ce problème ne se pose pas pour l'image satellite qui a été redressée). Par ailleurs, le fait de travailler à deux échelles différentes ne favorise pas l'homogénéité des calculs.

Cependant ces imprécisions ne sont pas constantes et quelques îlots se caractérisent par un écart plus important.

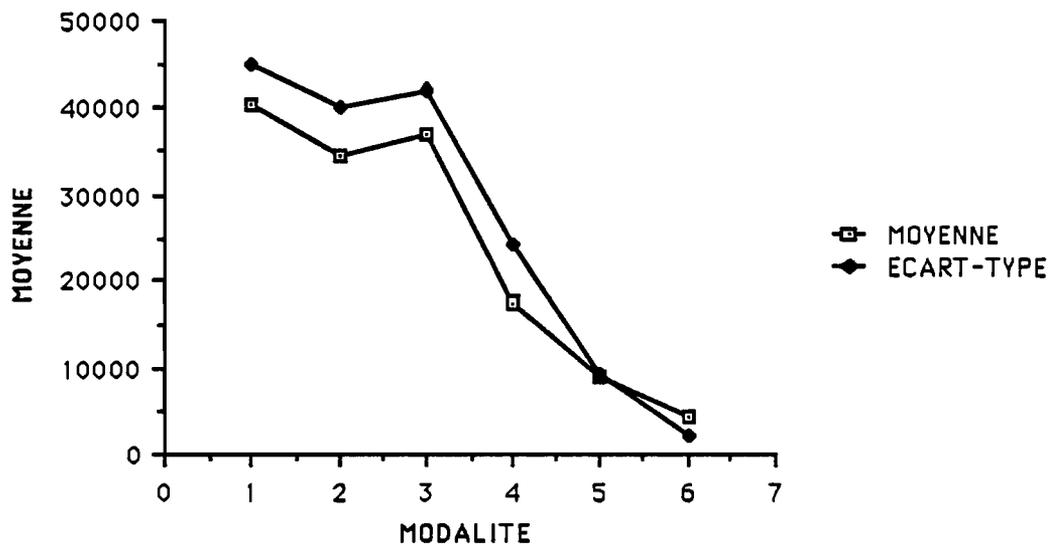
Tableau 2.2.4 - Statistiques sur la surface des îlots de l'échantillon par modalité -

MODALITE	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
Non bâti	40,57	44,97	111%
Très faible	34,35	40,26	117%
Faible	37,08	42,08	113%
Moyenne	17,46	24,24	139%
Forte	9,03	9,37	104%
Très forte	4,35	2,12	49%

Remarques :

CDV : Coefficient De Variation, obtenu en divisant l'écart-type par la moyenne. Ces valeurs sont données en pixels.

Figure 2.2.11 - Graphique des surfaces des sous-îlots par modalité de densité -



Quelques commentaires :

- en moyenne la taille des îlots décroît lorsque leur densité augmente, les coefficients de variation, qui sont ici plus révélateurs que les écarts-type, ont tendance à diminuer de façon inverse à la densité. On remarquera la grande hétérogénéité de la taille des îlots dans la modalité *moyenne*.
- on notera l'existence d'un maximum local occasionné par la modalité *faible*, cela semble dû à l'effectif important de cette modalité.

2.2.2.5) Statistiques sur la "densité du bâti".

Ce coefficient que nous avons élaboré a été obtenu en divisant la surface bâtie du sous-îlot par sa surface totale. Il a ensuite été multiplié par 100 et se conçoit donc comme un **pourcentage de surface bâtie**.

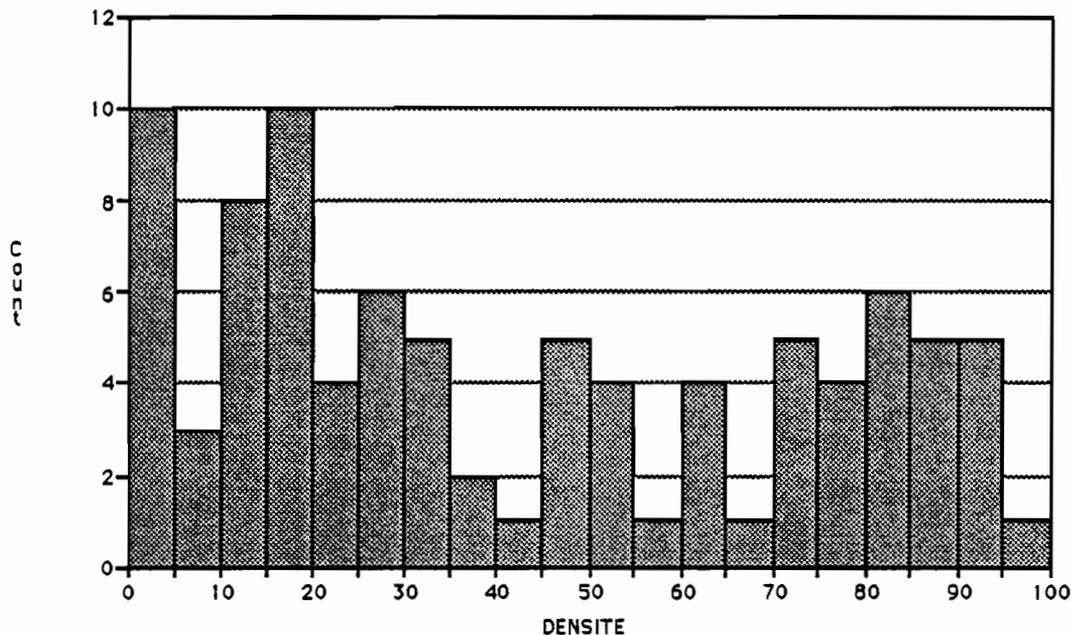
a) Etude de la distribution du coefficient densité du bâti .

La **Figure 2.2.12** fait apparaître une distribution de moyenne **44,00**, d'écart-type **32,00** et de médiane **38,00**. Compte tenu des différents pics et creux de la distribution, nous pouvons la scinder immédiatement en 4 classes disjointes :

- de 0 à 5
- de 10 à 35
- de 45 à 55
- de 70 à 95

Cette partition en 4 classes semble correspondre à une réalité urbaine imputable à un règlement d'urbanisme (zonage). Quoi qu'il en soit, la classe allant de 70 à 95 paraît difficile à segmenter en 2 pour obtenir nos 2 classes initiales les plus denses (*forte* et *très forte*). De même, la séparation entre nos 2 classes initiales *faible* et *moyenne* semble délicate. Au vu de l'histogramme de la **Figure 2.2.12**, la partition de la base en 6 modalités ne semble pas pouvoir être justifiée.

Figure 2.2.12 - Histogramme de fréquence du coefficient densité du bâti -



b) Répartition du coefficient densité du bâti par modalité.

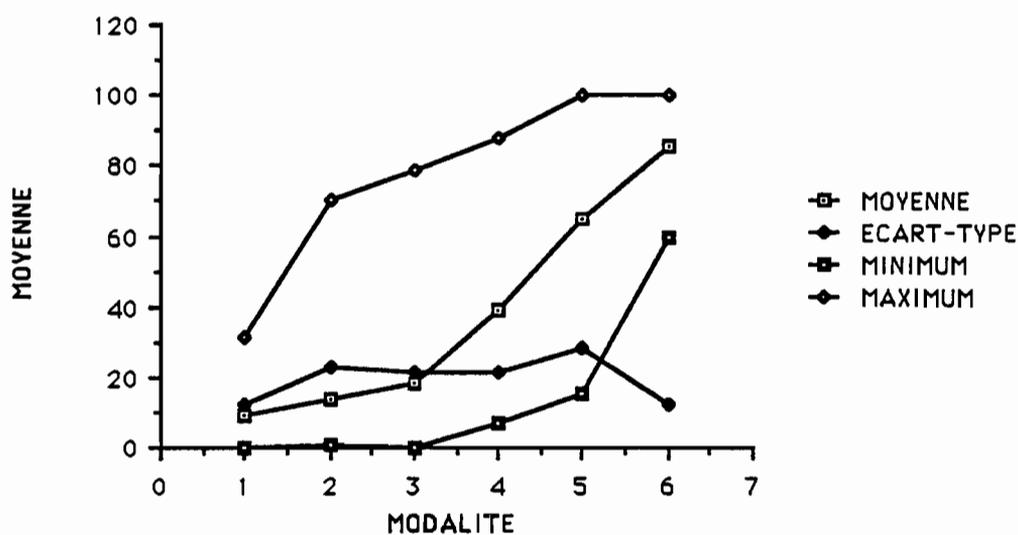
Les modalités notées (1) dans le **Tableau A.2.2.10** en **Annexe A.2.2** correspondent aux modalités telles qu'elles ont été définies initialement. Cependant, la lecture de ce tableau nous incite à considérer les modalités initiales avec circonspection. En effet, nous notons la valeur très importante des écarts-type, ainsi que les valeurs très éloignées des extremum intra-modalité. Ces faits sont illustrés par la **Figure 2.2.13**. Au vu du **Tableau A.2.2.10**, il nous faut donc conclure à une homogénéité médiocre des modalités, qui peut être expliquée par deux facteurs :

- certains îlots ont été construits ou démolis entre la date de prise des photos aériennes qui ont servi à délimiter spatialement les modalités et la date d'enregistrement de l'image satellite qui a servi de date de référence lors de l'enquête sur le terrain.
- certains îlots ne sont pas représentatifs de la modalité à laquelle ils sont rattachés. Lors de l'interprétation de la mosaïque photo-aérienne, il n'a pas été possible de détourner tous ces îlots "atypiques". En fait, c'est un **problème d'échelle** entre le zonage constitué par un groupe d'îlot et la densité de chaque îlot considéré séparément.

L'effet de ces deux facteurs est amplifié par le nombre peu élevé des îlots de l'échantillon : 80 sous-îlots, soit 2,31% du nombre total d'îlots INSEE constituant la ville de Marseille. Un tel taux de sondage, très faible, interdit à l'échantillon d'être représentatif au niveau de chaque modalité.

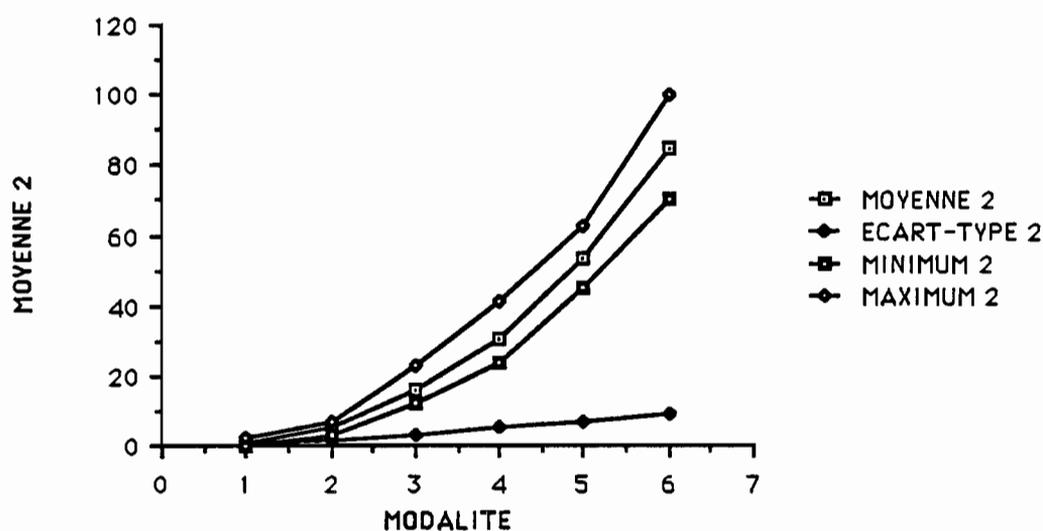
La valeur élevée des écarts-type de chaque classe, phénomène logique compte tenu du taux de sondage, est le fait de quelques îlots mal classés. Il ne semble donc pas que ces statistiques remettent en cause la fiabilité globale du découpage spatial de cette modalité. Cependant, il paraît indispensable de réaffecter les différents sous-îlots de l'échantillon à 6 "*nouvelles*" modalités aux bornes délimitées de façon précise. Cette manœuvre permettra de seuilier efficacement ces modalités après les différentes régressions tentées et de calculer des statistiques radiométriques fiables dans l'optique d'une classification.

Figure 2.2.13 - Graphique du coefficient densité du bâti réparti par modalités initiales-



Le graphique suivant présente les modalités telles qu'elles ont été redéfinies par la méthode des nuées dynamiques.

Figure 2.2.14 - Graphique du coefficient densité du bâti réparti par modalité après réaffectation des îlots selon la méthode des nuées dynamiques -



Deux méthodes de réaffectation seront successivement présentées. La première méthode, de type **nuées dynamiques**⁴, réaffecte les sous-îlots appartenant à l'échantillon dans ces "nouvelles" modalités, notées (2) dans le **Tableau A.2.2.10**,

⁴La méthode des nuées dynamiques est une classification non supervisée. (seul le nombre de classes est introduit). Elle s'exécute de façon itérative en calculant à chaque étape un nouveau centre pour chaque classes de façon à minimiser la variance intra-classe et à maximiser la variance inter-classe. Le processus s'arrête lorsque la convergence est atteinte.

Annexe 2.2 en maximisant la variance inter-classe et en minimisant la variance intra-classe du coefficient de densité du bâti calculé pour chacun des sous-îlots. Nous voyons que cette nouvelle distribution permet un seuillage immédiat et sans équivoque des 6 nouvelles classes en se fondant uniquement sur les extremum de chacune des classes (**Figure 2.2.14**). Une autre méthode, dont les résultats sont eux aussi présentés consiste à effectuer un seuillage en se fondant sur des valeurs extraites des îlots **typiques de leur modalité** (en ce qui concerne la densité du bâti). Les modalités ainsi définies sont notées (3) (**Tableau A.2.2.10, Annexe A.2.2**).

La même manipulation a été faite à partir des densités calculées en tenant compte d'une bande de 16 m (soit approximativement un demi pixel de Thematic Mapper) autour des îlots de l'échantillon. Comme dans le cas précédent, cette nouvelle réaffectation permet un seuillage immédiat des diverses modalités (voir **Figures A.2.2.1 et A.2.2.2 en Annexe A.2.2**).

PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES ET ENQUETE SUR LE TERRAIN : DEUX IMPÉRATIFS POUR INTERPRÉTER UNE IMAGE SATELLITE EN MILIEU URBAIN.

La création de cet échantillon de travail rend possible une interprétation de l'image satellite en se référant constamment à la réalité terrain (sous-îlots) que nous avons **vérifiée, analysée et quantifiée en fonction de notre thématique**.

L'estimation de la surface à l'aide d'une image satellite préalablement redressée est suffisante pour nos besoins (précision d'environ 10%).

Le résultat des statistiques sur le coefficient de densité du bâti ventilé par modalité soulève un problème, celui du taux de tirage de l'échantillon de travail. Compte tenu du mode de tirage, un taux de **2.31%** apparaît comme trop faible. Les travaux en cours de O. BARBARY préconisent un taux de **5%** pour obtenir une **représentativité correcte au niveau de chaque modalité**. Il n'est cependant pas possible de recourir à un nouveau tirage, donc à une nouvelle enquête et à un nouveau dépouillement, autant d'opérations coûteuses en temps. Pour pallier cette difficulté, il suffit de considérer non pas les modalités en tant que telles, mais les valeurs extrêmes de ces modalités calculées par l'une ou l'autre des deux méthodes proposées (nuées dynamiques ou valeurs typiques). La redistribution des sous-îlots de l'échantillon de travail dans ces "nouvelles" modalités en fonction des valeurs extrêmes du coefficient de densité du bâti sera donc effectuée pour chacune des deux méthodes.

La pertinence radiométrique de cette réaffectation sera testée dans le paragraphe que nous allons maintenant aborder et qui est consacré à la détermination d'un indice rendant compte de la densité du bâti telle que nous l'avons calculée sur notre échantillon.

2.2.3) RÉGRESSIONS ENTRE VARIABLES RADIOMÉTRIQUES ET COEFFICIENT DE DENSITÉ DU BÂTI.

A la suite des résultats obtenus précédemment, nous nous intéressons maintenant à l'évaluation du pouvoir de discrimination des différents indices à l'aide de régressions. Les coefficients de corrélation calculés au niveau des îlots, entre le coefficient de densité du bâti ou les coefficients de densité de la couleur dominante des toitures, et les moyennes de luminance dans les canaux, néo-canaux ou opérateurs spatiaux déterminent les régressions à tester.

Ces régressions simples, multiples ou polynomiales, tentent d'expliquer le mieux possible le **coefficient de densité du bâti** en fonction des indices les plus adaptés. Il s'agit de l'indice de végétation (IVG), du néo-canal $(TM4-TM5)/(TM4+TM5)$ noté IND1 et de la première composante principale notée ACP1. Seules sont présentées ici les régressions les plus performantes.

Deux parties structurent ce paragraphe; les régressions effectuées sur la base du coefficient de densité du bâti calculé à l'intérieur des sous-îlots et celles effectuées en considérant le sous-îlot et l'occupation du sol sur une bande de 16 m l'entourant. Ce dernier coefficient intègre dans son calcul une bordure de largeur égale à la moitié de la dimension d'un pixel Landsat TM. Il est en effet évident que les pixels de LANDSAT TM qui ont été pris en compte lors du calcul de la moyenne radiométrique d'un sous-îlot ne recouvrent pas uniquement ce sous-îlot, mais qu'ils en débordent. De plus, les valeurs des pixels situés en bordure d'un sous-îlot sont affectées par le type de revêtement bordant l'îlot. Cette dernière partie a cependant été reléguée en **Annexe A.2.2.3** afin d'alléger ces paragraphes. Tenir compte de cette bande supplémentaire ne fait à première vue pas apparaître d'éléments nouveaux susceptibles d'améliorer notre connaissance de l'image satellite, contrairement à ce que nous avons pu espérer.

2.2.3.1) Régression dans les sous-îlots.

a) *Matrice des corrélations.*

Notes sur la signification des abréviations utilisées.

ACP1 : première composante principale normée.

ACP2 : deuxième composante principale normée.

IVG : indice de végétation $(TM3-TM4)/(TM3+TM4)$.

IND1 : néo-canal $(TM4-TM5)/(TM4+TM5)$.

TEX1 : écart-type local fenêtre 5*5 sur le canal TM4.

TEX2 : écart-type local fenêtre 5*5 sur la deuxième composante principale normée.

Tableau 2.2.5 - Les corrélations entre moyennes radiométriques des sous-flôts, densité de bâti et pourcentage des couleurs dominantes des toitures -

	Densité	Brique	Marron	Blanc	Gris	Noir
Canal 1	-,226	-,163	-,335	-,036	,345	,093
Canal 2	-,331	-,159	-,398	-,109	,239	,093
Canal 3	-,238	-,030	-,335	-,149	,158	,061
Canal 4	-,702	-,308	-,497	-,252	-,116	-,036
Canal 5	-,407	-,067	-,366	-,169	-,101	,004
Canal 7	-,045	,142	-,134	-,210	,052	-,009
ACP1	-,459	-,102	-,443	-,222	,028	,061
ACP2	,586	,130	,362	,337	,314	,044
IVG	-,720	-,344	-,405	-,240	-,254	-,063
IND1	-,583	-,529	-,220	-,022	-,030	-,029
TEX1	-,510	-,419	-,223	-,077	,034	,097
TEX2	-,542	-,411	-,312	-,071	,086	,042

L'indice de végétation est, de tous les canaux et néo-canaux, celui qui est le plus corrélé avec le coefficient de densité du bâti. Compte tenu de son coefficient de corrélation négatif, **une densité est d'autant plus forte que cet indice est faible**, ce qui était tout à fait prévisible. Exception à noter, la deuxième composante principale est corrélée certes plus faiblement, mais positivement avec la densité du bâti.

Les indices de texture *TEXT1* (écart-type local calculé sur le canal 4), et *TEXT2* (écart-type local calculé sur la deuxième composante principale) ne sont que peu corrélés avec la densité du bâti.

Après analyse de ce tableau, il paraît difficile de tenter une régression quelconque entre la densité des couleurs des toits (en pourcentage de présence) et la moyenne radiométrique des différents canaux et indices. Seuls, les toits de couleur orange-brique conservent une chance non négligeable d'être discriminés. Cependant, la mise en évidence des critères de couleur ou de texture des matériaux qui constituent les toitures nécessite de travailler sur un sous-fichier de l'échantillon dans lequel ne seront retenus que les individus ayant une densité de bâti supérieure à la moyenne. De même, l'étude du non bâti se fera dans un sous-fichier constitué par des individus de faibles et très faibles densités. La moyenne déterminée dans le paragraphe 2.2.1, semble être la valeur apte à partager efficacement ces deux sous-ensembles.

b) Régressions simples, multiples et polynomiales.

Nous avons sélectionné dans le **Tableau 2.2.5** les meilleures régressions parmi l'éventail de toutes les combinaisons cohérentes (méthode de régressions pas à pas).

Précision : SCE résiduel estime la Somme des Carrés des Ecarts résiduels.

Tableau 2.2.6 - Les régressions les plus performantes entre moyennes radiométriques et coefficients de densité du bâti dans les sous-îlots de l'échantillon -.

CANAUX	CORRELATION Multiples	ECART-TYPE Résiduels	S.C.E Résiduel	F FISHER
Régression				
IVG	-0.720	22.93	47813	97.74
BATI = -0.65×IVG + 117.72				
IVG	-0.754	21.24	40586	59.44
BATI= -0.004 × IVG² - 1.78 × IVG + 185.74				
IND1, ACP1	-0.838	17.66	28054	106.08
BATI = -0.99 × IND1 - 0.71 × ACP1 + 237.62				
IVG, IND1, ACP1	-0.847	17.30	26632	75.26
BATI = -0.17 × IVG -0.81 × IND1 - 0.60 × ACP1 + 223.84				

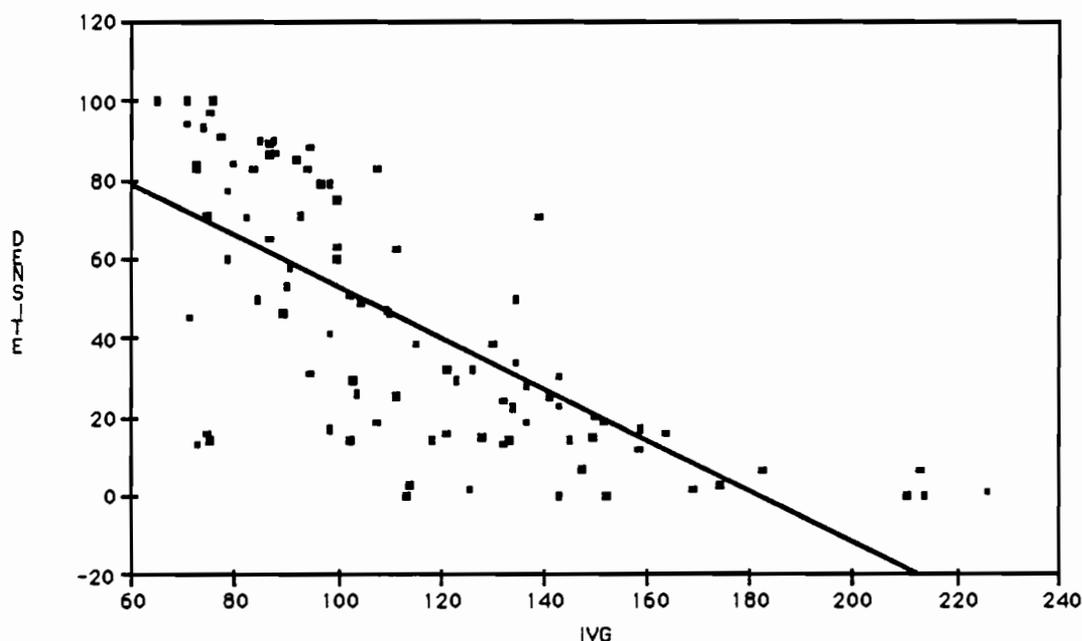
Le gain le plus important en ce qui concerne à la fois le coefficient de régression et l'écart-type résiduel est obtenu en passant de la régression simple (BATI / IVG) à la régression multiple (BATI / IND1, ACP1). L'amélioration constatée en ajoutant une variable explicative supplémentaire (IND1) demeure modeste.

c) Etude des résidus.

Nous étudions dans ce paragraphe les sous-îlots aux résidus importants (supérieurs à + ou - 2 écarts-type) pour les meilleures corrélations simples, multiples et polynomiales.

• Régression simple BATI/IVG.

Figure 2.2.15 - Graphique de la régression simple : densité du bâti/IVG -
 Abscisse : moyenne de l'Indice de Végétation (IVG) par sous-îlot
 Ordonnée : coefficient de densité du bâti par sous-îlot



Les îlots à forte densité (supérieure à 60) sont situés au dessus de la courbe théorique contrairement aux îlots à faible densité. Cela accrédite l'idée selon laquelle il sera nécessaire de scinder cet échantillon en 2 sous-échantillons; le premier regroupant les îlots de faible densité, et le second ceux de densité plus forte.

. Etude des résidus de la régression simple avec l'indice de végétation.

- * 506K01 densité 3, valeur du résidu : -55,26. Cet îlot est constitué à 86% par une surface bitumée, d'où une moyenne de luminance très faible et donc, une densité calculée relativement forte.
- * 511D07 densité 5, valeur du résidu : -48,77. C'est un îlot constitué de 81% de bitume. L'écart important constaté entre la densité réelle(16%) et la densité calculée(65%) s'explique par la surface très importante occupée par le bitume qui occasionne une luminance très faible et donc, compte tenu du coefficient de corrélation négatif, une densité calculée importante.
- * 528I04 densité 3, valeur du résidu : -44,45. Ilot totalement recouvert de bitume rouge-rose à luminance faible et donc, à densité calculée relativement forte.
- * 549D01I densité 3, valeur du résidu : -73,33. Cet îlot comporte 14% de bâti, sans compter 7% de chantier(dalle de béton).Le reste se partage entre de la végétation (arbres et herbes) ,de la terre nue, et du bitume (27%). De plus on note la présence importante d'ombres résultant de la grande hauteur des bâtiments. Tous ces éléments contribuent à une moyenne de luminance basse pour cet îlot et donc, à une densité calculée importante.

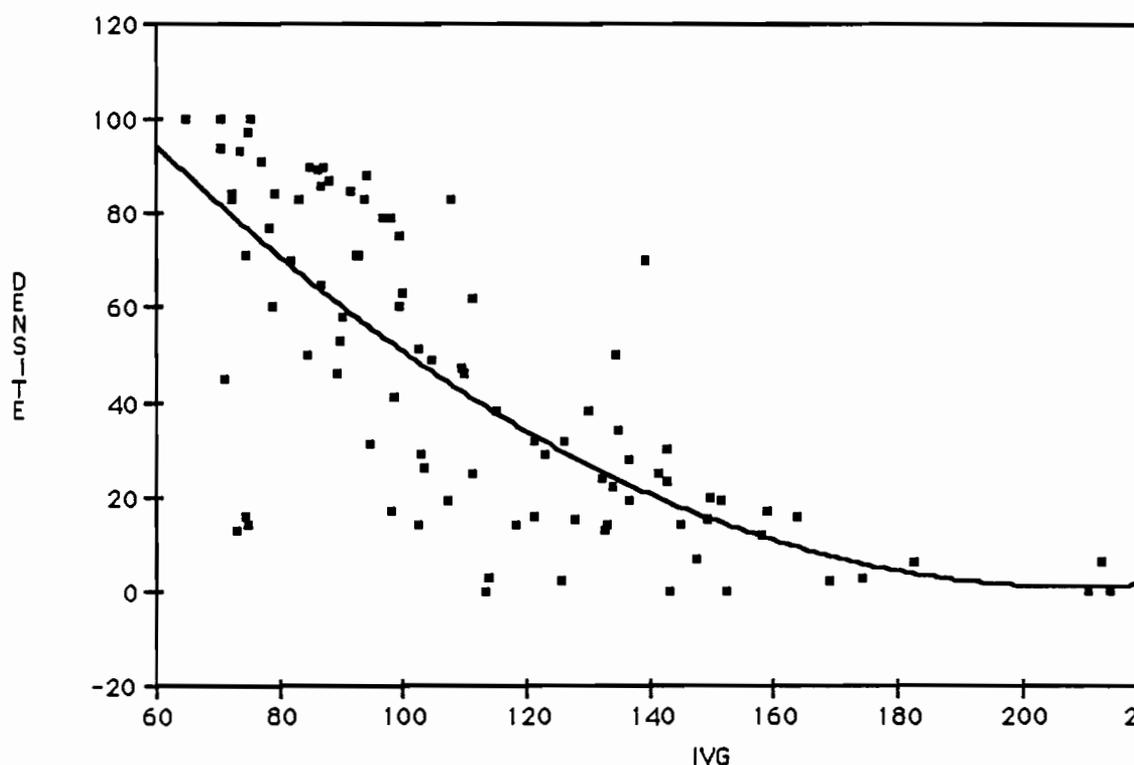
A l'issue de cette brève étude des résidus de la régression simple, nous pouvons dégager les 2 facteurs principaux perturbant la régression entre l'indice de végétation et la densité du bâti. Il s'agit du **bitume** et des **ombres** qui possèdent tous deux des réponses

radiométriques faibles pour l'indice de végétation et donc, biaisent l'estimation de la densité en la surestimant (tous les résidus sont négatifs).

.Etude des résidus de la régression polynomiale avec l'indice de végétation.

Le graphique précédent nous incite à tester une régression de degré 2 afin de mieux adapter la courbe théorique à la représentation graphique des sous-îlots.

Figure 2.2.16 - Graphique de la régression polynomiale : densité du bâti / IVG -

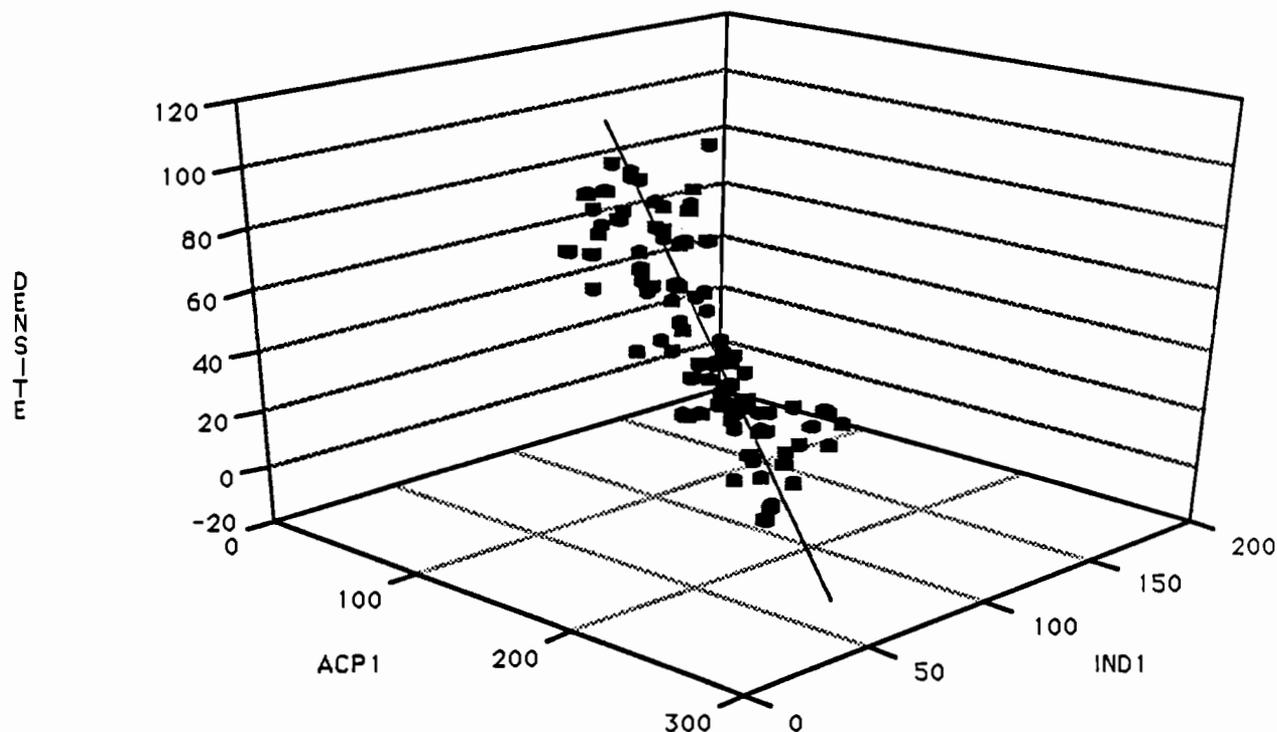


La courbe parabolique de la variable IVG s'adapte davantage pour décrire la densité du bâti, en particulier pour les densités très faibles.

L'étude des résidus nous apprend que ce sont les mêmes sous-îlots qui s'écartent le plus de la courbe théorique. Seul le sous-îlot 546H02 se situe très au dessus de la courbe (résidu : + 48,85), il est uniquement constitué d'immeubles aux toits blancs entourés de terre claire, offrant un indice de végétation moyen qui a pour effet de minimiser sa densité réelle.

. Etude des résidus de la régression multiple $BATI/IND1, ACP1$.

Figure 2.2.17 - Graphique de la régression multiple.: densité du bâti / ACP1, IND1-



- * 511D07 densité 5, valeur du résidu : -38,51.
- * 513A01 densité 5, valeur du résidu : 38,98. Ilot à densité très forte(90%) à dominante de couleur de toit marron.
- * 513B02 densité 3, valeur du résidu : 35,58. Ilot à densité très forte (80%) à dominante de couleur de toit blanc. La radiométrie forte qui en découle contribue à surestimer la densité du bâti.
- * 517E07 densité 5, valeur du résidu : 55,80. Ilot à densité très forte (100%) à dominante de couleur de toit blanc gris. Les moyennes radiométriques dans les 2 canaux qui nous intéressent sont fortes, cela est dû à la forte luminance des toits de couleurs claires
- * 555C02 densité 4, valeur du résidu : -38,40. Ilot à densité faible (14%). Le bitume et l'ombre occupent une surface importante ce qui provoque une surestimation du coefficient de densité du bâti.

Les résidus positifs résultant de cette régression sont en partie imputables aux toitures ou aux revêtements de chaussée de couleurs claires.

Seul, l'ilot 513A01, typique de centre ville dense, ne comporte pas de composante particulière susceptible d'expliquer l'écart constaté.

Etude de la régression multiple $BATI/IND1, ACP1, IVG$.

Cette régression a été abandonnée compte tenu de la très faible valeur du F de FISHER partiel (4.75 pour l'indice de végétation) qui n'est plus significatif. De plus, l'importance de l'écart-type partiel (0.08) pour ce même indice qui est du même ordre de grandeur

que le coefficient de régression (- 0.17) de l'IVG nous incite à ne pas tenir compte de cette régression.

Une analyse identique a été effectuée en tenant compte d'une bande de 16 mètres autour de chaque sous-îlot. Les résultats de ces opérations sont présentés en **Annexe A.2.2.3** afin de ne pas surcharger ce texte. Ces résultats n'apportent aucun élément déterminant supplémentaire.

DENSITÉ DU BATI ET MOYENNE DES LUMINANCES : UNE CORRÉLATION ÉTABLIE.

Nous avons conclu, dans le paragraphe consacré aux matrices de cooccurrences, que le découpage initial des modalités n'était pas adapté à la réalité statistique dans le canal 4. Il semble en être de même avec d'autres néo-canaux (IVG, IND1, TEXT_C4) ainsi qu'avec les néo-canaux utilisés pour générer les régressions (ACP1).

Les résultats de ces régressions sont encourageants. Ils confirment les prévisions que nous avons établies quant à la détermination des néo-canaux les plus discriminants lors de l'analyse statistique du descripteur *densité du bâti*.

S'abstraire de la notion de modalité comme nous l'avons fait ici est indispensable car le découpage de ces modalités n'est pas le même selon que l'on étudie une photographie aérienne ou une image satellite. Ici intervient le problème non seulement de l'échelle du document de travail mais surtout de la résolution des objets qui en découle. Pour un même phénomène observé, les bornes des modalités ne seront pas les mêmes suivant que l'on considère une photographie aérienne couleurs naturelles, une composition colorée issue de Thematic Mapper, ou une composition colorée provenant de SPOT, le tout à la même échelle.

Raisonnement par zone (ici le sous-îlot) est l'unique moyen de pouvoir étudier la correspondance entre une densité de bâti et une valeur radiométrique (ici la moyenne des luminances de canaux ou de néo-canaux pour le sous-îlot). Cependant, il ne paraît pas réaliste de vouloir entreprendre une étude sur la densité du bâti fondée uniquement sur les signatures spectrales des zones. L'analyse des valeurs moyennes de radiométrie des sous-îlots d'une même modalité dans différents canaux montre très vite qu'aucune signature spécifique ne peut être déterminée pour une modalité donnée. Compte tenu de la thématique qui nous intéresse, seule une tendance peut être dégagée, c'est ce que nous avons tenté de faire. La raison en est simple, l'hétérogénéité des sous-îlots appartenant à une même modalité de densité est trop importante. On peut s'en convaincre aisément en consultant les écarts-types par modalité du **Tableau A.2.2.15** en **Annexe 2.2**. En les supposant de même densité, il n'existe pas 2 sous-îlots strictement identiques quant au revêtement des toitures de leurs bâtiments ou à la nature du tissu interstitiel. La multiplicité des associations possibles des types de revêtement et des types de végétation rend hasardeux les résultats d'une telle approche. Nous sommes ici bien loin des étendues homogènes importantes auxquelles sont souvent confrontés les télédéTECTEURS en milieu naturel ou agricole.

Nous retiendrons de ce chapitre, que la densité de l'espace bâti, telle que nous l'avons définie par un coefficient calculé sur échantillon, peut être approximée à partir de la luminance des néo-canaux Thematic Mapper. En conséquence, nous allons étendre les résultats de ces calculs à l'ensemble de l'image, ce qui nous permettra d'élaborer ensuite une stratification basée sur la densité du bâti, et de quantifier la fiabilité de notre évaluation et de la stratification.

Il convient de préciser ici que le coefficient que nous avons élaboré n'a pas de rapport avec le COS (coefficient d'Occupation du Sol) des règlements d'urbanisme, puisqu'en autres, il ne prend pas en compte la hauteur des bâtiments.

2.2.4) CLASSIFICATIONS D'IMAGES SATELLITE SUIVANT LA DENSITÉ DU BÂTI.

Dans cette partie, quatre types de classification se référant à la densité du bâti ont été tentés et leur fiabilité évaluée. Tester plusieurs types de classification sur plusieurs types d'individus est impératif durant cette phase de travail qui consiste à évaluer une méthode d'analyse d'image satellite ayant pour objectif l'élaboration d'une stratification d'une base de sondage à objectif démographique.

Après avoir étudié les variations du canal TM 4 dans l'échantillon de travail au travers des matrices de cooccurrences, nous avons déterminé 4 couples de seuils définissant 4 classes (dont une regroupe les pixels non classés). Les classes de référence notées Réf ont de même été regroupées par couple afin de pouvoir évaluer la qualité du seuillage (Annexe A.2.2.4.1).

Le seuillage de la régression multiple la plus performante calculée précédemment sera effectué. Des seuils de différentes provenances seront successivement testés. Les pixels seront affectés à une classe en fonction de bornes déterminées par les résultats de la classification type nuées dynamiques opérée sur le coefficient de densité du bâti. Les sous-îlots d'un échantillon de vérification seront répartis dans ces classes suivant le même principe. Enfin, les bornes déterminées lors de l'analyse de la mosaïque photo-aérienne (valeurs typiques) seront utilisées pour opérer une dernière classification, des pixels, puis des îlots, à partir de cette même régression.

Une méthode classique, de classification supervisée utilisant la distance entre barycentres de classes, initialisée à partir des îlots de l'échantillon de travail sera ensuite proposée. Les individus classés seront tout d'abord les pixels de la totalité de l'image, puis les îlots de l'échantillon de vérification (Annexe A.2.2.4.2).

Nous terminerons par la présentation des résultats d'une ultime classification non supervisée, de type nuées dynamiques sur les îlots (Annexe A.2.2.4.3). Cette même classification n'a pu être tentée sur les pixels en raison de problèmes inhérents au matériel informatique (tableaux de données trop importants).

• Précisions sur l'évaluation de la fiabilité de ces classifications.

La référence à laquelle nous comparons ces différentes classifications provient de l'interprétation d'une mosaïque photo-aérienne. Cette mosaïque a ensuite été numérisée, puis intégrée dans la base de données gérée par SAVANE.

Dans le cas d'une classification sur les pixels, la référence du descripteur *densité du bâti* sur l'ensemble de la zone d'étude (voir Photo 2.2.1).

Dans le cas d'une classification sur des îlots issus d'un échantillon "de vérification", cette référence résulte du croisement de l'image du descripteur *densité du bâti* avec l'image des îlots de cet échantillon.

Notons tout d'abord que cet échantillon de vérification, tiré à un taux de 5% de façon systématique dans le fichier des îlots INSEE rangé par ordre alphanumérique, présente la particularité suivante : les îlots à modalité *non bâti, très faible et faible* sont sous-représentés en comparaison des îlots des modalités suivantes. En effet, ce type de tirage privilégie les modalités à fort effectif au détriment de modalités à plus faible effectif, mais de surface plus importante, ce qui est notre cas.

Afin de quantifier la précision des classifications, une matrice de confusion ainsi que plusieurs autres paramètres ont été calculés en prenant comme référence :

- le zonage du descripteur *densité du bâti* (déterminé à partir de photographies aériennes) en ce qui concerne la classification des pixels,
- le zonage du descripteur *densité du bâti* croisé avec les îlots de l'échantillon de vérification pour la classification des îlots.

Une telle démarche, habituelle en télédétection permet de quantifier le degré de précision de ces classifications afin de pouvoir déterminer laquelle de celles-ci présente le plus de **similitude** avec l'image résultant de l'interprétation de la mosaïque photo-aérienne.

Les valeurs indiquées dans ces matrices sont des valeurs brutes, c'est-à-dire qu'elles représentent le nombre de pixels (ou d'îlots) classés dans la **Classe J** et appartenant à la classe de référence **Ref I**.

Le pourcentage de pixels (ou d'îlots) bien classés résulte de la division de la somme des termes de la diagonale principale par le nombre total d'individus (pixels ou îlots).

Le pourcentage de pixels (ou d'îlots) bien classés par classe est obtenu en divisant les valeurs de la diagonale de chaque **classe I** par l'effectif de sa classe de référence **Ref I**.

L'évaluation statistique des résultats est caractérisée par le quotient de l'effectif de la **classe I** par l'effectif de la référence **Ref I**, ce qui évalue statistiquement les résultats de la classification par postes de référence **I**. Ce pourcentage, **qui peut-être supérieur à 100%**, mesure globalement l'importance des classes **Classe I** issues de la classification par rapport aux classes de références **Ref I**. Plus pratiquement, il correspond à la somme de la ligne **I** sur la somme de la colonne **I**.

2.2.4.1) Seuillage de la régression multiple la plus intéressante : **BATI/ACP1, IND1**.

Ces seuillages ont été effectués d'une part sur les valeurs de pixels de la zone d'étude entière, d'autre part sur les moyennes radiométriques calculées dans les îlots appartenant à l'échantillon de vérification.

Nous avons généré une image à partir de 2 néo-canaux, qui offrent une des corrélations les plus fortes avec la densité du bâti, en appliquant à chaque pixel ou moyenne par îlot la transformation linéaire suivante :

$$\text{BATI} = -.71 \times \text{ACP1} -.99 \times \text{IND1} + 237.62.$$

Nous avons obtenu une image dans laquelle tous les pixels ont une valeur comprise entre 0 et 100, les valeurs extrêmes ont été ramenées aux bornes correspondantes. **Cette image est donc une représentation de la densité du bâti (Photo 2.2.13).**

On se souvient que d'autres auteurs ont emprunté la méthode de la régression, certains modélisant même directement la densité de **population** à partir des réponses radiométriques des canaux MSS (HEGEDUS E. et Al, 1982).

Afin de pouvoir quantifier la fiabilité d'une telle représentation, nous avons seuillé dans cette image:

- les valeurs des pixels de la scène entière dans le cas de la classification des pixels
- la moyenne des îlots de l'échantillon de vérification dans le cas de la classification des îlots

Nous avons donc obtenu 6 classes de bâti, dans le but de comparer le résultat de ces "classifications" avec notre référence issue de la photo-interprétation.

a) Seuillage des pixels.

Les seuils de ces classes proviennent de la nouvelle réaffectation des îlots de l'échantillon de travail obtenu par la méthode des **nuées dynamiques**. La mer a été masquée à l'aide du canal TM 4.

Tableau 2.2.7 - Matrice de confusion. Classification des pixels par seuillage de la régression multiple -

	Ref 1 N.BATI	Ref 2 T.FAIBLE	Ref 3 FAIBLE	Ref 4 MOYEN	Ref 5 FORT	Ref 6 T.FORT
Classe 1 N.BATI (0-2)	5050	7972	3927	3430	203	12
Classe 2 T.FAIBLE (3-9)	1332	1811	1674	1999	146	4
Classe 3 FAIBLE (10-23)	2642	3520	4233	6393	537	15
Classe 4 MOYEN (24-44)	3045	3873	6710	13222	2024	95
Classe 5 FORT (45-55)	1767	1738	3499	8189	3880	561
Classe 6 T.FORT (66-100)	2134	1090	1937	3323	4745	1947

Pourcentage de pixels bien classés : **28 %**.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1	129 %	32 %	15 970 pixels
2	35 %	9 %	20 004 pixels
3	79 %	19 %	21 980 pixels
4	79 %	36 %	36 556 pixels
5	170 %	34 %	11 535 pixels
6	576 %	74 %	2 634 pixels

Quelques remarques :

- 3 classes ont gagné en effectif, il s'agit des classes *non bâti*, *forte* et *très forte*. La première au détriment de la classe *très faible*, les deux suivantes au détriment de la classe *moyenne*.
- les modalités les mieux classées sont celles qui ont bénéficié d'un apport de pixels.
- seule la modalité *très forte* est bien classée, on remarquera que cette modalité comprend de nombreux pixels appartenant à la référence 5.

Cette classification (**Photo 2.2.14**) est de mauvaise qualité. Cela semble provenir en partie du seuillage qui semble ici mal défini comme tendent à le montrer les fortes valeurs situées en-dessous des termes de la diagonale principale. Les valeurs importantes se regroupent cependant autour de cette même diagonale. Fait inquiétant, un grand nombre de pixels référencés en **Ref 1** sont classés en **Classe 6**. Une approche visuelle de la classification indique que cette confusion est due pour l'essentiel aux ombres des montagnes qui renvoient une valeur radiométrique semblable au centre ville dense dans les canaux que nous avons sélectionnés ici.

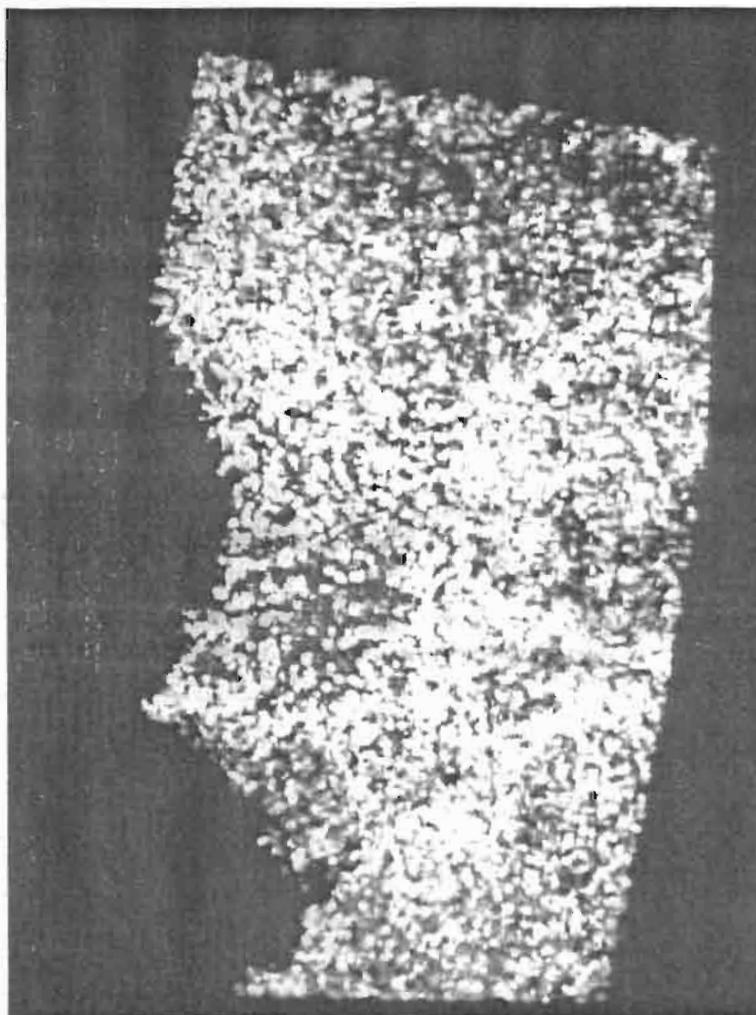


Photo 2.2.13 - Application de la régression multiples à l'image Thematic Mapper entière-

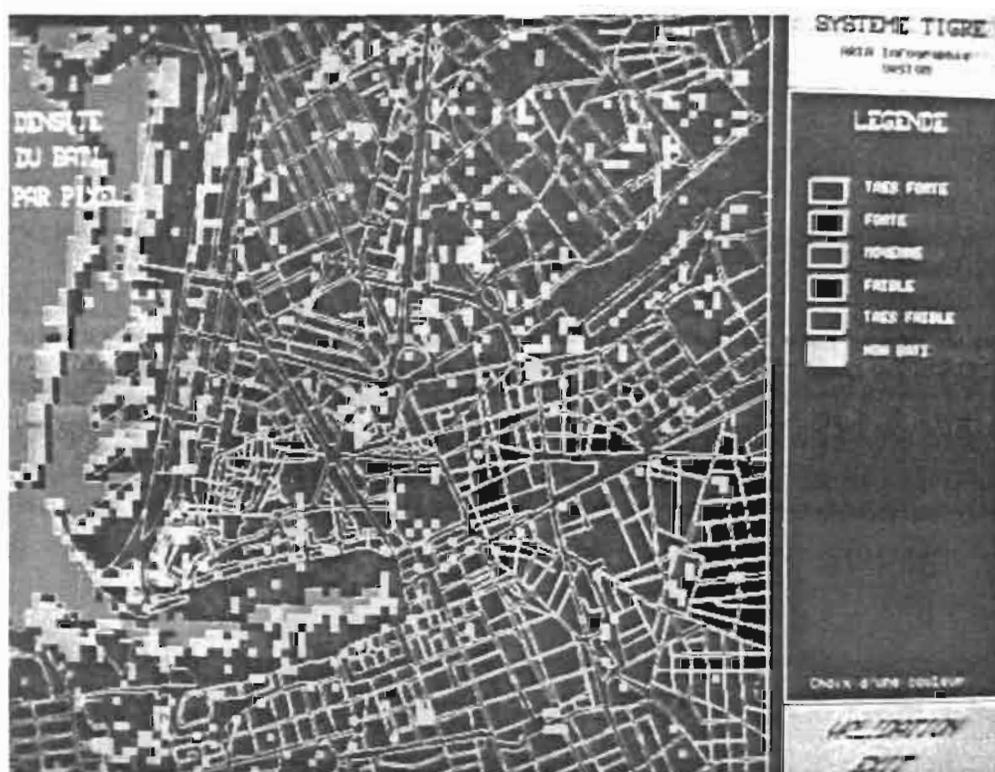


Photo 2.2.14 - Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la classification de pixels avec superposition de la limite des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres -

b) Seuillage des îlots.

Deux méthodes ont été testées pour déterminer les bornes des classes, les nuées dynamiques et les valeurs de densité typiques des modalités.

• *Seuillage des classes à l'aide des nuées dynamiques.*

Tableau 2.2.8 - Matrice de confusion. Classification des îlots par seuillage de la régression multiple à l'aide des seuils définis par nuées dynamiques -

Modalités Seuils	Ref 1 N.BATI	Ref 2 T.FAIBLE	Ref 3 FAIBLE	Ref 4 MOYEN	Ref 5 FORT	Ref 6 T.FORT
Classe 1 N.BATI (0-2)	00	00	00	00	00	00
Classe 2 T FAIBLE (3-9)	01	00	00	01	00	00
Classe 3 FAIBLE (10-23)	00	00	04	08	00	00
Classe 4 MOYEN (24-44)	00	04	07	47	05	00
Classe 5 FORT (45-55)	02	01	01	18	16	05
Classe 6 T FORT (66-100)	01	00	01	03	30	24

Pourcentage d'îlots biens classés : **51 %**.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1	0 %	0 %	4 îlots
2	40 %	0 %	5 îlots
3	92 %	31 %	13 îlots
4	82 %	61 %	77 îlots
5	84 %	32 %	51 îlots
6	203 %	83 %	29 îlots

Cette matrice présente une forte concentration de ses valeurs non nulles autour de sa diagonale principale; **plus de 90% des îlots sont bien classés à une classe près** ce qui est important à noter car le descripteur *densité du bâti* est une variable ordonnée. De plus, il est plus important pour nous d'obtenir une bonne précision dans les modalités les plus denses que dans les modalités *très faible* ou *non bâti*.

Les modalités les moins bien classées sont celles qui sont le moins représentées dans l'échantillon : seule la modalité forte est mal classée et se mélange à la fois avec la classe *moyenne* et la classe *très forte*.

Les modalités *non bâti* et *très faible* sont sous-représentées dans la classification contrairement à la modalité *très forte* qui attire à elle plus de la moitié des îlots de référence *forte*.

Statistiquement, les effectifs des classes ne se retrouvent pas dans les modalités *non bâti* (0%), *très faible* (40%) et *très forte* (203%).

• *Seuillage à partir de valeurs extrêmes appartenant à des îlots typiques de leur modalité initiale.*

Avant de procéder à l'interprétation de la mosaïque photo-aérienne, un certain nombre de zones (îlots INSEE) ont été choisies comme référentiel pour l'intensité de gris afin de pouvoir s'y reporter en cas d'ambiguïté lors du zonage du descripteur *densité du bâti*. Les valeurs à partir desquelles est opéré le seuillage qui va suivre sont issues d'îlots appartenant à ces zones de référence.

Tableau 2.2.9 - Matrice de confusion. Classification des îlots par seuillage de la régression multiple à l'aide des valeurs typiques -

	Ref 1 N.BATI	Ref 2 T.FAIBLE	Ref 3 FAIBLE	Ref 4 MOYEN	Ref 5 FORT	Ref 6 T.FORT
Classe 1 N.BATI (0-5)	01	00	00	00	00	00
Classe 2 T.FAIBLE (6-15)	00	00	01	04	00	00
Classe 3 FAIBLE (16-29)	00	02	05	<u>18</u>	00	00
Classe 4 MOYEN (30-60)	01	03	06	52	<u>18</u>	02
Classe 5 FORT (61-80)	02	00	00	01	27	<u>19</u>
Classe 6 TRES FORT (81-100)	00	00	01	02	06	08

Pourcentage d'îlots biens classés : 52 %.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1	25%	25 %	4 îlots
2	100%	0 %	5 îlots
3	192 %	39 %	13 îlots
4	106 %	68 %	77 îlots
5	96 %	53 %	51 îlots
6	59 %	28 %	29 îlots

Cette classification (Photo 2.2.15) qui marque une amélioration de 1 % par rapport à la classification précédente est cependant nettement meilleure, au sens plus proche de notre

référence (**Photo 2.2.16**), car l'évaluation statistique par poste de référence indique **une plus grande fidélité au zonage pré-défini**. Les valeurs importantes restent groupées autour de la diagonale, mais au-dessus, fait significatif d'un seuillage aux bornes inférieures trop élevées et, par conséquent, aux bornes supérieures trop basses contrairement au seuillage précédent. Cela démontre en particulier la difficulté de définir les seuils et l'importance du choix de ces bornes.

PRISE EN COMPTE DE LA ZONE : UNE NETTE AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE DES CLASSIFICATIONS RADIOMÉTRIQUES.

Il est possible de se rapprocher davantage de l'image des zones d'équidensité qui constitue notre référence en procédant à un seuillage visuel interactif sur *PERICOLOR 1000*. Ce faisant, il nous semble que l'on s'écarte d'une démarche objective en faisant intervenir la partialité d'un seuillage visuel qui ne correspond pas à la réalité statistique de la densité du bâti telle que nous l'avons mesurée, îlot par îlot, dans l'échantillon de travail. Cependant, cette manipulation ne produira pas de résultats très sensiblement meilleurs, car une grande partie des îlots de l'échantillon de vérification appartenant à la référence *forte* possèdent une densité calculée (à l'aide de ces indices) supérieure à celle de certains îlots correctement classés dans la classe *très forte*. Aussi, une translation ou même une modification des bornes du seuillage ne constitue pas une recette miracle.

Nous avons vu précédemment que la translation des bornes, même limitée, influait de façon importante sur la répartition des îlots dans les classes. Il faut rappeler que les statistiques d'initialisation des deux derniers types de classification ont été obtenues après réaffectation des îlots de l'échantillon de travail dans de "nouvelles modalités". Il n'est donc pas à priori surprenant d'obtenir un résultat différents quant à la délimitation des modalités proches en particulier; **leur dénomination reste la même, mais leurs bornes ont été translatées.**

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

- Les différentes statistiques radiométriques ont été calculées sur des îlots INSEE, il est donc logique de classer des entités de même grandeur que celles dont on a extrait l'information. Cela est plus flagrant lorsque l'on s'intéresse aux régressions. Calculer une densité de bâti par pixel est à la limite de l'acceptable. En effet, les régressions ont été obtenues en comparant les valeurs radiométriques de différents néo-canaux avec une densité de bâti par îlot. Il est donc plus logique d'appliquer ces régressions sur les mêmes entités, c'est à dire les îlots, que sur des éléments de dimension inférieure (les pixels).
- De nombreux chercheurs, travaillant sur l'interprétation d'images satellite en milieu urbain, filtrent par un lissage par la moyenne les images avant classification de façon à se rapprocher le plus possible des valeurs moyennes en fonction desquelles ils ont initialisé leur classification. Cette façon de procéder, qui contribue à dégrader artificiellement la résolution spatiale de l'image, s'apparente donc à un artefact qui facilite le classement de pixels de valeurs extrêmes.

Pour un objectif de stratification de l'espace urbain, la résolution spatiale plus fine de TM¹ est en milieu urbain un cadeau empoisonné (**Photo 2.2.17**). En effet, alors que les images générées par LANDSAT MSS étaient constituées d'un assemblage de pixels de valeurs relativement proches dû à un lissage lors de l'enregistrement des données, la résolution spatiale sensiblement meilleure du capteur TM permet l'émergence d'un

¹ par rapport à Landsat MSS.



116

Photo 2.2.15 - Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la classification des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres . Valeurs typiques -



Photo 2.2.16 - Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la référence photo-aérienne avec superposition des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres -



Photo 2.2.18 - Superposition des zones morphologiques sur une composition colorée des canaux 1,4 et 7 de Thematic Mapper. Les différents modes d'occupation du sol distingués sur photographies aériennes apparaissent aussi sur ce documents satellitaire -

nouveau type de pixel jusque là inconnu dans les villes : le pixel pur (ou presque pur). Compte tenu de notre problématique et du type de résultat que nous désirons obtenir (une stratification de l'espace urbain en fonction d'un critère bien précis), c'est paradoxalement une résolution spatiale plus grossière que nous aurait le mieux convenu. La résolution de TM paraît inadaptée pour l'étude de la densité des villes, trop fine pour **classer les pixels**, mais insuffisamment fine pour se livrer aux joies de la photo-interprétation. Par contre, pour élaborer une typologie du tissu urbain, cet inconvénient peut devenir un avantage, comme nous le verrons dans le chapitre 2.3, pour peu que l'on s'attache à classer des zones urbaines décrites par des variables rendant compte de la diversité de ces entités.

Sauf dans le centre-ville très dense et très homogène où il occupe une surface négligeable, le tissu urbain interstitiel, de par la variété de sa nature, induit des valeurs radiométriques qui sont très éloignées de celles générées par les toits des bâtiments voisins. De plus, ceux-ci sont loin d'être semblables et leurs valeurs de réflectance varient sensiblement en fonction des différents matériaux utilisés. C'est ainsi que nous obtenons des classifications qui présentent l'apparence d'un semis de points multicolores là où nous voudrions voir de grandes plages de mêmes couleurs (cas des classifications de pixels). Il reste alors à faire un véritable travail d'interprétation visuelle puis de regroupement pour passer du stade de la classification pixels au stade de la stratification (l'individu est alors le district de recensement INSEE), seule susceptible de nous intéresser, compte tenu de l'objectif que nous poursuivons.

Lisser avant ou après la classification est une opération qui entraîne une distorsion de la réalité, car elle n'est pas sélective au niveau spatial (lissage de pixels de mer avec les pixels côtiers pour prendre un exemple significatif), contrairement à une moyenne raisonnée sur une entité spatiale qui possède une réalité, ne serait-ce qu'administrative (les îlots INSEE par exemple). Il faut ajouter que plus cette entité est homogène sur le plan thématique, plus la production de la moyenne radiométrique sur cette zone se justifie. Dans notre cas, les districts de recensement INSEE, de par leur petite taille², se prêtent relativement bien à ce genre d'exercice, même s'ils ne constituent pas les entités idéales pour ce genre de traitement.

Passer d'une classification de pixels à une classification de zones pré-définies (ici les îlots INSEE) améliore les différentes classifications que nous avons effectuées de près de 100 %. Ce type de classification, qui constitue pour nous une stratification du milieu urbain, semble être une des méthodes les plus prometteuses. Dans la partie qui suit, nous évaluons l'apport de la meilleure classification de zones que nous avons réalisée sur l'image Thematic Mapper pour stratifier notre base de sondage dans le cadre d'une simulation d'enquête démographique à partir des données du recensement de 1982.

² comparée à celle de notre zone d'étude.

DENSITÉ DU BATI : STRATIFIER L'ESPACE URBAIN À PARTIR DE PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES OU À PARTIR D'IMAGES SATELLITE APPORTE UN GAIN COMPARABLE POUR UNE ENQUETE DÉMOGRAPHIQUE.

La **Figure 2.2.18¹** récapitule les principales étapes du travail effectué sur l'image LANDSAT Thematic Mapper de Marseille afin mettre en évidence la densité de l'espace bâti. Le schéma d'expérimentation est des plus classiques, l'utilisation d'un système d'information géographique pour localiser les zones test et définir de nouvelles entités à classer constituant l'essentiel de l'aspect novateur de la recherche.

Comme nous l'ont montré les analyses effectuées tant sur les variables radiométriques (les matrices de cooccurrences, les néo-canaux et les opérateurs de texture) que sur les variables calculées sur les photographies aériennes, il paraît trop ambitieux de vouloir obtenir une partition du descripteur *densité du bâti* en 6 modalités. **Segmenter ce descripteur en 4 modalités est plus réaliste.** Cependant, il était nécessaire d'effectuer des classifications en 6 classes afin de pouvoir quantifier ces résultats avec notre référence qui est seuillée en 6 postes. Quant aux résultats de fiabilité de nos classifications, sans être très performants, ils se situent dans la bonne moyenne des fourchettes de précision généralement publiées dans la littérature en milieu urbain.

Cependant, la véritable sanction de notre travail intervient, en fait, plus tard et à un autre niveau. Il ne faut pas perdre de vue que la classification des districts de recensement INSEE, qui correspond dans notre cas à une stratification de l'espace urbanisé (**Photo 2.2.19**), a pour objet d'améliorer la précision d'une enquête démographique par sondage. Il s'agit donc d'évaluer et de comparer l'apport des stratifications de la base de sondage que nous possédons à la précision d'estimations démographiques. **La fiabilité de la classification que nous avons réalisée sur image satellite est donc directement déduite du gain de précision imputable à l'emploi de la stratification qui en découle.**

Le **Tableau 2.2.10** qui suit illustré par la **Figure 2.2.19** extraits des travaux de O. BARBARY permet de comparer le gain qu'apporte la stratification issue de l'image satellite par rapport à l'estimation des mêmes caractères démographiques sans stratification, ou par rapport aux stratifications issues de l'interprétation des photographies aériennes (densité du bâti ou analyse typologique). Ce gain est calculé à partir des coefficients de variation (CDV) des estimateurs démographiques calculés sur l'ensemble de la base de sondage

$$\text{gain} = (\text{CDV}_{\text{ns}} - \text{CDV}_{\text{s}}) / \text{CDV}_{\text{ns}}$$

avec CDV_{ns} coefficient de variation sans stratification

et CDV_{s} : coefficient de variation avec stratification

Signification des abréviations

POPSDC : Population sans double compte

POPFRANC : Population des français

POPHEMP : Population des hommes de plus de 19 ans ayant un emploi

POP MEN : Population des ménages ordinaires

NBMEN-6 : Nombre de ménages de moins de 6 personnes

POP+5 : Population des personnes de plus de 5 ans

¹Organigramme extrait de l'article de 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. Paris, Service Technique de l'Urbanisme, Bilan sur la télédétection urbaine en France, Octobre 1987.

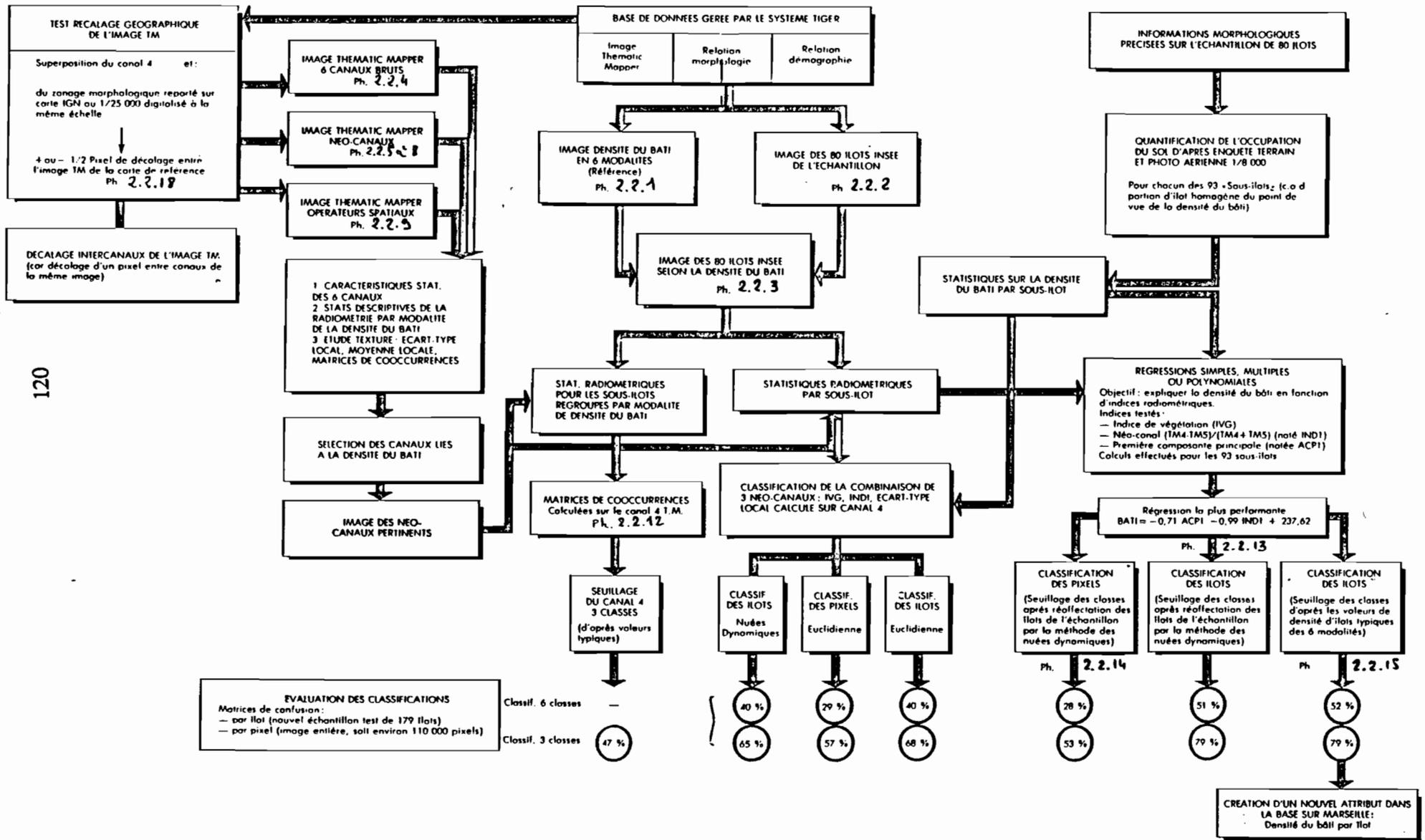


Figure 2.2.18 - Organigramme de la démarche suivie pour mettre en évidence la densité du bâti sur image LANDSAT Thematic Mapper -

Tableau 2.2.10 - Gains de précision pour 11 caractères démographiques (en % du coefficient de variation des caractères démographique non stratifiés) -

Caractères estimés	Gain de précision en % du coefficient de variation sur l'estimation non stratifiée			
	(1)	(2)	(3)	(4)
A) Effectif				
1 POPSDC	24,28	15,20	13,43	14,22
2 POPFRANC	23,86	13,79	12,83	12,83
3 POPHEMP	26,13	21,62	17,85	18,86
4 POPMEN	24,29	15,02	13,27	14,24
5 NBMEN-6	27,99	22,01	20,46	21,24
6 POP+5	24,63	15,79	14,00	14,80
B) Ratios				
7 POPFRANC/POPTOTAL	30,52	21,80	13,90	19,35
8 POPHEMP/POPH+19	33,79	35,17	24,14	28,28
9 POPMEN/NBMENAG	22,60	13,62	12,38	9,60
10 NBMEN-6/NBMENAG	21,43	7,14	5,71	2,86
11 POP+5/POPTOTAL	23,26	9,30	9,30	6,98

Légende :

- (1) : Stratification morphologique synthétique en 9 classes
- (2) : Stratification sur la densité du bâti issue de photographies aériennes en 6 classes
- (3) : Stratification sur la densité du bâti issue de photographies aériennes en 3 classes
- (4) : Stratification sur la densité du bâti issue d'images satellite en 6 classes

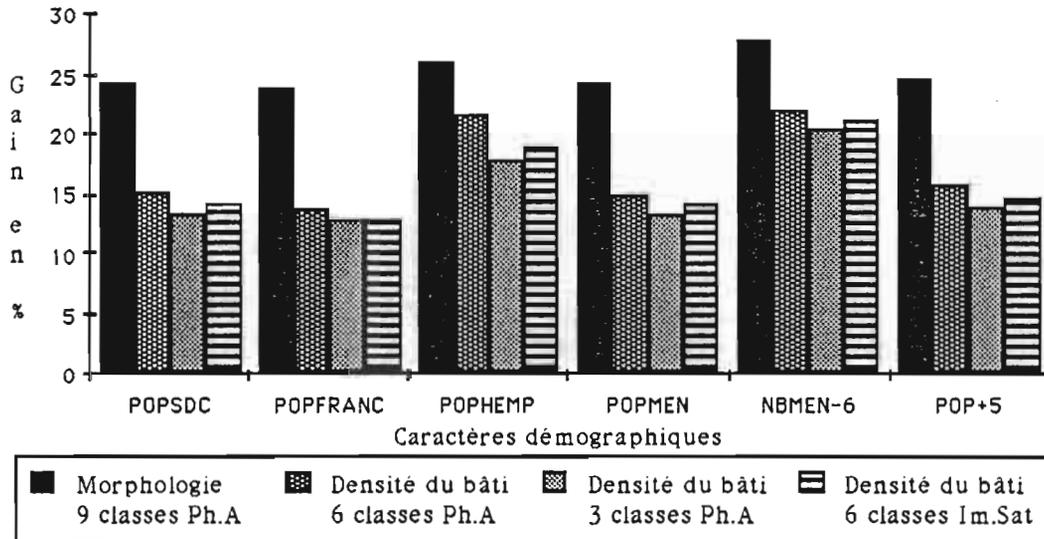
Les deux stratifications sur la densité du bâti en 6 classes (à partir des photographies aériennes et à partir des images satellite) sont donc d'une efficacité comparable quel que soit le caractère démographique retenu. **Compte tenu de notre objectif de stratification de l'espace pour un objectif démographique, il est donc aussi efficace, en terme de gains de variance des estimateurs démographiques, de stratifier sur une image satellite Landsat Thematic Mapper que sur une mosaïque de photographies aériennes.**

Une partie de l'objectif fixé est d'ores et déjà accomplie puisque "le gain de précision réalisé varie entre 20 et 50 % de la variance non stratifiée suivant le caractère estimé et représente en général un gain égal ou supérieur à la moitié de celui que permet la stratification morphologique synthétique"¹.

Les méthodes de classifications que nous avons employées nous paraissent appropriées, compte tenu de notre problématique propre et du milieu sur lequel nous travaillons. Des classifications de type maximum de vraisemblance paraissent peu adaptées à notre cas, compte tenu de la forme des distributions de chacune des modalités; il paraît risqué aux vus de nos résultats, de nous aventurer à émettre une quelconque hypothèse de loi de distribution (en particulier de loi Normale).

¹ O. BARBARY Thèse, Op cité.

Figure 2.2.19 - Comparaison des gain de précision apportés par quatre stratifications morphologiques à l'estimation de 6 caractères démographiques mesurés en effectif (en % du coefficient de variation des caractères démographique non stratifiés) -



La méthode employée pour caractériser les différents individus que nous avons étudiés à partir des canaux bruts, des néo-canaux, et des opérateurs de texture, qui ne tient compte que de paramètres statistiques présente l'avantage de la rapidité et permet une vision synthétique des individus et des phénomènes. Cependant, en raisonnant de la sorte, on perd toute l'information locale que nous amène la valeur de chaque pixel et il est alors plus difficile de comprendre la réponse spectrale en fonction de la couverture (artificielle ou naturelle) du pixel en question. Il est cependant nécessaire de préciser ici que l'objectif de cette étude n'est pas d'expliquer la valeur du signal en fonction de tel ou tel matériau de construction (FUEKI et al, 1985). La taille des éléments urbains, la résolution au sol de Thematic Mapper ainsi que la précision du recalage entre l'image satellite et les images morphologiques générées par SAVANE rendent très hasardeuse une telle entreprise. De plus, les résultats obtenus en classant non plus des pixels, mais des zones nous incitent à travailler sur un échantillon de petites zones pré-définies et bien connues dans lequel sont représentées toutes les classes de notre thématique.

Pour la suite de notre tâche, il est indispensable de travailler au niveau de chacun des sous-îlots de l'échantillon en privilégiant une analyse plus fine débouchant sur une typologie du tissu urbain; c'est en effet ce type de stratification (morphologie synthétique en 9 classes sur photographies aériennes) qui apporte les plus forts gains de variance des estimateurs démographiques. Le chapitre 2.3 qui suit, expose une méthode originale fondée sur l'analyse de la distribution radiométrique des sous-îlots de l'échantillon pour élaborer une nomenclature de types urbains adaptés à la télédétection. La **Photo 2.2.18**, qui superpose le découpage morphologique sur une composition colorée LANDSAT TM, permet d'ailleurs d'envisager cette éventualité sous des auspices prometteurs.

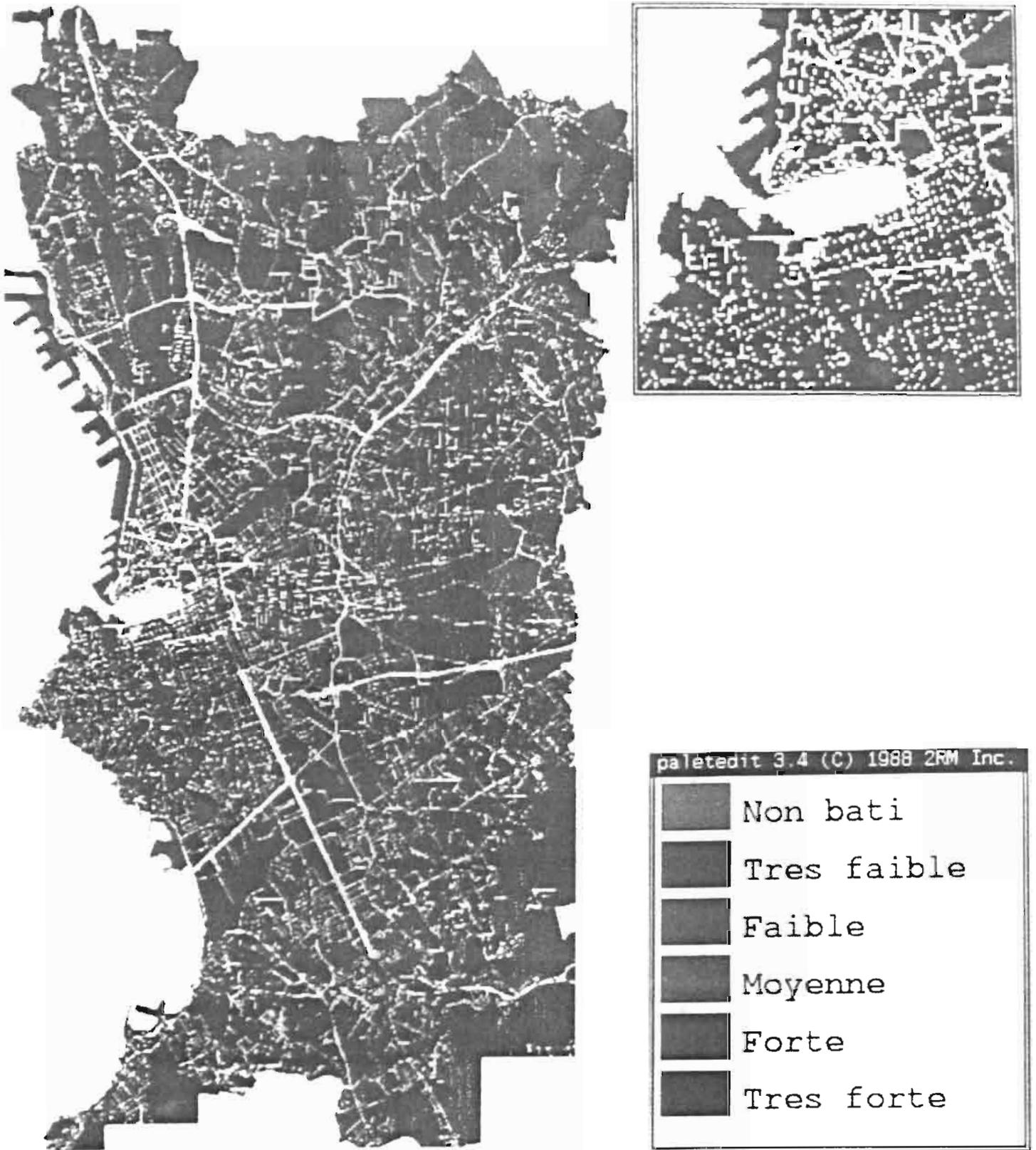


Photo 2.2.19 - Stratification de l'espace urbain marseillais suivant *la densité du bâti* à partir de la classification des districts de recensement INSEE suivant leur luminance dans quelques canaux de LANDSAT TM -

2.3) MISE AU POINT D'UNE TYPOLOGIE DE L'OCCUPATION DU SOL EN MILIEU URBAIN À PARTIR D'UNE IMAGE SATELLITE.

Etude des quantiles radiométriques des sous-îlots de l'échantillon de l'enquête morphologie.

a) *Rappel.*

Une des conclusions de notre précédent chapitre est de chercher à caractériser plus finement, d'un point de vue radiométrique, les entités que nous étudions (les sous-îlots INSEE). Il existe en effet un déséquilibre entre la finesse des informations que nous possédons sur la répartition de l'occupation du sol et la caractérisation radiométrique de ces entités. Les informations quantitatives et qualitatives issues de l'interprétation de photographies aériennes décrivent l'occupation du sol à l'aide des indicateurs dont nous rappelons les caractéristiques.

Les indicateurs qui nous intéressent ici sont des mesures qui correspondent au nombre de mm² mesurés sur photographies aériennes affectés à un certains type d'occupation du sol. Ils se distribuent en deux parties :

- **Le bâti.** Il est caractérisé par 3 indicateurs :

- la couleur dominante du toit en 6 postes (brique, marron foncé, blanc, gris, noir et autre couleur)
- la structure des éléments constitutifs du toit (plat, type tuile canal, type tuile mécanique, type tôle ondulée, autre type)
- la hauteur du bâti répartie en quatre postes (RDC à RDC +1, de RDC + 2 à RDC + 4, de RDC + 5 à RDC + 7, RDC + 8 et plus)

La somme des mm² faite à l'intérieur de chacun de ces 3 indicateurs est égale à la surface qu'occupent les éléments bâtis de l'îlot.

- **Le non bâti.** Il est ventilé en 2 postes :

- végétation (herbe, arbres, terre nue claire, terre nue foncée, autre végétal)
- voirie (bitume, béton, gravier, pavé, autre minéral)

La somme des rubriques de ces 2 postes est égale à la surface du non bâti.

La somme du bâti et du non bâti est égale à la surface totale de l'îlot. Chaque îlot est donc finement décrit par une suite de pourcentages résultant de la division de chacune des mesures précédemment décrites par la surface totale de l'îlot.

En ce qui concerne la distribution de la luminance d'un sous-îlot, les informations sont plus grossières (moyenne, écart-type, extrêmes, coefficient d'asymétrie et d'aplatissement). Si, comme tel est notre cas, on désire extraire une typologie de l'occupation du sol d'une image satellite, il n'est donc plus possible de se contenter uniquement de ces variables statistiques radiométriques calculées dans l'îlot. Différentes régressions infructueuses ont été tentées entre les moyennes de luminance (canaux bruts, indices ou indicateurs de texture) et ces différents pourcentages. Les résultats montrent clairement que le décalage de degré de précision qui existe entre les données radiométriques et les informations de l'occupation du sol hypothèque fortement une telle exploitation. Il est donc indispensable de caractériser plus finement la radiométrie à l'intérieur de l'îlot.

b) *Comment caractériser la distribution radiométrique des îlots. Calcul des quantiles.*

Nous avons choisi de rendre compte de la répartition des valeurs radiométriques dans un sous-îlot pour un canal donné à l'aide de 5 quantiles. La mise en place d'un tel procédé s'effectue comme suit :

- calcul de l'histogramme de l'ensemble des valeurs radiométriques, tous îlots confondus, mais non pas sur toute l'image,

- découpage de cet histogramme en N parties d'équipopulation (ou quantiles); on obtient alors 2N bornes résultant de ce découpage,
- découpage de la distribution de chacun des sous-îlots en fonction de ces bornes, identiques pour tous les îlots ; nous nous intéresserons alors au pourcentage de l'effectif total appartenant à chacun des 5 quantiles ($100 \times \text{effectif du quantile} / \text{effectif total de l'îlot}$)

Le choix du nombre de ces 5 quantiles résulte d'un compromis entre une connaissance suffisamment précise de la distribution radiométrique des sous-îlots et un nombre raisonnable de données. En effet, sachant que nous analysons 6 canaux de Thematic Mapper, cela fait donc **30 données pour caractériser un sous-îlot en ne tenant compte que des canaux bruts** (dans un premier temps). Le premier quantile, qui indique donc le pourcentage de l'effectif total présent entre les 2 premières bornes, sera donc qualifié de **quantile des très faibles valeurs** et ainsi de suite jusqu'au cinquième quantile (**quantile des très fortes valeurs**).

c) Seuils et effectifs théoriques des quantiles par canal.

L'effectif théorique que l'on doit théoriquement retrouver dans chacun des 5 quantiles est de **7142** pixels, soit le nombre de pixels total tous îlots confondus divisé par le nombre de quantiles (ici 5). Le tableau qui suit indique les répartitions réelles de l'effectif total (et non des pourcentages).

Tableau 2.3.1 - Répartition des effectifs suivant les seuils des quantiles -

Canal	Quantile 1	Quantile 2	Quantile 3	Quantile 4	Quantile 5
1 Effectif	0 - 57 8215	58 - 60 8018	61 - 64 7594	65 - 71 7563	72 - 255 4234
2 Effectif	0 - 22 10771	23 - 25 9512	26 - 28 7703	29 - 42 7274	43 - 255 364
3 Effectif	0 - 23 8862	24 - 26 7875	27 - 29 7166	30 - 36 7738	37 - 255 3978
4 Effectif	0 - 24 7935	25 - 29 8219	30 - 34 7923	35 - 42 7277	43 - 255 4265
5 Effectif	0 - 30 7196	31 - 37 8630	38 - 43 7147	44 - 51 7204	52 - 255 5442
7 Effectif	0 - 18 9037	19 - 22 9019	23 - 26 7345	27 - 35 7474	36 - 255 2744

Ces différents seuils ne correspondent pas à priori à une thématique particulière. Ils sont issus d'un calcul d'équipopulation, chaque quantile devant **théoriquement** posséder un effectif égal, tous îlots confondus. **Effectivement**, on note une forte variation de l'effectif des différents quantiles. En particulier, les premiers quantiles possèdent un effectif supérieur à celui du cinquième quantile; cela est imputable à la forte concentration de la dynamique, les premiers quantiles empiétant largement sur leur effectif théorique, le programme informatique tel qu'il a été conçu remplissant dans

l'ordre les quantiles des plus faibles valeurs aux plus fortes, ce qui est un choix tout à fait arbitraire. Si l'on avait commencé à remplir les tableaux des quantiles en commençant par les plus fortes valeurs, on aurait obtenu le même déséquilibre en sens inverse (les quantiles des plus faibles valeurs auraient été sous-représentés en effectif).

d) Pourquoi une analyse factorielle des correspondances (AFC) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH)?

Nous cherchons ici à faire apparaître les relations qui existent entre le type d'occupation du sol tel que nous l'avons quantifié et les variables radiométriques que nous avons extraites des images Thematic Mapper. Nous désirons analyser simultanément les variables radiométriques et les variables d'occupation du sol. Ces deux types de variables doivent donc jouer un rôle égal. Afin de pouvoir interpréter l'une par rapport à l'autre, il est indispensable de conserver une dualité entre les lignes (individus : îlots INSEE de l'échantillon dont on connaît précisément le contenu spatial) et les colonnes (variables radiométriques : quantiles). Pour comprendre les raisons de la proximité ou du lien entre les variables radiométriques et le mode d'occupation du sol, il est souhaitable de projeter sur un même plan factoriel les individus et les variables. L'analyse factorielle des correspondances conserve cette dualité et permet donc cette projection. C'est pourquoi nous avons choisi de l'utiliser.

Il aurait été également possible de pratiquer une analyse des liens entre radiométrie et occupation du sol fondée sur l'étude d'îlots typiques ou l'étude de profils radiométriques typiques. Une telle démarche suppose une certaine homogénéité des îlots appartenant à la même classe, suivant une typologie issue d'une autre source d'information (les photographies aériennes). Cette homogénéité n'est certainement pas vérifiée. En effet, même des îlots qui comportent une répartition identique en pourcentage des postes d'occupation du sol tels que nous les avons définis dans notre nomenclature différent quant à leur organisation spatiale interne. De plus, le mode de tirage des îlots de l'échantillon n'est pas axé sur le tirage d'îlots typiques du point de vue radiométrique. Cette démarche n'est donc pas très adaptée à notre problématique qui consiste à déterminer une typologie à partir des seules images satellite. Elle sera néanmoins pratiquée pour critiquer les résultats obtenus par l'analyse factorielle.

Nous avons dans un premier temps soumis à l'analyse factorielle deux tableaux décrivant la radiométrie des sous-îlots de notre échantillon de travail à l'aide des quantiles exprimés en **pourcentage**. Il en découle que les individus (sous-îlots de l'échantillon) sont affectés d'un même poids, ce qui contribue à favoriser les individus de faible surface, mais très typés quant à leur distribution, au détriment de grands sous-îlots à la distribution moins marquée. Nous voyons ici l'importance primordiale du recalage entre l'image satellite et l'image générée par SAVANÉ. **La valeur de l'interprétation de la radiométrie des sous-îlots en fonction du type d'occupation du sol repose en effet sur la qualité de ce recalage.**

Scinder en deux sous-groupes notre échantillon de travail offre l'avantage de ne pas présenter ce que nous connaissons déjà, i.e une information sur la densité du bâti, et permet d'amplifier la discrimination en classes opérée ensuite par la classification à l'intérieur de nos deux sous-groupes. A posteriori, ce choix est confirmé par le fait que ce ne sont pas les mêmes quantiles des mêmes canaux qui expliquent les plus forts pourcentages de variance des axes factoriels selon que l'on considère l'un ou l'autre de ces sous-échantillons.

La première partie traite des individus dont la densité de bâti est inférieure à 46% de la surface totale, la seconde décrit les sous-îlots plus denses. Cette coupure à 46% provient de l'étude des îlots de l'échantillon et correspond à un creux très net dans l'histogramme des fréquences du coefficient de densité du bâti (**Figure 2.2.12**).

2.3.2) ANALYSE DES VARIABLES RADIOMÉTRIQUES DES SOUS-ILOTS PEU DENSÉMENT BATIS.

2.3.2.1) Analyse Factorielle des Correspondances des variables radiométriques brutes.

Le tableau de mesure que nous soumettons à l'AFC se présente comme suit:

- 50 individus en ligne : sous-îlots INSEE de l'échantillon dont la densité est inférieure à 46 % d'espace bâti.
- 30 variables actives en colonne : quantiles. Chaque sous-îlot est décrit par le pourcentage de pixels présents dans chacun des 28 quantiles. La somme sur une ligne est donc égale à 600 (nous étudions les 6 canaux bruts de TM simultanément).
- 12 variables supplémentaires en colonne qui décrivent précisément le type d'occupation de l'espace non-bâti à l'aide de pourcentages.

a) Généralités- Pourcentage de variance des axes factoriels.

Tableau 2.3.2 - Variance des axes factoriels -

AXES	% de variance expliquée	% de variance cumulée
1	35.3%	35.3%
2	18.6%	53.9%
3	13.4%	67.3%
4	07.0%	74.3%
5	05.3%	79.6%

Nous avons limité notre analyse à l'étude des 4 premiers axes. En effet, la lecture de ce tableau nous incite à nous contenter des quatre premiers axes factoriels qui expliquent plus de 74% de l'inertie totale du nuage. Ce pourcentage est appréciable compte tenu du grand nombre de variables prises en compte (30).

Les variables actives sont notées $C(i,j)$, i représentant le canal et j indiquant le numéro du quantile. Les variables sont présentées par ordre décroissant d'importance.

Dans les graphiques qui suivent, les variables $C(i,j)$ sont représentées comme suit : le numéro du quantile (de 1 à 5) en abscisse, le pourcentage du quantile (de 0 à 100) en ordonnée, canal par canal. L'ordre des canaux s'effectue de bas en haut et de la gauche vers la droite. La répartition du type d'occupation du sol est présentée immédiatement au-dessus en pourcentage.

b) Etude des axes factoriels.

. Signification du premier axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol.

Cet axe oppose les très faibles valeurs radiométriques aux valeurs les plus fortes, quel que soit le canal (**Figure 2.3.1**). Dans cette figure ainsi que dans celles qui vont suivre, les regroupements effectués ("patatoïdes") illustrent les résultats obtenus à l'issue de la classification hiérarchique ascendante exposée dans la partie qui suit. Le canal 2 est celui qui explique le plus fort pourcentage de l'inertie du premier axe; à l'inverse le canal infra-rouge proche (canal 4) participe le plus faiblement. Cet axe ordonne les valeurs radiométriques, des plus faibles aux plus fortes, tous canaux confondus (**Tableau A.2.3.1**).

Cet axe, qui contribue à 35.3% de l'inertie totale du nuage de points, oppose les îlots contenant des surfaces très réfléchantes (terre nue claire) à des îlots moins réfléchants combinant une forte proportion de végétation et de bitume (**Figure A.2.3.1**).

. Signification du deuxième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol

Ce second axe factoriel oppose les valeurs extrêmes (quantiles 1, 4 et 5) aux valeurs moyennes (quantiles 2 et 3), quel que soit le canal (**Tableau A.2.3.2**).

Cet axe oppose des îlots de type pavillonnaire, toits rouge brique et végétation, à des îlots de type grands ensembles, immeubles à toiture blanche entourés de parking recouverts de bitume ou d'espaces verts (voir **Figure A.2.3.2**).

La **Figure 2.3.1** du premier plan factoriel représente un magnifique effet "Guttman" (enroulement parabolique du nuage de points autour du premier axe factoriel), ce qui n'a rien de surprenant. En effet, les variables (quantiles) sont naturellement ordonnées. Les quantiles sont regroupés par valeur et non par canal, les fortes valeurs se retrouvant dans la partie en haut à droite du plan.

. Signification du troisième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol.

Ce troisième axe consacre l'importance du canal 4 (infra-rouge proche) qui ne participait que très peu à l'inertie des deux précédents axes. Les fortes valeurs de ce canal ainsi que les plus faibles du canal 1 sont opposées aux très faibles valeurs des canaux 4 et 5 (**Tableau A.2.3.3**).

Cet axe oppose les îlots à dominante minérale : îlot N° 14, essentiellement bitume, aux îlots à dominante végétale îlots N° 84, 88 et 50, arbres, herbe ou champs (**Figure A.2.3.3**). Il faut cependant noter que l'îlot N° 14 est unique quant à son contenu.

Sur le plan factoriel 1-3 représenté par la **Figure 2.3.2**, on voit clairement l'opposition entre les canaux du visible (en haut) et les canaux de l'infra-rouge (en bas du graphique). Cette opposition est précisée sur la **Figure 2.3.3** dans laquelle les faibles valeurs des canaux de l'infra-rouge et les fortes valeurs des canaux du visible (en bas) sont nettement séparées des fortes valeurs des canaux de l'infra-rouge et des valeurs faibles des canaux du visible.

. Signification du quatrième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol.

Ce quatrième axe oppose les valeurs faibles aux valeurs fortes des canaux de l'infrarouge proche et moyen (canaux 4, 5 et 7) (voir **Tableau A.2.3.4**).

Il semble faire une distinction à l'intérieur des espaces végétaux. Les îlots à forte proportion d'arbres (N° 44 et 67) sont opposés aux îlots comprenant un pourcentage important d'herbe ou de champs (N° 86, 55 et 71). Les premiers présentent des valeurs faibles dans les canaux de l'infrarouge, contrairement aux seconds qui offrent des fortes valeurs dans ces mêmes canaux (**Figure A.2.3.4**).

2.3.2.2) Classification Hiérarchique Ascendante des sous-îlots peu densément bâtis en fonction des variables radiométriques.

Cette classification a été effectuée sur l'ensemble des 50 sous-îlots décrits par 30 variables (quantiles). Nous avons choisi comme ultra-métrique entre 2 nuages la distance moyenne (KHI-2) ; le critère d'agrégation est la minimisation du moment d'ordre deux.

Au vu de l'arbre de la classification (Voir **Figure 2.3.4**) et de l'histogramme des variances, nous avons choisi de scinder notre échantillon de travail en 10 classes. Il est nécessaire de considérer un nombre aussi important de classes afin de faire diviser des classes de fort effectif. Les premières classes qui apparaissent mettent en évidence des phénomènes importants du point de vue radiométrique, mais correspondant à des classes marginales et statistiquement minoritaires du point de vue typologie du tissu urbain classique. La partition en 10 classes donne les résultats interprétés de la façon suivante :

• CLASSE 1 : TYPE PAVILLONNAIRE A DOMINANTE TISSU INTERSTICIEL ARBRES

N° 6 (grands bâtiments à toit marron et arbres), 7 (pavillonnaire et arbres), 19 (pavillonnaire et arbres), 22 (mixte CV /pavillonnaire et arbres), 42 (pavillonnaire et arbres), 51 (construction sous arbres), 60 (tour d'habitation et arbres), 89 (arbres et herbe)

• CLASSE 2 : ENTREPOTS OU GRANDS ENSEMBLES D'HABITATION A DOMINANTE MINERALE

N° 8 (entrepôts), 33 (grand ensemble et construction en CV), 37 (trottoir en bordure de mer), 48 (grands bâtiment à toit brique), 49 (lycée), 56 (grand ensemble), 62 (pavillonnaire multicolore), 74 (grands bâtiments), 78 (grand ensemble), 79 (entrepôts industriels), 82 (grands bâtiments), 92 (grands bâtiments), 93 (grand ensemble)

• CLASSE 3 : ENTREPOTS OU GRANDS ENSEMBLES D'HABITATION A DOMINANTE VEGETALE

N° 9 (grands entrepôts sur quais), 63 (grands bâtiments à toit de zinc, gendarmerie), 75 (grands bâtiments), 77 (herbe et arbres), 83 (grand ensemble d'habitation), 94 (herbe et grands bâtiments), 96 (grand ensemble)

• **CLASSE 4 : N° 14 (bâtiment au toit très réfléchant (gare routière))**

• CLASSE 5 : PAVILLONNAIRE A DOMINANTE ESPACE INTERSTICIEL HERBE

N° 38 (pavillonnaire et grands bâtiments à toiture brique), 44 (pavillonnaire), 64 (pavillonnaire), 65 (pavillonnaire), 66 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 67 (pavillonnaire), 70 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 73 (pavillonnaire), 85 (pavillonnaire), 87 (champs cultivés)

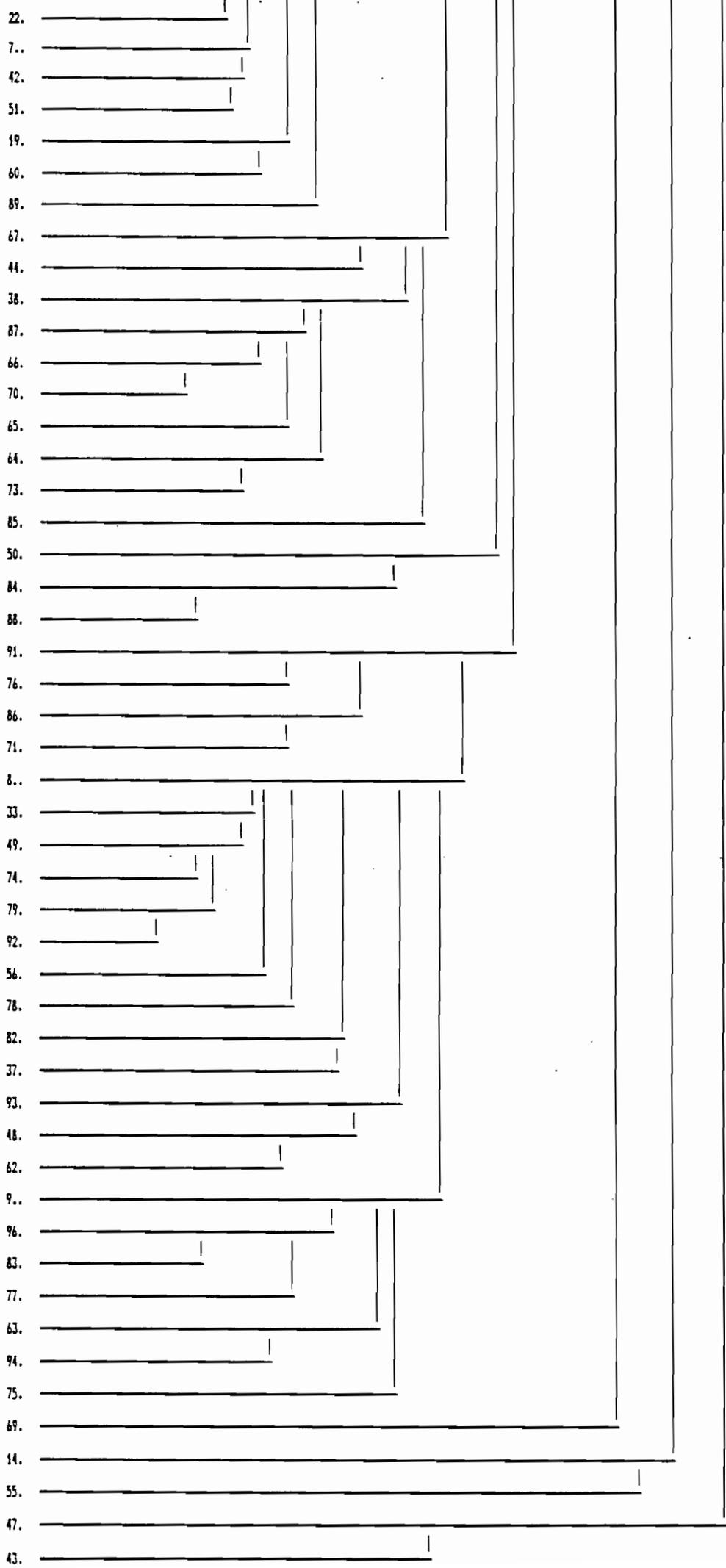


Figure 2.3.4 - Arbre de la classification hiérarchique ascendante des îlots peu densément bâtis -

• CLASSE 6 : DOMINANTE ESPACE INTERSTICIEL TERRE CLAIRE
N° 43 (plage), 47 (stade)

• CLASSE 7 : ESPACE A DOMINANTE AGRICOLE
N° 50 (pépinière), 84 (champs), 88 (champs, arbres)

• CLASSE 8 : ESPACE A DOMINANTE BETON
N° 55 (grand ensemble et construction en béton)

• CLASSE 9 : N° 69 (pavillons alignés)

• CLASSE 10 : ESPACE A DOMINANTE HERBE
N° 71 (serre et champs), 76 (pavillonnaire), 86 (champs), 91 (bâtiment hauts, herbe et bitume)

. Remarques et premières constatations.

Cette classification permet de distinguer 6 grandes classes :

- 2 classes de bâti de type pavillonnaire :
 - à dominante herbe (CLASSE 5)
 - à dominante arbres (CLASSE 1)
- 2 classes de bâti de type entrepôts ou grands ensembles d'habitation :
 - à dominante végétale (CLASSE 3)
 - à dominante minérale (CLASSE 2)
- 1 classe : espace à vocation agricole (CLASSE 7)
- 1 classe : espace à dominante sable ou terre claire (CLASSE 6)

Les 4 classes qui subsistent regroupent, soit des phénomènes minoritaires et peu représentatifs statistiquement, soit des îlots à priori mal classés. Il s'agit des classes suivantes :

- 4 ; l'îlot N° 14; cet individu est une gare routière constituée par un petit bâtiment entouré d'un parking en bitume nettement majoritaire en terme de surface.
- 8 ; l'îlot N° 55; cet individu correspond à un grand ensemble d'habitation dont une grande partie est constituée par une plate-forme de béton assez âgée témoignant d'une amorce de construction.
- 9 ; îlot N° 69; cet individu est un îlot de type pavillonnaire, sa seule caractéristique est l'alignement des maisons qui le composent; par ailleurs, sa petite taille rend plausible un mauvais classement résultant d'un éventuel décalage entre la vérité terrain et sa correspondance radiométrique.
- 10; îlots N° 71, 76, 86 et 91; cette classe regroupe des îlots qui ont peu de caractéristiques communes; les îlot N° 71 et 86 auraient dû être affectés en classe 7, l'îlot N° 76 en classe 5 et l'îlot N° 91 en classe 3. Cette différence importante quant à leur contenu au sol ne se retrouve absolument pas dans leurs profils radiométriques relativement proches. Cette classe demeure remarquablement compacte, quel que soit le plan factoriel que l'on étudie.

Par ailleurs, plusieurs anomalies subsistent à l'intérieur même des classes dont le contenu n'est pas toujours très homogène.

Tout d'abord, la distinction qui est opérée par la classification entre les 2 types de tissu pavillonnaire (CLASSES 1 et 5) n'est pas rigoureusement respectée. En effet, des îlots comme les N° 44 et 67 à dominante "arbre" ne sont pas affectés à la classe correspondante. De plus, certains individus typiquement pavillonnaires ne sont pas affectés à l'une de ces 2 classes (îlots N° 76 et 69 ce dernier créant une classe à lui seul) sans qu'une caractéristique pertinente au sol puisse expliquer pourquoi.

Ensuite, aucune distinction n'est faite à l'intérieur des classes ENTREPOT ou GRANDS ENSEMBLES (CLASSE 2 et 3) entre :

- les **grands ensembles d'habitation** caractérisés par de longs immeubles à toit à couleur dominante blanche, entourés de parkings bitumés et d'espaces verts, par exemple les individus N° 55, 56 78
- les **entrepôts industriels** ou les bâtiments abritant une activité plus récents aux toits recouverts de tôles de zinc ou en fibro-ciment, par exemple les individus N° 9, 79.

Cette distinction est pourtant essentielle à obtenir compte tenu de notre objectif démographique, ces deux types de tissus urbain n'ayant absolument pas la même répartition en terme d'effectif de population. Il est donc tout à fait important de pouvoir les discriminer sur notre stratification à venir.

La distinction qui est cependant faite, et qui tient compte de la nature de l'espace interstitiel (à dominante bitume pour la CLASSE 2) ou (à dominante végétale) pour la CLASSE 3 laissait espérer une discrimination fonctionnelle habitation/activité aisée. Or, il n'en est rien, cette différence ne permettant pas de distinguer les entrepôts industriels des grands ensembles; il est cependant à noter que certains de ces grands ensembles de notre échantillon de travail ne sont nantis que du minimum d'espaces verts. Nous noterons cependant que la distinction qui est communément faite entre les grands ensembles d'habitation et les entrepôts industriels est fondée sur des critères essentiellement fonctionnels que les capteurs, même à forte résolution spatiale, ne discriminent pas encore...

Différenciations acquises : pavillonnaire, grands ensembles de bâtiments et espaces agricoles.

Deux essais ont été menés conjointement :

- une classification suivant les mêmes variables mais à l'aide d'un algorithme de classification différent : les nuées dynamiques (**Annexe 2.3.2**)
- une CAH sur des variables différentes, des néo-canaux (**Annexe 2.3.2**)

En résumé, les résultats obtenus indiquent que l'outil CAH paraît mieux adapté à l'élaboration d'une typologie que "les nuées dynamiques", et que les canaux bruts constituent un ensemble de variables plus discriminants que les différents néo-canaux classiques que nous avons utilisés.

En conclusion, nous pouvons retenir que la différenciation des différents types d'occupation du sol que l'on obtient par analyse, puis classification des données radiométriques des îlots de notre sous-échantillon de travail se fonde essentiellement sur la **discrimination relativement aisée du minéral et du végétal sur l'image satellite TM.**

Cependant, les variables radiométriques opèrent des différenciations entre des îlots relativement proches, de par leur contenu au sol (pourcentage des différents types d'occupation du sol). Cette distinction semble tenir compte de l'agencement de ces diverses formes d'occupation du sol. En effet, un espace important de verdure marque la radiométrie de l'îlot par l'existence d'un pixel au moins majoritairement fort dans le canal 4, ce qui n'est plus le cas si l'on considère un espace vert de même importance (en pourcentage) disséminé dans l'îlot. Cette réalité, coexistence entre pixels "purs" et pixels "mixtes", apparaît comme l'une des principales difficultés à l'étude numérique du milieu urbain par le biais de la télédétection.

Nous tirerons deux enseignements de cette expérimentation; cependant, les conclusions qui en découlent ne doivent être considérées ni comme définitives, ni comme généralisables.

Les néo-canaux choisis sont fortement décorrélés. Ils illustrent les oppositions constatées lors de l'AFC réalisée sur les canaux bruts. L'indicateur de texture était censé

répondre au problème de l'agencement des différents types d'occupation du sol à l'intérieur des îlots. Leur choix n'a donc pas été laissé au hasard; cependant, l'ensemble des canaux bruts demeure meilleur pour discriminer les types d'occupation du sol que l'ensemble des différents indices que nous avons pu élaborer. Cela ne veut pas dire que pour une thématique très précise, individuellement un indice judicieusement élaboré ne soit pas de loin supérieur à n'importe quel canal brut.

Si le fait d'obtenir des résultats différents à l'issue de classifications exécutées sur des variables différentes ne doit pas être une surprise, il demeure que l'ampleur de la différence des regroupements d'îlots effectués par ces 2 classifications pose problème. **Pour une thématique donnée, il est donc peu réaliste d'espérer obtenir une typologie robuste et stable à l'issue de traitements numériques basés sur les classifications automatiques. A fortiori, les nomenclatures d'occupation du sol couramment utilisées en urbanisme, même fondées sur des critères physiques, ne semblent pas correspondre aux classes que sont capables de discriminer les méthodes d'analyse numérique des images du satellite Thematic Mapper.**

2.3.3) ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES DES SOUS-ILOTS DENSÉMENT BATIS.

Le tableau de mesure que nous soumettons à l'AFC se présente comme suit:

- 43 individus en ligne : sous-îlots INSEE de l'échantillon dont la densité est supérieure à 46 % d'espace bâti.
- 28 variables actives en colonne : quantiles (2 quantiles sont vides pour tous ces individus, il s'agit des cinquièmes quantiles des canaux 2 et 4). Chaque sous-îlot est décrit par le pourcentage de pixels présents dans chacun des 28 quantiles. La somme sur une ligne est donc égale à 600 (nous étudions les 6 canaux simultanément).
- 12 variables supplémentaires en colonne qui décrivent précisément le type d'occupation de l'espace bâti (couleur et texture des toitures) à l'aide de pourcentages.

a) Généralités - Variance des axes factoriels.

Nous avons limité notre analyse à l'étude des 4 premiers axes pour les mêmes raisons que celles exprimées précédemment.

Tableau 2.3.3 - Variance des axes factoriels -

AXES	% de variance expliquée	% de variance cumulée
1	41.0%	40.0%
2	16.3%	57.3%
3	8.7%	66.0%
4	8.3%	74.3%

b) Etude des axes factoriels

Les variables actives sont notées $C(i,j)$, i représente le canal et j indique le numéro du quantile. Ces variables sont présentées par ordre décroissant d'importance pour leur contribution relative à l'inertie expliquée par les différents axes factoriels.

. *Signification du premier axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol (Figure 2.3.5).*

Cet axe, qui contribue à 41.0% de l'inertie totale du nuage de points est principalement généré par les valeurs **fortes et moyennes**, tous canaux confondus. Il oppose les **fortes** (quantiles 4) et moyennes valeurs de tous les canaux (plus particulièrement les canaux 3, 4, 5 et 7) aux **très faibles valeurs** de tous les canaux. Ce premier axe ordonne donc les quantiles (quel que soit le canal) des plus fortes aux plus faibles valeurs radiométriques (Tableau A.2.3.6).

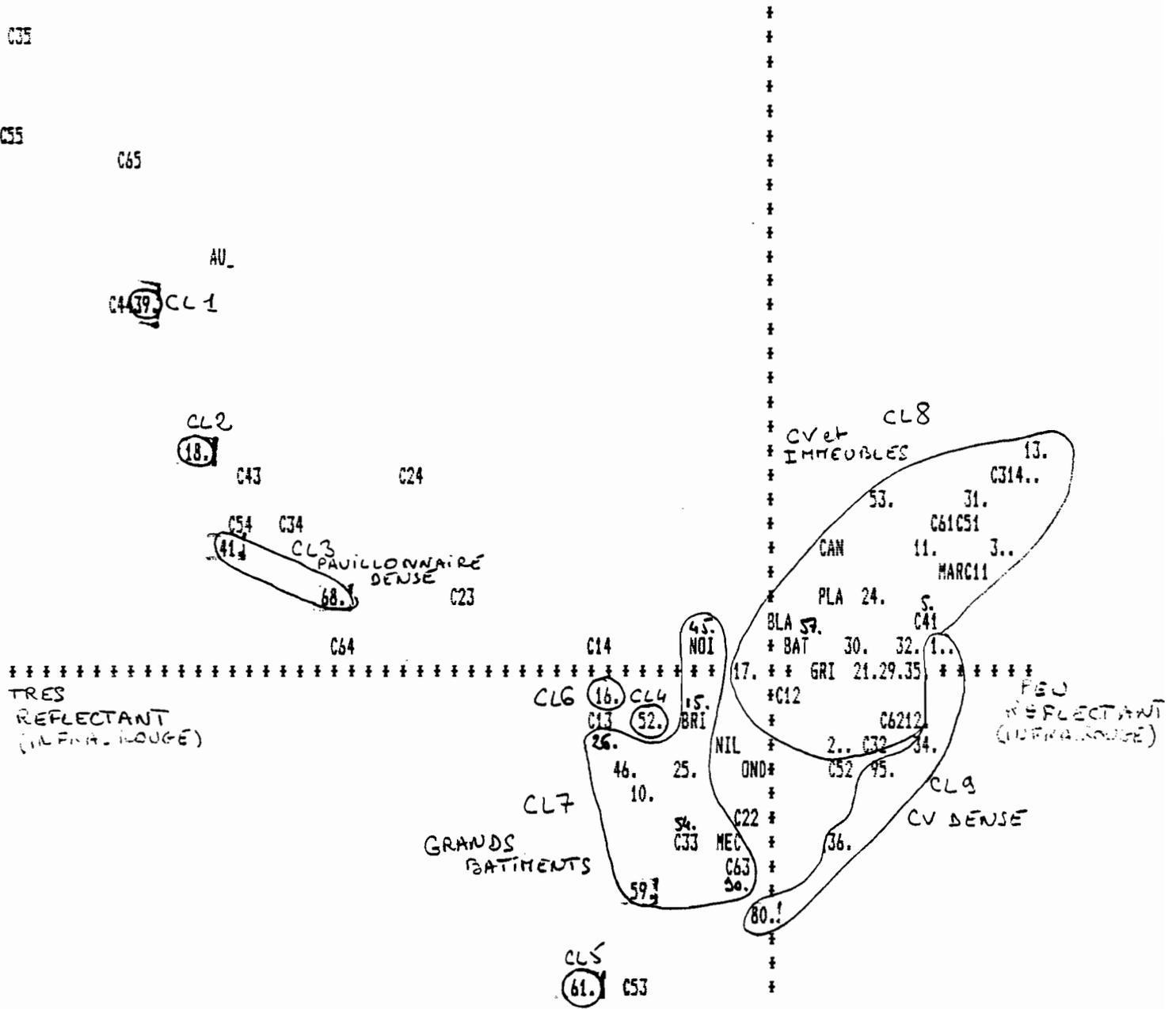


Figure 2.3.5 - Analyse des sous-îlots densément bâtis. Plan factoriel 1 2 -

Les sous-îlots qui participent le plus à la création de ce premier axe possèdent en commun une forte proportion de toitures de couleur brique. Ces sous-îlots de taille modeste, sont à classer dans la catégorie pavillonnaire et centre ville peu dense (Figure A.2.3.6).

. Signification du deuxième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol (Figure 2.3.5 et 6).

Cet axe factoriel oppose les **faibles et moyennes valeurs** (quantiles 2 et 3) principalement des canaux de l'infra-rouge, aux **valeurs extrêmes** (quantiles 1 et 5) principalement des canaux 5, 3 et 7 (Tableau A.2.3.7).

L'élément principal qui semble expliquer cette opposition, est la présence importante de toitures blanches dans les sous-îlots N° 61 et 80 à l'opposé de l'individu N° 39, îlot typique de centre ville à toiture couleur brique (Figure A.2.3.7).

. Signification du troisième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol (Figure 2.3.6 et 7).

L'opposition entre les fortes valeurs des canaux de l'infra-rouge moyen (canaux 5 et 7) et les fortes valeurs du canal bleu (canal 1) fait l'objet du troisième axe factoriel (Tableau A.2.3.8).

Le sous-îlot N° 52 qui explique plus d'un tiers de l'inertie du troisième axe correspond à un ensemble de bâtiments à toit blanc entourés de béton très clair. Il s'oppose à l'îlot N° 68 de type pavillonnaire (Figure A.2.3.8).

. Signification du quatrième axe factoriel. Lien entre la radiométrie et l'occupation du sol (Figure A.2.3.10 et 11).

Cet axe oppose les très fortes valeurs des canaux 7, 5 et 3 aux très faibles valeurs du canal 7 et aux fortes valeurs du canal 1 (Tableau A.2.3.9).

Les individus N° 39 et 52 qui participent à la création de ce quatrième axe marquent l'opposition entre un îlot de type centre ville et un îlot constitué de bâtiments de type résidentiel (Figure A.2.3.9).

2.3.3.2) Classification Hiérarchique Ascendante des sous-îlots densément bâtis en fonction des variables radiométriques (quantiles).

Une classification a été effectuée sur l'ensemble des 43 sous-îlots décrits par 28 variables (quantiles). Nous avons choisi comme métrique la distance du KHI-2 afin de conserver la même distance que celle utilisée lors de l'AFC. Le critère d'agrégation est la moyenne pondérée des distances.

La partition en 10 classes donne les résultats suivants, voir Figure 2.3.8 de l'arbre de la hiérarchie :

Précision : CV signifie centre ville

CLASSE 1 : N° 39 (CV moyennement dense)

CLASSE 2 : N° 18 (immeuble toit brique, parking en bitume)

CLASSE 3 : pavillonnaire N° 41 (pavillonnaire)

CLASSE 4 : N° 52 (immeubles avec toiture blanche)

CLASSE 5 : N° 61 (immeuble toiture blanche et brique)

CLASSE 6 : N° 16 (Voir N°17)

CLASSE 7 : GRANDS BATIMENTS OU ALIGNEMENT DE MAISONS IMPORTANT

N° 10 (EHSS), 15 (entrepôts denses), 25 (caserne), 26 (mixte CV/entrepôts), 45 (résidentiel), 46 (mixte entrepot et bâtiments avec toiture blanche), 54 (CV), 59 (CV), 90 (CV peu dense).

CLASSE 8 : CENTRE VILLE DENSE ET IMMEUBLE DE RESIDENCE

N° 2 (poste), 3 (CV et bâtiments toits blancs), 4 (CV), 5 (CV très dense), 11 (CV), 13 (mixte CV pavillonnaire), 17 (entrepôts très denses), 20 (CV), 21 (CV), 24 (immeuble et parking bitumé), 28 (CV), 29 (CV), 30 (immeuble et parking bitumé), 31 (CV dense), 32 (immeubles à toit multicolores), 35 (CV), 40 (CV très dense), 53 (immeubles à toit blancs), 57 (mixte immeuble à toit blanc, brique et végétation), 58 (CV moyennement dense), 81 (CV dense).

CLASSE 9 : CENTRE VILLE DENSE

N° 1 (CV), 12 (CV), 34(CV), 36 (CV), 80 (mixte CV, bâtiments), 95 (CV).

CLASSE 10 : pavillonnaire 68 (pavillonnaire allongé)

DIFFÉRENCIATIONS ACQUISES : PAVILLONNAIRE DENSE, CENTRE VILLE ET GRANDS BATIMENTS.

Cette classification génère les 3 grandes classes de bâti présentes dans ce sous-échantillon:

- le pavillonnaire dense (CLASSE 3 et 10)
- le type centre ville (CLASSE 8 ET 9)
- les grands bâtiments ou l'alignement de maisons important (CLASSE 7)

Cette classification n'a pas permis d'affecter à ces trois classes principales certains sous-îlots qui auraient dû normalement y trouver leur place, sans qu'aucune raison objective ne parvienne à expliquer pourquoi. A l'inverse, elle a généré un certain nombre de classes à effectif réduit qui n'offrent aucune différence sensible quant au contenu, même physique, de leurs éléments constitutifs. Cette classification semble donc peu robuste, elle a d'ailleurs posé de sérieux problèmes d'interprétation des types.

Cela peut provenir de la faible taille des îlots de notre échantillon comparativement à ceux de l'échantillon "peu densément bâti". En effet, l'inconvénient majeur de notre méthode d'analyse est d'affecter à chaque individu un même poids sans tenir compte de sa surface. Celle-ci, parfois très faible, rend indispensable un calage parfait entre l'image satellite et l'image générée par SAVANE. Le calage n'offre qu'une précision évaluée entre 1 à un 1/2 pixel de 30 mètres. Il est donc fort possible que les îlots typés d'un point de vue radiométrique, qui participent fortement à la création des axes factoriels et à la formation des classes, ne correspondent pas exactement à la description que nous leur faisons correspondre.

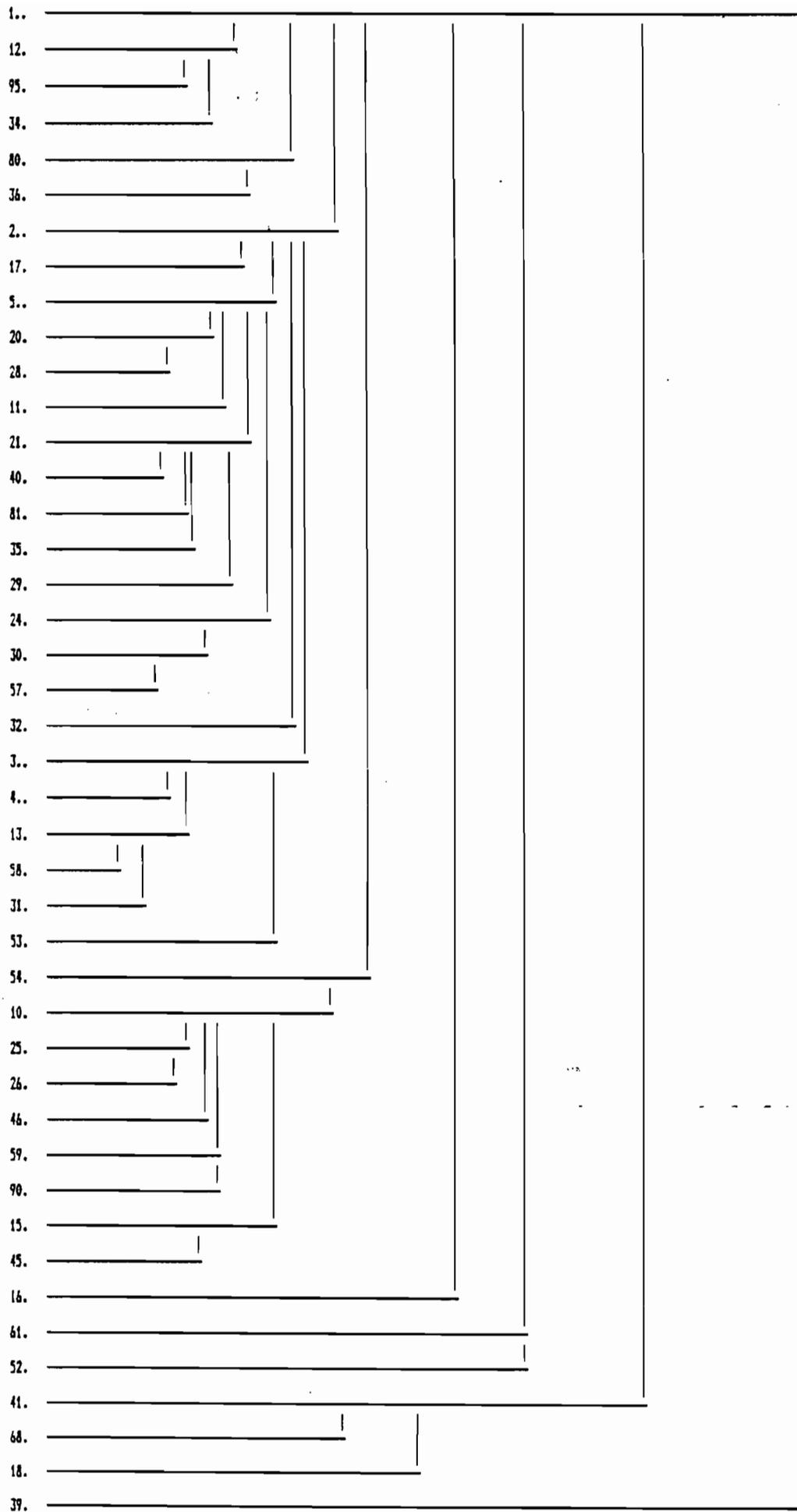


Figure 2.3.8 - Arbre de la classification hiérarchique ascendante des îlots densément bâtis -

2.3.4) TYPOLOGIE DU TISSU URBAIN À PARTIR DES IMAGES DU SATELLITE THEMATIC MAPPER.

La Figure 2.3.9 propose une synthèse des informations radiométriques en fonction des différentes classes définies à la suite de l'AFC et de la CAH effectuées sur les deux échantillons de sous-îlots. Les différentes classes sont celles issues de la CAH et que nous considérons comme les mieux identifiées. A chaque classe, nous avons fait correspondre les coordonnées dans l'espace des variables radiométriques (quantiles); cette information permet de comparer les profils radiométriques que distinguent la classification.

Cette première typologie ne doit pas être considérée comme figée ni totalement fiable. Son principal avantage réside dans l'élaboration de types urbains entièrement définis à partir de variables radiométrique, suivant une nomenclature adaptée à l'outil (radiomètre Thematic Mapper) dont nous testerons la fiabilité par rapport à notre objectif démographique. Elle ne doit donc être comprise que comme un exemple de ce que peut être une typologie du tissu urbain basée sur une étude fine de la radiométrie des canaux bruts de Thematic Mapper à l'intérieur de zones pré-définies.

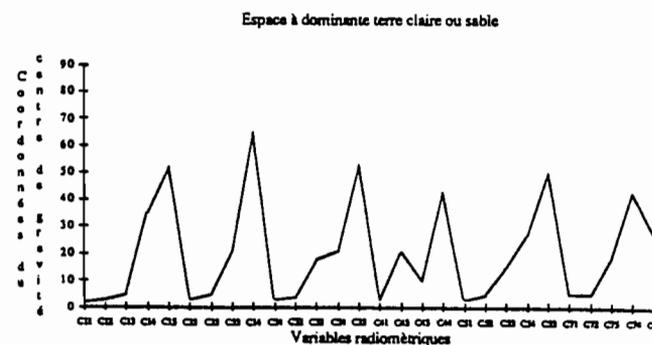
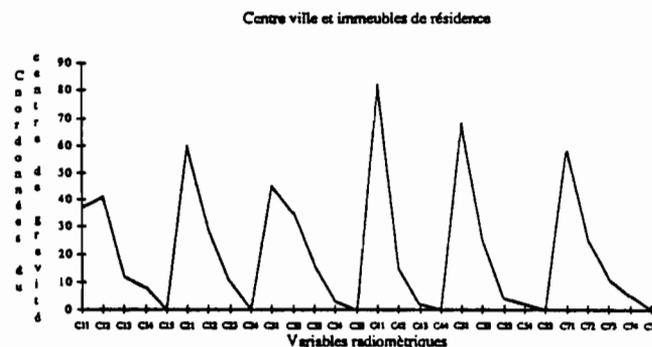
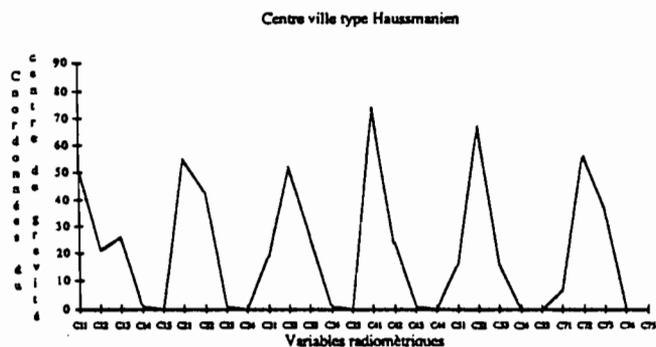
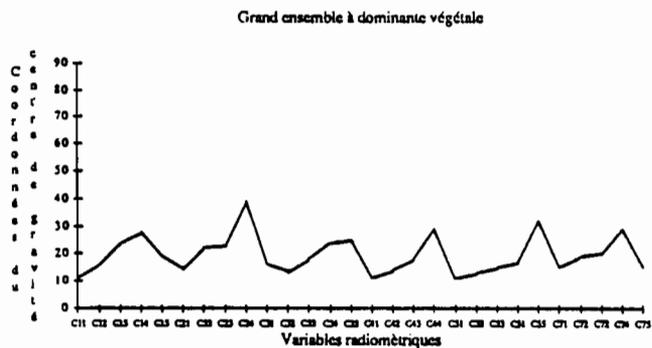
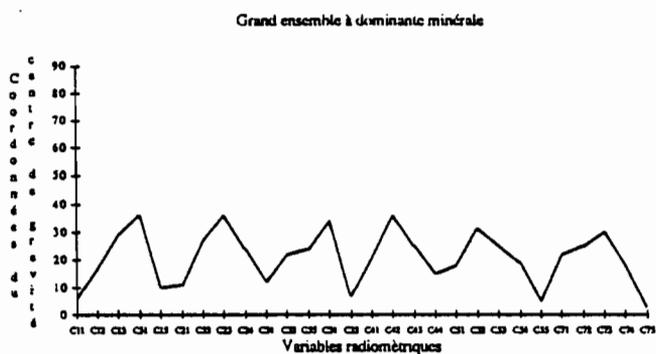
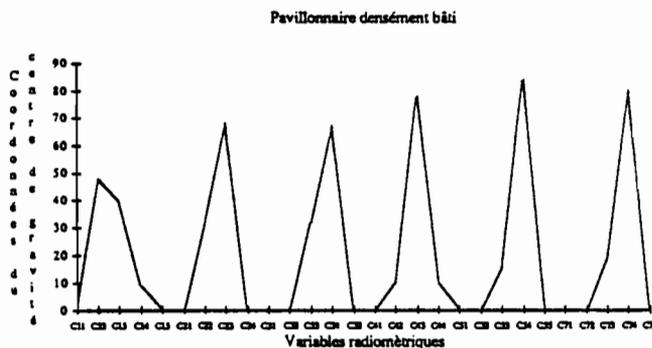
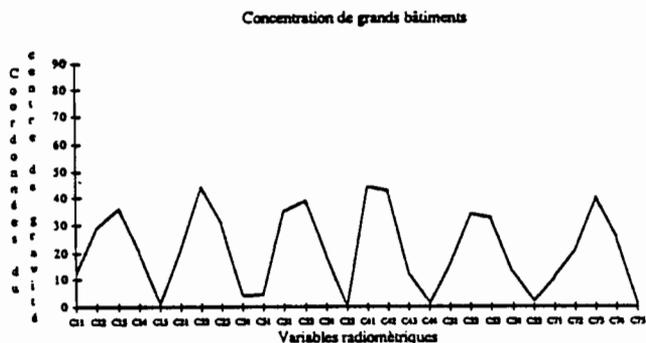
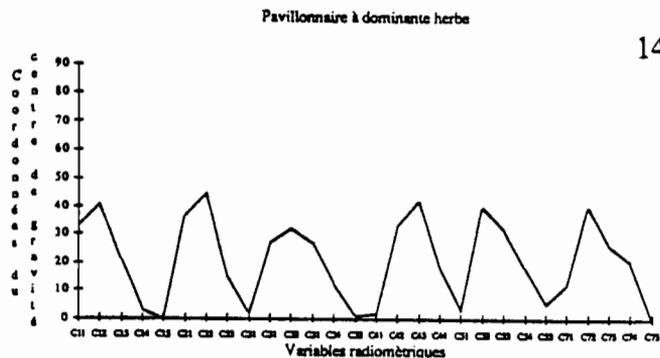
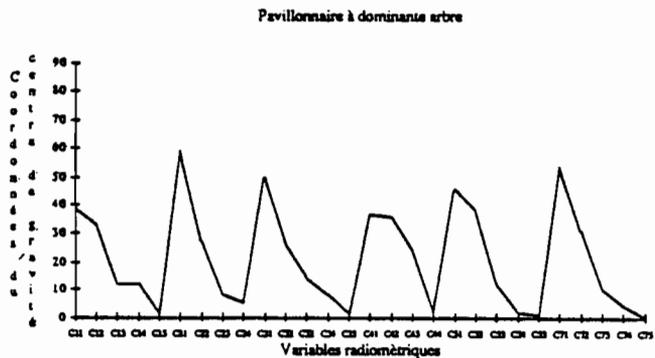
Comme nous l'avons vu, une typologie élaborée à partir de ce type de variables n'est pas unique. Néanmoins, trop de classes marginales ont été définies avant qu'une distinction entre les classes thématiques qui nous intéresse n'apparaisse. Cela provient de la diversité des types d'occupation du sol que recèle une cité, ainsi qu'à la multiplicité des agencements de ces différents types.

Cette étude a été l'occasion de tester la correspondance entre radiométrie et type d'occupation du sol. Elle a démontré que cette typologie dégagée à travers la radiométrie est fortement axée sur l'espace interstitiel en particulier lorsque celui-ci est de nature végétale.

Il semble que la méthode développée sur la base des quantiles ne permette que d'approcher la notion de profil radiométrique d'une zone sans prendre en compte toute la richesse de cette information. La méthode qui permettrait de classer des zones en fonction de leurs profils radiométriques complexes reste encore à mettre au point.

Bien que les résultats de la classification en fonction de néo-canaux n'aient pas apporté d'excellents résultats, il paraît souhaitable d'introduire un indice de texture dans les variables radiométriques afin de tester son pouvoir de discrimination des différents agencements des types d'occupation du sol.

Figure 2.3.9 - Profils radiométriques des 10 types urbains définis à l'issue des classifications hiérarchiques ascendantes -



IMAGES SATELLITE ET STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN : PREMIERS CONSTATS.

Cette première étape de mise au point et d'évaluation de la méthode de classification d'une image satellite s'achève sur l'élaboration de deux méthodes de stratifications de l'espace urbain, la **densité du bâti** et la **typologie du tissu urbain**, mises en oeuvre uniquement à partir de l'information satellitaire.

Nous avons soumis l'échantillon de l'enquête "**morphologie**" comprenant 80 îlots au programme VARECH ¹. afin de comparer les coefficients de variations de quelques estimateurs démographiques. Trois stratifications ont été successivement testées, il s'agit de la **stratification synthétique** en 9 postes issus de l'analyse des photographies aériennes, de la stratification suivant la **densité du bâti** en 6 postes résultant de la classification des zones sur images satellite et de la stratification issue de la **typologie élaborée à partir des quantiles radiométriques** (9 classes non vides).

Pour comparer ces trois stratifications, nous avons opté pour un plan de sondage équiprobable avec allocation optimale de NEYMAN (taux de sondage proportionnel à l'écart-type du caractère dans la strate), c'est en effet ce plan de sondage qui permet le gain le plus important en terme de variance des estimateurs. Le taux global est de 66,6%, c'est un taux arbitraire simplement destiné à limiter l'ordre de grandeur du coefficient de variation.

Tableau 2.3.4 - Coefficients de variation des estimateurs démographiques calculés sur l'échantillon de l'enquête morphologie -

Descripteur démographique	SANS	SYNTHETIQUE 9 classes	DENSITE 6 classes	CAH-QUANTILES 9 classes
POPSDC (*)	22,44	11,35	16,94	13,78
PCETRANG	26,99	18,44	22,40	19,25
TAILLEMEN	4,80	3,75	2,93	3,75
PCMEN1	9,18	6,46	6,52	6,70
POPHOMEMP	19,87	15,47	18,64	17,01

(*) Pour ce descripteur particulièrement, la probabilité de tirage est proportionnelle à la surface de l'îlot, c'est dans ce cas le type de plan de sondage pour lequel l'estimateur de la variance du caractère considéré est minimum.

Signification des abréviations :

POPSDC : population sans double compte

PCETRANG : pourcentage d'étrangers

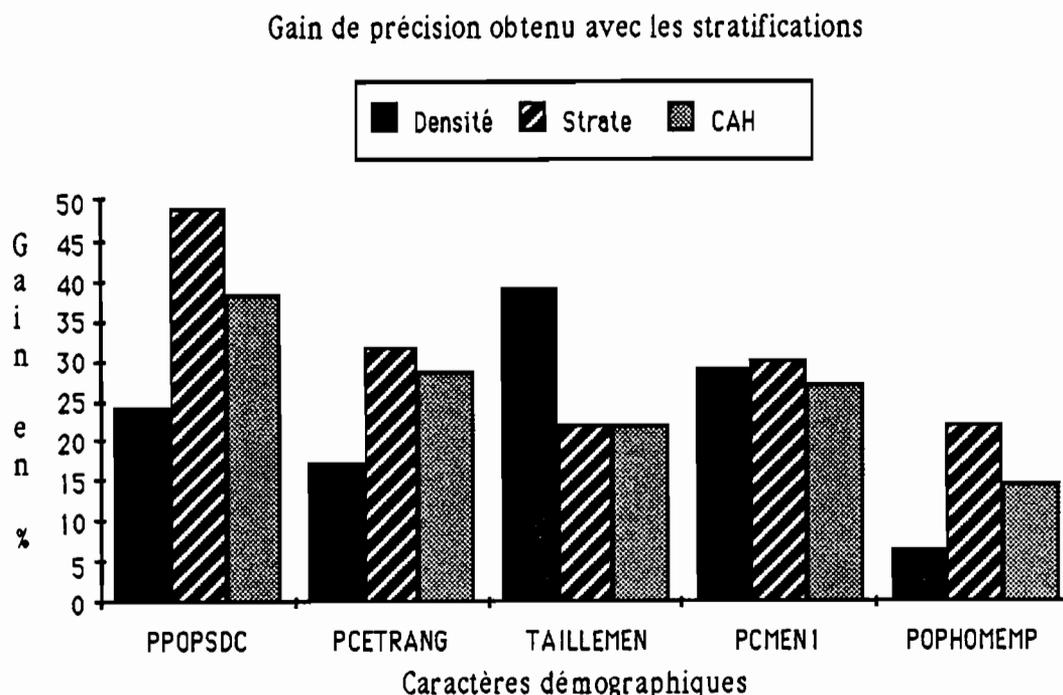
¹ VARIance d'EChantillonnage : programme développé sous environnement DBASE 3 par O. BARBARY permettant entre autre, d'évaluer le gain dû à une stratification pour plusieurs plans de sondage par rapport à un plan de sondage non stratifié.

TAILLEMEN : taille des ménages

PCMEN1 : pourcentage de ménage d'une personne

POPHOMEMP : population des hommes de plus de 19 ans ayant un emploi

Figure 2.3.10 - Comparaison des gains¹ de précision obtenu pour 5 caractères démographiques en fonction de la stratification considérée -



Comme le confirme la *Figure 2.3.10*, la stratification typologique en 10 postes élaborée à partir des variables radiométriques (quantiles) permet des gains en termes de variance des estimateurs démographiques choisis, comparables à ceux obtenus par stratification "synthétique" (issue de la CAH pratiquée sur les descripteurs observés sur la mosaïque photo-aérienne).

L'élaboration d'une typologie résultant de l'analyse des quantiles radiométriques se révèle plus efficace que la seule prise en compte de la densité de l'espace bâti pour la plupart des caractères démographiques.

L'emploi d'images satellite pour stratifier l'espace en vue d'optimiser une enquête démographique par sondage s'avère donc pleinement justifié et paraît aussi efficace que l'utilisation de documents plus classiques tels que les photographies aériennes.

¹ Ce gain s'exprime en pourcentage du coefficient de variation de l'estimateur dans un plan de sondage non stratifié.

3

**Stratification de la ville de
Quito (EQUATEUR) à partir
d'images SPOT : première
mise en oeuvre de la méthode
de sondage**

Introduction.

. Situation du problème par rapport à l'expérimentation effectuée à Marseille.

D'après les résultats enregistrés lors de l'expérimentation de la méthode à Marseille, les stratifications réalisées sur image LANDSAT Thematic Mapper sur la base de la "densité de l'espace bâti" et de la "typologie du tissu urbain" améliore significativement la précision des estimateurs démographiques. Les traitements développés ayant apporté la preuve de leur efficacité, il s'agit donc dans cette phase d'application en vraie grandeur (**Figure 3.0.1**), de les adapter en tenant compte des nouvelles conditions d'exploitation qui sont l'utilisation d'images SPOT et non plus LANDSAT TM, et l'absence d'une base de données localisées et donc de zones pré-définies. Une enquête démographie/migrations (**Annexe 3.8**) a été effectuée sur la base de sondage stratifiée à partir de l'image traitée pour évaluer la densité du bâti.

Pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent, nous avons pu constater l'avantage sur site urbain, du traitement d'image satellite dans des **zones pré-définies** (pour estimer la densité du bâti par exemple) par rapport à un traitement classique par pixel. Cet avantage nous est apparu lorsque nous avons travaillé sur les images de Thematic Mapper de la ville de Marseille. Ces zones pré-définies résultaient de zonages visuels pour la morphologie du tissu urbain et d'un découpage administratif imposé en ce qui concerne les îlots INSEE. Au cours de notre phase de mise au point et d'évaluation de la méthode, ces différentes zones ont été numérisées, puis superposées à l'image satellite après redressement de cette dernière. Une telle superposition a permis de générer des statistiques radiométriques par zone (îlot de recensement), le traitement de ces statistiques permettant la différenciation des différents tissus urbains en fonction de la densité du bâti, et l'élaboration d'une typologie des espaces urbanisés adaptée à une enquête démographique par sondage. Dans un cas comme dans l'autre, la prise en compte de la notion de zone s'est avérée comme particulièrement payante pour la réalisation de nos objectifs de stratification à finalité démographique. C'est donc un cheminement très semblable que nous avons adopté pour décrire l'espace urbain quiténien à partir d'image SPOT. Une question reste en suspens : la méthode est-elle suffisamment robuste pour supporter le changement de site et de capteur?

. Présentation du plan d'expérimentation.

Mise au point des outils : enquête "morphologie", mesure des surfaces, extraction de la voirie, mini-base de données localisées.

L'enquête "morphologie" que nous avons effectuée demeure l'outil indispensable pour d'une part, caler notre interprétation des images satellite, et d'autre part, étudier les relations bâti/population. La densité de l'espace bâti, évaluée à la fois par une mesure précise et une modalité, ainsi que diverses indications caractérisant l'îlot constituent la plus grande partie du contenu des fiches remplies lors de cette enquête.

La **surface des individus primaires du sondage, les îlots**, doit impérativement être connue de façon précise afin de permettre une extrapolation des descripteurs démographiques à l'ensemble de la base de sondage. Plusieurs sources (tirage photographique d'image satellite, traitement informatique sur image satellite et enquête sur le terrain) nous permettent de mesurer ces surfaces et de calculer la précision de ces mesures en les confrontant à une référence exacte (cartes 1/1 000).

Contrairement à notre expérimentation marseillaise, à Quito nous ne numériserons pas les différents îlots (plus de 6 000). Il est donc indispensable de **segmenter l'espace en zones urbaines pertinentes**, condition nécessaire à l'application de notre méthode d'analyse de l'image, à partir des seuls documents fiables et exhaustifs dont nous disposons : les images satellite. Pour ce faire, nous nous fondons sur la voirie qui sépare les différents pâtés de maisons.

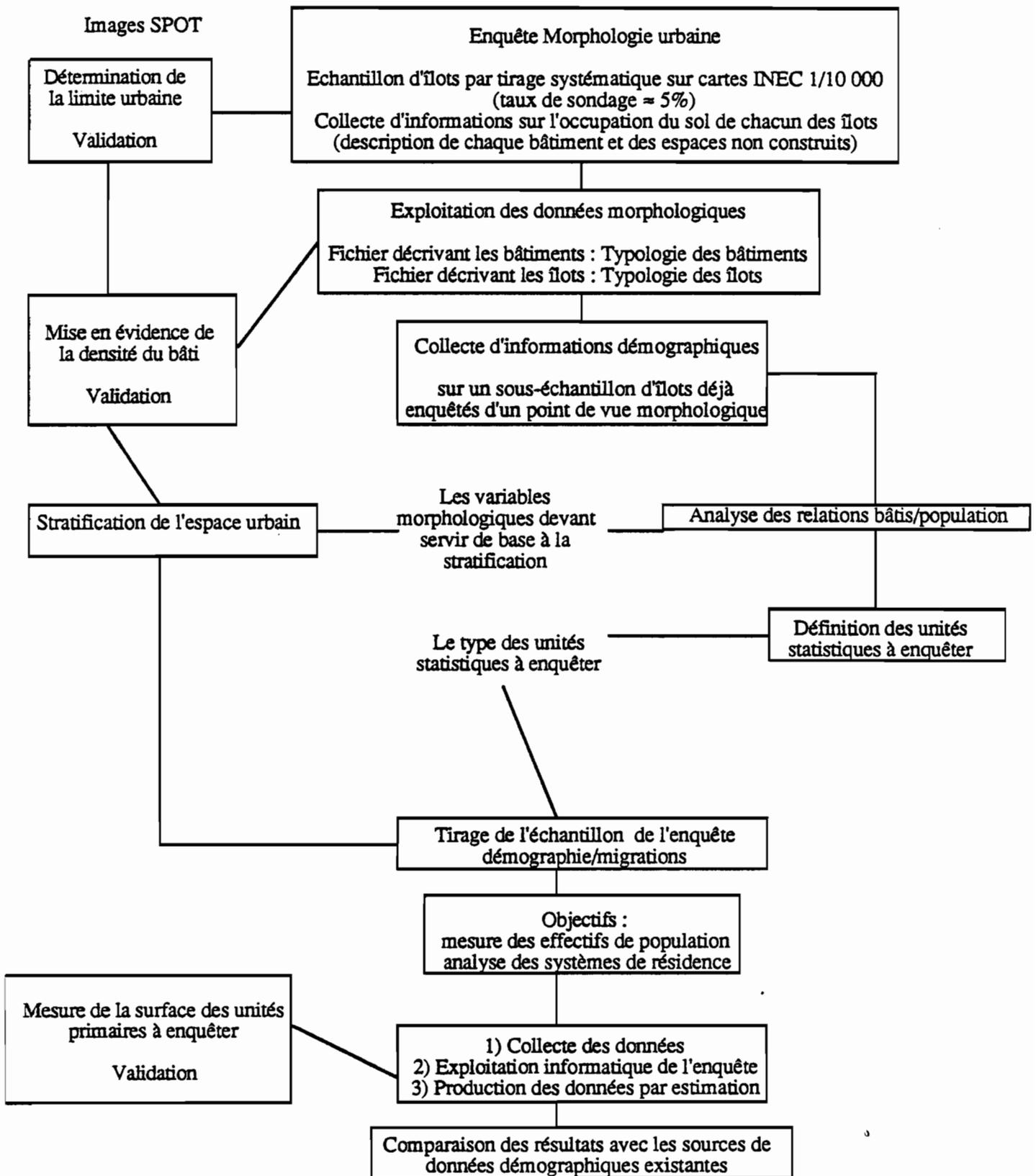


Figure 3.0.1 - Plan d'expérience sur Quito -

Nous faisons appel aux fonctionnalités du système *SAVANE* qui autorise l'assemblage et le recalage de cartes en coordonnées géographiques, afin d'évaluer la **fiabilité de l'extraction de voirie** par superposition des deux images dans une portion de l'espace urbanisé. C'est dans cette optique, que nous avons numérisé 4 cartes à l'échelle 1/2 000.

Réalisation des objectifs : détermination de la limite urbaine, densité et typologie de l'espace bâti.

A la différence de Marseille où notre zone d'étude avait été déterminée en fonction de critères administratifs, un des objectifs du programme réside dans la **délimitation des zones urbanisées** uniquement à partir de documents satellitaires. Deux méthodes, visuellement à partir de tirages photographiques et automatiquement par traitement numérique, seront confrontées et validées.

Après labellisation de toutes les zones obtenues à l'issue de l'extraction automatique de la voirie, les étapes suivantes de notre travail consistent à :

- classer l'ensemble de ces zones en fonction de la **densité du bâti** établie sur échantillon; deux méthodes seront menées de front et comparées : une régression de type polynomiale fondées sur l'indice de végétation et une analyse discriminante à partir des canaux de SPOT-HRV,
- mettre au point une **typologie du tissu urbain** telle que l'on peut la définir à partir des seules valeurs de luminance, l'individu considéré étant la zone décrite par des quantiles radiométriques, comme dans le cas de l'expérimentation marseillaise.

Chacune de ces étapes sera évaluée par rapport à une vérité terrain, mais surtout en fonction du gain de variance des estimateurs démographiques que les stratifications issues de ces classifications apporteront.

En perspective, nous aborderons rapidement les possibilités de suivi de l'espace urbain et plus particulièrement la détection des constructions nouvelles sur une portion de l'image grâce à une **analyse diachronique**.

3.1) ENQUETE MORPHOLOGIE URBAINE. (OCTOBRE-DÉCEMBRE 1986). COLLECTE ET EXPLOITATION DES DONNÉES¹

La plupart des informations concernant cette enquête, méthode de collecte et d'exploitation des données, sont fournies par le *manuel d'instructions aux enquêteurs* et le *manuel de codification*, reproduits en Annexe A.3.1; nous nous limiterons donc ici à quelques brefs compléments d'information.

3.1.1) OBJECTIFS DE L'ENQUETE.

La collecte de données sur la morphologie urbaine répond à deux objectifs. L'objectif principal de cette première enquête réalisée à Quito est de recueillir une information précise sur l'occupation du sol dans un certain nombre d'îlots de la ville afin d'initialiser l'interprétation des images satellite devant servir de base de sondage à l'enquête démographique d'Octobre 1987, et de valider les classifications obtenues.

L'image SPOT la plus récente qui soit à notre disposition a été enregistrée le 26 Novembre 1986 (Photo 3.1.1) et l'image Thematic Mapper que nous avons acquise est du 15 Septembre 1986 (Photo 3.1.2) : cette concomitance² de l'enquête terrain et des enregistrements par les satellites nous place dans des conditions favorables pour exploiter les documents satellitaires.

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

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

3.1.2) MISE EN OEUVRE DE L'ENQUETE "MORPHOLOGIE".

3.1.2.1) Sélection de l'échantillon.

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

¹ Cette partie est extraite en partie de l'Annexe 22 du Rapport final ATP/CNRS/ORSTOM "Enquête morphologie Quito (Octobre-Décembre 1988) : collecte et exploitation des données", F. DUREAU et A. MICHEL, Op. cité.

² Il faut toutefois signaler que cette concomitance entre enregistrement SPOT et relevés-terrain résulte plus de la chance que d'une programmation très maîtrisée : ce n'est que deux mois après la fin de l'enquête que nous avons été avertis par SPOT IMAGE de l'existence de ces images. Cette première expérience montre les difficultés à mettre en oeuvre un plan de collecte des données incluant l'enregistrement d'une image Spot ; il est vrai que nous sommes à l'étranger, sur une zone que les conditions météorologiques rendent difficile à observer, mais ce seront justement les conditions d'application de la méthode de collecte démographique que nous cherchons à développer.

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

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

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

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

Nous avons ainsi constitué un échantillon de 195 îlots, par tirage systématique sur carte. Les cartes de l'INEC datant de 1982, elles ne couvrent pas les extensions de la ville de 1982 à 1986 ; il a donc fallu compléter notre échantillon tiré systématiquement sur document cartographique par quelques îlots de la périphérie dont le type morphologique n'était pas représenté dans l'échantillon initial. Cet ajout de 4 îlots s'est fait en fin d'enquête, une fois bien connues par l'équipe les caractéristiques morphologiques de l'échantillon enquêté et celles des extensions récentes de Quito.

Au total, notre échantillon compte donc 199 îlots.

3.1.2.2) Elaboration des documents d'enquête.

Comme l'indique le "Manuel d'instructions aux enquêteurs" (**Annexe A.3.1**), chaque îlot de l'échantillon est décrit par trois types de documents :

- **Carte** : sur le fond de plan INEC agrandi au 1/500¹, sur lequel ne figurent au départ de l'enquête que les limites de chaque îlot à enquêter, les enquêteurs établissent la cartographie de l'occupation du sol de l'îlot. Tous les bâtiments ainsi que tous les éléments non bâtis doivent figurer sur ces plans.
- **Fiche de description des bâtiments** : chacun des édifices dessinés sur la carte est décrit sur cette fiche . Il est repéré par un numéro de 1 à n.
- **Photographies** : pour chaque îlot, les chercheurs de l'ORSTOM ont fait des photographies depuis un point surplombant l'îlot (étage élevé d'un immeuble ou relief), et au sol, en bordure et/ou à l'intérieur de l'îlot. Ces photographies sont destinées à préciser et contrôler l'information recueillie par les enquêteurs.

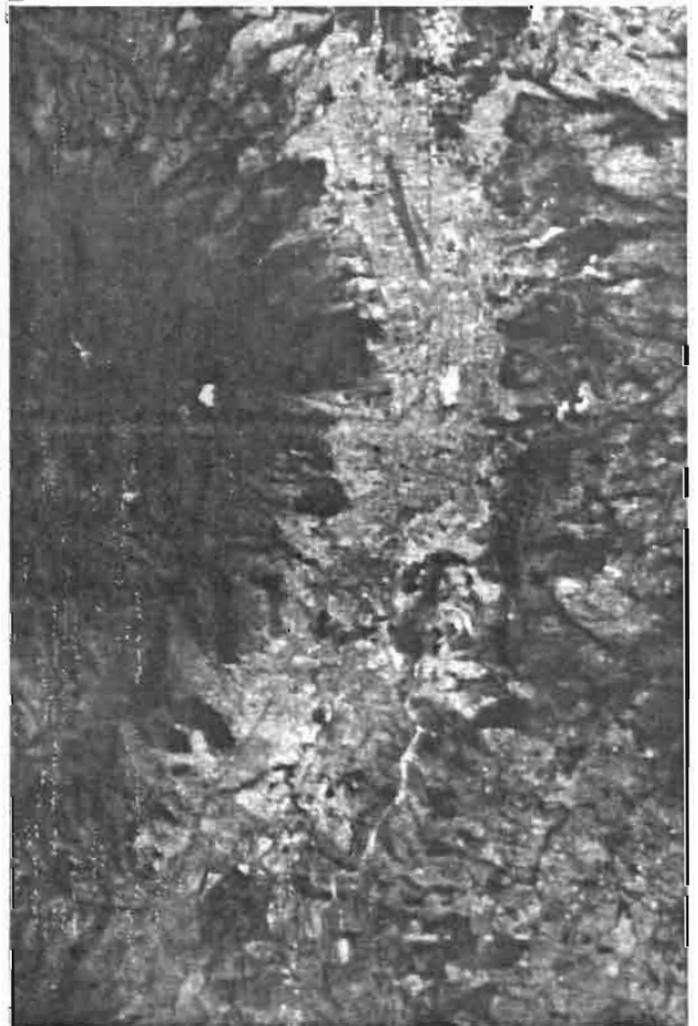
La connaissance du bâti et du non-bâti acquise lors de diverses sorties sur le terrain effectuées à Quito, nous a permis de modifier, en l'adaptant, la fiche d'enquête conçue et expérimentée à Marseille ; les conseils de collègues de l'équipe Atlas connaissant bien la ville nous ont aidé à préciser les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

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



Photo 3.1.1 - Composition colorée de l'image SPOT du 26 novembre 1986 -

Photo 3.1.2 - Composition colorée des canaux 2, 3 et 4 de l'image LANDSAT Thematic Mapper du 15 septembre 1986 -



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

3.1.2.3) Collecte des données.

La procédure de collecte des données étant décrite précisément dans les points 3 et 4 du manuel d'instructions aux enquêteurs (Annexe A.3.1), nous ne donnerons ici que quelques précisions sur les temps et conditions de collecte.

. Temps de collecte.

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

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

. Conditions de collecte.

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

3.1.3) INTÉGRATION DES DONNÉES DE L'ENQUETE.

3.1.3.1) Codification.

La codification a été réalisée par F. DUREAU selon les principes décrits dans le manuel de codification reproduit en Annexe A.3.1. Elle a été établie à partir de toutes les données collectées au cours de l'enquête : questionnaires, plans au 1/500, photographies. Ces photographies se sont révélées fondamentales pour préciser l'information collectée par les enquêteurs : ce sont des documents qu'il faut s'efforcer de recueillir lors de toute collecte de données-terrain en milieu urbain. Outre leur rôle de contrôle du travail des enquêteurs, ils apportent l'information qualitative complémentaire des données quantitatives des questionnaires simplifiés que nous utilisons.

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

Cette procédure répond à plusieurs besoins :

- pouvoir classer d'une part les bâtiments, d'autre part les îlots : les îlots de Quito ne sont pas toutes homogènes. Il nous importe de voir l'influence respective des caractéristiques du bâtiment, de l'îlot, et de la localisation dans la ville sur les caractéristiques socio-démographiques des résidents.

- le fichier des bâtiments pris individuellement aurait été trop volumineux pour être traité sur l'IBM AT du programme ; d'où la nécessité d'effectuer un premier regroupement au sein de chaque îlot lors de la codification. En procédant de la sorte, nous obtenons 2134 genres de bâtiments, ce qui est déjà très lourd pour des classifications sur IBM AT.

3.1.3.2) Saisie.

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

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

QMANZANA : fichier descriptif des 199 îlots enquêtés (recto de la fiche de codification)

champs 1-3 : identification îlot

champ 4 : identification enquêteur

champs 5-7 : mesure de surface

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

champs 11 - 42 : description de l'espace bâti

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

champ 1 : identification îlot

champ 2 : identification du genre dans l'îlot

champ 3 : nombre de bâtiments du genre dans l'îlot

champ 4 à 13 : caractérisation du genre

3.1.3.3) Contrôles de cohérence ; redressement des mesures de bâtiments.

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

. Redressement des mesures de bâtiments

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

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

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

Recodage.

A l'issue de l'analyse des histogrammes de fréquences, deux variables ont été recodées : les surfaces des bâtiments (7 classes) et le nombre de pans du toit (5 classes).

3.1.4) EVALUATION DE LA PRÉCISION DES MESURES DE SURFACES DES ILOTS.

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

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

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

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

3.1.4.1) Sélection des îlots de l'échantillon.

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

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

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

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

3.2.4.2) Différentes méthodes de mesure de la surface.

a) Méthode de mesure sur écran.

Les îlots de l'enquête "morphologie" ont servi à initialiser et à valider les traitements de télédétection, ils ont donc été délimités sur une image panchromatique (juin 1986, 19° Ouest) **sur écran**. Nous avons ensuite généré **une image de ces îlots de l'échantillon (Photo 3.1.3)** en décrivant leur contour sur l'image panchromatique à l'aide du curseur. L'estimation de la surface s'effectue donc simplement à partir d'un histogramme de l'image des îlots, chacun étant affecté d'une valeur différente. La précision de ce calcul est bien évidemment tributaire de la résolution spatiale de SPOT dans la bande panchromatique (pixel de 100 m²).

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

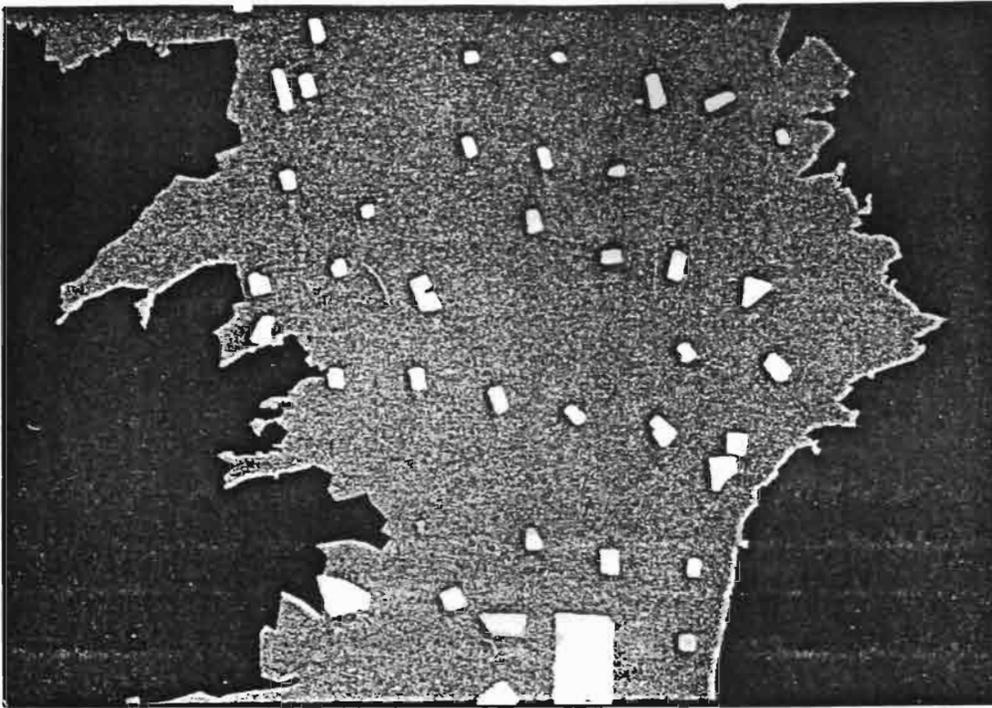


Photo 3.1.3 -
Ilots de l'échantillon
de l'enquête morphologie.
Partie centrale de l'image,
superposable à l'image
SPOT de Juin.
Pixel de 10 mètres -

Photo 3.1.4 -
Délimitation sur la
carte INEC à l'échelle
1/10 000 de quelques
îlots appartenant à
l'échantillon
morphologie -



Photo 3.1.5 - Extrait de
l'image panchromatique
SPOT de Juin 1986,
report des contours de
quelques îlots appartenant
à l'échantillon
morphologie -

Les îlots ne sont pas obligatoirement délimités par une voirie et même dans ce cas favorable, celle-ci n'apparaît pas toujours de façon nette sur l'image. Cependant, la cause principale d'une mauvaise délimitation résulte du fait que ces îlots ont été repérés sur la cartographie INEC à l'échelle 1/10 000 (**Photo 3.1.4**) qui ne présente d'un point de vue géométrique que peu de ressemblance avec la réalité dès lors que l'on s'aventure hors de l'axe central Nord-Sud de la ville. En effet, le report sur l'image des limites cartographiées d'un îlot fait appel en grande partie à une reconnaissance visuelle des formes induites par le réseau de voirie (**Photo 3.1.5**). **Le tracé imprécis de ce réseau sur la carte rend le repérage des îlots pour le moins ardu.** De plus, l'épaisseur du contour (1 pixel de 10 mètres de côté) est incluse dans l'îlot et par voie de conséquence, prise en compte dans l'évaluation de la surface, ce qui constitue une source de biais non négligeable pour les petits îlots, en particulier lorsque la valeur radiométrique de la voirie ne tranche pas sur son environnement immédiat. On ignore alors si la voirie a été incluse ou non dans l'îlot.

b) Méthode de mesure sur tirage photographique.

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

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

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

Les causes d'erreur sont semblables à celles rencontrées sur écran. De plus, compte tenu de l'échelle du tirage photographique (1/15 000) un mm² sur le tirage photo équivaut théoriquement à 225 m² sur le terrain; il est cependant segmentable, contrairement au décompte sur écran qui ne considère que les pixels entiers. Cependant, l'échelle de ce document n'est pas exactement 1/15 000, mais plus précisément 1/15 362 après comparaison de longueurs mesurées suivant un axe plan Nord-Sud sur carte et sur tirage photographique, soit une équivalence effective : 1 mm² sur tirage égale 236 m² sur le terrain.

c) Méthode de mesure sur le terrain.

Une fois sur place, l'enquêteur reporte avec précision sur un croquis les angles et les longueurs de chaque segment droit délimitant l'îlot ainsi que leur pente (**Figure 3.1.1**).

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

La surface est ensuite calculée par programme informatique à l'aide du logiciel MacDraft™ sur Apple MacIntosh. Il suffit de dessiner à l'échelle choisie les contours de l'îlot en respectant les longueurs préalablement corrigées en fonction de la pente, et les angles prescrits (**Figure 3.1.2**).

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

Figure 3.1.1 - Croquis enquêteur réalisé sur le terrain -

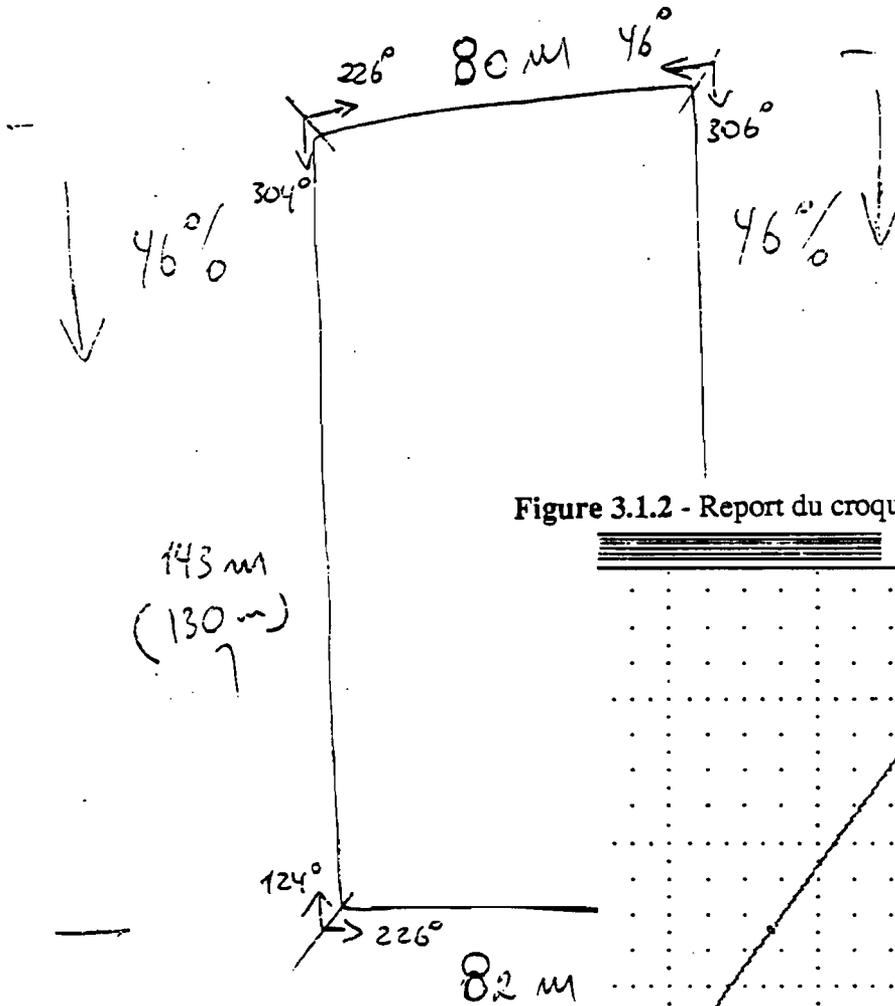


Figure 3.1.2 - Report du croquis sur Mac Intosh+. Logiciel MacDraft -

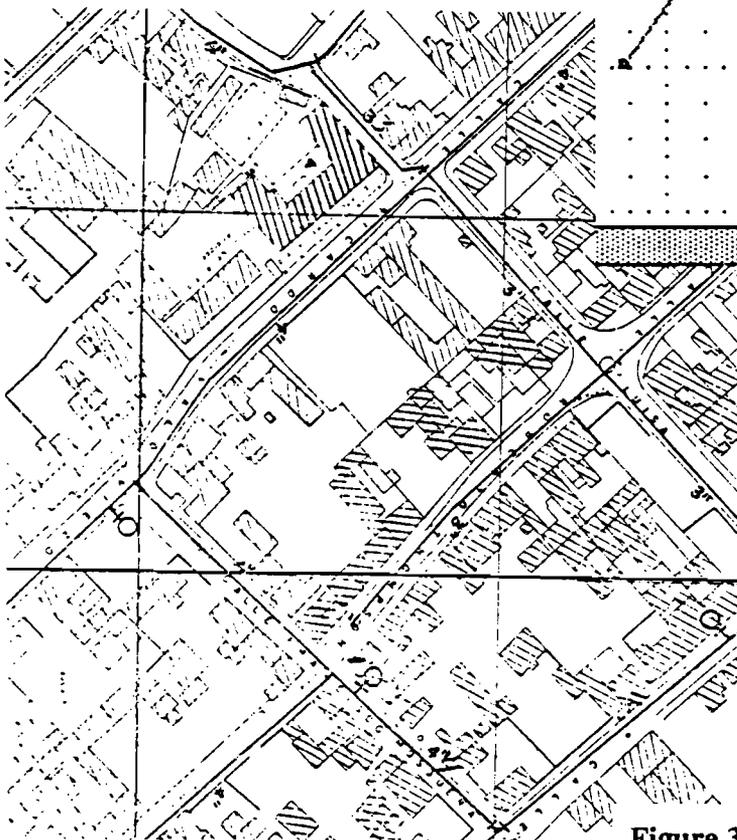
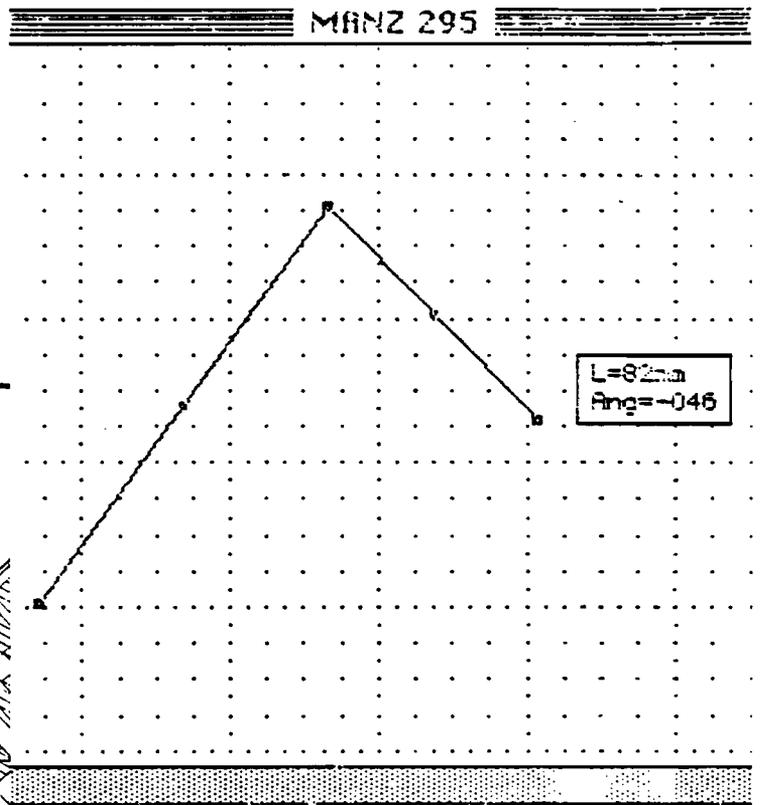


Figure 3.1.3 - Extrait d'une carte 1/2 000 du Municipio -

d) méthode de mesure de la surface de référence.

Les surfaces sont mesurées au planimètre électronique sur une carte à l'échelle 1/2 000 (**Figure 3.1.3**). Cette cartographie est de bonne qualité, mais ne recouvre malheureusement pas l'ensemble de la ville. L'opération de mesure est réitérée plusieurs fois, une moyenne des surfaces non aberrantes est retenue.

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

3.2.4.3) Résultats comparatifs des 3 méthodes de mesure.

a) Remarques liminaires.

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

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

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

avec S_m : surface mesurée

et S_r : surface de référence

Afin de comparer quantitativement la fiabilité des 3 méthodes de mesure (**Tableau 3.1.1**), nous avons retenu 3 critères qui caractérisent et synthétisent simplement les résultats obtenus :

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

Tableau 3.1.1 - Comparaison des méthodes de mesure de la surface des îlots -

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

Premiers résultats :

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

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

Tableau 3.1.2- Influence de la taille sur la précision de la mesure de la surface des îlots-

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

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

Les estimations de surfaces sont plus imprécises sur des îlots de faible taille, sauf pour les mesures terrain où ce sont les îlots de taille moyenne qui sont le plus affectés par cette imprécision. *A priori*, cela n'a rien d'étonnant, l'influence de la délimitation d'un îlot sur la mesure de sa surface se faisant plus ressentir lorsque sa taille est faible. Par contre ce phénomène n'a aucune raison de jouer si l'on considère la mesure sur le terrain, où seule la complexité du découpage de l'îlot peut alors entrer en jeu.

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

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

Tableau 3.1.3 - Influence de l'orientation et de la pente sur la précision de la mesure -

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

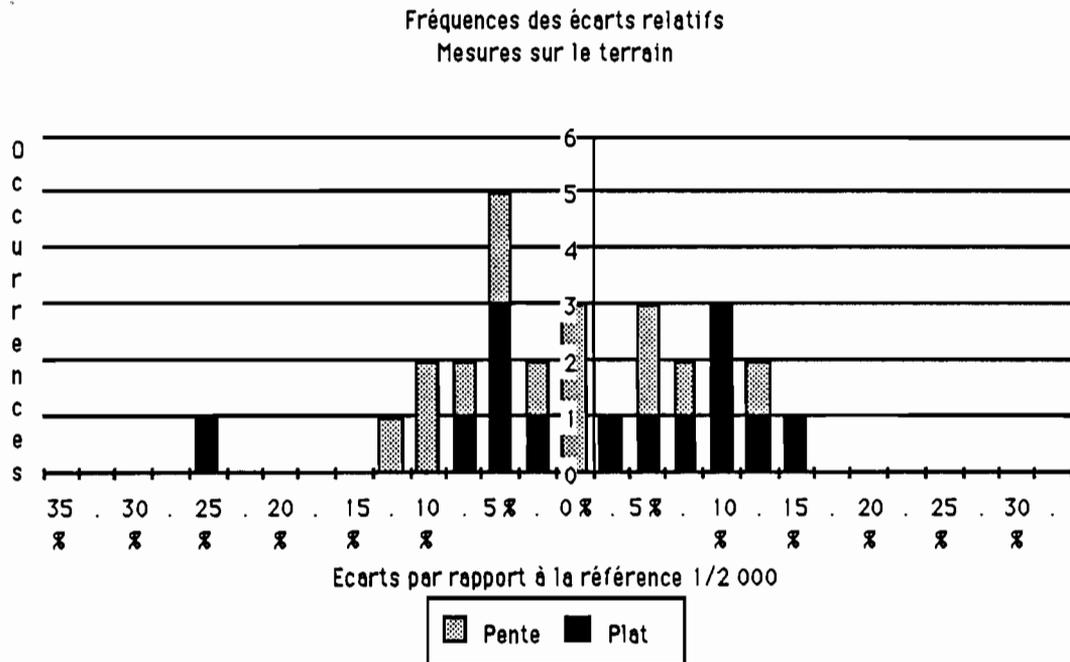
Globalement, la pente affecte peu les mesures de surface effectuées sur le terrain (99% sur terrain en pente et 1,01% sur terrain plat), la précision des mesures est *quasi-identique*, et la fiabilité de la précision, du même ordre.

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

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

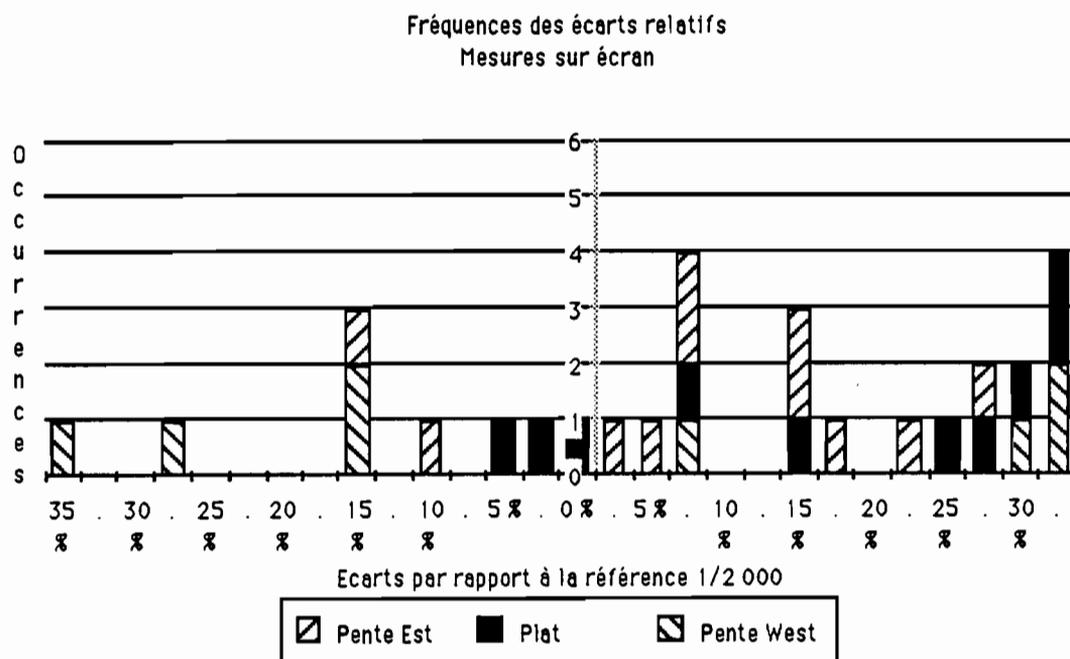
Les graphiques qui suivent illustrent ces phénomènes de façon plus précise. Il s'agit d'histogrammes des fréquences absolues des différences relatives constatées en tenant compte de la pente. Les fréquences des différentes modalités de pente sont superposées les unes sur les autres. Ces écarts (en pourcentage) sont classiquement négatifs à gauche de l'axe des ordonnées (**effectif**) et positifs à droite. Ils permettent aussi de se rendre compte de l'hétérogénéité des écarts entre les différentes méthodes de calcul utilisées. L'axe des abscisses (**différences relatives**) est gradué de 2,5 en 2,5%.

Figure 3.1.4 - Précision des mesures sur le terrain -



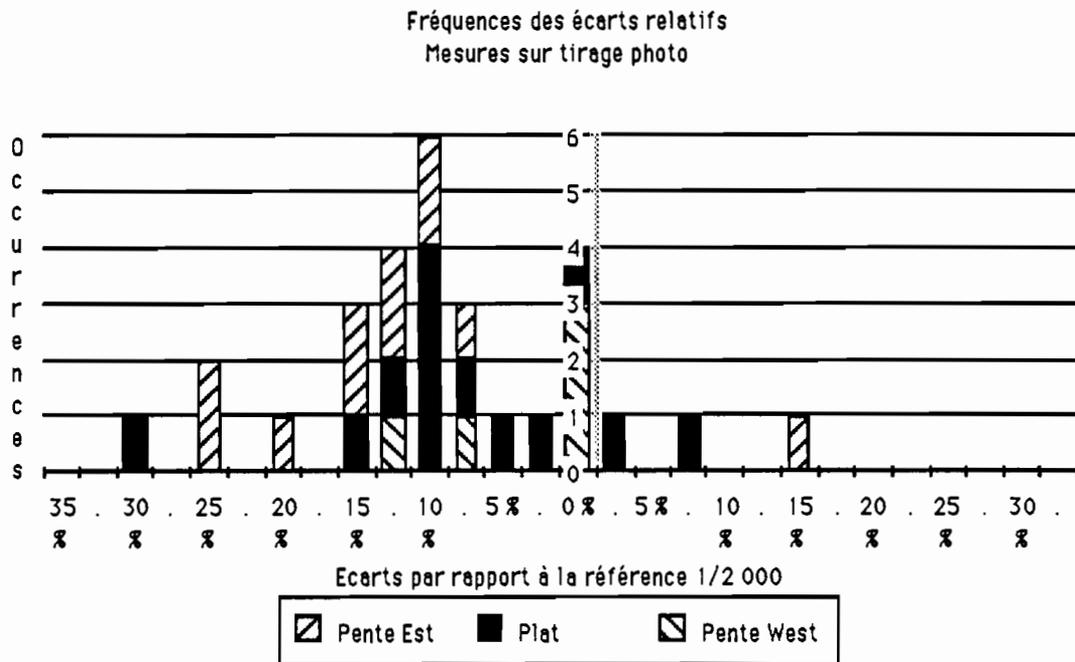
Les surfaces mesurées sur le terrain apparaissent comme remarquablement centrées autour de 0%, variant de -15% à 15%. Les mesures sur pente sont légèrement plus nombreuses à avoir été sous-estimées.

Figure 3.1.5 - Précision des mesures sur écran -



La distribution des différences relatives constatées sur les mesures prises à l'écran ne présente pas une distribution particulière. Les surfaces de îlots exposés sur un flanc Ouest demeurent les moins précises, aussi bien sur-évaluées que sous-évaluées.

Figure 3.1.6 - Précision des mesures sur tirage photographique -



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

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

Précision de la mesure de la surface des îlots : 10%.

Mesures sur tirage photographique et mesures sur le terrain pour les îlots à délimitation impossible sur image sont les deux méthodes qui seront retenues pour l'extrapolation des données démographiques. D'après nos évaluations, on est en droit d'attendre une précision d'environ **10%** sur l'ensemble de ces mesures.

Par ailleurs, la mesure des surfaces des différentes strates de densité du bâti estimée par traitement d'image a été effectuée par mesure sur papier millimétré sur un tirage photographique à l'échelle 1/15 000. Seule une légère sous-estimation des surfaces, essentiellement non bâties, situées sur le flanc Est du Pichincha peut être déplorée; elle peut être aisément corrigée en intégrant les pourcentages obtenus à l'issue de nos calculs.

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

Si les mesures de surfaces calculées sur ordinateur apparaissent comme moins sûres, une explication en forme de justification peut toutefois être avancée. L'objectif correspondait alors uniquement à initialiser, puis à valider les traitements de télédétection, non à calculer des surfaces, ce qui n'implique pas le même type de précautions quant à la méthode de travail. Dans ce premier cas, il importe essentiellement que tous les types de milieu urbain soient représentés. C'est pourquoi, lorsque ces îlots ont été délimités, nous avons surtout accordé de l'importance à les localiser précisément. Dans le cas, pas si exceptionnel, où une délimitation précise était impossible, mais où la texture et les réponses spectrales étaient homogènes sur une grande surface autour de l'îlot test, nous avons quand même décidé de délimiter de façon *quasi* arbitraire un polygone afin de tenir compte de ce type de milieu urbain, Comité Del Pueblo ou péri-urbain, pour initialiser et valider les classifications. Si l'objectif avait été de mesurer précisément la surface de ces îlots, nous aurions alors suivi la même démarche qu'en ce qui concerne la mesure sur tirage photographique, et nous n'aurions retenu que les îlots desquels nous étions certains à la fois de la localisation et de la délimitation.

3.2) SEGMENTATION DE L'IMAGE FONDÉE SUR L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE.

Nous avons abouti, à l'issue du chapitre précédent, à un fichier décrivant précisément les 199 îlots de l'échantillon de travail en fonction de l'occupation du sol, et qui constitue l'ensemble de nos données terrain. A Marseille, nous avons pu utiliser une base de données localisées pour effectuer nos traitements et en particulier, pour mettre en relation les données terrain et les moyennes radiométriques calculées dans les districts de recensements INSEE. En l'absence de telles entités pré-définies, il convient d'en générer à partir uniquement de l'image satellite. L'objet de ce chapitre consiste donc à tester sur une partie de l'image SPOT de Quito (900*700) l'efficacité des outils de morphologie mathématique simples pour extraire la voirie principale. Cet objectif s'inscrit dans une problématique plus vaste et dont la principale interrogation s'énonce comme suit : **est-il possible de constituer des zones définies à l'intérieur de contours, ces contours résultants de l'extraction des réseaux de voirie?** Il s'agit donc d'évaluer la faisabilité d'une extraction automatique de la voirie devant permettre la **création de zones**, une zone étant l'unité spatiale incluse à l'intérieur des contours de la voirie adjacente. Pour parvenir à cet objectif, deux axes doivent être explorés :

- l'extraction de la voirie
- la reconstruction des contours (réseaux de voirie), chaque zone devant impérativement être fermée

L'objectif de ce chapitre est donc d'exposer les différents traitements à mettre au point pour définir ces zones et d'indiquer les choix qui devront être effectués à chaque étape.

. Présentation de la méthode d'extraction de la voirie à l'aide d'algorithmes de morphologie mathématique.

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

Lors de la phase de développement, nous avons défini une fenêtre de 700*900 extraite d'une scène SPOT de Quito. La taille de cette fenêtre nous a été imposée par des contingences matérielles, taille des tableaux acceptable par l'ordinateur (en particulier pour la labellisation des zones) et temps calcul raisonnable permettant de tester différentes chaînes de traitement en morphologie mathématique.

3.2.0) PRÉLIMINAIRES - PRÉTRAITEMENTS SUR LES IMAGES : RECTIFICATION GÉOMÉTRIQUE INTER-BANDES.

En fin de programmation d'acquisition, nous avons eu à notre disposition les scènes SPOT suivantes de niveau 1B :

- juin 86 : panchromatique et multispectral, parties Nord et Sud (22°R),
- août 86: panchromatique et multispectral, partie Nord (Vertical),
- novembre 86: panchromatique, parties Nord et Sud, multispectral. partie Nord uniquement (8,7°L),

ainsi qu'une image Thematic Mapper du 15 septembre 86.

Les images SPOT qui nous ont été livrées sont de **très bonne qualité radiométrique**, elles présentent une bonne dynamique (le panchromatique seuillé à 3% se situe entre 5 et 90). Cette dynamique est semblable sur toute les images qui ne présentent que très faiblement l'effet "pyjama". Nous n'avons pas décelé de différence entre barrettes dans les canaux en mode multispectral.

Les incertitudes sur la qualité de la cartographie dont nous disposons (une carte au 1/15.000 sans indication de la projection utilisée ni aucune coordonnée géographique et une série de cartes au 1/1.000 dont l'intégration dans une base prendra du temps) ne nous ont pas permis de demander une rectification géométrique.

Pour entreprendre une étude diachronique et compte tenu des différences d'angles importantes entre les différentes images que nous avons à notre disposition et du relief autour et dans la ville même de Quito, il est nécessaire de disposer d'un modèle numérique de terrain. La réalisation d'un tel modèle à partir de points cotés est prévu dans le cadre de l'Atlas Informatisé de Quito; c'est l'une des fonctionnalités attendue du système *SAVANE*.

Un traitement d'ensemble est ensuite effectué sur les images enregistrées en Juin 86, seule date pour laquelle la totalité du site de Quito est couverte en panchromatique et multispectral. Le raccordement de deux scènes continues d'une même trace s'effectue par la **mise en coïncidence des quelque 300 lignes communes**. Les pré-traitements déjà effectués par SPOT IMAGE entraînent des différences radiométriques et géométriques sur cette partie commune. Ces différences sont suffisamment faibles pour être négligées (moins d'un pixel et moins de 5 comptes numériques).

Nous avons extrait de ce rassemblement une fenêtre de **1912 colonnes sur 3868 lignes (20 X 40 Km)** correspondant à la zone qui nous intéresse et qui englobe très largement l'agglomération. La superposition entre le panchromatique et le multispectral de la même date laisse apparaître un décalage variant entre 0 et 15 pixels. La correction par un polynôme de degré 5 à partir d'une centaine d'amers est tout à fait satisfaisante : moins d'un pixel de décalage.

Nous n'avons pas procédé à des rectifications de type radiométrique.

3.2.1). DÉFINITION DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT CHOISIE POUR EXTRAIRE LA VOIRIE.

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

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

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

3.2.1.1). Transformation "chapeau haut de forme".

Nous avons travaillé sur une image résultant de la somme du Panchromatique et du proche infra-rouge (Canal XS3) afin de bénéficier de la résolution spatiale optimum (Panchromatique) et du pouvoir discriminant de la radiométrie infra-rouge (canal XS3) (Photo 3.2.1).

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

a) Extraction des vallées. *Eléments théoriques.*

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

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

- une "**dilatation**"

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

$$F(x) + S = \text{SUP} (F(s), S_{S_x}) \text{ avec } S_x \text{ l'élément structurant S appliqué au point x de F(x)}$$

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

- une "**érosion**"

Avec les mêmes notations, il vient

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

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

On voit (Photo 3.2.2) que la fermeture a donc opéré un **comblement des vallées**, laissant globalement le reste de l'image peu transformé. Il ne reste donc plus qu'à soustraire l'image que nous venons d'obtenir par l'image origine, puis à seuiller ce résultat de façon à ne conserver que l'information qui nous intéresse, c'est à dire les vallées.

- **soustraction** de l'image "**fermée**" à l'image **origine** et **seuillage**, ce qui s'écrit de façon formalisée de la manière suivante :

soit l'image fermée notée F(x)S

soit l'image résultante notée G(x)

soit le seuil noté P

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

Nous obtenons donc une image **binaire** où n'apparaissent que les vallées, c'est à dire **principalement** les éléments de voirie qui nous intéressent (Photo 3.2.3)

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

b) *Choix des paramètres. Aspects pratiques.*

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

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

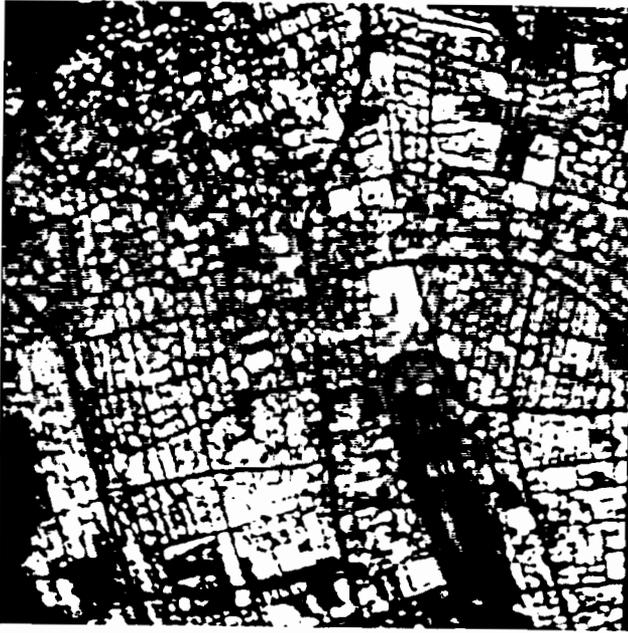


Photo 3.2.1 - Image SPOT Juin 1986. Panchromatique + Infra-rouge proche : la voirie apparait dans les valeurs les plus faibles de l'image et se distingue sur un fond plus clair (valeurs plus élevées) -

Photo 3.2.2 - "Fermeture" de l'image précédente -

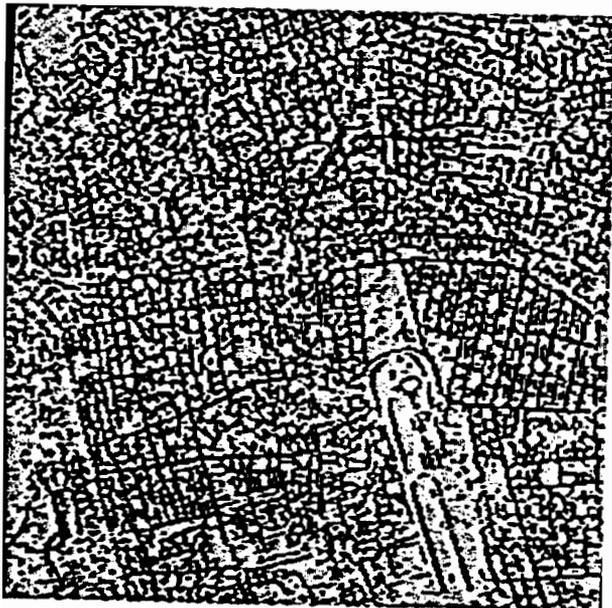


Photo 3.2.3 - Seuillage de l'image originale soustraite à sa "fermeture" -

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

En ce qui concerne la détermination la valeur du seuil, nous avons opéré par seuillage visuel interactif sur *Station de travail SUN*. La valeur optimum de ce seuil correspondant à la valeur pour laquelle nous conservons un maximum d'éléments linéaires et un minimum de "taches". Ce choix est bien évidemment arbitraire.

3.2.1.2). Amincissement du réseau par itérations successives.

Ce qui nous intéresse ici, ce n'est pas de conserver une information sur l'importance (largeur) de la chaussée, mais d'extraire un élément de contour à partir d'éléments de la voirie. Or, l'image que nous avons obtenue à l'issue de ces traitements simples apparaît comme peu exploitable car trop bruitée. Nous allons donc procéder à un amincissement des éléments de voirie extraits afin ne conserver que la présence des éléments linéaires. Ces éléments de voirie sont codés 1 (élément de contour). Cet amincissement consiste en une succession de 8 érosions de l'image binaire, chacune de ces érosions étant effectuée dans l'une des 8 directions possibles 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° et 315° (image en trame carrée et masque 3*3 pixels).

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

L'élément structurant employé pour effectuer l'érosion binaire dans la direction 0° est le suivant :

0	0	0
X	1	X
1	1	1

Le 0 signifie que la valeur 0 (pas de pixel contour) est indispensable

Le 1 signifie que la valeur 1 (pixel contour) est indispensable

Le X signifie que la valeur du pixel est indifférente

Compte tenu de la configuration rencontrée, le pixel central qui est un pixel de voirie (de valeur 1) restera un pixel de voirie (de valeur 1) si son voisinage 3*3 est compatible avec l'élément structurant. Sinon, il prendra la valeur 0.

Les éléments structurants des 7 autres directions s'obtiennent en effectuant une rotation de 45° de l'élément structurant de la direction précédente. Ainsi pour la direction 45°, l'élément structurant présente la configuration suivante:

X	0	0
1	1	0
1	1	X

Dans notre exemple, l'idempotence s'obtient après 2 amincissements complets effectués dans chacune des 8 directions. La **Photo 3.2.4** a été prise après 1 amincissement complet opéré dans les 8 directions.

3.2.2) AMÉLIORATION DE L'EXTRACTION DE LA VOIRIE.

Deux opérations sont indispensables pour améliorer la qualité de l'extraction de la voirie, la connexion de pixels isolés ou en groupes à un segment pour assurer la continuité du réseau ainsi que la suppression des pixels ou groupes de pixels isolés n'appartenant pas à priori à de la voirie.

3.2.2.1).Fermeture des contours.

Il est souhaitable de prolonger la méthode que nous avons débutée en soumettant notre image à des algorithmes de suivi de contour. La littérature est très abondante sur ce sujet et la méthode préconisée par MILGRAM et Al qui a été testée sur une photographie aérienne numérisée paraît adaptée à notre cas, bien qu'un grand nombre de points "selle" risquent d'apparaître.

. Présentation de la méthode.

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

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

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

L'image des distances est une approximation du double de la distance euclidienne utilisant les distances de "Chamfer" afin de pouvoir générer une image constituée de nombres entiers (**Photo 3.2.5**). Elle se calcule en deux passages à l'aide de masques.

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

L'ensemble des deux opérations se fait très rapidement. La **Photo 3.2.6** montre une imagerie 128*128 après un passage de l'algorithme. Les pixels-selle sont représentés en rouge.

3.2.2.2) Suppression des zones contenant 1 pixel.

Afin de limiter le nombre de zones, et de ne tenir compte que des zones de taille raisonnable, nous avons décidé de supprimer les zones ne s'étendant que sur 1 pixel. L'élément structurant utilisé est le suivant :

X	X	X	X	X
X	1	1	1	X
X	1	0	1	0
X	1	1	1	X
X	X	X	X	X

On voit immédiatement qu'il a pour fonction de mettre à 1 (contour) les pixels 0 isolés. Suivi d'un amincissement 8 directions, cette convolution a pour effet de supprimer les zones de surface inférieures ou égale à 1.



Photo 3.2.4 - "Amincissement"
de l'image précédente -

Photo 3.2.5 - Image des
distances au point contour
le plus proche -

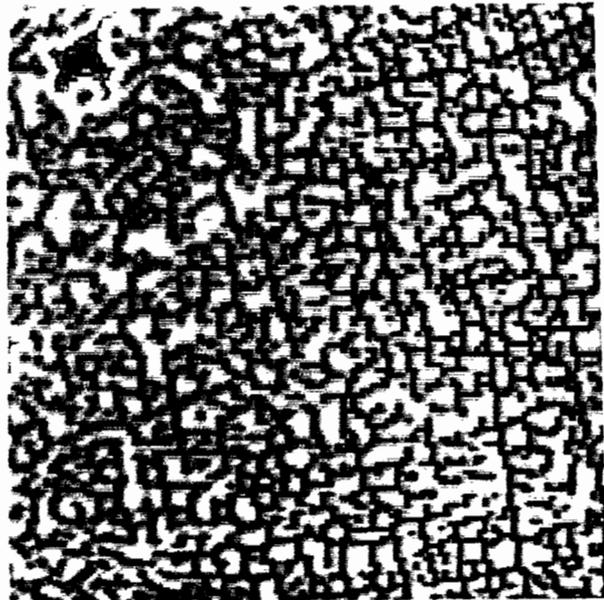
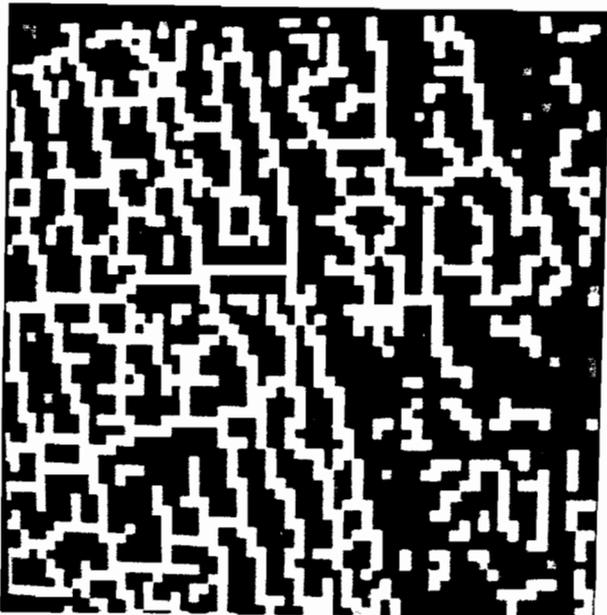


Photo 3.2.6 - Ajout (rouge)
et suppression (jaune) de pixels
sur l'image -



3.2.2.3) Ebarbulage et suppression des pixels isolés

La majorité des segments étant à présent reconnectée, nous effectuons un ébarbulage afin de **supprimer les segments de faible longueur**. L'ébarbulage consiste à convoluer l'image avec l'élément structurant suivant :

X	X	X
X	1	1
X	X	1

moyennant 8 rotations de 45°.

Pour nettoyer l'imagette des nombreux amas de 1, 2, ou 3 pixels déconnectés d'un élément de réseau, nous l'avons balayée à l'aide d'une fenêtre 5*5. Lorsque l'on rencontre une des 15 configurations correspondant à un amas de pixels déconnecté d'un réseau, le pixel central prend la valeur 0. Deux passages ont été exécutés avant de nettoyer effectivement cette image.

La **Photo 3.2.6** illustre les deux traitements successifs, les pixels apparaissant en rouge étant ceux qui ont été reconnectés, les pixels jaunes, ceux qui ont été supprimés.

LA CRÉATION DE ZONES PLUTOT QUE L'EXTRACTION RÉELLE DE LA VOIRIE.

Afin d'améliorer l'extraction de la voirie, il est envisageable de préparer l'image initiale en la traitant de manière à faire ressortir de façon plus nette le contraste. Différents filtres ou méthodes peuvent être testés avec profit.

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

Ces premiers résultats (**Photo 3.2.7**) montrent la difficulté d'extraire **numériquement** la voirie en milieu urbain à partir d'une image où **visuellement** celle-ci apparaît de façon relativement distincte (**Photo 3.2.8**). Cependant, une première comparaison (non quantifiée) permet d'affirmer que la méthode visuelle, si elle permet de n'extraire que les éléments de voirie et de constituer ainsi des éléments linéaires continus, ne permet pas de les extraire tous. **Le réseau secondaire extrait visuellement est en effet moins important que celui, extrait par la méthode numérique (de façon discontinue)**. Ces premiers résultats sont donc encourageants.

Il reste à évaluer quantitativement la fiabilité de cette méthode d'extraction de la voirie; c'est l'objet du chapitre qui suit, dans lequel nous superposons, dans une fenêtre de 2,5 sur 2,5 Km, l'image des réseaux extraits d'une image satellite et l'image de la voirie telle qu'elle apparaît sur une cartographie à l'échelle 1/1 000.



Photo 3.2.7 - Image des réseaux extraits -



Photo 3.2.8 - Image des réseaux extraits visuellement -

3.3) CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES SUR LE SITE DE QUITO.

Parvenus à cette étape d'avancement de notre travail, il nous a semblé indispensable d'évaluer la fiabilité du traitement d'extraction de voirie présenté plus haut. La méthode la plus appropriée consiste à comparer les éléments de réseau obtenus automatiquement à partir de l'image SPOT avec le réseau tel qu'il est cartographié.

Compte tenu d'impératifs de temps, une telle opération n'est pas envisageable sur la totalité de la ville; néanmoins, il est concevable de sélectionner une petite zone incluant la plupart des configurations (en terme d'association des différents éléments urbains d'une part et de réseau de voirie d'autre part). C'est dans cet objectif, que nous avons réalisé une mini-base de données sur Quito, afin de pouvoir superposer sous forme numérique l'image du réseau de voirie issue de cartographie à grande échelle avec l'image de l'extraction. Une telle superposition n'est en effet réalisable que sous cette forme, compte tenu de la **déformation de l'image SPOT par rapport à la cartographie existante**, et donc de la nécessité de corriger géométriquement cette image.

3.3.1) MISE EN OEUVRE DE LA MINI-BASE DE DONNÉES.

3.3.1.1) Préparation des documents cartographiques.

Une couverture à l'échelle 1/1 000 de la ville de Quito a été achevée par l'IGM¹ en 1984 sur la base de photographies aériennes. Un assemblage à l'échelle 1/2 000 de 16 de ces cartes (soit approximativement une aire de 2,5 Km sur 2,5 Km) a été choisi. La **Photo 3.3 1** montre l'assemblage au 1/2 000 de 4 cartes 1/1 000 prêt pour la saisie.

Afin de constituer une base de données utilisée par ailleurs dans un autre but², il a été décidé de saisir non pas la voirie, mais plutôt son complémentaire, *les zones de recensement INEC*³.

La préparation de ces cartes en vue de leur numérisation s'est avérée plus longue que prévue initialement; en effet, nos documents (copies de réduction au 1/2 000) se sont révélés à l'examen être de qualité graphique moyenne. Les difficultés auxquelles nous avons été confrontés sont de différents ordres :

- la définition de la limite externe des zones INEC à prendre en compte; nous avons décidé, après examen des cartes, de retenir comme limite, le trait le plus extérieur à la zone. Cela revient donc à inclure, lorsqu'il existe, le trottoir à l'intérieur de la zone. Néanmoins, même si ces contours se sont révélés être mieux fermés que ceux délimitant la zone *stricto-sensu*, nombre d'entre eux ne bouclent pas. En particulier, la délimitation des voies sans issue est généralement intermittente. La plupart des zones situées en périphérie ne comportant pas de trottoir, nous avons alors opté pour la limite "interne" de la zone.
- le report des zone du document INEC initial (l'échelle 1/10 000) aux cartes IGM 1/2 000
- l'actualisation du tracé de la voirie; il est conseillé, lorsque des voies apparaissent en trait pointillé (en projet...) de se reporter à l'image panchromatique SPOT pour vérifier que le projet a bien été exécuté.
- la densité des traits (trottoir, limite interne de zone, murs, clôture, limite de bâtiments, réseaux divers, courbes de niveau) rend parfois problématique le suivi

¹Instituto Geografico Militar

² Consulter à ce sujet la thèse de D. COURET, Bibliographie.

³ Institutna Nacional de Planificacion y Coordinacion Economica.

de la limite de la zone. De plus, la non continuité de ces traits ne favorise pas la cohérence de la délimitation. Il est parfois obligatoire de "s'aider" d'un réseau de canalisation pour fermer une zone.

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

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

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

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

L'étape suivante a consisté à générer une image comprenant la totalité de la saisie. Nous avons opté pour une résolution spatiale de pixel de 2,50 m, taille cohérente à la fois avec l'échelle des cartes saisies, mais aussi, compatible avec le degré de zoom raisonnable sur image satellite. L'image ainsi obtenue est de dimension 1150*1150 pixels (voir **Photo 3.3.2**).

3.3.2) CORRECTION GÉOMÉTRIQUE DE L'IMAGE SPOT À PARTIR DU SUPPORT GÉOGRAPHIQUE.

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

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

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



Photo 3.3.1 - Assemblage
au 1/2 000 de 4 cartes au 1/1 000
prêt pour la saisie -



Photo 3.3.2 - Extrait de l'image générée
à partir de la mini-base, pixel de 2,5 mètres -



Photo 3.3.3 - Composition colorée.
Bleu : image de la carte numérisée.
VERT : image panchromatique SPOT -

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

La **Photo 3.3.3**, composition colorée effectuée en affectant la couleur bleue à l'image de la carte numérisée et la nuance grise à l'image SPOT panchromatique illustre la qualité ainsi que la non uniformité du recalage. En première approche, on peut dire que le gris le plus clair représente l'espace bâti alors que le plus sombre indique la présence de voirie bitumée ou de végétation. Bien que cela n'apparaisse pas de façon très claire sur cette photographie, on note un bon recalage en ce qui concerne la partie gauche de l'image (la plus urbanisée et la plus plate) au contraire de la partie située à droite. Cela est imputable en grande partie au relief plus accidenté ainsi qu'à la difficulté de repérer correctement les amers situés dans les espaces très végétaux. L'angle important d'enregistrement de l'image satellite (22°R) ne peut qu'accentuer la difficulté de recalage inhérent plus particulièrement au relief important.

3.3.3) EVALUATION DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE BASÉE SUR LES ALGORITHMES DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE.

Après avoir recalé les deux images comme indiqué dans le paragraphe précédent, nous avons appliqué à l'image satellite la chaîne de traitement décrite dans la partie précédente. La **Photo 3.3.4** (gris : panchromatique et vert : extraction de la voirie) illustre le principe d'extraction de vallée sous-jacent à l'extraction de la voirie. Il montre clairement que "fermeture - image originale" est inapproprié dans la partie haut-gauche de l'image où la voirie apparaît comme plus claire que le fond plus foncé constitué de végétation. Il faudrait dans ce cas précis concevoir une extraction des crêtes. Cette opération judicieuse dans ce cas précis, sélectionne au contraire en milieu urbanisé les espaces construits de faible épaisseur spatiale, ce qui apparaît bien comme contradictoire avec notre objectif.

Tableau 3.3.1 - Matrice de confusion extraction automatique de la voirie / numérisation du réseau -

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

Fiabilité globale : 72 %

Le **Tableau 3.3.1** illustre les résultats d'un croisement entre l'image du réseau générée par la mini-base et l'image résultant de l'extraction automatique de la voirie. L'image résultant de tous ces traitement n'est pas vraiment satisfaisante **dans un strict objectif d'extraction de la voirie.**

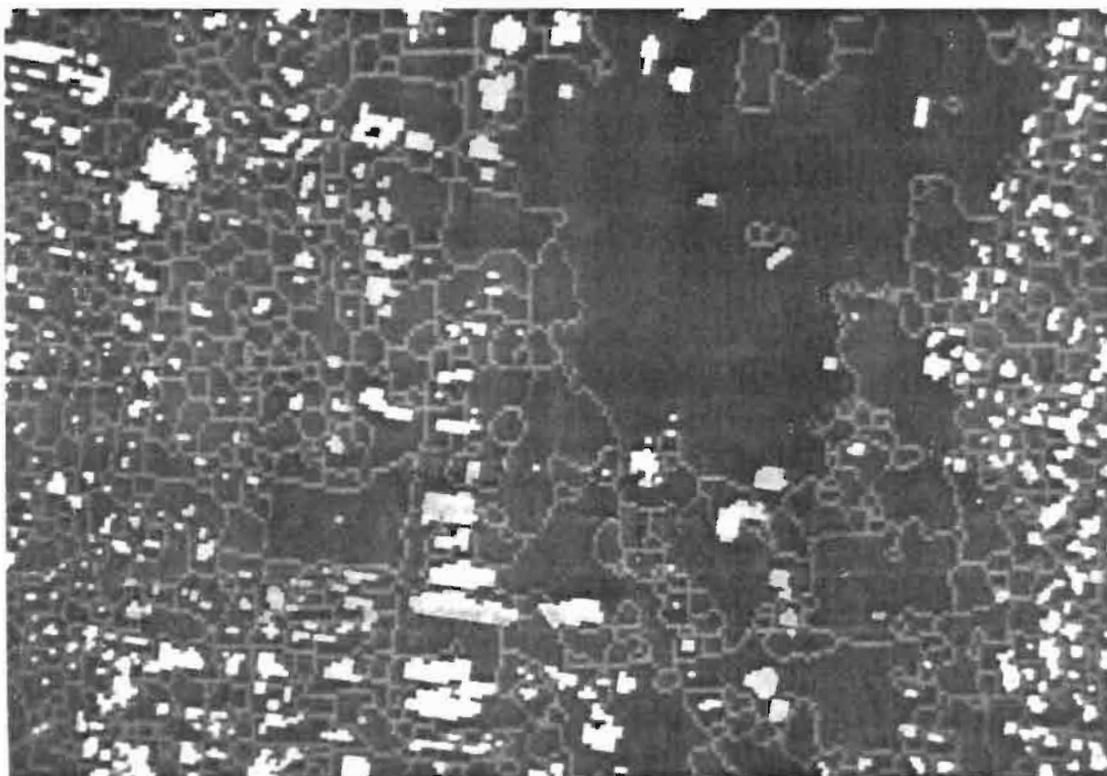


Photo 3.3.4 - Composition colorée.
Vert : extraction automatique de la voirie.
Gris : image panchromatique SPOT -



Photo 3.3.5 - Composition colorée.
Bleu : réseau numérisé.
Vert : extraction automatique de la voirie.
Gris : panchromatique SPOT -

La **Photo 3.3.5** est une combinaison de trois couleurs :

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

elle suscite deux affirmations :

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

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

En ce qui concerne le second point, il convient de déterminer pourquoi ces pixels ont été identifiés à des éléments de voirie. A première vue, il semblerait que nombre de ces erreurs soient dues à l'ombre de certains bâtiments. D'une part, la luminance très faible des surfaces à l'ombre s'apparente à celle du bitume qui constitue la nature principale de la voirie et d'autre part, les pixels d'ombre se regroupent par petits amas de faible effectif. Il est donc délicat de les séparer des pixels de voirie. Toutefois, l'ombre ne constitue pas le seul facteur d'erreur; d'autres éléments dont la nature n'est pas déterminée entretiennent la confusion.

La superposition d'une partie de l'image SPOT traitée et d'un extrait de carte numérisée indique clairement que le problème à résoudre est lié à une **sur-détection** du réseau de voirie. On notera qu'une **multitude de petits segments sont représentés à l'intérieur des pâtés de maisons** et que ce ne sont pas les réseaux les plus importants qui ressortent les plus fidèlement.

Quoi qu'il en soit, **l'extraction automatique de la voirie ne nous sert qu'à segmenter l'image en zones s'apparentant le plus possible à celles que nous avons classées lors de l'expérimentation marseillaise**, et de ce seul point de vue, la segmentation de l'image SPOT peut être considérée comme satisfaisante. Nous avons vu que cette phase n'est pas obligatoire, puisqu'il est toujours possible de classer des pixels, mais que la prise en considération de zones est plus satisfaisante tant d'un point de vue conceptuel que de celui d'une simple optimisation du travail de stratification, voire même d'une recherche d'efficacité maximum.

La suite de notre travail peut donc se scinder en deux parties distinctes : la première traite d'une aide à la détermination de la limite urbaine à partir de traitement d'image simple, puis d'une première stratification élaborée à partir d'une classification de pixels, la seconde reprend plus précisément les recettes qui ont fait la preuve de leur efficacité lors de la phase d'expérimentation : classification selon la densité du bâti et mise au point d'une typologie de l'espace urbain, ces deux derniers traitements considérant des zones comme individu. Ce sont ces mêmes zones que nous venons de définir à partir de la segmentation de l'image sur la base de la voirie.

3.4) PREMIERE CLASSIFICATION SUR LA "DENSITÉ DU BATI".

L'objectif de ce chapitre est d'exposer la méthode choisie pour délimiter, puis stratifier la base de sondage, laquelle servira pour réaliser l'enquête démographique finale. Nous proposons ici des traitements simples, rapides et peu coûteux qui peuvent être mis en oeuvre à partir de quelques documents photographiques issus d'images satellites. Même si ces traitements n'apparaissent pas comme ceux qui auraient pu permettre une meilleure optimisation du plan de sondage, des contraintes de temps et de budget notamment nous ont contraints à utiliser les résultats issus de classification des pixels des images SPOT.

Ce chapitre s'articule selon deux axes principaux, la délimitation visuelle sur photographies aériennes servant à valider la méthode automatique d'aide à la délimitation de l'espace urbanisé, et la stratification de la base de sondage sur la base d'une classification d'une image SPOT. La sanction de ce dernier travail se retrouve dans les estimations des gains de variance des variables démographiques induits par cette stratification, et dans la précision des intervalles de confiance des estimations construites à partir de l'enquête démographie/migrations.

3.4.1) DÉTERMINATION VISUELLE DE LA LIMITE URBAINE.

3.4.1.1) Documents utilisés.

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

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

3.4.1.2) Mise en oeuvre et règles de décision.

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

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

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

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

Les différentes limites obtenues indépendamment par deux photo-interpréteurs¹ ont été confrontées. Leurs tracés respectifs n'offrent pas de différences fondamentales. Une limite de "synthèse" a donc été retenue (**Photo 3.4.1**). La discrimination de la limite externe s'est faite pour l'essentiel sur l'image panchromatique brute, mais aussi à partir de l'image de l'indice de végétation et de l'écart-type local. Enfin, nous sommes allés conforter la limite ainsi obtenue par une enquête sur le terrain, qui nous a de plus permis de lever l'ambiguïté concernant un espace recouvert de nuages sur l'image satellite.

3.4.1.3) Validation.

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

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

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

3.4.2) DÉTERMINATION AUTOMATIQUE DE LA LIMITE URBAINE À L'AIDE DE L'INDICE DE VÉGÉTATION ET DE L'ÉCART-TYPE LOCAL CALCULÉ SUR LE CANAL PANCHROMATIQUE.

L'objectif principal de cette démarche est de mettre au point une méthode simple **d'aide à la décision** pour définir la limite urbaine, à partir d'une **analyse numérique** de l'image SPOT. Cette méthode doit pouvoir être applicable sur tirages photographiques. Elle a donc été fondée sur le seuillage de valeurs radiométriques dans des néo-canaux appropriés (classification hypercube). Afin de traiter l'image dans des délais raisonnables, nous avons préalablement échantillonné l'image originale entourant largement Quito (1912*3868 pixels de 10 m) en ne conservant qu'un pixel sur 9.

3.4.2.1) Choix des néo-canaux.

La lecture de la littérature ainsi que l'analyse visuelle des différents canaux et néo-canaux de SPOT conduite lors de la délimitation visuelle nous a incités à choisir l'indice

¹ F. DUREAU et A. MICHEL

de végétation et l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique à l'intérieur d'une fenêtre 5*5. La prise en compte simultanée de ces 2 facteurs permet de discriminer la zone urbaine caractérisée par une **activité chlorophyllienne détectable par satellite quasi-nulle** (sauf espaces verts, parcs et stades) et une **hétérogénéité locale forte** (peu de plages homogènes). Ces deux néo-canaux ont été réévalés suivant 2 valeurs d'écart-types autour de la moyenne.

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

3.4.2.2) Choix des seuils.

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

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

La limite urbaine est donc théoriquement confondue, ou du moins incluse, dans la classe 3 (minéral hétérogène) (**Photo 3.4.2**). Après classement, nous avons lissé l'image résultante par convolution majoritaire dans une fenêtre 5*5 pixels, afin de supprimer les zones de faible taille et de ne conserver que les grandes frontières entre classes (**Photo 3.4.3**).

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

Nous avons croisé les classes obtenues à l'issue de la classification avec la limite urbain/rural en 2 classes qui nous sert de référence. On obtient donc 8 classes qui illustrent (**Photo 3.4.4**) et valident notre traitement de détermination automatique de l'aire urbaine. Le **Tableau 3.4.1**, résume quantitativement les résultats. Les nombres expriment le pourcentage de pixels d'une classe (en colonne) inclus ou non à l'intérieur de la limite de la ville définie visuellement (en ligne). Il se lit comme suit : sur les 49% (*resp 56%*) de pixels "végétal homogène" que comporte l'image entière classée (*resp classée et lissée*), 44 % (*resp 50%*) sont situés hors de la limite urbaine et les 5% restants étant localisés à l'intérieur de la limite. *Les nombres en italique se réfèrent à la classification lissée.*

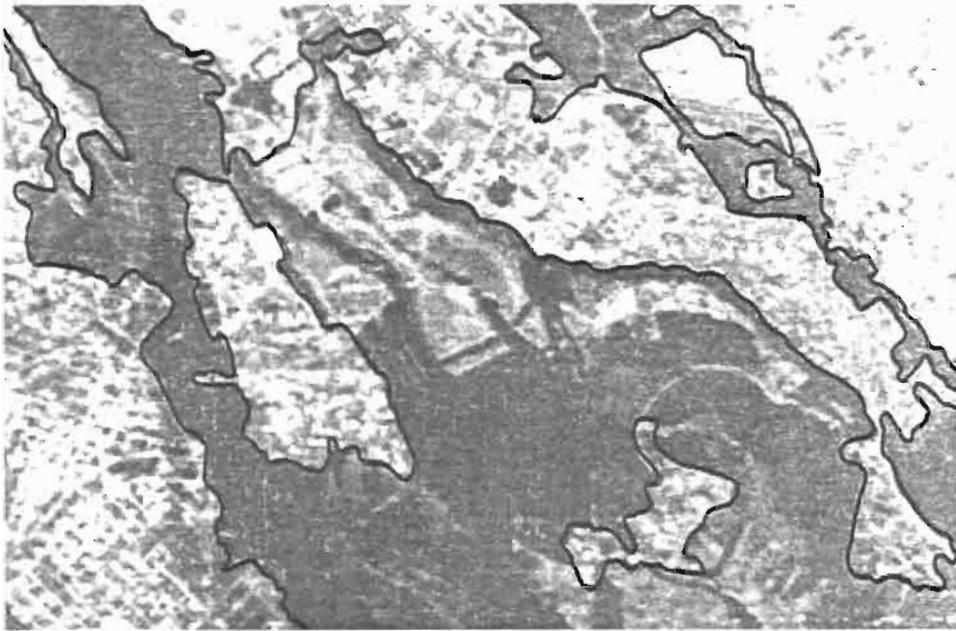


Photo 3.4.1 - Détermination visuelle de la limite urbaine sur un tirage de l'image panchromatique SPOT de Juin 1986 -

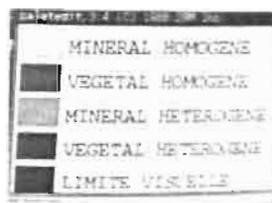


Photo 3.4.2 - Détermination de la limite urbaine; hypercube 4 classes et limite visuelle.
Image échantillonnée 1 pixel sur 9 -



Photo 3.4.3 - Détermination de la limite urbaine; hypercube 4 classes lissé et limite visuelle.
Image échantillonnée 1 pixel sur 9 -

Tableau 3.4.1 - Croisement de la classification et de la limite obtenue visuellement -

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

. Commentaires.

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

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

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

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

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

Très logiquement, cette classe englobe les villes de la périphérie. Cependant, celles-ci ne présentent pas de frontière avec Quito, seules quelques petites zones éparses dans le Nord peuvent ponctuellement créer une ambiguïté quant à la délimitation précise de la limite urbaine.

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

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

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

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

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

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

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

Le pourcentage important de cette classe s'explique par le choix qui a été fait lors de la délimitation visuelle de la ville. Il avait été décidé de prendre en compte une limite englobant toute **continuité** urbaine. C'est précisément le cas dans le Sud de Quito, où l'urbanisation est longtemps présente le long de la route pan-américaine et de la "Vencedores de Pichincha" (**Photo 3.4.5**). Cependant, afin de ne pas créer de toute pièce une densité de bâti ponctuellement forte, il a été convenu d'inclure cette urbanisation filiforme à l'intérieur du découpage de l'îlot par la voirie adjacente. Or, la voirie secondaire délimitant l'îlot se situe loin de cette urbanisation, ce qui a pour effet d'inclure à l'intérieur de la limite déterminée visuellement une très large surface d'espace à vocation agricole. Le traitement simple que nous avons réalisé ne peut bien évidemment pas tenir compte de ces règles de délimitation.

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

Classe 5 - Végétal homogène hors de la ville (44% 50% de la surface totale) -

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

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

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

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

UNE AIDE À LA DÉLIMITATION DE L'AIRES URBAINE À PARTIR D'UN TRAITEMENT SIMPLE D'UNE IMAGE SATELLITE.

Comme l'illustre la **Photo 3.4.2**, la limite de la classe 3 est dans toute la partie Nord, très proche de la délimitation déterminée visuellement. Lorsque l'on érige des règles de délimitation plus complexes s'éloignant de la réalité physique et intégrant l'urbanisation future ou la répartition de la densité, des écarts importants comme ceux rencontrés dans le Sud peuvent apparaître. Cependant, **ce traitement simple permet de définir aisément une limite urbaine pertinente sur des critères physiques constants**, alors que le principal écueil d'une délimitation totalement visuelle sur tirages photographiques consiste à dériver progressivement des règles initialement fixées, en particulier lorsque plusieurs documents différents sont utilisés.

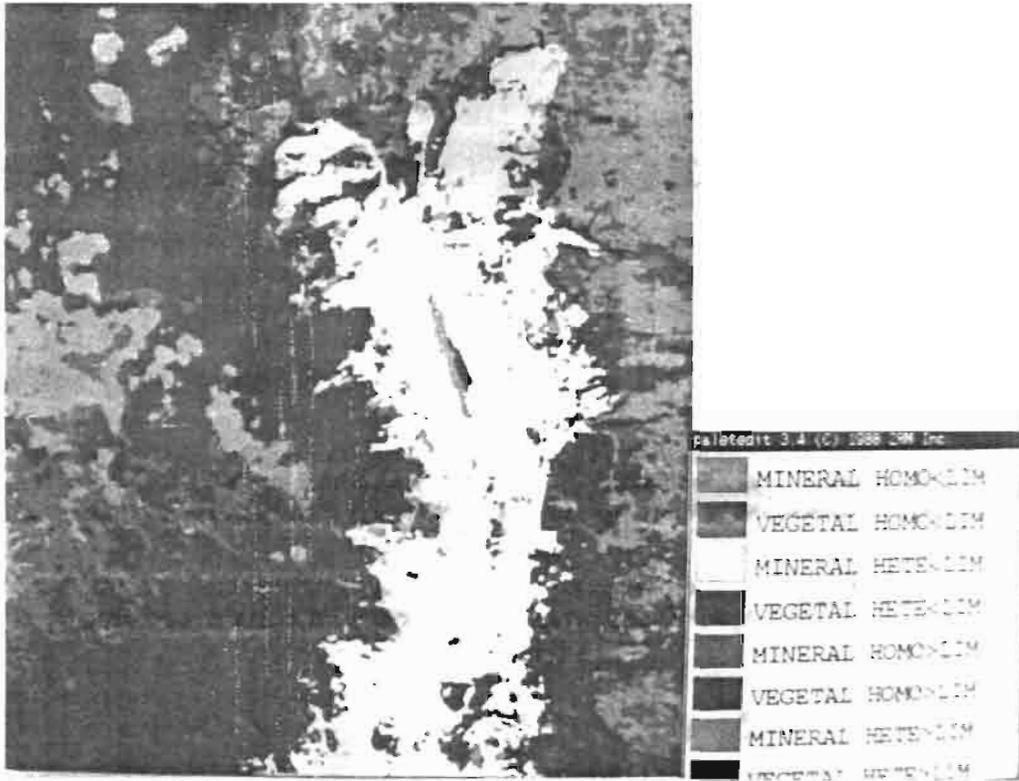


Photo 3.4.4 - Détermination de la limite urbaine;
croisement entre la délimitation automatique
et la détermination visuelle (hypercube 4*2 classes).
Image échantillonnée 1 pixel sur 9 -

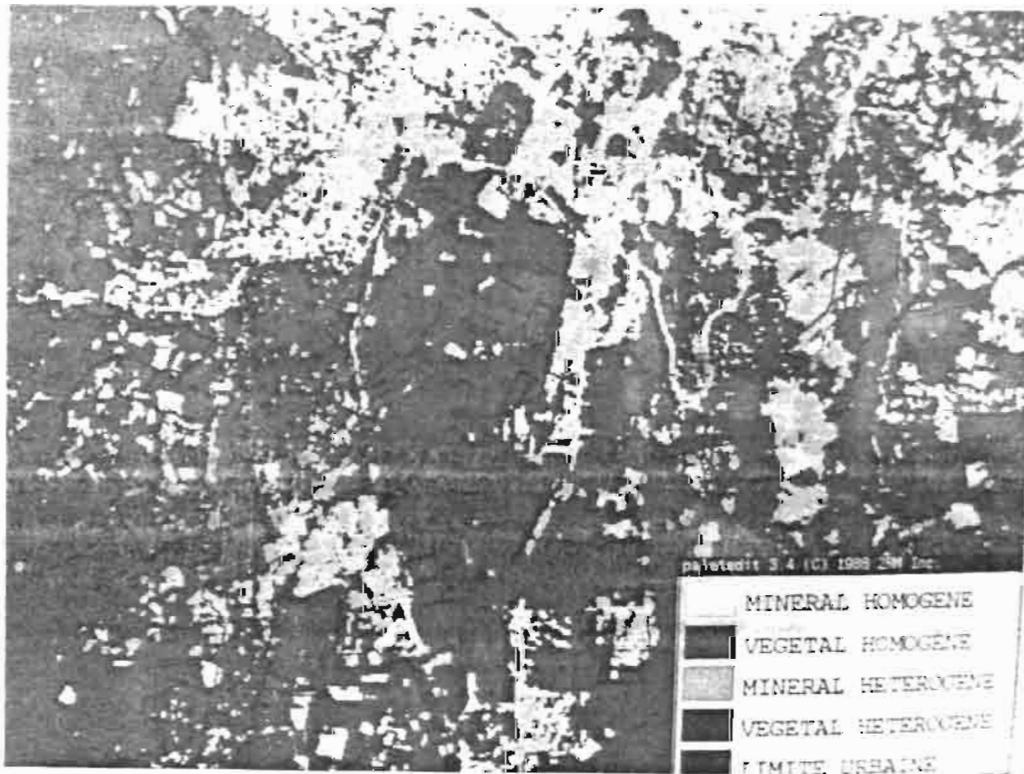


Photo 3.4.5 - Détermination de la limite urbaine;
hypercube 4 classes et limite visuelle.
Extrait du Sud de l'image pixel de 10 mètres -

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

3.4.3) STRATIFICATION VISUELLE À PARTIR D'UNE CLASSIFICATION "DENSITÉ DU BÂTI" CALCULÉE PAR PIXEL.

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

Le zonage à l'intérieur de l'espace urbain a été réalisé à partir d'une copie d'écran représentant une classification de la densité du bâti. Cette classification de type barycentrique en 6 postes a été supervisée en fonction des statistiques descriptives calculées sur l'échantillon de 164 îlots précisément décrits et mesurés¹. Les canaux (XS1) et néo-canaux (Ecart-type local sur panchromatique, Indice de végétation, et Indice de brillance) utilisés pour opérer cette classification ont été choisis en fonction de leur aptitude à rendre compte de la densité du bâti. Les délais d'élaboration de cette classification ont été très courts, l'enquête devant impérativement commencer avant l'hiver 87, pour des raisons essentiellement budgétaires, ce qui explique le peu d'étude préalable réalisé. On s'est donc contenté de reproduire le type de classification expérimenté sur le site de Marseille, en sachant qu'il est toujours possible de tester d'autres classifications en post-stratifiant.

3.4.2.2) Evaluation classique de la classification.

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

¹ En effet, bien que l'échantillon comptât 199 îlots, seuls 164 ont été repérés avec suffisamment de précision et de certitude pour pouvoir servir à l'initialisation de cette classification.

**Tableau 3.4.2 - Classification barycentrique des pixels suivant la densité du bâti.
Matrice de confusion -**

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

La fiabilité de cette classification est :

39% en 6 classes

60% en 3 classes

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

3.4.2.3) Elaboration de la stratification, premiers résultats en terme de gain de précision des estimateurs démographiques.

L'interprétation de cette classification de pixels, a nécessité un important travail de zonage, non seulement en fonction de la valeur des pixels, mais surtout en fonction des associations de valeurs (de la texture) de l'image classée. En effet, il est aberrant de concevoir un indicateur de densité par pixel, et l'on doit tenir compte du voisinage *a fortiori* s'il s'agit d'effectuer un zonage dans l'optique d'une stratification de l'espace. Les plages homogènes de faibles surface n'ont donc pas été détournées. Ce zonage, pour lequel nous avons conservé les 6 postes initiaux a été effectué indépendamment par deux interpréteurs, puis reporté, après confrontation, sur le tirage panchromatique au 1/30.000 préalablement délimité. Les limites entre strates empruntent des frontières naturelles (québradas), ou artificielles (rues) de façon à ne pas couper les unités primaires de l'échantillon que sont les pâtés de maisons

Les résultats qui suivent estiment, mieux qu'une matrice de confusion, la qualité de la stratification effectuée à partir de l'image satellite. Les Tableaux 3.4.3 et 3.4.4 sont extraits de la thèse de O. BARBARY, qui a testé les différentes stratifications disponibles (sur la base de l'évaluation de la densité de l'espace bâti) et les a comparées les unes aux autres à l'aide du coefficient de variation de quelques variables démographiques. *Ces calculs ont été effectués sur un sous-échantillon de l'échantillon "morphologie" comportant 50 îlots.*

Tableau 3.4.3 - Liste des variables démographiques utilisées pour la comparaison des gains de variance -

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

Signification des différentes stratifications.

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

Stratifications DENSBATIM et DENSBATIME : stratifications issues de la classification de l'image SPOT. Alors que la stratification DENSBATIM est directement issue de la stratification brute, la stratification DENSBATIME est réajustée en ce sens que l'on vérifie que l'unité enquêtée n'est pas atypique de sa strate d'affectation.

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

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

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

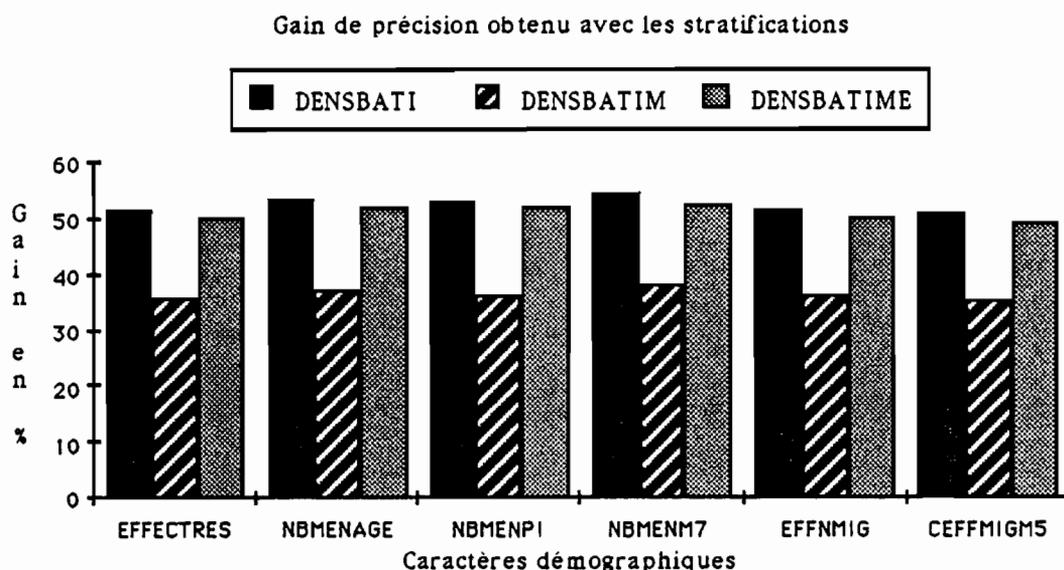
Ces choix découlent du fait que le mode de tirage choisi (par point sur l'image) implique cette probabilité et des conclusions de O.BARBARY.

Tableau 3.4.3 : Coefficients de variation des estimations des variables démographiques avec différentes stratifications. (Programme VARECH sous DBASE III)

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

Quelle que soit la variable démographique considérée, la stratification de l'espace établie à partir de l'image satellite (DENSBATIME) induit un **gain d'environ 50%** du coefficient de variation, soit **une diminution de la variance des estimateurs d'un facteur d'environ 4,5 par rapport à un sondage non stratifié**. La stratification DENSBATIME apporte des gains très comparables à ceux de la stratification "de référence" DENSBATI (enquête morphologie), comme le souligne O.BARBARY, "la différence entre les deux stratifications n'excède pas 1,5 % du coefficient de variation non stratifié".

Figure 3.4.1 - Gains de précision en fonction des différentes stratifications utilisées -



A l'issue de cette étape, nous sommes donc parvenus à **délimiter notre base de sondage** puis à **élaborer une stratification à partir d'une image satellite** qui soit applicable à notre problématique d'enquête démographique par sondage. Cette enquête (démographie/migrations) dont le plan de sondage et le déroulement sont décrits succinctement en **Annexe 3.8**, a été effectuée sur un échantillon tiré à partir de l'image satellite stratifiée. Les intervalles de confiance calculés témoignent de l'important apport imputable à la stratification issue de la classification "densité du bâti"

Les gains estimés sont appréciables et confirment de façon définitive le bien-fondé de notre démarche de stratification de l'espace urbain à partir de documents satellitaires. Néanmoins, il serait bon de tester d'autres stratifications et tenter d'améliorer ces résultats, pour évaluer la fiabilité des classifications d'images satellite que permet la prise en compte de zones en milieu urbain, ce qui nous fournira les outils nécessaires pour comparer sur une même base les capteurs LANDSAT TM et SPOT-HRV. Ce sera l'objet des deux prochains chapitres.

3.5).CLASSIFICATION DES ZONES EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU BÂTI

L'expérience réalisée à Marseille, concernant la classification suivant la densité de l'espace bâti, nous conduit à réitérer l'approche consistant à considérer comme individu à classer sur image satellite des zones urbaines et non des pixels. Nous rappelons qu'une telle démarche s'est soldée par un gain de précision très sensible quant à la fiabilité de la classification.

L'extraction de voirie décrite dans le chapitre 3.2, n'a pour objet que de délimiter des zones sans faire appel à un critère proprement radiométrique qui aurait permis de segmenter automatiquement l'image. En effet, notre but est de classer l'image en fonction d'une densité d'espace bâti mesurée sur échantillon. Les entités à classer sont les zones ainsi délimitées.

Les pixels 4-connexes compris à l'intérieur d'un ensemble de réseaux de voirie ont été étiquetés (recodés suivant la même valeur). Nous avons ainsi identifié 9.785 zones à l'intérieur de notre première fenêtre d'étude.

Plusieurs types de classifications ont été testés :

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

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

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

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

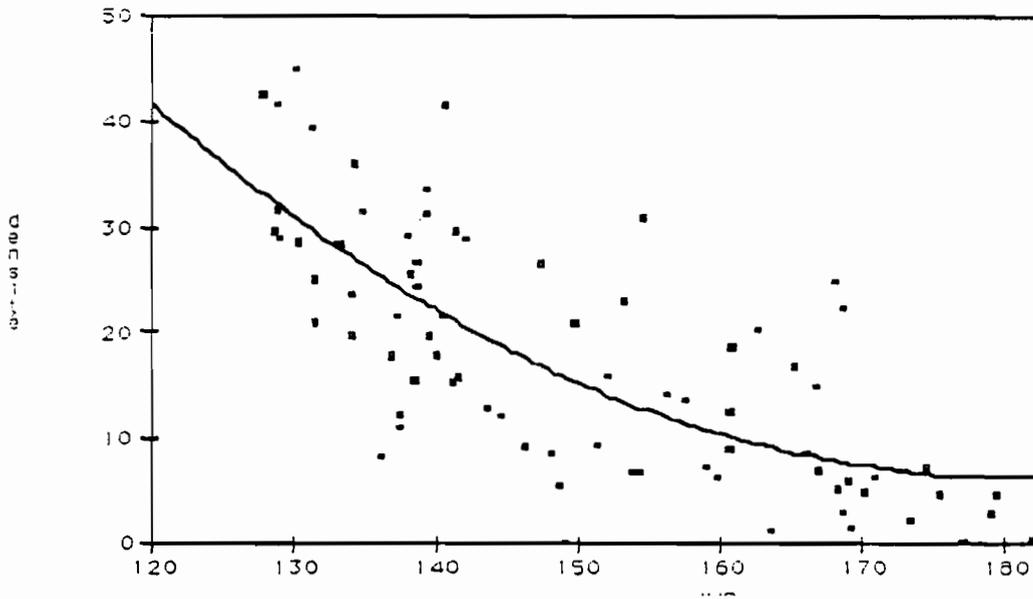
3.5.1).RÉGRESSION POLYNOMIALE DE L'INDICE DE VÉGÉTATION.

A l'instar des classifications effectuées sur l'image Thematic Mapper de Marseille, nous avons cherché quel est le canal, néo-canal ou indice le plus corrélé avec la densité du bâti estimé sur notre échantillon d'initialisation. De même, l'indice de végétation s'est avéré comme le plus pertinent pour évaluer la densité du bâti. Pour un seuil de signification à 99 % nous obtenons les résultats résumés dans le Tableau 3.5.1.

Tableau 3.5.1 - Paramètres de la régression "densité du bâti" en fonction de l'indice de végétation -

CANAUX	CORRELATION	ECART-TYPE résiduel	S.C.E résiduelle	F de FISHER
IVG	-0.751	7.8	4928	52.39
DENSITE = 0.01 × IVG² -3.47 × IVG + 320				

Figure 3.5.1 - Régression polynomiale entre l'indice de végétation et la densité du bâti dans les îlots de l'échantillon morphologie -



Ces coefficients ont été appliqués à chaque moyenne (une par zone) calculée à partir de l'indice de végétation. Nous avons donc obtenu une valeur (une "densité du bâti") pour chacune des zones de notre image. En fonction des seuils calculés à partir des îlots de l'échantillon pour chacune des 6 modalités de densité du bâti, nous avons affecté chaque zone à une des 6 classes (**Photo 3.5.1**).

a) Validation de la régression polynomiale.

Avant de procéder à la validation de cette classification, nous avons opéré sur l'image un lissage majoritaire **conditionnel**. Les pixels délimitant la voirie n'offrant plus aucun intérêt de notre point de vue, la valeur majoritaire à l'intérieur d'une fenêtre 3*3 leur a été affectée. La **Photo 3.5.2** illustre le résultat d'un tel lissage. Les valeurs qui suivent représentent la fréquence croisée (en pourcentage) des îlots de l'échantillon de validation référencés dans la modalité "Référence" et classés dans la modalité "classe".



Photo 3.5.1 - Classification de zones suivant la densité du bâti en 6 classes, régression polynomiale en fonction de l'indice de végétation, avec limites de zones-



Photo 3.5.2 - Classification de zones suivant la densité du bâti en 6 classes, régression polynomiale en fonction de l'indice de végétation -

Tableau 3.5.2 - Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe), régression polynomiale de l'indice de végétation -

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

Les valeurs sont exprimées en pourcentage.

Deux principales confusions apparaissent, d'une part entre la classe 1 et la référence 2 (14%), d'autre part entre la classe 4 et la référence 3.

La fiabilité de cette classification est donc :

- 38 % en 6 classes
- 72 % en 3 classes obtenues en regroupant les classes 1 et 2, 3 et 4, et 5 et 6.

b) Critique de la référence.

Lorsque l'on analyse un histogramme des fréquences de densité du bâti calculée par modalité, on s'aperçoit qu'il apparaît un recouvrement entre les 6 modalités. Il est alors possible de redéfinir des modalités aux seuils recalculés en fonction des bornes de l'histogramme, la règle de décision étant de séparer les modalités en excluant le moins possible d'individus appartenant à la modalité pré-définie. On obtient alors la matrice de confusion suivante.

Tableau 3.5.3 - Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe), régression polynomiale de l'indice de végétation -

Remarques : Les seuils des modalités de référence ont été redéfinis.

Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Référence 1	3%	1	1	0	0	0
Référence 2	0	22%	5	3	2	0
Référence 3	0	4	9%	9	10	0
Référence 4	0	0	0	3%	10	0
Référence 5	0	0	3	2	9 %	1
Référence 6	0	0	0	1	1	1%

Les valeurs sont exprimées en pourcentage.

La fiabilité de cette classification devient donc **47 % en 6 classes**, ce qui améliore sensiblement la fiabilité de cette classification comparée avec la précédente "référence". Cependant, la classification sur-estime toujours la densité calculée sur échantillon, en particulier pour les classes Moyenne et Forte pour lesquelles la confusion est maximum par rapport aux modalités de référence recalculées. Un tel résultat nous amène à émettre l'hypothèse d'une non continuité de la régression densité du bâti / valeur radiométrique.

Les coefficients de régression ne semblent effectivement pas appropriés quelle que soit la valeur radiométrique rencontrée. Il serait alors possible d'envisager plusieurs coefficients de régression en fonction de l'intervalle de valeurs radiométriques dans lequel on se situe. Trois intervalles regroupant les classes Non bâti et Très faible, Faible et Moyenne, et Forte et Très forte et donc trois équations de régressions, pourraient peut-être améliorer la connaissance de la relation moyenne des luminances / densité de l'espace bâti.

Cependant, compte tenu de la précision de la mesure du coefficient de densité du bâti et de la diagonale chargée de la matrice de confusion révélatrice d'un problème de seuillage des modalités, ces résultats peuvent être considérés comme bons.

3.5.2) ANALYSE DISCRIMINANTE SUIVANT LA DENSITÉ DU BATI.

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

Alors que la méthode précédente prend en compte le **pourcentage de surface bâtie** par îlot, valeur peu précise du fait de l'imprécision de la surface totale de l'îlot, l'analyse discriminante tient compte uniquement d'une **modalité** (de densité du bâti) pré-définie. L'appréciation de la densité du bâti (détermination des modalités de chaque îlot de l'échantillon) a été faite par plusieurs observateurs à partir des photographies prises lors de l'enquête sur le terrain ainsi que par les enquêteurs. La distinction opérée entre les modalités s'avère donc paradoxalement plus fine que le résultat du seuillage du coefficient de densité du bâti calculé précédemment.

Cependant, à l'intérieur de l'échantillon des 87 îlots, une grande disparité règne concernant les effectifs des différentes modalités. Il a donc été nécessaire de regrouper certaines modalités afin de ne pas traiter de phénomènes marginaux. La modalité *non bâti* (6 individus) a été regroupée avec la modalité *très faible* et la modalité *très forte* (5 individus) avec la modalité *forte*. Il demeure ainsi 4 modalités, ce qui d'après les travaux de O.BARBARY sur Marseille, paraît suffisant dans une optique de stratification.

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

Les 2 premiers axes expliquent 96 % de la variance totale, il n'est donc pas nécessaire de calculer le suivant. Nous noterons que le premier axe seul épuise plus de 84 % de l'inertie du nuage.

Tableau 3.5.4 - Coefficients des variables centrée réduites dans l'équation linéaire des axes discriminants la densité du bâti -

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

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

Il est utile de calculer la distance entre les 4 groupes afin de vérifier la bonne séparabilité des classes. La distance calculée est de *MAHALANOBIS*.

Tableau 3.5.5 - Matrice des distances entre centres de gravité des classes issues de l'analyse discriminante, densité du bâti -

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

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

Tableau 3.5.6 -Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe).

Les valeurs sont exprimées en pourcentage -

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

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

La classification retenue est de type barycentrique. Nous avons donc classé les zones en fonction de leur **moyenne** radiométrique dans les 2 néo-canaux les plus discriminants pour évaluer la densité du bâti (**Photo 3.5.3** et **Photo 3.5.4**). Cette classification a été initialisée sur 4 classes (du non bâti au très dense) à partir des 87 îlots de l'échantillon d'initialisation.



Photo 3.5.3 - Densité du bâti,
analyse discriminante : axe 1 -



Photo 3.5.4 - Densité du bâti,
analyse discriminante : axe 2 -

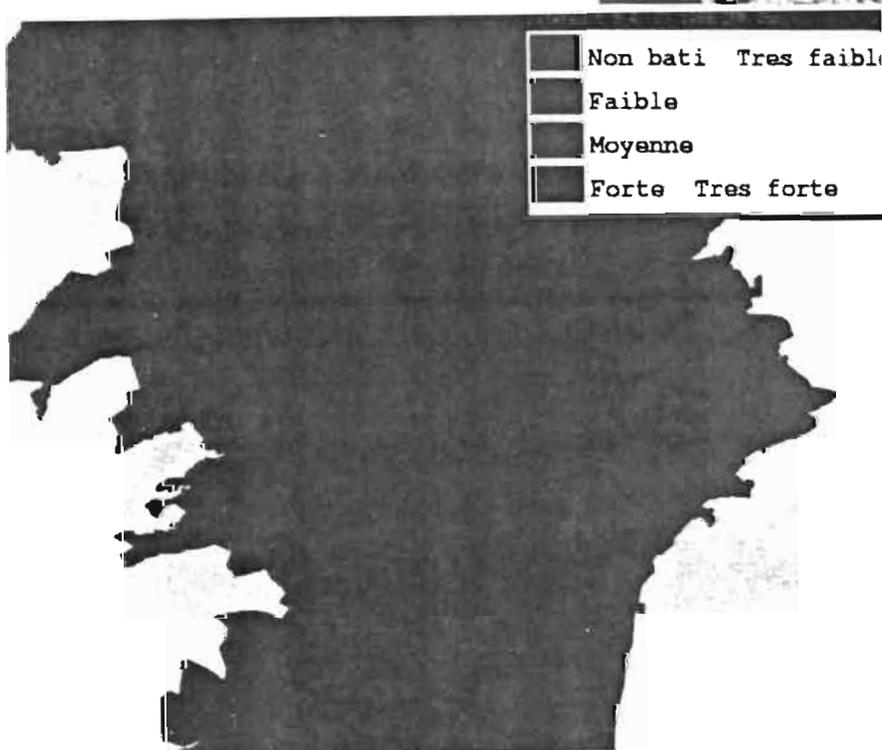


Photo 3.5.5 - Classification
de zones suivant la densité du bâti
en 4 classes, analyse discriminante -

. Validation.

Le même filtrage majoritaire conditionnel que décrit précédemment a été appliqué à l'image des zones classées préalablement à l'évaluation de la fiabilité de la classification. Le résultat obtenu est illustré par la **Photo 3.5.5**.

Tableau 3.5.7 - Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe).-

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

Le pourcentage d'ilots bien classés, exprimé en pourcentage, se chiffre à :

57 % pour une classification en 4 postes

71 % pour une classification en 3 postes

La confusion la plus importante se situe entre la classe 3 et la référence 2.

UNE JUSTIFICATION DE L'"EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE" : L'AMÉLIORATION SENSIBLE DE LA CLASSIFICATION SUIVANT LA DENSITÉ DU BATI.

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

A l'instar des résultats enregistrés lors de la phase d'expérimentation marseillaise, **la classification de zones s'avère sensiblement plus performante que la classification de pixels** pour évaluer la densité du bâti. Ce constat justifie à posteriori les traitements plus lourds engagés pour **segmenter** l'image satellite et relativise donc la médiocre performance de l'extraction automatique de la voirie.

Lorsque l'on compare visuellement les deux types de classifications (régression et analyse discriminante), on ne note pas de différences sensibles.

En terme de fiabilité, les résultats des classifications sont comparables à ceux enregistrés lors de l'expérimentation marseillaise avec une image **Thematic Mapper**. Cela n'est pas vraiment étonnant : notre méthode consiste à effectuer un lissage **raisonné** par la moyenne à l'intérieur de zones, on perd alors la finesse spatiale de l'imagerie SPOT. Par contre, si l'on veut obtenir une typologie de l'espace urbain en se basant comme cela a été fait à Marseille sur une étude précise des distributions statistiques à l'intérieur des zones, on est en droit d'attendre des résultats à la fois une typologie différente et une meilleure discrimination des types de bâti.

3.6) TYPOLOGIE DES ESPACES BATIS À PARTIR DES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES.

De la même façon que nous avons étudié la typologie qu'il était possible d'élaborer à partir d'une image Thematic Mapper, nous allons à présent tester la finesse de la nomenclature qu'il est raisonnable d'escompter de l'analyse fine de la radiométrie issue d'une image SPOT. En effet, les résultats énoncés lors de notre étape de mise au point de la méthode, mettaient en exergue le gain important inféré par la prise en compte des différences internes à la ville décrites par une nomenclature appropriée à l'outil radiomètre. Comme dans le cas de Marseille, cette analyse se base sur l'analyse des quantiles, description statistique fine de la distribution radiométrique, des 164 îlots de l'échantillon issus de l'enquête "morphologie".

Travailler à partir d'un échantillon tiré de façon systématique sur un plan nous assure d'une bonne représentativité des différents types urbains usuellement considérés, et d'une répartition équitable dans l'espace. Cette méthode se situe donc aux antipodes de celles qui travaillent sur un échantillon déterminé de façon raisonnée¹ et qui ne permettent donc de retrouver au mieux que ce que l'on connaît déjà, décrit par une typologie prédéterminée et a priori inadaptée.

On répertorie de nombreuses typologies tendant à décrire les villes, cependant elles demeurent toutes attachées soit à une problématique spécifique, soit à un outil de mesure particulier. Les typologies généralement rencontrées dans la littérature consacrée à la télédétection urbaine sont le plus souvent issues de classifications de pixels; les profils radiométriques d'îlots tels que nous les définissons ici n'ont pas été étudiés et il est donc indispensable de chercher non pas à obtenir une typologie pré-existante, mais bien de déterminer quel type de nomenclature on peut définir à partir de ces informations radiométriques.

Notre démarche se veut donc essentiellement non supervisée, puisqu'il s'agit dans un premier temps de mettre en évidence les facteurs principaux qui émergent "naturellement" d'une analyse de l'espace des quantiles radiométriques, puis d'agglomérer les individus (pâtés de maisons) en les regroupant, afin de déboucher sur une typologie de l'espace urbain telle que l'on peut l'obtenir directement et uniquement à partir d'une image satellite.

Outre le résultat immédiat que l'on en attend, une telle démarche nous fournira des éléments permettant de comparer l'aptitude des deux satellites SPOT et Thematic Mapper à construire une typologie de l'espace bâti.

3.6.1) PRÉSENTATION.

3.6.1.1) Présentation des deux échantillons - Nature des individus.

Les individus analysés, puis classés, sont des îlots (au sens pâtés de maison).

Nous avons scindé l'échantillon de l'enquête "morphologie" en deux groupes (fichiers) d'après leur modalité de densité de l'espace bâti (densément bâti regroupe les modalités *moyenne, forte et très forte* et peu densément bâti les modalités *très faible et faible*)

- Les îlots appartenant à la modalité *faible*, mais présentant effectivement une densité moyenne (220, 233, 266) ont été affectés au fichier des îlots densément bâtis.

Ont été exclus de l'étude :

- les îlots appartenant à la modalité *non bâti* (113,165, 227, 241, 268, 358),

¹ A ce propos, se reporter à l'article de M.L. DE KEERSMAECKER, 1987 - Stratégie d'échantillonnage des données terrain intégrées dans l'analyse des images satellitaires, Espace géographique, N° 3, p 195-205.

- Les îlots appartenant à la modalité, *très faible* mais apparaissant effectivement comme trop faiblement bâti pour que les luminances induites par les constructions puissent avoir un effet observable (112, 118, 125, 354).

De par leur contenu presque uniquement végétal, l'ensemble de ces îlots participent de façon trop importante à la création des premiers axes factoriels pour que l'on puisse étudier de façon fine la typologie des îlots restants.

Les îlots sont **précisément** décrits quant à leur contenu (taille et nature des principaux éléments constituant) par des fiches provenant de l'enquête; par ailleurs, il est toujours possible de se référer aux photographies de terrain pour affiner la compréhension des fiches de l'enquête.

3.6.1.2) Présentation des quantiles radiométriques - Nature des variables.

Comme dans le cas de Marseille, les variables sont des quantiles définis par équipopulation sur l'ensemble de l'échantillon, tous individus confondus. Les bornes définissant chaque quantile ne sont donc pas déterminées en fonction d'une thématique particulière.

Pour cette étude, nous avons sélectionné les trois canaux du mode multispectral, le canal panchromatique, ainsi qu'un indicateur de transition (écart-type local calculé sur le canal panchromatique à l'intérieur d'une fenêtre glissante 5*5 pixels).

Tableau 3.6.1 - Bornes des quantiles dans chaque canal -

	Quantile 1	Quantile 2	Quantile 3	Quantile 4	Quantile 5
XS1	0-41	42-47	48-55	56-66	67-255
XS2	0-26	27-32	33-41	42-52	53-255
XS3	0-60	61-69	70-80	81-101	102-255
Pa	0-38	39-45	46-55	56-69	70-255
ECT	0-2	3-4	5-7	8-13	14-255

3.6.1.3) Corrélations entre les différentes variables soumises à l'analyse factorielle.

Outre les très fortes corrélations **attendues** des canaux XS1, XS2 et panchromatique entre eux, on retiendra des faits plus inhabituels et que seule une étude aussi fine de la radiométrie peut mettre en évidence :

- l'écart-type local est moins corrélé avec les variables radiométriques lorsque l'on considère le sous-échantillon densément bâti. L'apport de cette variable sera donc plus important en milieu densément bâti.

- dans ce même sous-échantillon, les premiers quantiles des canaux du visible présentent une particularité intéressante que l'on peut résumer par le tableau ci-dessous.

Tableau 3.6.2 - Coefficients de corrélation dans le spectre visible -

Quantile	Echantillon	XS 21	PA 1
XS 11	Peu dense	.758	.915
	Dense	-.025	.963
XS 21	Peu dense		.842
	Dense		-.020

Contrairement aux autres quantiles de ces mêmes canaux, dans le sous-échantillon densément bâti, les très faibles valeurs du canal "vert" sont totalement indépendantes des très faibles valeurs "rouge", mais fortement corrélées avec les très faibles valeurs du panchromatique. On note un phénomène identique entre les très faibles valeurs du canal "rouge" et les très faibles valeurs du canal panchromatique. Cela est d'autant plus remarquable que les coefficients de corrélation entre quantile de même rang pour ces différents canaux du visible varient entre 0,915 et 0,995 pour l'échantillon à tendance végétale et 0,729 à 0,979 en ce qui concerne l'échantillon densément bâti.

La différenciation par histogramme bidimensionnel fait apparaître que ce phénomène peut être attribué aux espaces plantés d'eucalyptus, qui présentent cette curieuse propriété spectrale.

3.6.1.4) Type de classification.

Nous avons mené une classification hiérarchique ascendante (CAH) sur les îlots étudiés par analyse factorielle ; une limitation (nombre de variables) due au logiciel de statistique ne nous a pas permis de classer les individus en fonction des quantiles initialement définis, aussi les variables à partir desquelles a été effectuée la classification sont les coordonnées des individus dans l'espace des cinq premiers facteurs de l'AFC.

3.6.2) TYPOLOGIE DES ILOTS DENSÉMENT BATIS.

3.6.2.1) Analyse factorielle des correspondances des îlots densément bâtis.

Tableau 3.6.3 - Contribution des variables à l'inertie totale expliquée par les axes factoriels : échantillon des îlots densément bâtis -

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Cion relative	45,5 %	16,4 %	10,3 %	05,6 %	05,1 %
Cion cumulée	45,5 %	61,9 %	71,4 %	77,0 %	82,1 %
Cion relative Visible	71,7 %	40,7 %	11,5 %	30,6 %	19,1 %
Cion relative I-R Proche	18,8 %	40,2 %	13,3 %	08,7 %	71,6 %
Cion relative Texture	09,5 %	19,1 %	75,2 %	60,7 %	09,3 %

. Interprétation des axes factoriels.

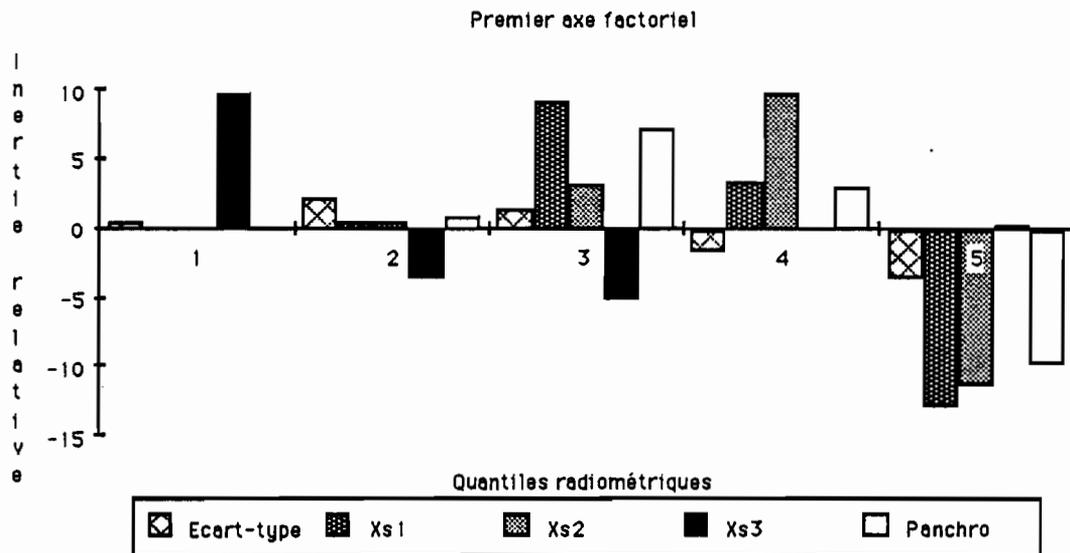


Figure 3.6.1 - Contribution relative des variables : axe factoriel 1 -

Ce premier facteur, qui explique près de la moitié de l'inertie du nuage, est principalement dû aux canaux du visible qui totalisent 71,7 % de l'inertie. Il affirme une opposition entre les très fortes valeurs, et les valeurs fortes ou moyennes dans le visible ainsi que les très faibles valeurs dans le proche infra-rouge (Figure 3.6.1).

C'est donc un axe qui rend essentiellement compte de la brillance dans le visible et qui oppose logiquement les îlots densément bâtis de type "centre ville colonial" à la toiture de tuile très foncée, îlot N° 224 (Photo 3.6.1) à un îlot industriel constitué uniquement d'entrepôts recouverts d'Eternit, îlot N° 353 (Photo 3.6.2).

L'interprétation du second facteur est plus délicate, puisqu'elle fait intervenir la plupart des canaux, mis à part le panchromatique (Figure 3.6.2). On note cependant une prépondérance du canal XS3 (40,2% de la variance du second facteur) et en particulier des fortes valeurs de ce canal (quatrième quantile).

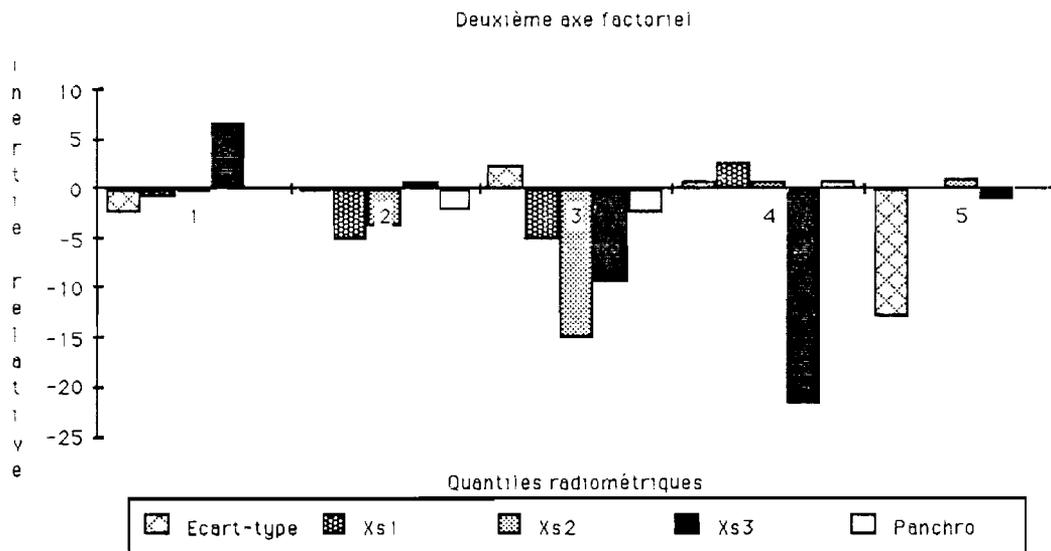


Figure 3.6.2 - Contribution relative des variables : axe factoriel 2 -

Cet axe voit la décroissance des valeurs dans l'infrarouge proche, il semble donc pouvoir être interprété comme l'axe de la "minéralisation / végétalisation". De plus, les individus qui contribuent de façon significative à son inertie, sont les seuls du sous-échantillon qui combinent espaces végétaux et espaces minéraux importants et bien distincts, îlots N° 252 et 214 (Photo 3.6.3)

L'indicateur de transition, ou tout du moins l'écart-type calculé sur le canal panchromatique, est sans conteste la variable qui génère ce troisième facteur (Figure 3.6.3). Plus de la moitié de l'inertie expliquée par cet axe est imputable aux très fortes valeurs de cet indicateur.

Photo 3.6.4



Photo 3.6.5.

Photo 3.6.4, 3.6.5, 3.6.6.-
Limite de quelques îlots de l'échantillon
morphologie sur la composition colorée
de l'image SPOT de Juin 1986 -

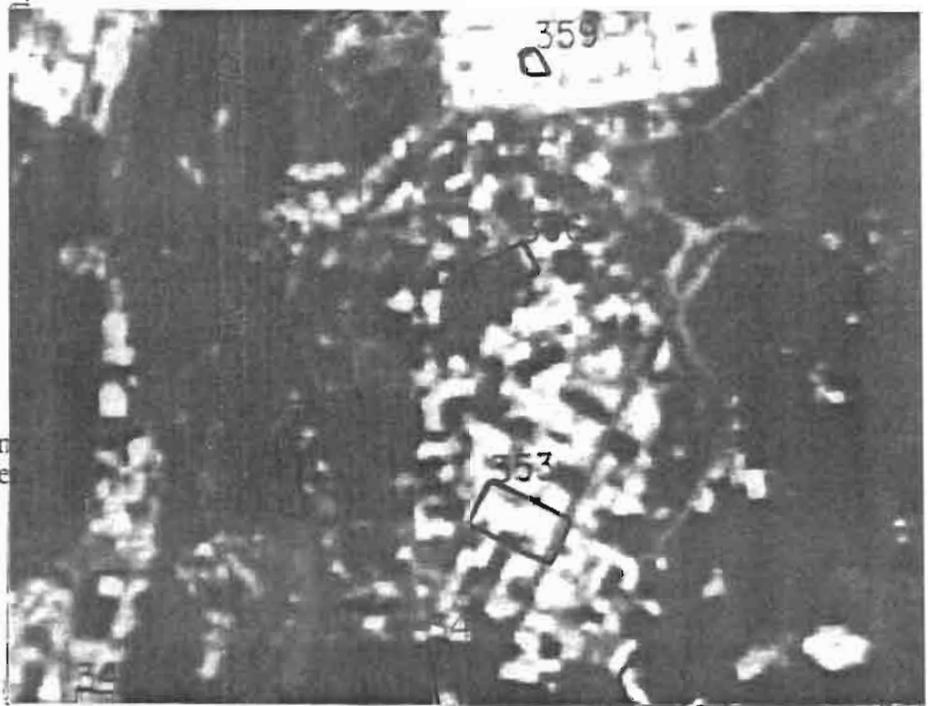
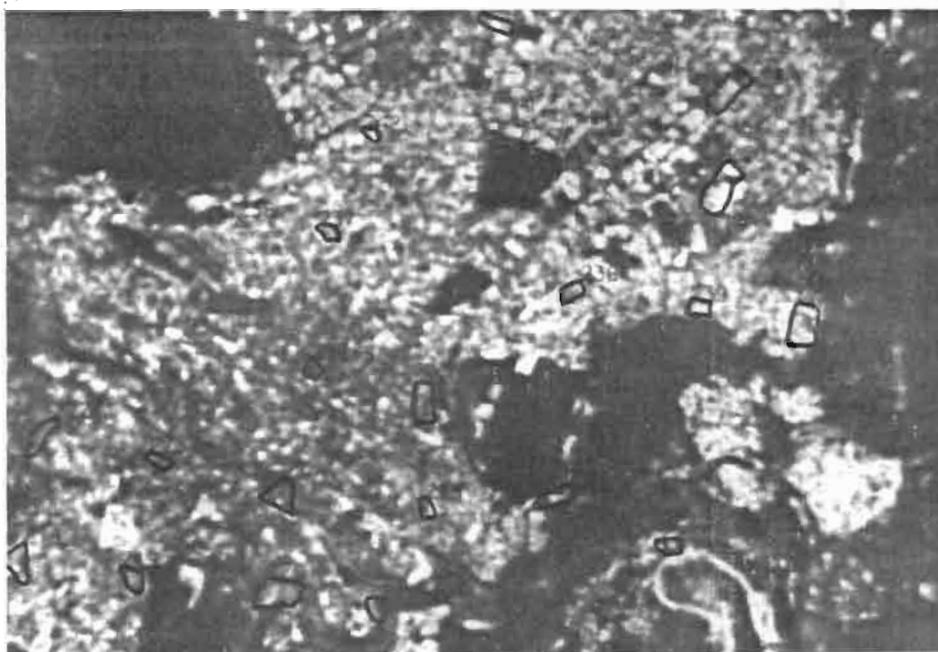


Photo 3.6.6.



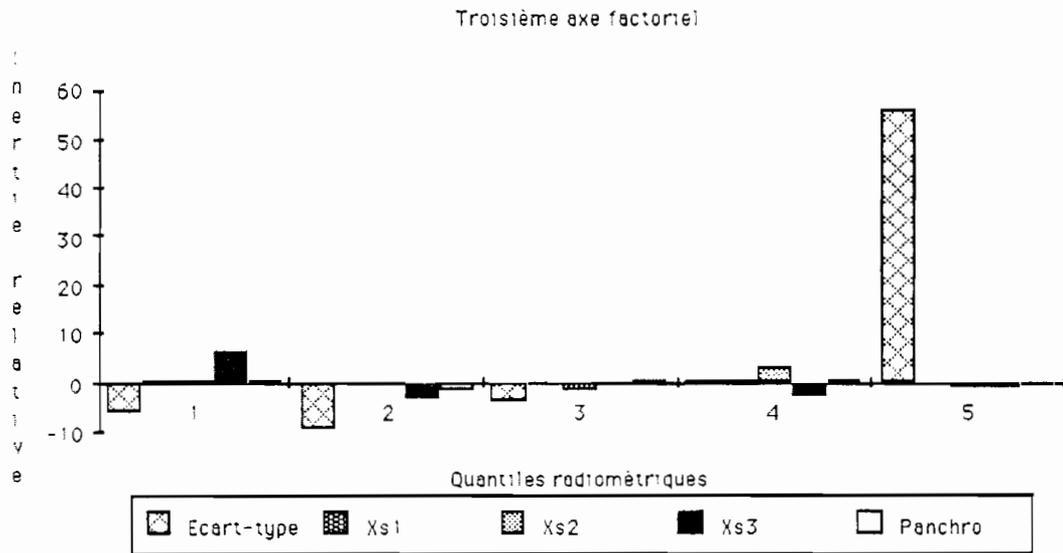


Figure 3.6.3 - Contribution relative des variables : axe factoriel 3 -

Un îlot contribue de façon importante à la création de ce facteur, il s'agit d'un entrepôt au toit de zinc très réfléchissant bordé de voies couvertes de bitume; cet individu, îlot N°136, possède donc un cinquième quantile "de transition" très important (69%). Alors que de fortes valeurs dans les premiers quantiles de cet indicateur peuvent s'interpréter comme l'assurance que l'individu est à la fois homogène et fondu dans son environnement, des fortes valeurs dans les derniers quantiles peuvent être représentatives soit d'un îlot intrinsèquement très hétérogène, soit d'un îlot homogène, mais présentant une apparence très tranchée par rapport à son environnement immédiat. Il est important de noter ici, que cet indice a été calculé à partir du canal panchromatique, sensible à la brillance dans le spectre visible, mais ne distinguant pas dans les valeurs faibles la végétation du bitume.

C'est ce même indicateur qui contribue de façon prépondérante à la création du quatrième axe (**Figure 3.6.4**) mais ici, il oppose les **fortes valeurs de transition** aux autres valeurs de cet indicateur contrairement à l'axe précédent qui présente plutôt une "variation graduellement ordonnée" de cet indicateur.



Photo 3.6.1

Photo 3.6.2.

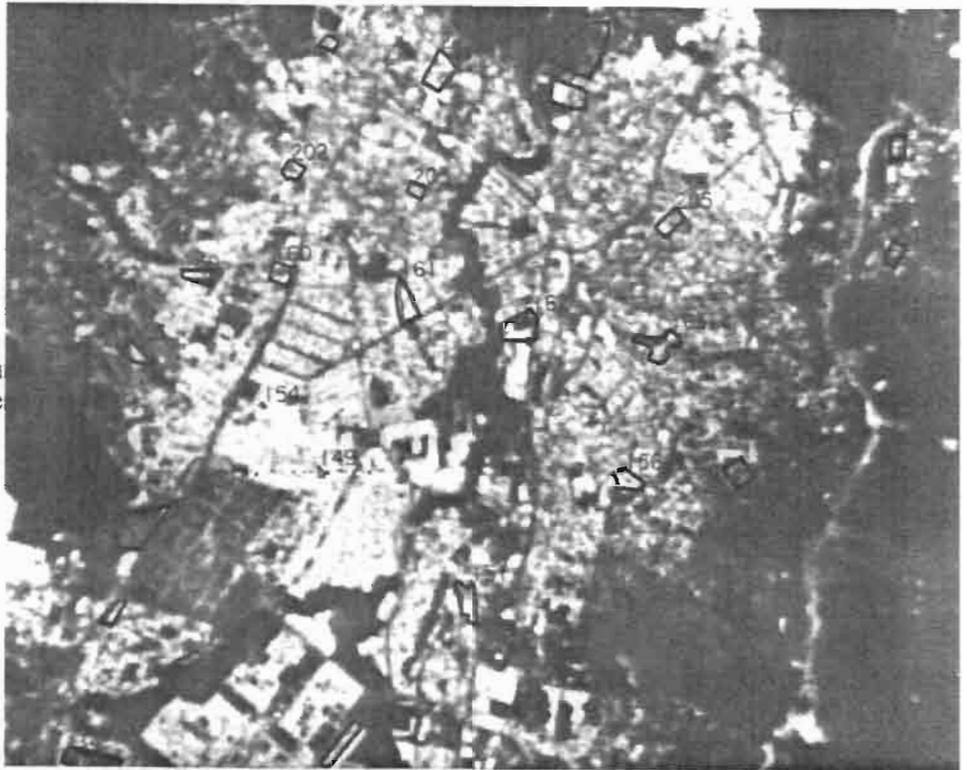


Photo 3.6.1, 3.6.2, 3.6.3.-
 Limite de quelques îlots de l'échantillon
 morphologie sur la composition colorée
 de l'image SPOT de Juin 1986 -



Photo 3.6.3.

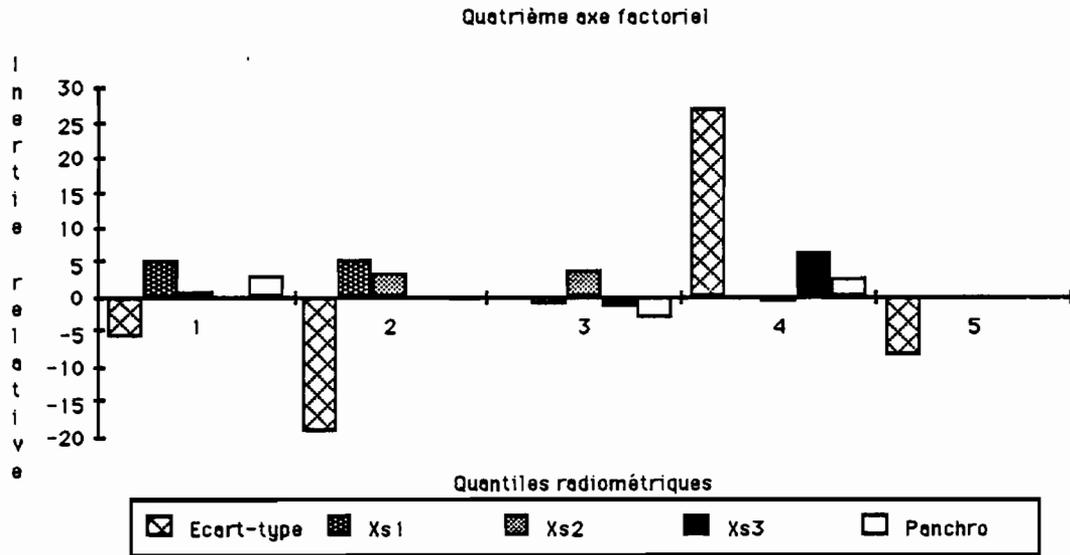


Figure 3.6.4 - Contribution relative des variables : axe factoriel 4 -

Il semblerait que cet axe opère une distinction entre hétérogénéité interne, filot N° 213 (Photo 3.6.5) à contribution positive et hétérogénéité externe, filot N° 136, à contribution négative.

Une différenciation interne à l'infra-rouge proche explique près des 3/4 de l'inertie du cinquième facteur (Figure 3.6.5).

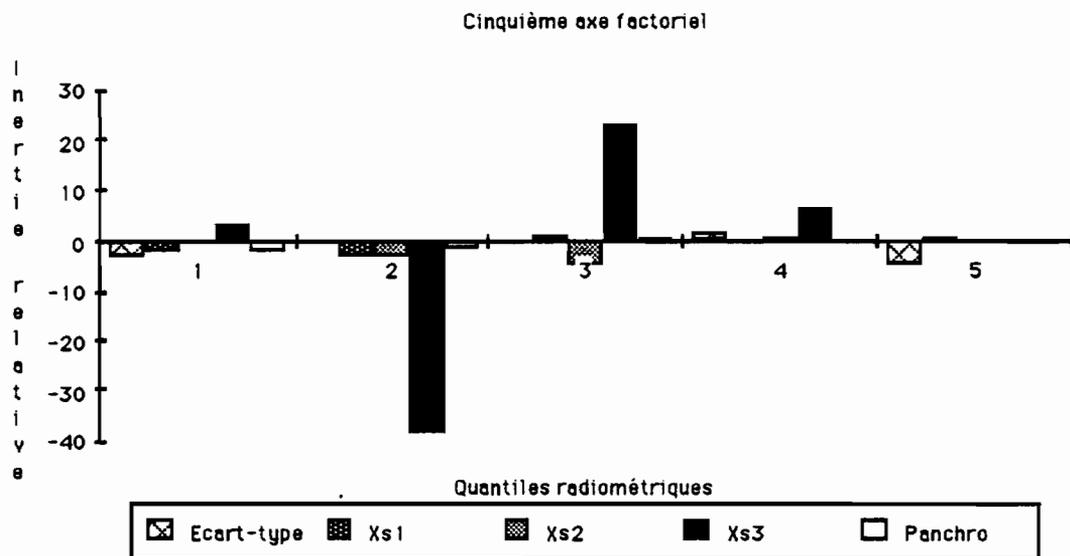


Figure 3.6.5 - Contribution relative des variables : axe factoriel 5 -

L'opposition est cristallisée entre le deuxième et le troisième quantile de ce canal. L'explication thématique de cette opposition ne paraît a priori pas évidente.

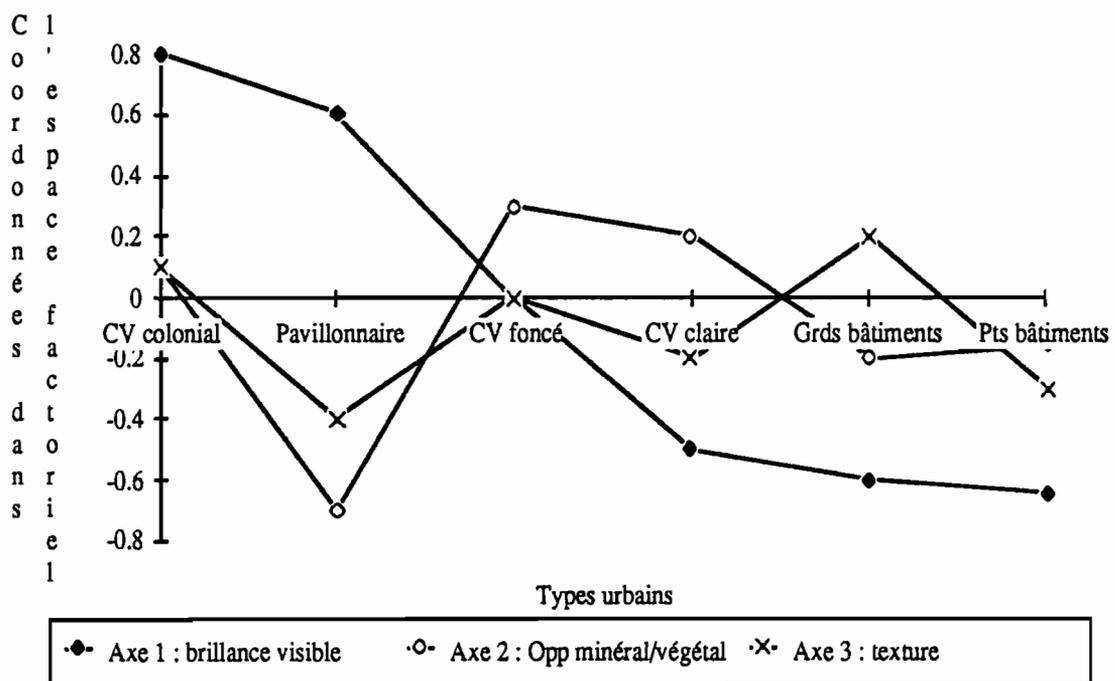
3.6.2.2) Classification hiérarchique ascendante des îlots densément bâtis.

Une segmentation en 13 classes de l'arbre issu de la classification ascendante hiérarchique permet de retrouver la plupart des différenciations internes de la ville détectables sur une composition colorée. Il est nécessaire de descendre jusqu'à ce niveau car les premières classes qui apparaissent ne distinguent que les individus minoritaires, et non des groupes d'individus, qui se singularisent le plus sans définir un type d'occupation de l'espace reconnaissable et identifiable. Cependant, il est possible, dans un second temps, de réunir ces classes et de déboucher sur quelques grandes catégories significatives d'un mode d'occupation du sol propre à Quito.

Cette partition de notre espace en 13 classes permet de conserver un pourcentage de variance inter-classe/totale élevé : 89%.

La Figure 3.6.6 qui suit synthétise les différentes classes obtenues et permet une caractérisation de ces classes en fonction des coordonnées de leur centre de gravité dans l'espace des axes factoriels, ce qui peut être assimilé à une signature spectrale des zones urbaines. Ces axes ayant été expliqués d'un point de vue correspondance avec une réalité sur le terrain, la caractérisation de ces classes ne consiste qu'à leur affecter les caractéristiques des axes qui contribuent le plus à leur formation (Tableau A.3.6.1).

Figure 3.6.6 - Signatures spectrales des types urbains dans l'espace des trois premiers axes factoriels, échantillon des îlots densément bâtis -



Le Tableau A.3.6.1 en Annexe A.3.6 démontre que les trois premiers axes factoriels sont souvent suffisants pour discriminer les différentes classes qui nous intéressent.

La Figure 3.6.7 montre, sur le plan défini par les deux premiers axes factoriels, les 6 principaux regroupements d'individus que nous avons effectués au vu des résultats de la classification. Les classes 2 et 3 semblent imbriquées, cela est dû essentiellement à l'individu N° 242 qui est particulièrement mal représenté ($\text{Cos}^2 = 0,0243$ et $0,0002$ sur les deux premiers axes factoriels). La différenciation des classes (9, 7) et 4 fait appel au troisième axe et n'apparaît donc pas clairement sur cette projection.

REPRESENTATION SIMULTANÉE DES LIGNES (Observations) ET COLONNES (Variables) ***
 PLAN 1 2 AXE 1 HORIZONTAL AXE 2 VERTICAL

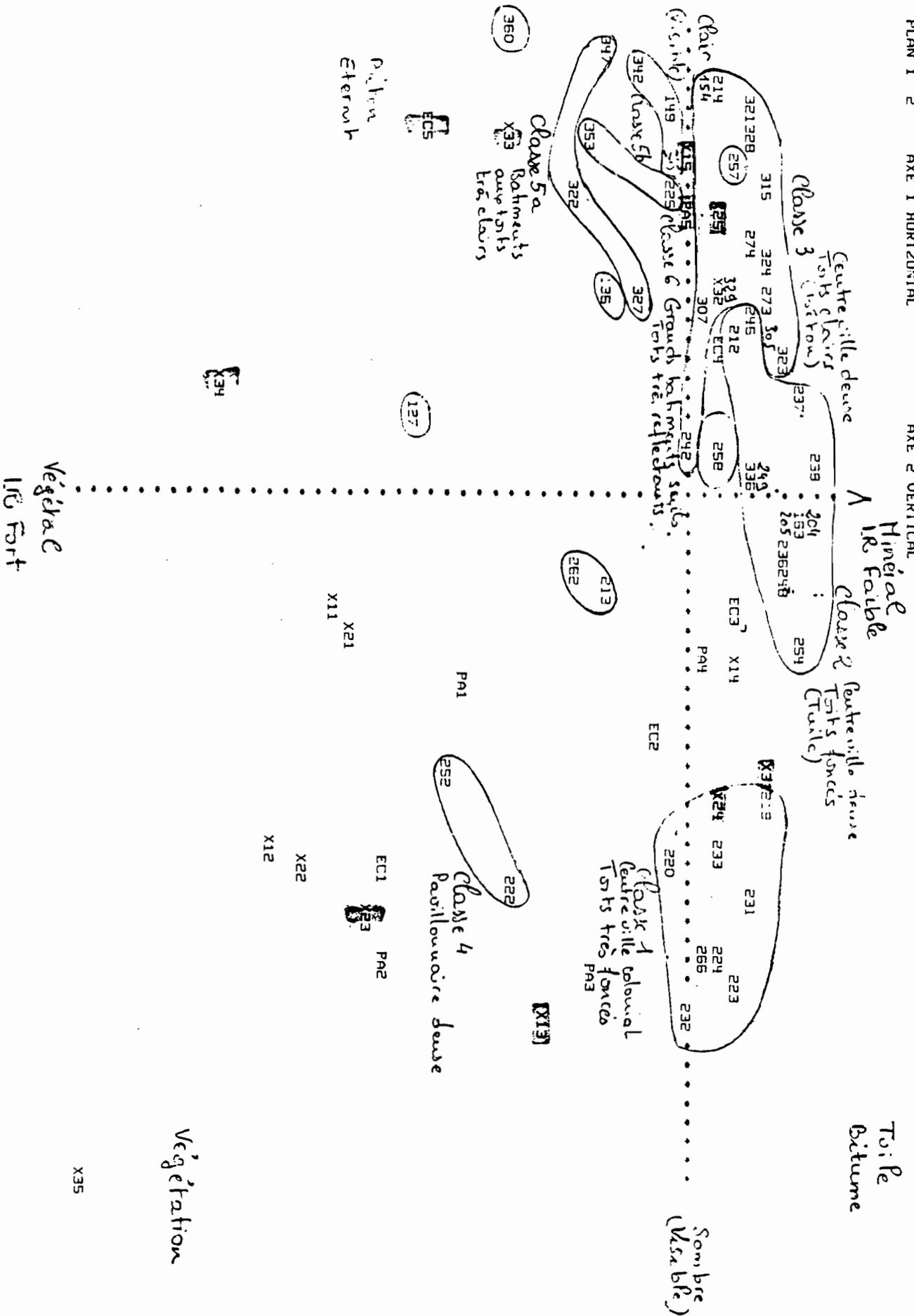


Figure 3.6.7 - Représentation des individus regroupés en types sur le premier plan factoriel, îlots densément bâtis-

Le **Tableau A.3.6.2** en **Annexe A.3.6** indique le centre de gravité des classes retenues dans l'espace des 5 premiers axes factoriels. A partir de ces valeurs, nous pouvons donc classer l'ensemble des zones **densément bâties**¹ définies sur l'image et affecter chacune de ces zones à une de ces 6 classes à présent définies et identifiées.

3.6.3) TYPOLOGIE DES ILOTS PEU DENSÉMENT BATIS.

3.6.3.1) Analyse factorielle des correspondance des îlots peu densément bâtis.

Plus encore que dans le cas précédent, les canaux du spectre visible participent à la création des axes factoriels. Le facteur brillance influe de façon prépondérante dans la compréhension du milieu majoritairement végétal.

Tableau 3.6.4 - Contribution des variables à l'inertie totale, échantillon des îlots peu densément bâtis -

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Cion Relative Cumulée	43,6% 43,6%	15,7% 59,3%	9,8% 69,1%	8,3% 77,4%	4,9% 82,3%
Cion Relative Visible	81,3 %	83,3 %	45,1 %	36,5 %	41,4 %
Cion Relative I-R Proche	08,4 %	07,7 %	38,1 %	62,0 %	39,2 %
Cion Relative Texture	10,3 %	09,0 %	16,8 %	01,5 %	18,4 %

. Interprétation des axes factoriels.

Le premier facteur rend compte de la brillance dans le spectre visible. Ainsi que l'illustre la **Figure 3.6.8**, on observe une opposition entre les valeurs radiométriques faibles (contributions positives) et les fortes (contributions négatives), tous canaux du **visible** confondus.

Le canal infra-rouge proche (XS3) ainsi que l'écart-type local n'interviennent que très peu. On remarquera le canal XS3 dont la contribution est négligeable, mais qui suit une tendance strictement inverse des autres canaux. Les îlots comme le N° 102 (**Photo 3.6.4**) presque exclusivement à vocation agricole apparaissant en sombre dans le visible et s'affrontent à des îlots plus urbain comme le N° 162 (**Photo 3.6.5**) globalement beaucoup plus reflectants dans cette partie du spectre.

¹ Il est donc nécessaire d'effectuer un masque afin de ne considérer que les zones densément bâties. Ce masque est issu de la classification précédente sur la densité du bâti en 6 classes.

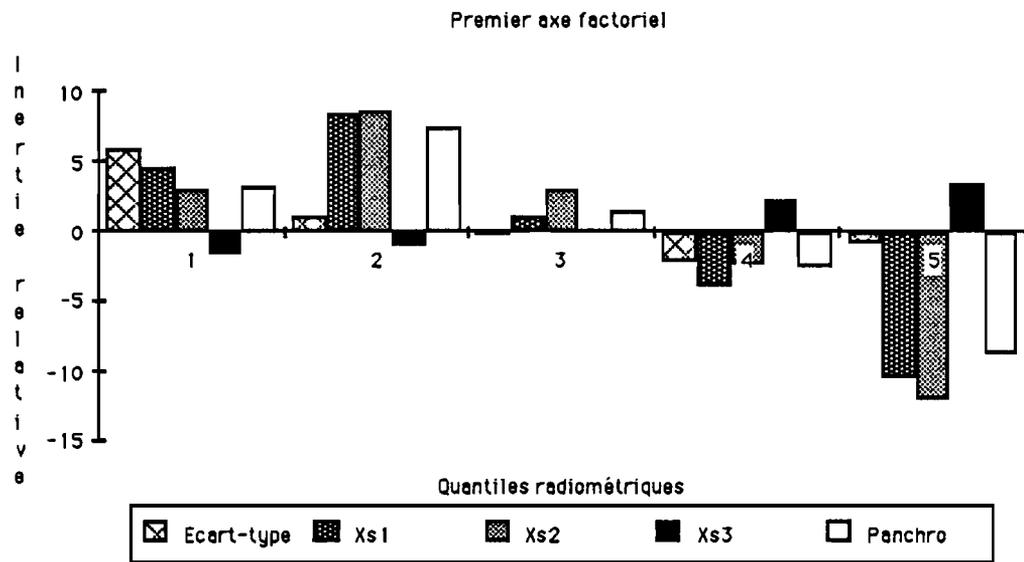


Figure 3.6.8 - Contribution relative des variables : axe factoriel 1, îlots peu densément bâtis -

Toujours dans le spectre visible, le second facteur extrait oppose les extrêmes : très fortes et très faibles valeurs radiométriques contre des valeurs faibles, moyennes et fortes (Figure 3.6.9).

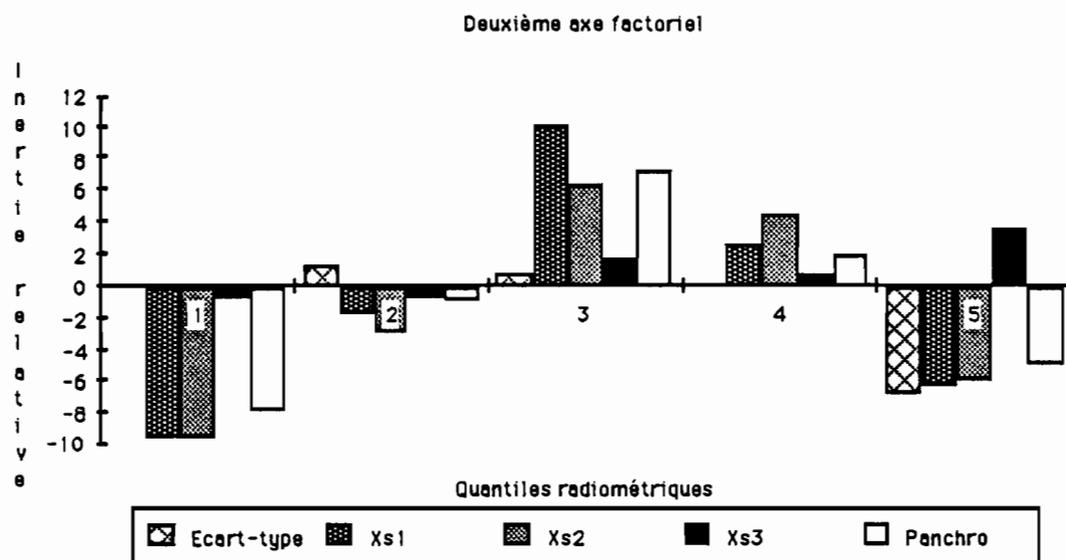


Figure 3.6.9 - Contribution relative des variables : axe factoriel 2, îlots peu densément bâtis -

Des îlots majoritairement recouverts de végétation à forte activité chlorophyllienne sur lesquels sont construits quelques entrepôts très réfléchissants (îlot N° 117) sont ainsi distingués d'îlots dont la végétation présente une activité chlorophyllienne moindre ainsi que des bâtiments aux toits plus sombres, îlot N° 216.

Une opposition dans l'infrarouge proche entre très faibles, faibles valeurs et fortes valeurs, et un indicateur de transition très élevé sont les principales caractéristiques de ce troisième facteur (Figure 3.6.10).

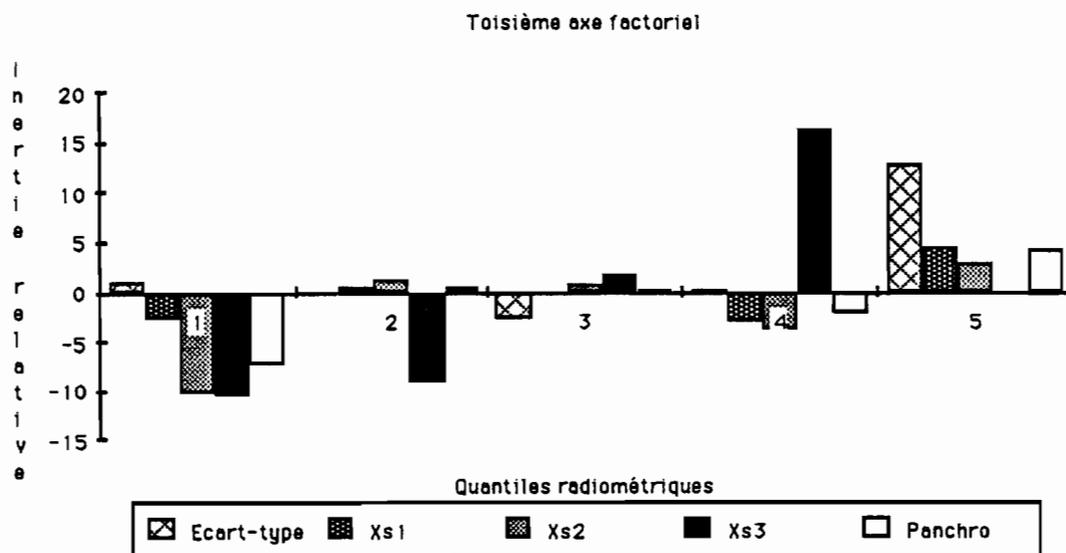


Figure 3.6.10 - Contribution relative des variables : axe factoriel 3, îlots peu densément bâtis -

Elle est concrétisée par une discrimination entre deux individus qui contribuent fortement à ce facteur : l'îlot N° 105 (Photo 3.6.4) constitué par un entrepôt de

matériaux de construction (usine Eternit) aux pourtours de verdure et un ensemble d'entrepôts plus anciens aux couvertures de zinc bordé de pelouse et d'arbres, N° 217 (Photo 3.6.1). Cet axe semble faire ressortir d'un côté les constructions à forte réflectance dans l'infrarouge proche (Eternit, béton) en opposition avec des toitures à plus faible réfléchissement dans le même canal (vieux zinc ou tuile). La forte participation (positive) du cinquième quantile de l'indicateur de transition indique une très forte différence de luminance dans le visible à l'intérieur de ce type d'îlot. Le quatrième axe est majoritairement consacré à l'infrarouge proche, et en particulier au cinquième quantile de ce canal (Figure 3.6.11).

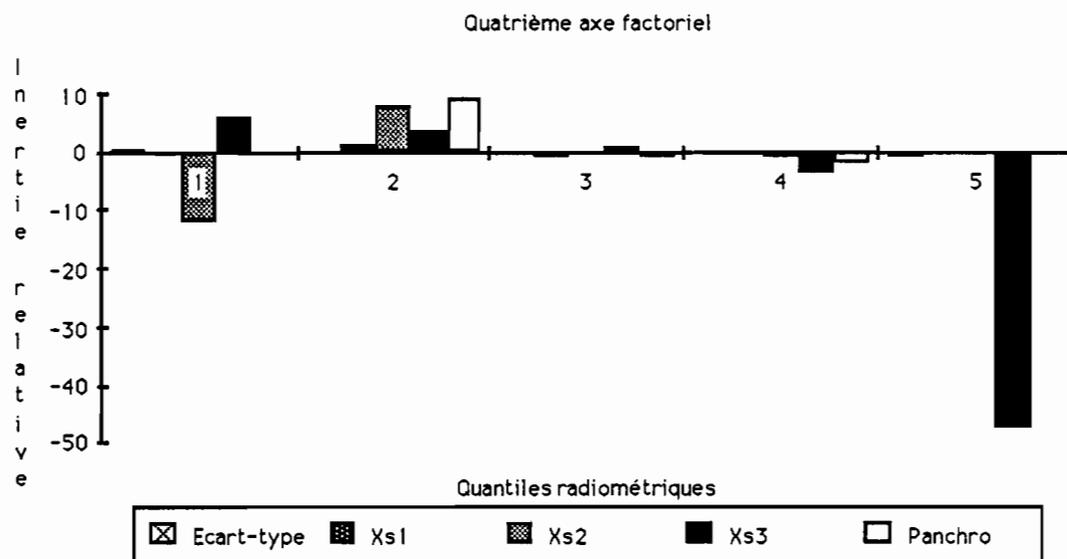


Figure 3.6.11 - Contribution relative des variables : axe factoriel 4, îlots peu densément bâtis -

L'îlot 117, qui contribue pour plus d'un quart à l'inertie de cet axe est constitué par un espace vert sur lequel sont construits deux entrepôts aux toits réfléchissants. A l'opposé, les îlots N° 108 (Photo 3.6.4) et 131 sont des espaces à vocation agricole sur lesquels on remarque la présence de terre nue et de quelques habitats recouverts de tuiles. Cet axe apparaît donc comme celui rendant compte de l'opposition végétation/terre nue.

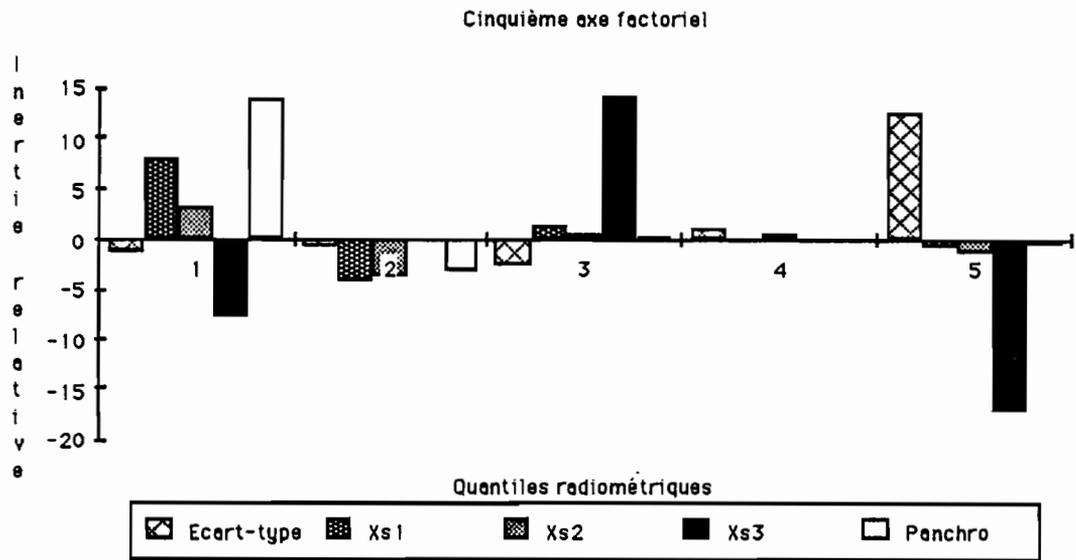
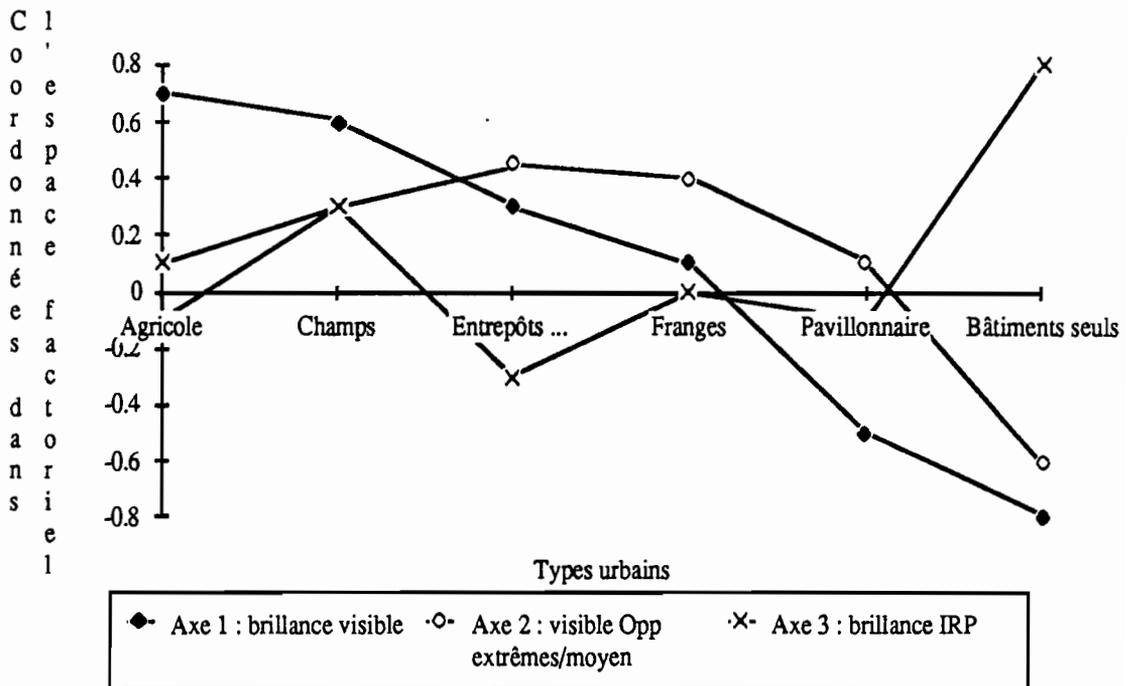


Figure 3.6.12 - Contribution relative des variables : axe factoriel 5, îlots peu densément bâtis -

La Figure 3.6.13 qui suit constitue une tentative d'illustration de la signature spectrale des types urbains définis à partir de l'échantillon des îlots peu densément bâtis. Cette signature se situe dans l'espace des axes factoriels préalablement interprétés en fonction de notre thématique urbaine.

Figure 3.6.13 - Signatures spectrales des types urbains dans l'espace des trois premiers axes factoriels, échantillon des îlots peu densément bâtis -



Conclusions.

Contrairement à ce que l'on pouvait prévoir, l'infrarouge proche est cantonné dans une position secondaire par rapport à l'importance accordée aux canaux du spectre visible. L'écart-type local calculé sur le canal panchromatique joue un rôle d'appoint et ne paraît pas adapté au type de milieu étudié.

3.6.3.2) Classification hiérarchique ascendante des îlots peu densément bâtis.

Nous avons défini 15 classes afin de pallier le même inconvénient que celui rencontré lors de l'étude précédente, à savoir la nécessité de descendre relativement bas dans l'arbre hiérarchique et de pouvoir ainsi avoir accès à des classes d'îlots typologiquement proches de la problématique des aménagés.

La variance inter-classe/variance totale est comparable à celle obtenue précédemment (86 %).

Seules 9 classes possèdent des effectifs suffisants pour qu'il soit pertinent d'interpréter les regroupements d'individus opérés (Figure 3.6.14).

Pour la plupart des classes, la connaissance des trois premiers axes factoriels épuise la presque totalité de la contribution des variables aux classes.

Comme dans le cas précédent, les coordonnées des centres de gravité des classes reportées dans le Tableau A.3.6.4 en Annexe A.3.6 serviront à initialiser une classification basée sur la distance à ces centres de classes identifiées.

3.6.4) COMPARAISON AVEC D'AUTRES NOMENCLATURES ISSUES DE TYPOLOGIES DIVERSES.

Trois typologies différentes ont été définies sur la ville de Quito en faisant appel à diverses méthodes et pour répondre à des objectifs particuliers (Voir nomenclatures de ces typologies en Annexe A.3.6, Tableau A.3.6.5). Il s'agit des typologies suivantes :

- P. CAZAMAYOR , H. GODARD. Les types sont extraits de la légende de la carte "Esbozo de tipologia del habitat" établie en 1984 sur l'ensemble de la ville. Le mode d'établissement de cette carte de la typologie de l'habitat est lié à la connaissance précise bien qu'empirique qu'ont de la ville les deux auteurs, cette typologie n'est pas fondée sur des critères précis, et constitue donc une vision "synthétique" de la ville.

- F. DUREAU et A. MICHEL cette typologie a été conçue pour les besoins de l'enquête morphologie et sa nomenclature est fondée sur la connaissance "analytique" des îlots de l'échantillon "morphologie". Les enquêteurs d'une part et les photographes de l'autre ont affecté les îlots qu'ils ont enquêté dans l'un des types définis. Ces types reposent sur le standing extérieur de l'habitat ainsi que sur la fonction principal de l'îlot.

- O. BARBARY. L'analyse statistique multivariée du fichier des bâtiments fait ressortir la prépondérance de 3 descripteurs (surface au sol, nombre d'étages et matériaux du toit) dont la prise en compte fait apparaître 38 types de bâtiments. La CAH d'un tableau de contingence caractérisant l'espace bâti des îlots permet la définition, après croisement avec la densité du bâti et avec un indicateur d'homogénéité des bâtiments, de 9 types d'îlots.

REPRESENTATION SIMULTANEE DES LIGNES (Observations) ET COLONNES (Variables) ***
 PLAN 1 2 AXE 1 HORIZONTAL AXE 2 VERTICAL

220

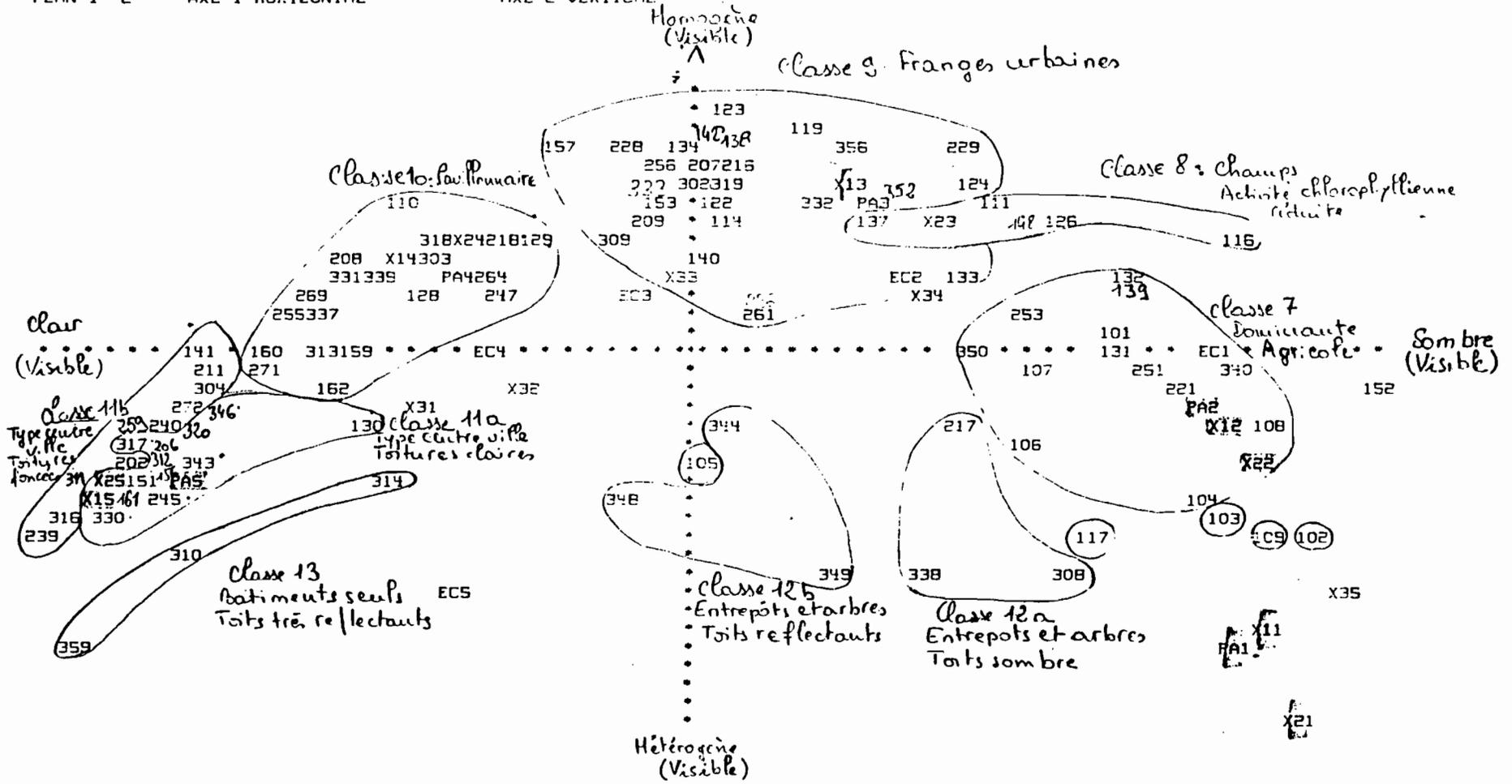


Figure 3.6.14 - Représentation des individus regroupés en types sur le premier plan factoriel, îlots peu densément bâtis -

Des tableaux croisés entre ces différentes typologies et celle élaborée sur la base des données de télédétection concernant les îlots de l'enquête morphologie peuvent être consultés en **Annexe A.3.6**. Il en ressort plusieurs indications intéressantes quant aux liaisons entre profil radiométrique et standing ou fonction (croisement typologie enquête photo, typologie enquête morphologie et typologie CAZAMAJOR/GODARD):

- le "vieux centre" est considéré majoritairement comme de standing moyen/bas à très bas
- le "centre ville à dominante béton" appartient à un standing moyen à moyen haut, légèrement plus élevé que le "centre ville à dominante tuile".
- "le centre ville dense" s'apparente à un tissu de standing très bas, de même que les espaces à dominante agricole, les champs à activité chlorophyllienne réduite et les franges urbaines
- le pavillonnaire peu dense et le tissu évolutif à dominante minéral sont inclassables, variant d'un standing élevé à un standing très bas
- les types "grands bâtiments clairs", "entrepôt et végétation" et "bâtiments clairs seuls" regroupe la majorité des fonctions commerciales, industrielles et scolaires, **sans cependant en avoir l'exclusivité ni pouvoir prétendre à l'exhaustivité.**

Bien que cela ne constitue pas une surprise, la typologie élaborée à partir de la classification hiérarchique ascendante de certaines variables issues de l'enquête morphologie¹ s'avère être la plus proche de celle obtenue à partir des variables télédétection. En effet, le croisement des deux typologies réalisées sur la base de l'échantillon "morphologie" fait ressortir plusieurs intersections très chargées signe d'une correspondance effective entre certains postes des deux typologies

- le péri-urbain MORPHO se retrouve essentiellement dans les classes TLD 7 (dominante agricole) et 9 (franges urbaines),
- le vieux centre MORPHO est constitué dans sa plus grande partie par les classes TLD 1 (vieux centre colonial) et 2 (centre ville à dominante tuile),
- le poste majoritaire dans la classe industries MORPHO correspond à la classe TLD 12 (entrepôt et végétation).

Par contre, les luminances semblent peu sensibles au standing tel que le définissent les variables collectées lors de l'enquête morphologie ; le haut standing se retrouvant indifféremment en centre ville à dominante béton, dans un tissu évolutif minéral ou pavillonnaire peu dense. De même, mais cela ne constitue pas une surprise, les modalités de l'habitat populaire, avec ou sans étage, ne sont pas différenciées.

LES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES RENDENT COMPTE DE CERTAINS MODÈS D'OCCUPATION DU SOL.

La typologie que nous avons extraite des caractéristiques radiométriques de l'image SPOT laisse clairement apparaître que la différenciation des différents individus fondée sur des critères physiques (brillance, végétation, hétérogénéité locale) permet, moyennant une analyse des correspondances, de lier ces critères et un mode d'occupation du sol de façon plus ou moins précise suivant les types. Les modes d'occupation du sol que cette méthode distingue sont particulièrement intéressants pour réaliser notre stratification à finalité démographique. En effet, la différenciation effective de tissus tels que le vieux centre historique, les quartiers pavillonnaires, les franges urbaines et les grands bâtiments laisse présager une forte diminution de la variance des estimateurs démographiques puisque leur mode d'habitation est différent. En revanche, compte tenu de notre problématique démographique, il est peu intéressant de discriminer entre eux des types usuellement pratiqués comme industrie, commerce et administration puisque ces types sont, les uns comme les autres, inhabités.

¹ A ce sujet, se reporter à la thèse de O.BARBARY

La confrontation des différentes typologies démontre essentiellement que la lacune principale des typologies issues de la télédétection réside dans le manque de **vision globale des éléments qui constituent la ville**, prise en compte d'éléments rendant compte de l'organisation de l'espace, sans laquelle toute typologie constituée à partir de mesures physiques demeure cantonnée à ne décrire qu'imparfaitement l'état du sol en fonction d'indications telles que clair / foncé, minéral / végétal, lisse / chahutée. Il reste donc à mettre au point des procédures automatiques et rapides permettant de rendre compte de la **taille** et de la **répartition**, éventuellement de **hauteur** des bâtiments dans l'îlot. Obtenir 2 ou 3 modalités par zone serait amplement suffisant pour différencier efficacement les différents types de tissu urbain habituellement utilisés par les aménageurs.

Même regroupées au niveau d'une zone, les seules mesures physiques demeurent impuissantes à rendre compte de la complexité du tissu urbain. Un fait exemplaire bien qu'anecdotique vient tempérer les velléités de classification précise et sans confusion : un fort gradient climatique partage Quito entre un Nord sec, dont la végétation présente une faible activité chlorophyllienne, et un Sud plus humide et donc plus verdoyant. Cette distinction, qui apparaît sur les images et dont rendent compte efficacement les variables radiométriques (quantiles), est plus forte que les variations internes à la ville qui pourraient permettre de **formellement** différencier de façon automatique les quartiers résidentiels des quartiers plus déshérités.

STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN QUITÉNIEN : QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONCLUSION.

a) Les outils de travail. (Figure 3.8.1).

Cette partie consacrée à la mise au point d'outil constitue l'aspect le plus novateur de cette troisième partie. En effet, nous avons dû résoudre un certain nombre de problèmes essentiellement pratiques, afin de pouvoir recréer un contexte comparable à celui existant lors de notre phase d'expérimentation, contexte nécessaire pour appliquer les méthodes mises au point à Marseille.

La fusion de 2 scènes SPOT d'une même trace, l'extraction de notre fenêtre d'étude et la superposition des images en mode multispectral et panchromatique se sont déroulés sans encombre.

Sur les 199 îlots que compte l'échantillon de l'enquête morphologie, 164 ont pu être correctement localisés sur une image panchromatique (soit 82% de l'effectif). Un sous-échantillon de cet ensemble nous a permis de mesurer la précision des mesures de surface de quelques îlots suivant plusieurs méthodes. La plus précise s'avère être la plus aisée à mettre en oeuvre dans les PVD; la précision obtenue est suffisante pour extrapoler, à l'ensemble de la base, les résultats de l'enquête démographique.

Si l'extraction de la voirie à partir de l'imagerie SPOT ne peut être intrinsèquement considérée comme valable, la segmentation de l'image qu'elle permet d'accomplir autorise la définition et la labellisation de zones urbaines dont l'utilité a été démontrée dans la seconde partie de ce travail.

b) Détermination de l'espace urbanisé et évaluation de la densité du bâti.(Figure 3.8.2).

Une méthode simple a été développée pour aider à déterminer le tracé de la limite urbaine le plus objectif possible à partir de documents satellitaires. La confrontation de plusieurs limites, dont une issue de l'interprétation de photographies aériennes, permet de conclure à la pertinence de l'utilisation de l'indice de végétation et de l'écart-type local pour parvenir à cet but.

Des impératifs de calendrier et de budget nous ont contraints à élaborer rapidement la base de sondage pour débiter l'enquête démographique, ce qui explique l'existence de deux approches pour évaluer la densité du bâti. La première, initialisée sur l'ensemble de l'échantillon, classe des pixels avec une fiabilité de 39 % en 6 classes, la seconde d'une mise en oeuvre plus complexe, affecte les zones à 6 modalités de densité suivant une régression de l'indice de végétation avec une fiabilité de 47 % ou suivant des néo-canaux discriminants en 4 modalités du même descripteur avec une fiabilité de 63%.

c) Mise au point d'une typologie du tissu urbain. (Figure 3.8.3).

Reprenant la méthode mise au point à Marseille à partir de l'étude de la distribution statistique des zones échantillon, la typologie élaborée sur la base des images SPOT de Quito amène des résultats intéressants par rapport à notre problématique démographique. Les types immédiatement identifiables et les plus robustes distinguent le **vieux centre ville**, les **franges urbaines** et les **grands entrepôts entourés de végétation**. Le standing demeure toujours, malgré la prise en compte de la végétation, un critère difficile à intégrer à partir des images satellite...

Documents de travail

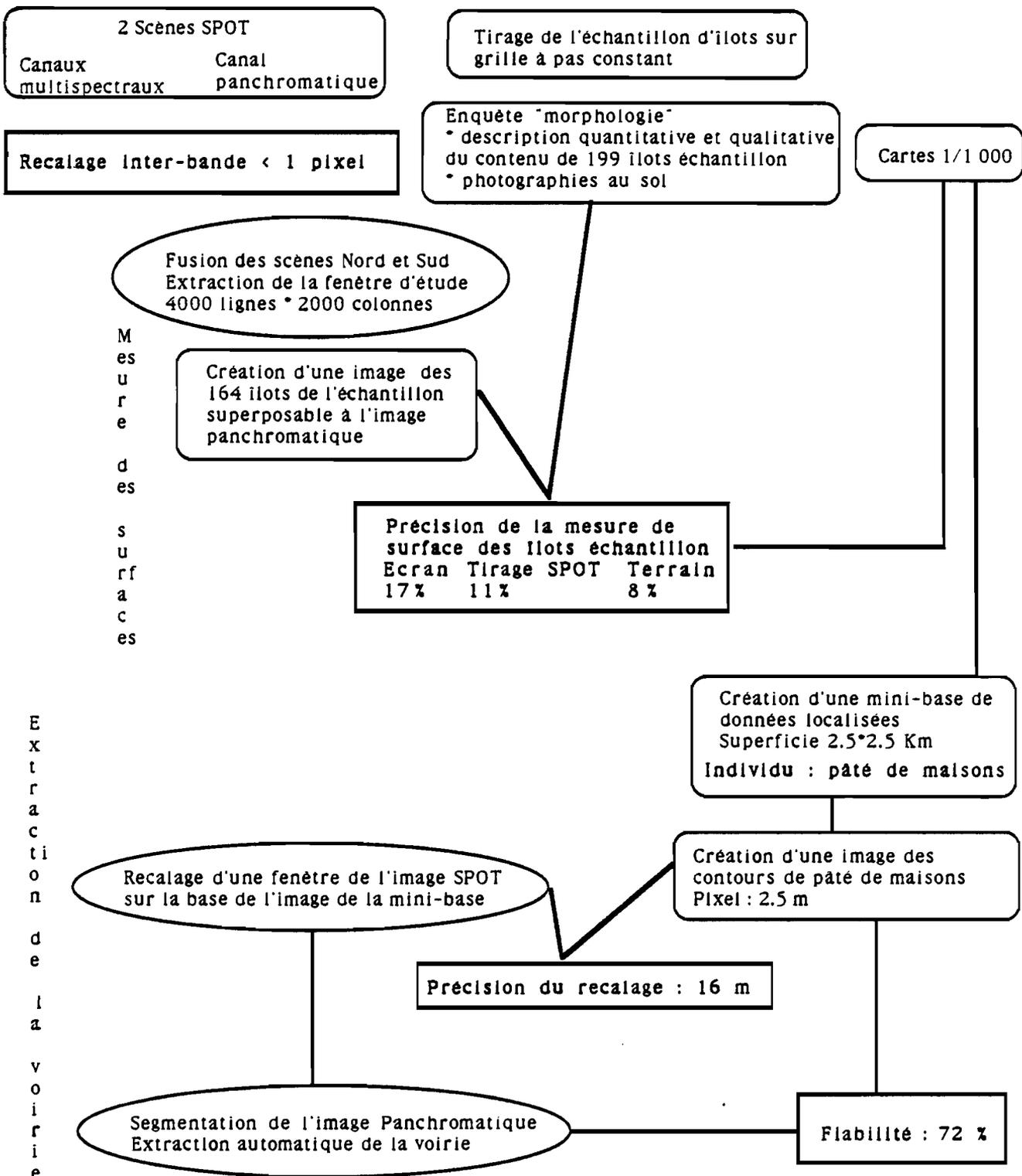
Document de
Vérification

Figure 3.8.1 - Etapes de la mise au point des outils méthodologiques -

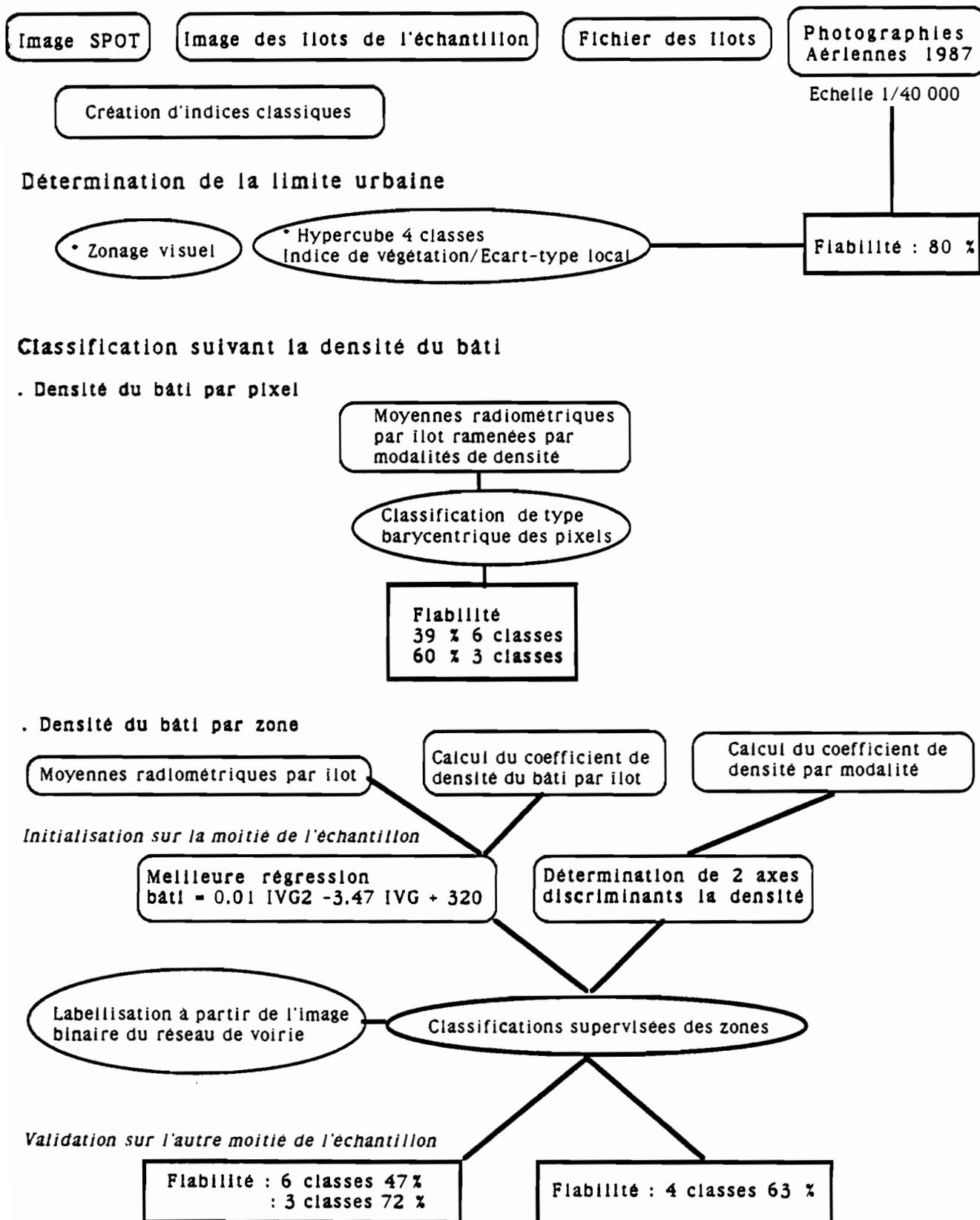


Figure 3.8.2 - Etapes de la détermination de la limite urbaine et de l'évaluation de la densité du bâti -

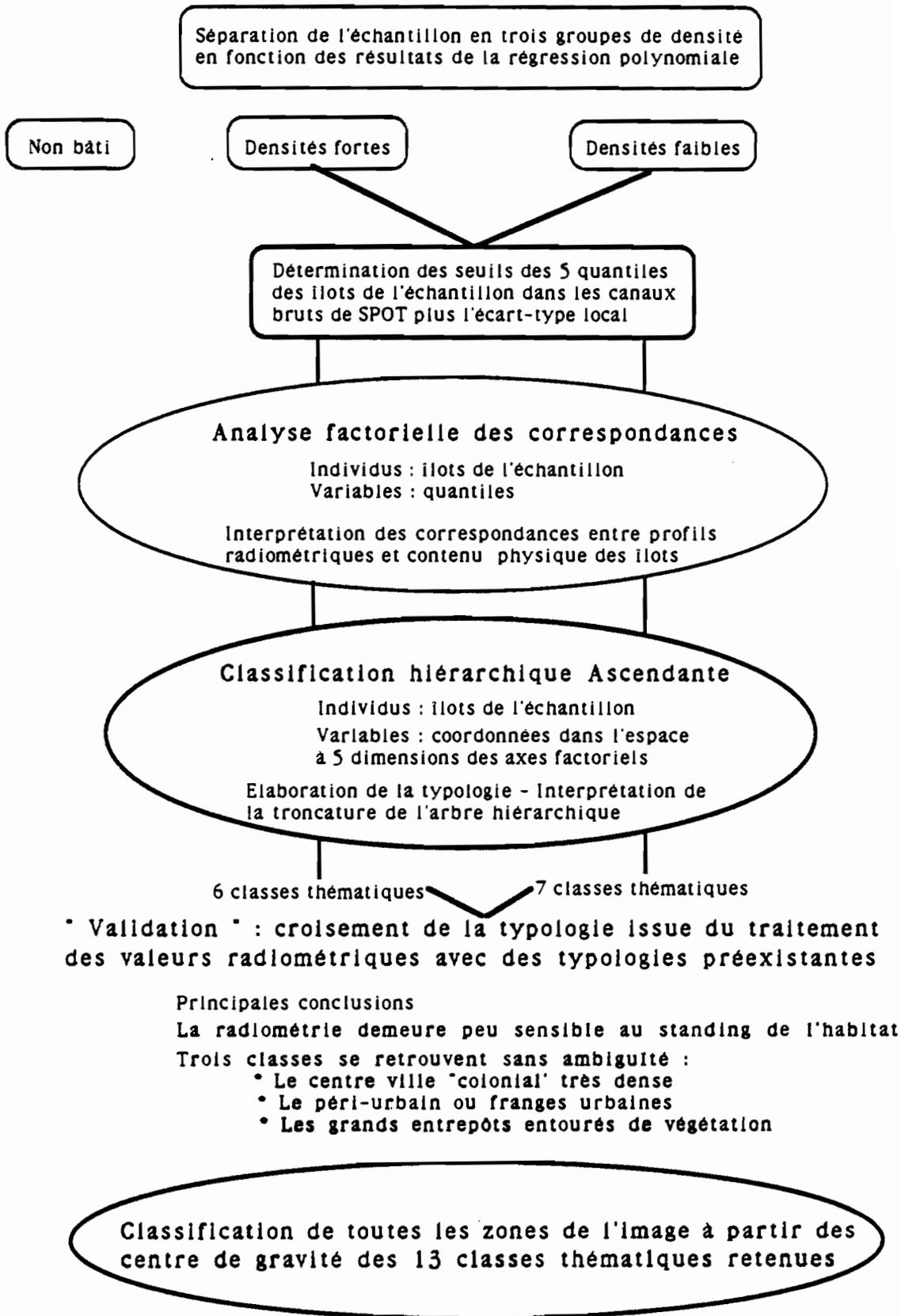


Figure 3.8.3 - Etapes de l'élaboration de la typologie du tissu urbain -

d) Apport des stratifications élaborées à partir d'images satellite.

Le **Tableau 3.8.1** compare les différentes stratifications réalisées au niveau des coefficients de variation des estimateurs démographiques. L'échantillon sur lequel reposent les tests se compose de 42 ou 44 îlots (cela dépend des variables démographiques considérées), identique à celui utilisé pour les tests précédents (**Chapitre 3.5**). Ces comparaisons sont effectuées en considérant un plan de sondage à **probabilité proportionnelle à la surface de l'îlot**. Comme dans le cas de la comparaison des stratifications effectuées sur la base de la densité du bâti (voir **Tableau 3.5.3**), le taux de sondage n'est pas constant dans les strates (allocation optimale de NEYMAN); il varie en fonction de la variance du caractère démographique dans la strate (les strates à forte variance sont plus enquêtées). La signification des variables démographiques est explicitée dans le **Tableau 3.5.2**.

Tableau 3.8.1 - Coefficients de variation des estimateurs démographiques sous différentes stratifications.(Programme VARECH environnement DBASE 3) -

Variables	Non stratifié	Stratifié DENSBATI	Stratifié DENSZONE	Stratifié TYPETLD	Stratifié TYPENQU
EFFECTRES	25,42	12,30	16,68	11,94	12,96
NBMENAGES	26,26	12,19	16,31	11,39	12,70
NBMENPI	26,25	12,33	16,39	11,68	12,84
NBMENM7	27,14	12,40	16,33	11,44	12,74
EFFP5A	26,45	12,77	19,66	12,00	13,44
EFFNMIG	25,02	13,60	19,87	12,82	13,80
CEFFMIGM5	26,42	12,92	19,87	12,32	13,54

Signification des abréviations. concernant les stratifications :

DENSBATI : stratification "de référence" concernant la densité du bâti issue de l'exploitation de l'enquête "morphologie".

DENSBATIM : stratification résultant de la première classification de pixels réalisée en fonction de la densité du bâti

DENSBATIME : identique à la précédente, mais on est intervenu pour vérifier la correspondance entre les îlots échantillon et la modalité de la strate

DENSZONE : stratification issue de la classification densité du bâti par zone (régression polynomiale de l'indice de végétation)

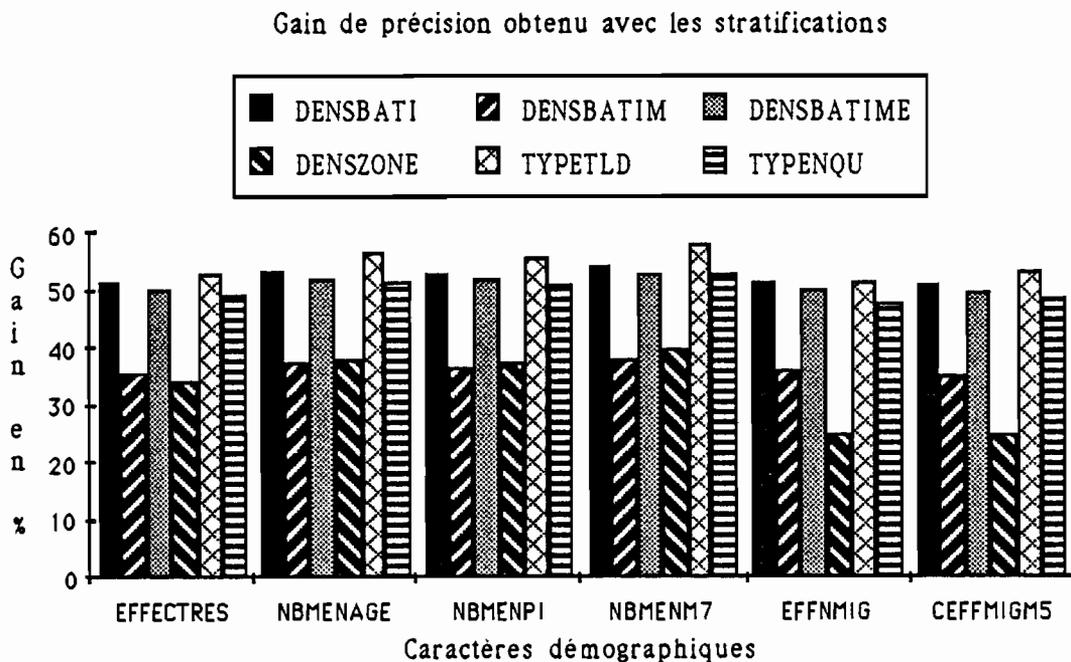
TYPENQU : stratification issue de la CAH effectuée à partir des données de l'enquête "morphologie", 8 classes bâti sont représentées.

TYPETLD : stratification issue de la typologie effectuées sur la base de l'analyse des variables radiométriques en 13 classes (seules 9 classes possèdent un effectif non nul dans l'intersection échantillon "démographie" / échantillon "morphologie").

La Figure 3.8.4 qui suit montre que 4 stratifications obtiennent des résultats semblables, il s'agit de DENSBATI, DENSBATIME, TYPENQU et TYPETLD. Les gains s'étalent entre 50 et 60 % des coefficients de variation des caractères démographiques sans stratification.. Il faut cependant noter que les deux premières laissent une place à l'intervention et donc éventuellement à la correction, ce qui n'est pas le cas des trois autres. (DENSBATIM, DENSZONE et TYPETLD).

La stratification TYPETLD réalisée sur la base de variables radiométriques recueille les meilleurs résultats, quel que soit le caractère démographique considéré, même en comparaison avec la stratification "de référence" TYPENQU".

Figure 3.8.4 - Gain de précision sous plan de sondage à probabilité proportionnelle à la surface avec allocation optimale aux strates de NEYMAN de différentes variables démographiques -



La stratification TYPETLD de par ses bons résultats, justifie la typologie élaborée à partir des quantiles radiométriques, dans une démarche à problématique démographique: dans notre cas, les regroupements d'individus effectués sur la base de la C.A.H des quantiles radiométriques s'avèrent indéniablement pertinents pour stratifier l'espace urbain, car ils correspondent effectivement à une réalité démographique.

Ces résultats, ainsi que les croisements des différentes typologies démontrent à notre sens, le bien fondé d'une démarche typologique axée sur la détermination de classes à partir de l'analyse de variables radiométriques caractérisant une zone.

e) Eléments de comparaison SPOT-HRV / LANDSAT Thematic Mapper.

Il avait été initialement prévu de consacrer un chapitre de ce travail à la comparaison des mérites respectifs des deux capteurs. Cependant, la topographie chahutée du site de Quito conjuguée à l'absence d'un modèle numérique de terrain ont contrarié ces prévisions optimistes en interdisant, pour l'instant, une superposition des différentes images sur l'ensemble de la ville.

Cependant, nous pouvons puisqu'ils sont fondés sur une même méthode, comparer les résultats obtenus par le traitement des canaux de Thematic Mapper à Marseille et ceux obtenus par le traitement des canaux SPOT à Quito, du double point de vue des classifications concernant la densité du bâti et du gain de précision apportés aux estimations démographiques.

Lorsque l'on considère le premier critère du **Tableau 3.8.2**, la richesse spectrale de LANDSAT et en particulier le canal 5 infra-rouge moyen, apporte des atouts supplémentaires pour rendre compte de la densité du bâti telle que nous l'avons définie. Pour ce critère, **le gain de précision d'un sondage à objectif démographique induit par la stratification issue de l'image satellite Thematic Mapper est comparable à celui résultant de l'interprétation de la mosaïque de photographies aériennes à échelle 1/23 000 constituant notre référence.**

Tableau 3.8.2 - Eléments de comparaison SPOT-HRV/LANDSAT Thematic Mapper dans le cadre de la réalisation d'une stratification de l'espace urbain à objectif démographique -

CRITERE	REGRESSION		CLASSIFICATION	GAIN	
	Coefficient régression	Ecart-type résiduel	% bien classés	% de CDV de l'estimateur ¹ satellite	référence
Densité TM	-0,838	17,66	52 %	14 %	15 %
Densité SPOT	-0,751	7,8	47 %	34 % ²	52 %
Typologie TM				39 %	49 %
Typologie SPOT				53 %	49 %

Par contre, l'élaboration d'une typologie de l'espace réalisée à partir d'une même méthode démontre, de manière indéniable, que la finesse spatiale de SPOT constitue un avantage déterminant pour rendre compte de la diversité et de la complexité du tissu urbain. En effet, **la stratification réalisée à partir de la classification opérée sur la base des quantiles radiométriques des canaux de SPOT apparaît légèrement**

¹ il s'agit de l'estimation de la variable POPSDC, population sans doubles comptes dans le cas de Marseille et de EFFECTRES effectif total dans le cas de Quito. Ce gain est calculé par rapport à une estimation non stratifiée.

² Ceci est le chiffre brut directement issu de la classification par zone notée DENZONE. Dans le cas de la stratification corrigée issue de la "classification pixel", ce gain s'élève à 50 %.

supérieure à notre référence (stratification réalisée sur la base des données de l'enquête morphologie).

Il convient de préciser que la méthode que nous avons mise au point pour stratifier l'espace urbain ne peut être utilisée dans un objectif démographique que si l'on peut tirer un échantillon sur l'image et que l'on est ensuite capable d'aller l'enquêter sur le terrain. La localisation précise de l'îlot sur le terrain - puisque dans notre méthode il s'agit de l'unité primaire de l'enquête - a nécessité, dans le cadre de notre expérimentation marseillaise, l'utilisation d'un Système d'Information Géographique gérant des données localisées (districts de recensement INSEE). L'impossibilité pratique de localiser précisément et de mesurer la surface des îlots de l'enquête démographique uniquement sur des images de résolution spatiale 30 mètres, nous conduit à exprimer l'impossibilité de réaliser notre méthode à partir des seules images satellite Thematic Mapper. Seule la finesse du panchromatique de SPOT permet de localiser avec une précision suffisante les îlots sélectionnés et donc, d'envisager l'application de cette méthode sur un autre site où de telles images sont disponibles.

D'un point de vue plus général, ces résultats confirment totalement l'hypothèse de base que nous avons émise au commencement de notre travail, à savoir **qu'il est possible de délimiter l'espace urbain, puis de le stratifier uniquement à partir d'une image satellite afin de réaliser et d'optimiser une enquête démographique par sondage** et que, d'après nos évaluations, **les gains que l'on est en droit d'attendre de cette méthode sont déterminants**. Nous avons évalué les coûts relatifs au développement de du volet strictement télédétection de notre méthode (Annexe 3.9), compte tenu de la précision des estimations des caractères démographiques obtenue, **cette méthode de collecte de l'information démographique apparaît globalement comme très rentable**

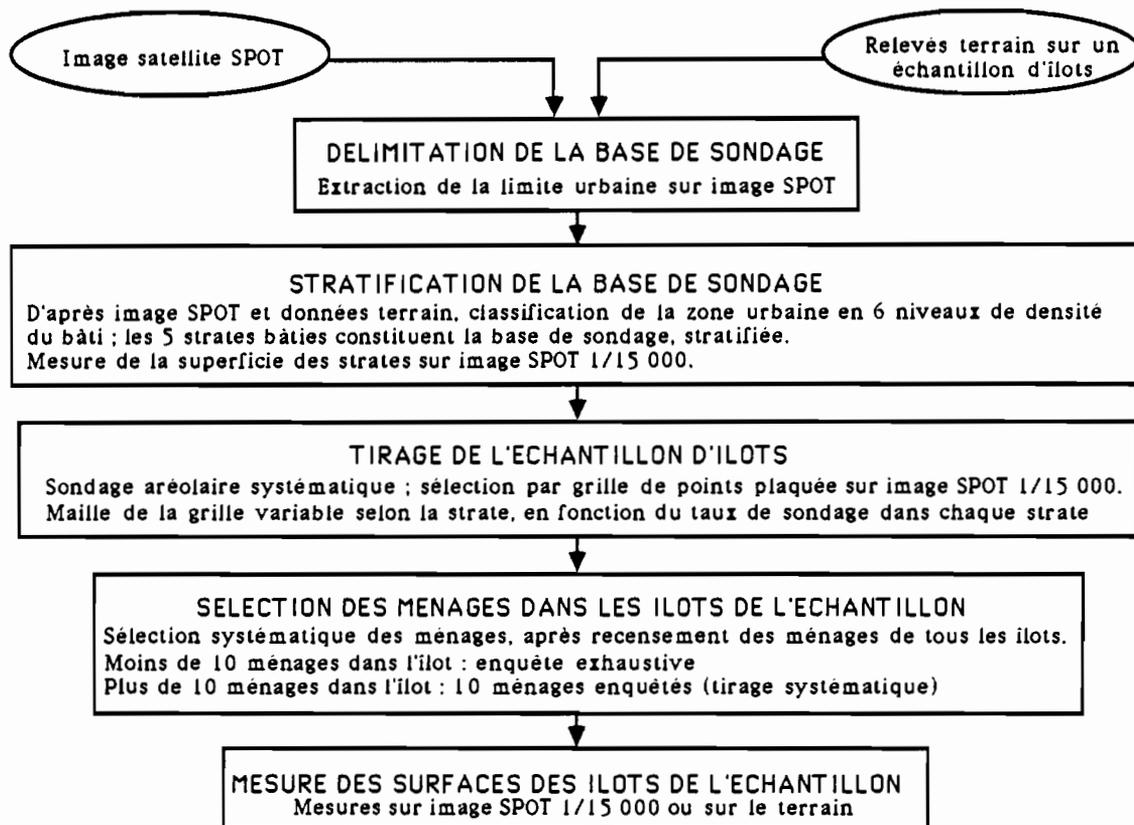
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Mise en oeuvre de la méthode de collecte de données démographiques.

. *Stratification sur image satellite : un plan de sondage performant.*

La réalisation de l'enquête démographie/migrations sur un échantillon tiré à partir d'une image satellite SPOT sur laquelle la ville a été délimitée et stratifiée, puis l'exploitation de cette enquête, nous conduit à vérifier les hypothèses émises dans l'introduction de ce travail. La prise en compte de la morphologie des villes telles que nous pouvons l'extraire d'une image satellite haute résolution permet de définir un plan de sondage rigoureux et performant (Figure 3.8.5).

Figure 3.8.5 - Plan de sondage de l'enquête Migrations (Quito, décembre 1987)¹ -



Les premiers résultats à notre disposition (Tableau A.3.8.1 en Annexe 3.8) confirment, non seulement la pertinence de l'utilisation d'image satellite pour collecter des données démographiques dans des villes pour lesquelles on ne dispose pas de cartographie exhaustive, fiable et actualisée, mais surtout la précision des informations extrapolées à l'issue de la mise en oeuvre. Concernant ce dernier point, la principale conclusion que O. BARBARY tire de ces résultats s'exprime comme suit : "par rapport au sondage équiprobable sur liste, que nous avons considéré tout au long de ce travail comme une sorte de référence, le sondage que nous proposons possède plusieurs avantages. Sa

¹ Figure extraite de la communication de F. DUREAU, 1988 "A propos de l'analyse des systèmes résidentiels, Présentation de l'enquête Migrations réalisée à Quito (EQUATEUR)", aux Journées Démographiques de l'ORSTOM, Paris, 17 P.

précision est au moins équivalente et elle est meilleure dès que le caractère estimé est bien corrélé à la morphologie"¹.

. Une mise en oeuvre à plusieurs vitesses.

Tout au long de cette étude, nous nous sommes efforcés de proposer, quelle que soit l'étape considérée, plusieurs options en fonction des capacités financières et technologiques des utilisateurs à venir. Qu'il s'agisse de la délimitation de la base de sondage ou de la stratification de l'espace urbanisé, il demeure possible de réaliser ces phases, soit à partir de tirages photographiques éventuellement adaptés (indice de végétation ...), soit à partir d'images stockées sous forme de bandes magnétiques. Ces deux modes de fonctionnement ne nécessitent pas un environnement comparable ni particulier du point de vue matériel informatique. Comme nous avons pu le noter, la complexité des traitements d'image satellite pour stratifier la base de sondage n'est pas directement proportionnelle au gain de précision obtenu. En conséquence, la stricte optimisation du plan de sondage (rapport coût/gain de précision) passe plus certainement par la prise en compte d'un plus grand nombre d'individus, que par l'élaboration d'une stratification plus élaborée du point de vue de la morphologie urbaine.

Traitement d'images satellite haute résolution : des retombées sur l'étude de la morphologie des villes.

La stratification de l'espace urbanisé pour réaliser une enquête démographique par sondage a fourni l'occasion de mettre au point, dans une problématique clairement définie, un certain nombre de traitements informatiques ayant pour objet l'interprétation d'image satellite en milieu urbain. Dans ce strict domaine, les retombées tant théoriques que pratiques ne sont pas négligeables, même si les méthodes proposées ici apparaissent sans nul doute perfectibles.

L'analyse d'images satellite en milieu urbain basée sur la connaissance qualitative et quantitative de zones tests tirées de façon systématique, amène des résultats directement interprétables par les aménageurs (aide à la détermination d'une limite urbaine, évaluation de la densité de l'espace bâti, élaboration d'une typologie physico-fonctionnelle).

Tant du point de vue de l'estimation de la densité de l'espace bâti, que de l'élaboration d'une typologie adaptée à l'outil d'investigation, la prise en compte de la zone comme entité d'étude s'est avérée satisfaisante dans une optique conceptuelle, et concluante d'un point de vue fiabilité.

Travailler dans un environnement de base de données localisées gérée par un système d'information géographique constitue un avantage important pour optimiser les conditions d'expérimentation (précision de localisation des zones test, définition d'entités à classer pertinentes, croisement d'informations d'origines diverses, etc) et favorise l'émergence de nouvelles méthodes de traitement rendues possibles par l'intégration de l'information d'origine satellitaire dans une base de données. Le SIG constitue de plus un outil quasiment indispensable lorsque l'on analyse une image LANDSAT Thematic Mapper en milieu urbain pour localiser précisément les zones test sur l'image satellite

¹O. BARBARY Thèse, Op cité.

Perspectives.

. Suivi de l'évolution de la ville à partir d'images multi-dates.

Nous avons effectué un essai de concordance des deux images panchromatiques (juin : 22° R et novembre : 8° L). Cet essai s'est déroulé sur une fenêtre située au Sud de la ville où le relief peut être considéré comme suffisamment plat pour ne pas interférer de façon importante sur la déformation de l'image. Malgré les problèmes posés par la différence d'incidence, le résultat est suffisamment satisfaisant, pour mettre clairement en évidence un certain nombre de modifications de petite taille concernant directement le bâti. Une composition colorée (cyan en bleu, novembre en rouge) **fait apparaître très simplement en rouge vif toute construction nouvellement apparue en l'espace de six mois (Photo 3.8.1)**. En supposant réglé le problème technique de la superposition d'images provenant de capteurs différents ou enregistrées avec des angles d'incidence éloignés, ce simple type de traitement permet d'envisager **le suivi de l'évolution du tissu urbain tant en ce qui concerne la détection de nouvelles constructions que les démolitions** et même d'évaluer le vieillissement de certains quartiers. Combiné avec un système d'information géographique, une méthode fondée sur la télédétection permet de suivre au rythme des acquisitions du capteur SPOT-HRV, toute modification même minime du tissu urbain.

. Etude de la morphologie urbaine : vers une typologie fonctionnelle.

D'un point de vue exclusivement analyse du milieu urbain à partir d'image satellite, les facteurs d'amélioration de l'extraction de l'information morphologique en milieu urbain demeurent nombreux et les voies les plus prometteuses semblent être à notre sens :

- la prise en compte d'éléments rendant compte de **l'agencement** et de la **hauteur** des bâtiments à l'intérieur d'une zone,
- la mise au point d'indices synthétiques, performants et rapides à calculer pour décrire la **texture** à l'intérieur d'une zone.

Ces informations sont indispensables pour élaborer une typologie définie à partir d'une nomenclature plus "fonctionnelle", et donc susceptible d'intéresser davantage les aménageurs urbains.

. Intégration de l'information satellitaire dans un système d'information géographique.

L'intégration de données d'origine satellitaire dans un système d'information géographique, qui permet en outre **l'actualisation d'une base de données**, suppose en particulier la généralisation de l'utilisation des modèles numériques de terrain afin de superposer des images satellite sur un fond cartographique exact. L'élaboration d'un tel modèle, possible à partir d'images SPOT, constitue un axe de recherche incontournable lorsque l'on travaille dans une ville au relief important, ne serait-ce que pour superposer deux images d'un même capteur prises à des dates différentes, ou provenant de deux satellites différents.

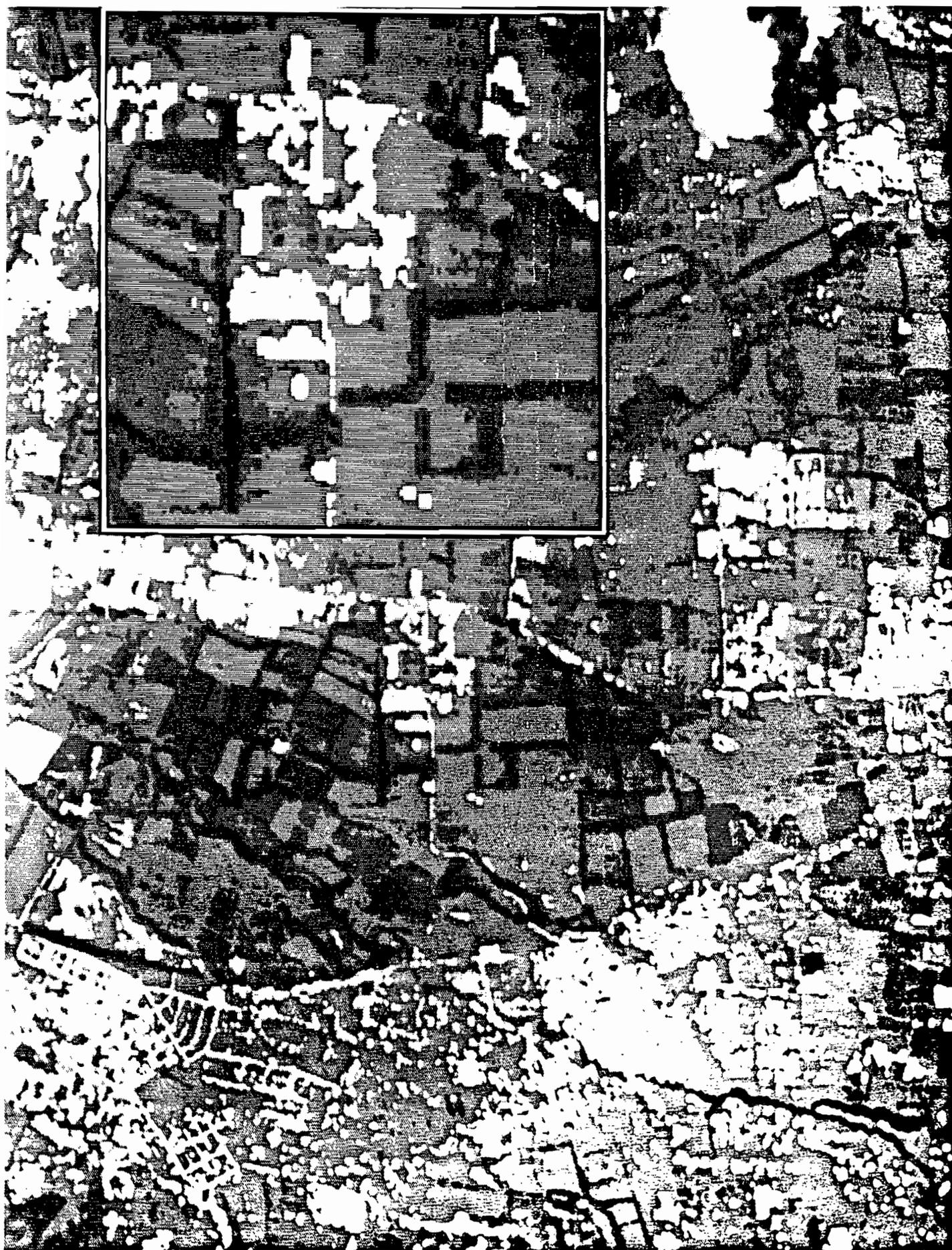


Photo 3.8.1 - Composition colorée de deux images SPOT en mode panchromatique enregistrées à deux dates différentes. En cyan : juin 1986, en rouge : novembre 1986. La fenêtre intérieure présente un agrandissement d'une zone dans laquelle l'étendue des nouvelles constructions (en rouge sur) est particulièrement importante -

TABLE DES MATIERES.

1) Acquis méthodologiques, situation de la recherche et praticabilité de la méthode.....	14
Introduction.....	15
1.1) Exposé du plan de thèse - Définition de la méthode de travail - Axes de recherche.....	18
1.2) Acquis méthodologiques issus de l'utilisation de la télédétection aéroportée et satellitaire pour recueillir des données démographiques.....	22
1.3) Situation du problème par rapport à la bibliographie de la télédétection satellitaire en milieu urbain.....	28
1.3.1) Documents de référence.....	28
1.3.2) Images LANDSAT MSS.....	28
1.3.3) Images LANDSAT Thematic Mapper.....	29
1.3.4) Comparaison LANDSAT Thematic Mapper / MSS / SPOT-HRV / Photographies aériennes.....	30
1.3.5) Images HRV de SPOT.....	31
Perspectives.....	32
1.4) Praticabilité face aux contraintes météorologiques.....	33
1.4.1) Etude sur le site de Quito (EQUATEUR).....	33
Conclusion.....	37
1.4.2) Politique d'acquisition d'images à travers le catalogue des compagnies SPOT IMAGE et LANDSAT - Quelques exemples africains	
Dakar, Bouaké et Gao.....	37
Conclusion.....	38
2) Mise au point de la méthode à partir d'un modèle expérimental, Marseille.....	39
Introduction.....	40
2.1) Informations géographiques et données satellitaires Répercussions méthodologiques et mise en oeuvre de l'intégration.....	42
2.1.1) Intégrer information géographique et télédétection une nécessité?.....	42
2.1.2) Typologies urbaines et télédétection satellitaire.....	46
Conclusion.....	57
2.1.3) Présentation des données intégrées dans la base.....	58
En conclusion, de nouvelles perspectives en télédétection?.....	67
2.2) Estimation de la "densité du bâti" à partir d'une image Thematic Mapper.	
Déroulement de l'étude.....	68
2.2.1) Statistiques descriptives concernant le descripteur "densité du bâti" observé sur la mosaïque photographique au 1/23.000.....	71
Radiométrie et densité du bâti : un lien effectif.....	89
2.2.2) Echantillon de travail.....	90
Photographies aériennes et enquête sur le terrain : deux impératifs pour interpréter une image satellite en milieu urbain.....	101

2.2.3) Régressions entre variables radiométriques et coefficient de densité du bâti.....	102
Densité du bâti et moyenne des luminances : une corrélation établie.....	108
2.2.4) Classifications d'images satellite suivant la densité du bâti.....	109
Prise en compte de la zone : une nette amélioration de la performance des classifications radiométriques.....	115
Densité du bâti : stratifier l'espace urbain à partir de photographies aériennes ou à partir d'images satellite apporte un gain comparable pour une enquête démographique.....	119
2.3) Mise au point d'une typologie de l'occupation du sol en milieu urbain à partir d'une image satellite.....	124
2.3.2) Analyse des variables radiométriques des sous-îlots peu densément bâtis.....	127
Différenciations acquises : pavillonnaire, grands ensembles de bâtiments et espaces agricoles.....	135
2.3.3) Analyse Factorielle des Correspondances des sous-îlots densément bâtis.....	137
2.3.4) Typologie du tissu urbain à partir des images du satellite Thematic Mapper.....	144
Image et stratification de l'espace urbain : premiers constats.....	146
3) Stratification de la ville de Quito (EQUATEUR) à partir d'images SPOT : première mise en oeuvre de la méthode de sondage.....	148
Introduction.....	149
3.1) Enquête morphologie urbaine. (Octobre-Décembre 1986). Collecte et exploitation des données.....	152
3.1.1). Objectifs de l'enquête.....	152
3.1.2) Mise en oeuvre de l'enquête "morphologie".....	152
3.1.3) Intégration des données de l'enquête.....	155
3.1.4) Evaluation de la précision des mesures de surfaces des îlots.....	157
Précision de la mesure de la surface des îlots : 10%.....	165
3.2) Segmentation de l'image fondée sur l'extraction automatique de la voirie.....	167
3.2.0) Préliminaires - Prétraitements sur les images rectification géométrique inter-bandes.....	167
3.2.1) Définition de la chaîne de traitement choisie pour extraire la voirie.....	168
3.2.2) Amélioration de l'extraction de la voirie.....	172
La création de zones plutôt que l'extraction réelle de la voirie.....	174
3.3) Création d'une base de données sur le site de Quito.....	176
3.3.1) Mise en oeuvre de la mini-base de données.....	176
3.3.2) Correction géométrique des images SPOT à partir du support cartographique.....	177
3.3.3) Evaluation de la méthode d'extraction automatique de la voirie basée sur les algorithmes de morphologie mathématique.....	179
3.4) Première classification sur "la densité du bâti".....	182
3.4.1) Détermination visuelle de la limite urbaine.....	182
3.4.2) Détermination automatique de la limite urbaine à l'aide de l'indice de végétation et de l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique.....	183

Une aide à la délimitation de l'aire urbaine à partir d'un traitement simple d'une image satellite.	187
3.4.3) Stratifications visuelles à partir d'une classification "densité du bâti" calculée par pixel.....	189
3.5) Classification des zones en fonction de la densité du bâti.....	194
3.5.1) Régression polynomiale de l'indice de végétation.....	194
3.5.2) Analyse discriminante suivant la densité du bâti.....	198
Une justification de l'"extraction automatique de la voirie" : l'amélioration sensible de la classification suivant la densité du bâti.....	202
3.6) Typologie des espaces bâtis à partir des quantiles radiométriques.	203
3.6.1) Présentation.....	203
3.6.2) Typologie des îlots densément bâtis.....	206
3.6.3) Typologie des îlots peu densément bâtis.	214
3.6.4) Comparaison avec d'autres nomenclatures issues de typologies diverses.....	219
Les quantiles radiométriques rendent compte de certains modes d'occupation du sol.....	221
Stratification de l'espace urbain quiténien : quelques éléments de conclusion.....	223
Conclusions et perspectives.....	231
Mise en oeuvre de la méthode de collecte de données démographiques.	231
Traitement d'images satellite haute résolution : des retombées sur l'étude de la morphologie des villes.....	232
Perspectives.....	233

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN A PARTIR
D'IMAGES SATELLITE POUR REALISER UN
SONDAGE A OBJECTIF DEMOGRAPHIQUE.

Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images
SPOT et LANDSAT TM en milieu urbain.

Thèse de doctorat

Soutenue le 7 Décembre 1988

par

Alain MICHEL

Direction de thèse :

Jean Pierre RAISON, EHES

Membres du jury :

Marc BARBUT
J.P GILG
A. DUBRESSOW
A. BALLUT
J.P RAISON.

ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES

**STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN A PARTIR
D'IMAGES SATELLITE POUR REALISER UN
SONDAGE A OBJECTIF DEMOGRAPHIQUE.**

**Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images
SPOT et LANDSAT TM en milieu urbain.**

Thèse de doctorat

Soutenue le

par

Alain MICHEL

Direction de thèse :
Jean Pierre RAISON, EHESS

Membres du jury :

ANNEXES.

Annexes PREMIERE PARTIE.

A.1.3) LE POINT SUR LA TELEDETECTION URBAINE A TRAVERS LA BIBLIOGRAPHIE FRANCAISE ET ANGLO-SAXONNE.

A.1.3.1) DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE.

A.1.3.2) IMAGE LANDSAT MSS.

- *Type d'image.*
- *Nomenclature des classifications.*
- *Prétraitements.*
- *Méthodologie des classifications et résultats.*

A.1.3.3) IMAGE LANDSAT THEMATIC MAPPER

- *Type d'image.*
- *Nomenclature des classifications.*
- *Prétraitements ou post-traitements.*
- *Méthodologie des classifications et résultats.*

A.1.3.4) COMPARAISON THEMATIC MAPPER / MSS / SPOT / PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES

- *Nomenclature des classifications.*
- *Traitements.*
- *Méthodologie des classifications et résultats.*

A.1.3.5) SPOT

- *Type d'image.*
- *Nomenclature des classifications.*
- *Traitements.*
- *Méthodologie des classifications et résultats.*

A.1.4) PRATICABILITÉ FACE AUX CONTRAINTES MÉTÉOROLOGIQUES.

A.1.4.1) LE SITE DE QUITO (EQUATEUR).

- *Site et climat de Quito.*

A.1.4.1.1) Recueil des données météorologiques

- *Origine des données.*
- *Type des données recueillies.*
- *Période et fréquence des données.*

A.1.4.1.2) Traitement des données météorologiques.

- *Fréquence relative de la nébulosité par mois.*
- *Les précipitations.*
- *Les vents.*

ANNEXES DEUXIEME PARTIE

A.2.2) ETUDE DU DESCRIPTEUR "DENSITÉ DU BATI".

ANNEXE 2.2.1 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR L'ENSEMBLE DE LA BASE -

ANNEXE 2.2.2 - ECHANTILLON DE TRAVAIL -

Annexe A.2.2.2.2 - Enquête morphologie urbaine (Marseille, 9-14 juin 1986) :
collecte et exploitation des données -

Annexe 2.2.2.5 - Statistiques sur la densité du bâti -

A.2.2.3) LES RÉGRESSIONS DANS L'ENSEMBLE SOUS-ILOTS ET BANDE DE 16 METRES
AUTOUR DES SOUS-ILOTS.

a) *Les matrices de corrélations.*

b) *Etude des sous-îlots aux résidus importants (supérieurs ou égaux à + ou
- 2 écarts-type) pour les meilleures corrélations simples et multiples.*

. *Régression BATI / IVG :*

. *Régression multiple BATI/ACP1, IND1.*

. *Régression multiple BATI/CAN4, ACP1, IND1.*

Conclusion partielle.

A.2.2.4) CLASSIFICATIONS.

A.2.2.4.1) *Seuillage du canal TM 4 au vu des résultats des matrices de
cooccurrences.*

A.2.2.4.2) *Classification supervisée de type barycentrique*

a) *Classification des pixels.*

b) *Classification des îlots.*

A.2.2.4.3) *Classification de type nuées dynamiques sur les îlots.*

A.2.3) TYPOLOGIE DE L'ESPACE À PARTIR DES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES

A.2.3.2) *TPOLOGIE DES ILOTS PEU DENSÉMENT BATIS*

a) *Tableaux des variables et des individus - Figures des profils
radiométriques des individus par axe factoriel.*

b) *Classification par la méthode des nuées dynamiques.*

c) *Classification obtenue par la prise en compte des néo-canaux.*

A.2.3.3) *TPOLOGIE DES ILOTS DENSÉMENT BATIS.*

a) *Tableaux des variables et des individus - Figures des profils
radiométriques des individus*

b) *Classification par la méthode des nuées dynamiques.*

ANNEXES TROISIEME PARTIE

A.3.1) MANUEL D'ENQUETE- MANUEL DE CODIFICATION.

A.3.6) NOMENCLATURES DES TYPOLOGIES DE L'ESPACE BATI QUITÉNIEN.

a) Coordonnées des classes dans l'espace des axes factoriels.

b) Présentation des types.

c) Présentation des tableaux croisés.

A.3.8) ENQUETE DÉMOGRAPHIE/MIGRATIONS.

A.3.9) ÉLÉMENTS DE COUT.

LISTE DES LOGICIELS UTILISÉS.

PLANETES : LOGICIEL DE L'UNITÉ DE TRAITEMENT INFORMATIQUE DU
LABORATOIRE D'INFORMATIQUE APPLIQUÉ DE L'ORSTOM À BONDY
LOGICIELS DE TRAITEMENT DE TEXTE ET DE STATISTIQUE SUR MICRO
ORDINATEUR

LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET PHOTOS.

BIBLIOGRAPHIE SÉLECTIVE.

**ANNEXE A.1.3 - LE POINT SUR LA
TELEDETECTION URBAINE A TRAVERS LA
BIBLIOGRAPHIE FRANCAISE ET ANGLO-
SAXONNE SUR LE SUJET.**

Figure A.1.2.1 - Exemple d'une fiche de dépouillement bibliographique remplie -

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	TOLL D.L., 1985. Landsat 4 Thematic Mapper scene characteristics of suburban and rural aera Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N° 9, pp 1471-1482.																
OBJECTIFS	Evaluation des propriétés spécifiques de discrimination spectrale de LANDSAT Thematic Mapper Estimation des méthodes de sélectives pour améliorer les performances cartographiques (mode d'occupation du sol																
DOCUMENTS DE REFERENCE	Photographies aériennes infra-rouge couleur du 13 Juillet 1982, Echelle de restitution 1/40 000 Carte de l'occupation du sol déduite par photo-interprétation de la photo-aérienne IRC Description de la zone étudiée : Belstville-Laurel (Nord-Ouest de Washington DC)																
TYPE D'IMAGE	TM 1, 2, 3, 4 du 29 Juillet 1982 corrigée radiométriquement et géométriquement, soit une zone de 500*500 pixels de 28,5 m ² TM 1, 2, 3, 4, 5 et 7 du 2 Novembre 1982 sans nuage MSS 4, 5, 6 et 7 du 2 Novembre 1982 sans nuage MSS 4, 5, 6 et 7 du 2 Novembre 1982 sans nuage																
TYPLOGIE DE LA CLASSIFICATION	Classification en 7 postes : eau, forêt, terres agricoles, carrières, routes principales, commerces et industries, habitats résidentiels																
PRETRAITEMENTS	Recherche des meilleurs combinaisons de canaux Par ordre décroissant - 1 canal : 5/6/3/2/4 - 2canaux : 2,3/3,4/1,4 3 canaux : 2,4,6/1,4,5/2,4,5 Analyse canonique * Automne TM : 1 ^{er} axe : brillance, 2 ème axe : Opposition visible/PIR, 3ième axe : opposition MIR/visible * Eté MSS : Visible PIR Filtrage : filte médian ou majoritaire pour réduire la variance intra-classe (fenêtre 5*5)																
METHODOLOGIE DE LA CLASSIFICATION	Echantillon tiré dans une base stratifiée 75 pixels par classes, soit 525 pixels échantillon Maximim de vraisemblance sous hypothèse Gaussienne, 9 classifications ont été réalisées																
RESULTATS	<table border="0"> <tr> <td>Classif 1 (sans transformation)</td> <td>précision : 79,2%</td> <td>classif 6 (multidates)</td> <td>précision 87,2%</td> </tr> <tr> <td>2 (filte médian)</td> <td>89,1%</td> <td>7 (4 TM du 29/7)</td> <td>77,5%</td> </tr> <tr> <td>3 (majoritaire)</td> <td>90,5%</td> <td>8 (4 MSS du 2/11)</td> <td>72,9%</td> </tr> <tr> <td>4 (Transformation canonique)</td> <td>83,4%</td> <td>9 (2/11 7 bandes MSS et TM)</td> <td>79,2%</td> </tr> </table>	Classif 1 (sans transformation)	précision : 79,2%	classif 6 (multidates)	précision 87,2%	2 (filte médian)	89,1%	7 (4 TM du 29/7)	77,5%	3 (majoritaire)	90,5%	8 (4 MSS du 2/11)	72,9%	4 (Transformation canonique)	83,4%	9 (2/11 7 bandes MSS et TM)	79,2%
Classif 1 (sans transformation)	précision : 79,2%	classif 6 (multidates)	précision 87,2%														
2 (filte médian)	89,1%	7 (4 TM du 29/7)	77,5%														
3 (majoritaire)	90,5%	8 (4 MSS du 2/11)	72,9%														
4 (Transformation canonique)	83,4%	9 (2/11 7 bandes MSS et TM)	79,2%														
CONCLUSIONS	<ul style="list-style-type: none"> - Les bandes TM suffisent pour discriminer le mode d'utilisation du sol - Il existe une redondance à l'intérieur des bandes spectrales, on peut donc supprimer sans perte significative les canaux TM6 et TM2 - TM permet d'identifier des étendues d'eau 3 fois plus petites que ne le permettait MSS 																

ANNEXE A.1.3 - LE POINT SUR LA TELEDETECTION URBAINE A TRAVERS LA BIBLIOGRAPHIE FRANÇAISE ET ANGLO-SAXONNE SUR LE SUJET.

1.3.1) DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE.

Cinq grands types de documents servent couramment de référence pour choisir les sites d'entraînement dans l'optique d'une classification supervisée ou de l'identification de signatures spectrales, ainsi que pour vérifier les résultats dans les zones test après classification. Il s'agit :

- *D'enquêtes sur le terrain des zones échantillon.* Cinq auteurs ont défini leur typologie ou ont procédé à des vérifications par ce seul moyen.

- *De photographies aériennes.*

- ◊ Panchromatiques : 23 auteurs. L'échelle de restitution varie de 1/100 000 à 1/10.000, la moyenne se situe aux alentours de 1/24 000. Deux auteurs seulement ont profité des possibilités qu'offre la stéréoscopie pour l'interprétation du milieu urbain.

- ◊ Infra-rouge couleur : 8 auteurs. L'échelle de restitution des photographies varie entre 1/20 000 et 1/40 000. Un seul auteur a tiré profit de la lecture stéréoscopique.

- *De photographies terrestres.* Deux auteurs ont utilisé ce mode de restitution en couleur naturelle, l'un d'eux a numérisé une interprétation de ces photographies.

- *De cartes topographiques ou thématiques déduites de l'interprétation de photographies aériennes :* 30 auteurs. Leur échelle varie entre 1/5000 (carte de l'occupation du sol issue du MOS) et 1/500 000 (carte géologique). Des cartes provenant d'organismes aussi divers que l'USGS, l'IGN, Michelin, et le Ministère des Travaux Publics ont servi de base à ces travaux.

- *D'études statistiques.* Deux auteurs ont puisé des informations susceptibles de les aider à mettre au point leur nomenclature dans des recueils statistiques divers.

- *D'autres données.* Cinq auteurs se sont servi du MOS, un autre a travaillé à partir d'une base de données géographiques (CUSHNIE J.L., 1984).

1.3.2) IMAGES LANDSAT MSS.

. *Type d'images.*

Ce sont toutes des images enregistrées par le satellite Landsat. Peu d'auteurs précisent la qualité des images. [BARDINET C., 1982], [BALLUT et Al., 1982]. BOZET et Al. (1978) attirent l'attention du lecteur sur l'importance des phénomènes de pollution. Dans [FERIER et Al., 1979], est expliquée en détail la méthode de correction radiométrique choisie. CARTER et Al. (1980) indiquent que compte tenu des perturbations climatiques, une couverture LANDSAT MSS complète sur leur zone de travail (l'Angleterre) n'est possible qu'à une ou deux occasions dans l'année.

De nombreux auteurs font part de leurs difficultés pour superposer une carte thématique sur une image MSS [BALLUT A., 1979]. Après correction géométrique, CARTER et Al. (1980) constatent une erreur standard de 1 pixel. Pour superposer deux images MSS, RICHARD J.A. (1984) fonde sa méthode sur le calcul de l'interpolation cubique (30 amers ont été retenus) et obtient moins d'un quart de pixel de différence (moins de 15 m).

. *Nomenclature des classifications.*

La nomenclature de l'occupation du sol choisie par les différents auteurs varie suivant le

document qui est à l'origine de leur travail:

- Typologie fonctionnelle en 19 postes du Mode d'Occupation du Sol réalisée par l'IAURIF.
- Typologie issue de l'interprétation de photographies aériennes : 26, 8, 12, 5, 7, 18, 6, 8, 6 classes.
- Nomenclatures issues des classifications non assistées : 21, 15, 6, 16 classes (regroupées ultérieurement en 6 classes synoptiques), 49 taxons (regroupées en 5 classes).

Dans son article, FORSTER B.C. (1985) décrit la contenance moyenne d'un pixel urbain dans sa zone de travail : herbe (36%), toiture (23%), arbre (16%), bitume (14%), béton (5%), autre (6%).

. *Prétraitements.*

Le plus simple de ces prétraitements, et qui donne de bons résultats, est la détermination d'indices:

- $MSS4-MSS6$, $(MSS4+MSS5+MSS6) / MSS4$ [BARDINET C., 1982];
- $MSS7 / MSS5$, $MSS5 / MSS4$ [LO C.P., 1985];
- L'indice de végétation qui met en évidence la limite urbaine ainsi que les axes routiers principaux [BOASSON et Al., 1983];

ou la création de néo canaux :

- Transformation de KARHUNEN-LOEWE (on retient les 2 premières composantes principales) [BOZET et Al., 1978, 1980], [FERIER et Al., 1979], ou les 4 premières dans le cas d'une analyse diachronique [RICHARD J.A., 1984].

Avant de mettre en oeuvre une classification, DURAND-LASSERVE et Al. (1982) partitionnent leur image en urbain/rural utilisant une méthode automatique (signatures spectrales proches) et une méthode visuelle (délimitation sur écran) qui s'est avérée être la meilleure. Cependant, la méthode la plus efficace pourrait être de délimiter les deux zones en se basant sur l'analyse du changement des valeurs radiométriques entre deux dates.

Les auteurs s'intéressent aussi à la répartition spatiale des pixels. Deux grands axes sont explorés :

- Affectation du pixel à une cellule par filtrage spatial [BOZET et Al., 1980], ce qui a pour effet d'améliorer le résultat des classifications non supervisées (moins de pixels isolés, plus de classes) et d'accroître la netteté des contours;
- Calcul de paramètres de texture : matrice de cooccurrence des niveaux de gris (14 paramètres) [DINSTEIN et Al., 1973], [JENSEN J.R., 1978];
- Transformée de FOURIER [BARDINET C., 1982].

Des approches originales sont tentées :

- Calcul de la diminution du désordre dans l'image que provoque la correction radiométrique à l'aide de la théorie de l'information, ou application du modèle numérique des catastrophes, qui s'est soldé par un échec compte tenu de la trop grande fluctuation des luminances entre pixels voisins, [FERIER et Al., 1979];
- "Etude des formes contenantes" et en particulier extraction des réseaux à l'aide de filtres (variance mobile et Laplacien), séparation entre une texture plus grossière et une texture plus fine, et recherche des formes squelette en contractant l'information spatiale [RIMBERT S., 1981].

Dans [FORSTER B.C., 1985], l'Analyse en Composantes Principales exprime les contributions de chaque composante pour chacune des classes thématiques et l'on peut visualiser les positions des différentes classes sur le premier axe factoriel. Ce type d'analyse fait quelquefois apparaître des noyaux et permet d'intégrer, lors de la classification, des paramètres de texture pré-calculés [WILMET J., 1982].

Méthodologie des classifications et résultats (Tableau A.1.3.1).

BALLUT A. (1979) emploie une classification supervisée de type géométrique, et il fait varier la caractéristique de calcul des distances, ainsi que le mode de choix des pixels.

CARTER (et Al., 1980) fait appel à une classification supervisée selon le maximum de vraisemblance. La cause principale des mauvais classements provient selon lui d'une rectification géométrique insuffisante, d'une résolution spatiale et spectrale inadaptée à la problématique, et du manque de sophistication du logiciel de classification.

DINSTEN (et Al., 1973) calcule les matrices de cooccurrence des niveaux de gris puis procède au classement selon une classification supervisée, avec hypothèse statistique pour la photographie aérienne digitalisée, et selon les hyper-plans discriminants pour l'image satellite.

JENSEN J.R. (1978) crée un quatrième canal composé respectivement de l'Ecart Type Local (ETL), du Contraste (C), du Filtrage Haute Fréquence (FHF) et du Second Moment Angulaire (SMA). Une moyenne prenant en compte les 4 directions principales est ensuite effectuée.

LO C.P. (1985) teste différentes classifications. Dans les trois premières, il fait appel à la distance euclidienne comme mesure. Les traitements effectués sont :

- Transformation par une Analyse Canonique;
- Classification selon deux Néo Canaux : MSS5/MSS4, MSS7/MSS5.

Dans la classification suivante, il pose une hypothèse statistique (Maximum de Vraisemblance).

Tableau A.1.3.1 - Comparaison des classifications. Images MSS -

AUTEUR	CANAUX	TRAITEMENT	POSTES	FIABILITE	ECHANTILLON
BALLUT 85					
BALLUT 79	4MSS	Sebesten	19	22,4%	zone de 621 pix
	4MSS	Euclidienne	19	24,0%	zone de 621 pix
	4MSS	Xi et écart	19	26,9%	zone de 621 pix
	4MSS	sans	19	24,6%	zone entière ¹
	4MSS	2	19	41,7%	zone entière 1
	4MSS	2 (resp 2)	19	51,7%	zone entière 1
	4MSS	2 (resp 3)	19	53,8%	zone entière 1
	4MSS	sans	8	60,0%	zone entière 1
CARTER	4MSS	sans	5	80,0% ³	6 zones test
DINSTEIN	4MSS	sans	8	77,0%	6244
	4MSS	texture	8	83,0%	6244
	photo	sans	7	83,0%	6244
JENSEN	MSS4,5,6	sans	6	sans	
	MSS4,5,6	ETL	6	+37,0%	5
	MSS4,5,6	C	6	+70,0%	5
	MSS4,5,6	FHF	6	+80,0%	5
	MSS4,5,6	SMA	6	+55,0%	5
LO	4MSS	DE	9	73,4%	6
	4MSS	DE	8	77,0%	7
	4MSS	AC	8	81,0%	7
	4MSS	NC	8	83,8%	7
	4MSS	MV	8	72,4%	7

Les autres auteurs ne quantifient pas les résultats de leur classification, la plupart d'entre eux comparent visuellement les classes obtenues avec une carte thématique ou une photographie aérienne de leur zone d'étude. BARDINET C. (1982) propose une méthode de critique de la classification fondée sur l'analyse discriminante.

Seul l'article de BOZET et Al. combine deux classifications; la première, non assistée, est suivie d'une seconde, assistée; cependant l'identification de l'industrie lourde demeure impossible. Dans leur article, HUSSON et Al. (1982) indiquent les limites d'une classification, même supervisée.

¹ Image de 256 036 pixels.

² On ne prend en compte que les pixels ayant 1, (res 2), (res 3) couronne(s) de pixels de même MOS.

³ Ce chiffre ne concerne que les zones urbaines. 85 à 95 % des zones rurales ont été bien classées.

⁴ La moitié pour l'entraînement et l'autre moitié pour la validation.

⁵ Les pixels qui ont changé d'affectation sont vérifiés par enquête sur le terrain.

⁶ La classification obtenue est comparée avec une photographie aérienne échelle de restitution 1/ 100 000. Le nombre de pixels test n'est pas précisé.

⁷ La classification est comparée avec une photographie aérienne ; échelle de restitution 1/25 000. Le nombre de pixels test n'est pas précisé.

BOASSON et Al. détectent les changements intervenus entre deux dates sans mettre en oeuvre le mécanisme un peu lourd d'une classification. Une composition colorée de l'indice de végétation à ces deux dates fait apparaître les zones nouvellement construites ainsi que la délimitation urbain/rural.

[IISAKA J., HEGEDUS E., 1982] mettent en oeuvre une méthode originale d'estimation de populations, de description de leur distribution et de leur changement à partir des variables radiométriques. Des régressions sont tentées entre les variables de 3 des canaux bruts (rééchantillonnées à 50 m et corrigées géométriquement) et les données du recensement transformées en densité de population sur une grille 500m*500m.

1.3.3) IMAGES LANDSAT THEMATIC MAPPER.

. Type d'images.

Il s'agit le plus souvent d'images enregistrées par le satellite. Seul HAACK B.N. (1984) a mêlé des images TM simulées avec des images radar simulées à l'aide d'un capteur embarqué sur avion. La plupart des auteurs n'ont pas travaillé sur la bande 6 (infra rouge thermique de résolution 120 mètres).

Dans [CUSHNIE J.L., 1984], il est rappelé l'influence de l'heure d'enregistrement de l'image et plus particulièrement de la position du soleil sur les phénomènes de zones d'ombre potentiellement nombreuses dans les villes.

Il est rarement précisé si ces images ont fait l'objet d'un prétraitement visant à les corriger géométriquement et radiométriquement. IOKA M. et Al. (1986) notent qu'ils ont rééchantillonné leur image à 30 mètres exactement (initialement 28,5 m) à l'aide d'une convolution bi-cubique standard qui lisse la radiométrie. Ils ont ensuite procédé à une correction géométrique (3^{ième} ordre).

Seul TOLL D.L. (1985) précise brièvement la qualité de l'image (présence ou non de nuages, brume, etc...).

Un quart des articles dépouillés ne présente pas de description, même sommaire, du site étudié.

. Nomenclature des classifications.

Il est majoritairement fait appel à une optique fonctionnelle pour définir les thématiques de classification des différentes utilisations / couvertures du sol.

Le nombre de classes varie de 5 à 23, sauf WANG S.C., 1984 qui se repère par rapport à 49 "états" regroupés ultérieurement en 10 grandes classes. Dans certaines typologies, le bâti n'est caractérisé que par 2 classes en fonction de sa densité [CUSHNIE J.L., 1984] ou du type d'activité (commerce et industrie / habitat) [TOLL D.L., 1985]. FUEKI (et Al., 1985) propose, parallèlement à une typologie fonctionnelle en 23 postes, une typologie des matériaux de construction comportant 10 classes, ainsi qu'une correspondance entre elles deux. IOKA M. et KODÁ M. (1986) évaluent la fiabilité des classifications en fonction du nombre de classes prises en compte.

La plupart des types sont déduits de l'interprétation de photographies aériennes, préalablement à la classification. Cependant, le mode de classification choisi rend quelquefois indispensable l'adoption d'une nouvelle nomenclature.

. Prétraitements ou post-traitements.

Trois grands types de traitements ont été effectués dans le but d'améliorer les résultats des classifications :

-Les filtres spatiaux. Il s'agit de dégrader l'image (atténuation du contraste à

l'aide d'un lissage) qui entraînera une réduction de la variance intra classe [TOLL D.L., 1985], [CUSHNIE J.L., 1984] ou un lissage majoritaire de la classification qui améliorera les résultats [IOKA M., KODA M., 1986].

- Le calcul d'indices. LIMA ROSARIO DA TRIDALE F. (1985) fait appel à deux indices, l'indice de végétation et l'indice de brillance; le résultat de ces deux classifications est uniquement visuel.

- Les analyses :

* Analyse multicanal. TOLL D.L. (1985) et QUATTROCHI D.A. (1983) en extraient les corrélations entre les différents canaux.⁸

* Analyse discriminante. Elle permet de calculer le pouvoir, le degré de séparabilité de deux classes. On peut en déduire les combinaisons de canaux optimales : TM 4 / 4,5 / 3,4,5 / 2,3,4,5 / [CUSHNIE J.L., 1984], (HAACK N.B., 1984) : TM4 / 4,5 / 2,1,6 / 1,2,3,6, ou [TOLL D.L., 1985] : TM 5 / 2,3 / 2,4,6 / 3,4,5,7.

* Analyse canonique. FUEKI et Al. (1985) la développent pour rechercher la combinaison de canaux optimale face à un thème déterminé, cartographie de l'utilisation du sol : TM 2,3,4, et cartographie des matériaux de construction : TM 4,5,7. Dans [TOLL D.L., 1985], la transformation canonique, qui est une transformation linéaire, est mise à contribution pour réduire la variance intra classe tout en perdant le minimum de variance inter classes.

* Analyse statistique descriptive : tableau présentant la moyenne et l'écart type pour chaque zone dans chaque canal [HAACK B.N., 1984].

. *Méthodologie des classifications et résultats (Tableau A.1.3.2)*

Nous ne parlerons ici que des classifications ayant donné lieu à une évaluation chiffrée des résultats. Comme le disent HORD R.M. et BROONER W. (1976), "pour favoriser l'accueil de la cartographie de l'occupation du sol à partir de la télédétection, le cartographe doit être capable de spécifier la précision de son travail". Les autres méthodes (de l'histogramme bidimensionnel et de la divergence transformée) ont été uniquement évaluées par les auteurs en fonction de critères visuels : comparaison avec une carte thématique ou une photographie aérienne.

Différents types de classifications supervisées multicanal sont habituellement employées, mais la plus usitée est celle du maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne [CUSHNIE J.L., 1984], [TOLL D.L., 1985], [IOKA M., KODA M., 1986]. Une méthode non supervisée a été testée par QUATTROCHI D.A. (1983); une autre s'apparentant aux nuées dynamiques est choisie par WANG S.C. (1984).

⁸ Matrice de corrélation Landsat TM.

Bande	1	2	3	4	5	6	7
1	1,0						
2	0,96	1,0					
3	0,83	0,89	1,0				
4	0,57	0,62	0,65	1,0			
5	0,76	0,81	0,79	0,70	1,0		
6	0,84	0,87	0,84	0,60	0,95	1,0	
7	-0,05	-0,10	-0,16	0,05	-0,09	-0,10	1

Tableau A.1.3.2 - Comparaison des classifications. Images TM -

AUTEUR	CANAUX	TRAITEMENT	POSTES	FIABILITE	ECHANTILLON
CUSHNIE	TM3,4,5	Filtre moyen	5	93,3%	9
	TM1,3,4,5	Filtre médian	5	92,0%	1
	7 TM	sans	5	89,0%	1
QUATTROCHI	7TM	sans	11	89,18%	10
TOLL	7TM	Lissage	7	90,5%	75 pixels/classe
	7TM	Filtre médian	7	89,1%	"
	11TM	Multidate	7	87,2%	"
	7TM	Trans Canon	7	83,4%	"
	7TM	sans	7	79,2%	"
WANG	6TM	sans	5	43 à 100%	non précisé
IOKA et Al.	6TM	rééchantillonnage	12	48%	147 zones test
			5	76,8%	"

1.3.4) COMPARAISON TM / MSS / SPOT / PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES.

. Nomenclature des classifications.

Toutes les thématiques à l'exception de [ANUTA et Al. 1984] sont d'inspiration fonctionnelle.

Ces typologies issues de l'interprétation de photographies aériennes comportent entre 7 et 12 postes, mise à part celle de [DOLAN et Al., 1984], dont le nombre de classes n'est pas précisément spécifié et qui s'inspire à la fois de la typologie de l'USGS Land use and Land Cover Classification et de la Howard County Classification Summary. Ces deux typologies très semblables possèdent 4 niveaux de précision. Après une classification de type non supervisée, les auteurs totalisent 51 classes pour l'image SPOT et 46 classes pour l'image TM; de même, ANUTA et Al. (1984) obtiennent 42 classes pour l'image TM et 21 classes pour l'image MSS, à la suite d'une classification de type nuées dynamiques (classification non supervisée).

L'article de COLWEL R.N. et POULTON C.E. (1984) ne se base pas sur une réelle typologie puisque l'objectif de cette étude consiste en une détection d'objets, urbains et ruraux, bien précis (maisons, églises, golfs, chênes, etc...).

. Traitements.

⁹ Les pixels d'entraînement sont choisis par hasard par fenêtres de (5,5), ceux de test par fenêtres de (3,3). Suburbain (125 pixel d'entraînement, 63 pixels de validation), urbain dense (50,27)⁹, eau (125,63), forêt (125,63), Agriculture (250,126).

¹⁰ 138 polygones échantillon ont été vérifiés sur le terrain. La moitié pour identifier les classes, l'autre moitié pour évaluer la fiabilité de la classification.

ANUTA et Al. (1984) procèdent à l'Analyse en Composantes Principales d'une image TM et d'une image MSS représentant la même zone (Chicago), ce qui leur permet d'affirmer que, sur ce site, on peut se contenter des 4 premières composantes pour TM et des 2 premières pour MSS sans perte significative d'information (variance expliquée respectivement 98,50% et 96,78%). Les mêmes auteurs déterminent, à l'aide de l'Analyse Discriminante qui mesure le pouvoir de séparabilité des canaux par le calcul de la distance statistique entre chaque classe, les combinaisons de canaux les plus discriminantes qui sont : TM 5 / 4,5 / 3,4,5 / 3,4,5,6 / 3,4,5,6,7 / 2,3,4,5,6,7.

Dans ses deux articles, TOLL dégrade la résolution spatiale (convolution par filtre) ainsi que le niveau de quantification (division par 4 de la valeur de chaque pixel) de TM afin de pouvoir évaluer, sur une même base, le gain ou la perte de discrimination imputable à TM.

. Méthodologie des classifications et résultats (Tableau A.1.3.3).

En ce qui concerne les classifications supervisées, qui sont les seules à avoir été suivies de mesures de fiabilité, la méthode dominante demeure la classification selon le maximum de vraisemblance.

Tableau A.1.3.3 - Comparaison des classifications. Image MSS et TM -

AUTEUR	CANAUX	TRAITEMENT	POSTES	FIABILITE	ECHANTILLON
ANUTA	7 TM	sans	7	95,7%	X
	TM 3,4,5,6	sans	7	92,6%	X
	MSS4,5,6,7	sans	7	67,4%	X
	7 TM	SECHO ¹¹	7	97,9%	X
KENNARD	SPOT	sans	8	45,4%	10
	TM 2,3,4	sans	8	49,2%	1000 ¹²
	7 TM	sans	8	54,5%	1000 ¹²
TOLL 1985	4 MSS	sans	7	74,8%	75 pi / postes
	7 TM	sans	7	83,2%	75 pi / postes
TOLL 1984	7 TM	simul ¹³	12	70,4%	100 ¹⁴
	4 MSS	sans	12	64,6%	100

1.3.5) SPOT.

¹¹ Supervised Extraction and Classification of Homogeneous Objects (algorithme prenant en compte la texture).

¹² 1000 pixels purs par classes pour l'entraînement et pour le test. Les pixels purs sont ceux dont le voisinage est constitué de pixels appartenant à la même classe thématique.

¹³ Simulation TM ; l'image a été dégradée pour obtenir une résolution spatiale de 30m.

¹⁴ 100 pixels non contigus par classe.

. Type d'images.

En ce qui concerne les publications parues avant 1987, seules des simulations réalisées avec un scanner DAEDALUS embarqué sur avion ont été utilisées. Pour les autres publications, des images multispectrales ont été utilisées.

. Nomenclature des classifications.

BOUILLOT J. (et Al., 1942) ainsi que SOUDOPLATOFF S. (1984) ont défini sur le site de Niamey, à l'aide de photographies aériennes, une typologie en 19 postes (dont 7 spécifiquement urbains) pour le mode multispectral, et une seconde en 15 postes uniquement urbains pour le mode panchromatique. Ces typologies tiennent compte à la fois du type de matériau et de l'âge de la construction. La typologie proposée par l'USGS a été utilisée par DEANGELIS (et Al., 1984) qui a structuré sa photo interprétation en fonction du niveau III. MADEC (et Al., 1984), NGUYEN P.T. (1984) et BOQUET E. (1987) ont opté pour une légende comportant respectivement 3, 7 et 11 postes.

. Traitements

Les néo-canaux décorrélés résultant de l'Analyse en Composantes Principales, ont fait apparaître des réseaux de voirie initialement inexistantes [SOUDOPLATOFF S., 1984] et ont facilité l'identification des différentes classes et de leurs signatures spectrales [NGUYEN P.T., 1984]. Ce dernier auteur a opéré un lissage par la médiane des canaux S1, S2, S3, suivi d'une segmentation de l'image (canal panchromatique). Dans un second temps, il a affecté à chacun des pixels la valeur moyenne des points du segment auquel il appartient. Pour BOQUET E., chaque axe factoriel "valorise" un thème spécifique, le premier axe privilégie le thème "habitat collectif", le second la limite urbain/rural, et le troisième les voiries internes et générales. Une autre ACP est en outre effectuée en intégrant un néo-canal spatial (gradient de Roberts) aux 3 canaux bruts. L'indice de végétation $(S3-S2)/(S3+S2)$ a été calculé avec profit par MADEC (et Al., 1984) et PEBAYLE J. (1986); c'est en effet un estimateur intéressant de l'urbanisation qui permet en outre de faire ressortir clairement l'habitat pavillonnaire.

. Méthodologie des classifications et résultats.

Deux sortes de classifications ont été utilisées:

- Une classification non supervisée, de type nuées dynamiques [BOUILLOT J. et Al., 1984], qui a partagé l'image de Niamey en 50 classes suggérant 4 grands thèmes : urbain, végétation, sols nus et eau. Les auteurs indiquent qu'une classification supervisée a été testée, et qu'elle a donné sensiblement les mêmes résultats.
- Des classifications supervisées :
 - * de type parallélépipédique modifié [DEANGELIS R.H. et Al., 1984]. Un tel traitement a détecté, en nombre, 83% des changements d'affectation et en a correctement reclassé 74% en fonction de la typologie de l'USGS niveau III.
 - * de type agrégation autour d'un centre mobile [MADEC J. et Al., 1984], [PEBAYLE J., 1986]. Sur la même région, l'Ouest de Paris, les premiers partitionnent l'image en typologie de 2 à 5 postes selon la proportion plus ou moins grande de végétation, alors que le second auteur définit 17 classes. Cette classification donne, aux dires des auteurs, de bons résultats.
 - * de type maximum de vraisemblance
 - sur une image lissée et segmentée [NGUYEN P.T., 1984]. Cette

classification, dont on ne connaît pas la légende thématique, discrimine l'habitat individuel, mais ne différencie pas les zones d'habitat collectif.

- sur les 3 canaux bruts (93% de points bien classés pour une typologie en 11 postes) et sur les 3 canaux bruts enrichis d'un néo-canal spatial. La prise en compte de l'amélioration de contour améliorant nettement les résultats de la classe "habitat individuel" [BOQUET E., 1987].

SOUDOPLATOFF S. (1984) obtient une légende en 5 postes (plus ou moins densément bâtis) à la suite d'une classification d'un type non précisé.

Une démarche originale est tentée par DE KEERSMACKER, il s'agit de "considérer la densité d'espaces verts comme un indicateur socio-économique". L'extraction des espaces verts se fait par lissage à l'aide d'une fenêtre 33*33 et permet de calculer un taux de "verdurisation", après une classification en 4 postes (espaces bâtis, espaces verts, prairies et sols nus) dont la précision est 84%. Ce coefficient est introduit dans une analyse de régression avec des variables exogènes socio-économiques. Une tentative de modélisation sera ensuite effectuée en tenant compte de la distance au centre ville.

On notera que seulement deux parmi toutes ces classifications supervisées ont donné lieu par la suite à une estimation chiffrée de fiabilité. Pour la plupart, les auteurs se contentent d'une estimation visuelle des résultats de leur traitement.

**ANNEXE A.1.4 - PRATICABILITÉ FACE AUX
CONTRAINTE MÉTÉOROLOGIQUES -**

ANNEXE A.1.4 - PRATICABILITÉ FACE AUX CONTRAINTES MÉTÉOROLOGIQUES -

A.1.4.1) LE SITE DE QUITO (EQUATEUR)

. Site et climat de Quito.

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

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

A.1.4.1.1) Recueil des données météorologiques.

. Origine des données.

A Quito, les relevés météorologiques quotidiens (**Figure A.1.4.1** et **A.1.4.2**) de la station de l'aéroport "Mariscal Sucre" relatifs aux 10 dernières années sont regroupés dans les bureaux de la Direction de l'Aviation Civile. L'aéroport se situe dans la partie nord de la ville et constitue la seule station météorologique où sont effectués des relevés horaires de nébulosité. L'importance du recueil de ces données pour l'aviation constitue une garantie de fiabilité suffisante pour notre propos.

. Type des données recueillies.

La nébulosité.

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

. Les précipitations.

Deux types d'appareils sont utilisés pour mesurer la quantité de précipitation: le pluviomètre et le pluviographe. Nous avons opté pour ce dernier, plus précis et dont aucune mesure n'était absente dans la période considérée, ce qui n'était pas le cas des mesures de pluviométrie. Le pluviographe enregistre directement les quantités d'eau recueillie en mm pendant 6 heures. Nous avons relevé nos données pour la période comprise entre 1h et 7h, laps de temps situé immédiatement avant l'heure de passage des deux satellites. La prise en compte de cette mesure constitue un critère de choix non négligeable pour déterminer les périodes de l'année durant lesquelles la surface perméable du sol n'est pas imbibée d'eau.

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

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

. La vitesse du vent.

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

. Période et fréquence des données.

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

A.1.4.1.2) Traitement des données météorologiques.

. Fréquence relative de la nébulosité par mois. (Figures A.1.4.3, 4 et 5).

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

La comparaison pour un même mois aux heures différentes de passage des deux satellites nous livre une première information intéressante : les fréquences de faible nébulosité (de 0/8 à 2/8) sont plus importantes à 9h30 qu'une heure plus tard, et ce quelque soit le mois considéré, à l'exception toutefois du mois de mars à la nébulosité de toute façon trop forte pour pouvoir être retenu. Les histogrammes de la Figure A.1.4.6 renforcent cette opinion. L'idée communément exprimée affirmant que SPOT "passe" trop tard se trouve donc confirmée.

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

Soit une nébulosité inférieure ou égale à 2/8. Les mois pendant lesquels la fréquence des jours qui vérifient cette condition est la plus forte sont les suivants (Tableaux A.1.4.1 et A.1.4.2):

- à 9h30: juillet (43%), août et septembre (36%) et novembre (35%)

- à 10h30: juillet (36%), août (35%), novembre (30%) et juin (29%).

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

du point de vue nébulosité sont :

- à 9h30 : mars (6%)
- à 10h30 : avril (5%) et mars (7%).

Tableau A.1.4.1 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 9h30 -

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

. Les précipitations.

Les diagrammes en barre de la **Figure A.1.4.7** nous indiquent les mois les plus défavorables à l'enregistrement d'une image. Cette indication est fondée à la fois sur la moyenne journalière des précipitations exprimées en mm et sur le pourcentage des journées pluvieuses, et ceci pour chacun des mois de l'année. La période considérée, entre 1h et 7h, se situe juste avant les heures de passage des satellites.

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

Tableau A.1.4.2 - Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 10h30 -

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

. Les vents.

La période la plus ventée s'étend de Juin à Septembre. La Figure A.1.4.8 présente 2 diagrammes en barre correspondant aux heures de passage des satellites. Nous avons relevé, pour chacun des mois des 10 années pour lesquelles nous avons recueilli des données, la vitesse maximale des vents. Ces diagrammes illustrent donc la fourchette (minima et maxima) des vitesses maximales du vent. La période la plus ventée s'étend de Juin à Septembre et affecte donc malheureusement les mois les plus favorables pour l'enregistrement des images. Cependant, si ces vitesses semblent importantes et donc paraissent pouvoir occasionner des nuages de poussière susceptibles de bruite le signal lors de l'enregistrement des images, il convient de relativiser ce phénomène en rappelant qu'il s'agit de maxima; l'apparition de vents soufflant à ces vitesses demeure peu fréquente.

Figure A.1.3.3 - Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (janvier-avril) -

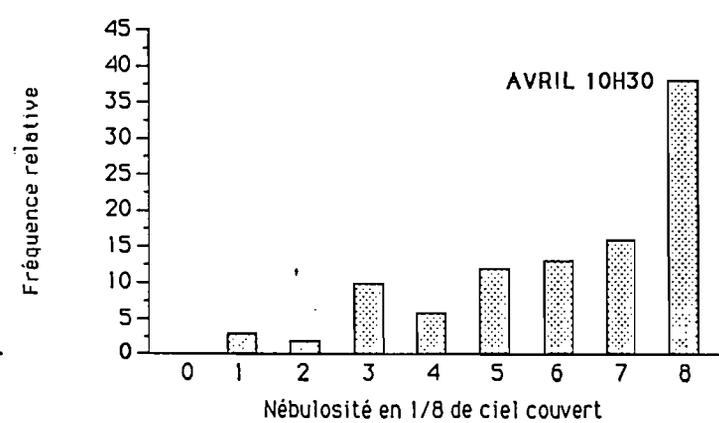
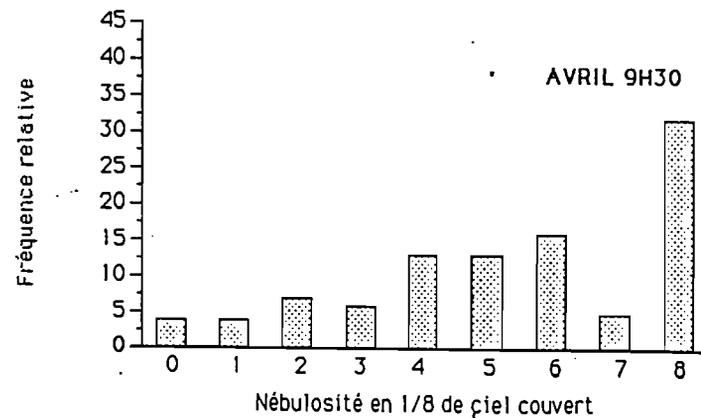
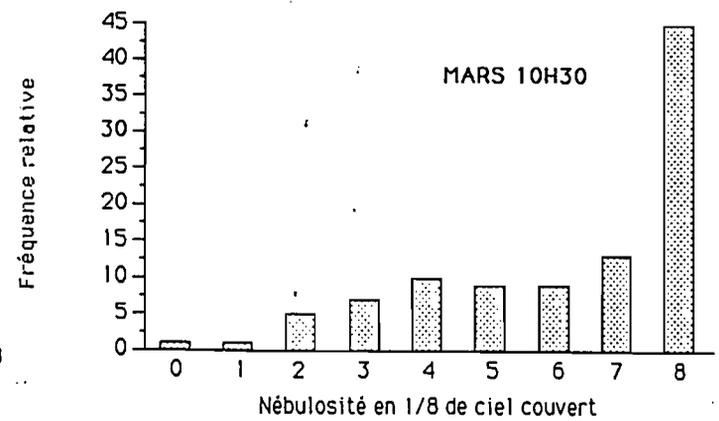
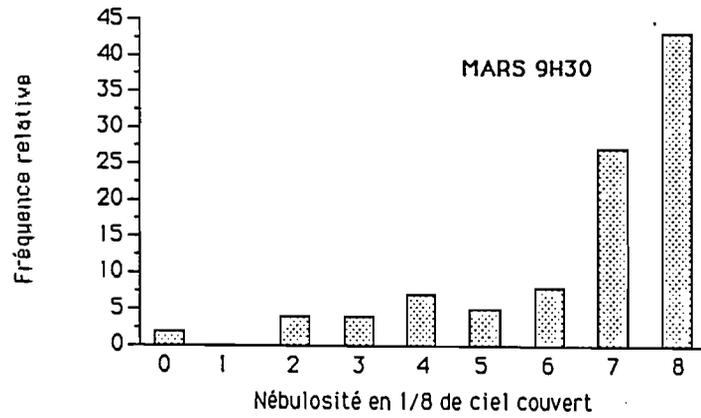
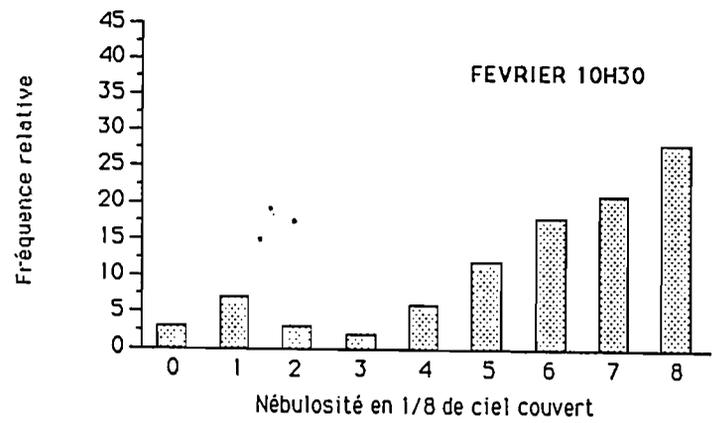
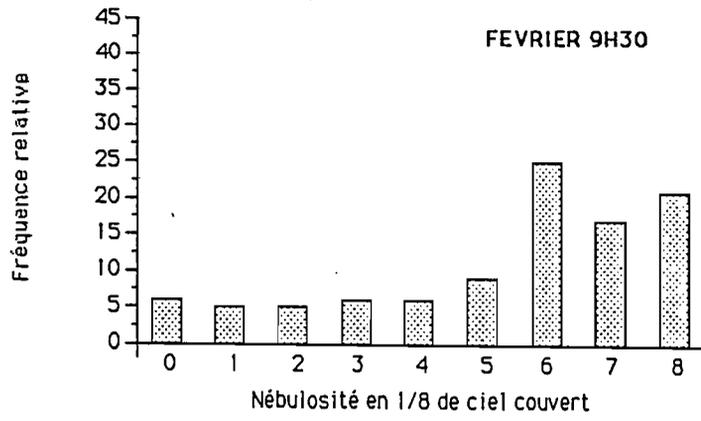
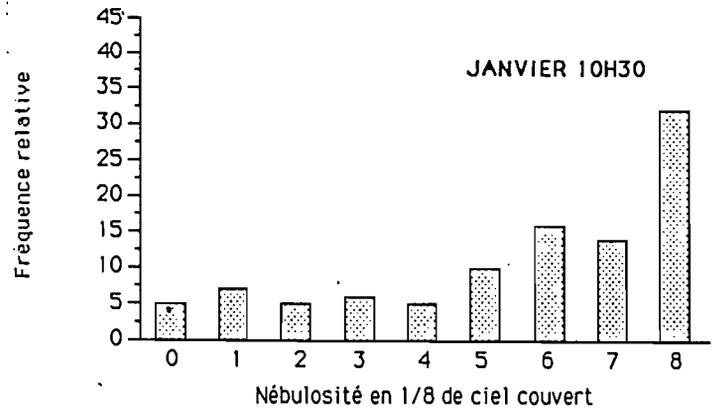
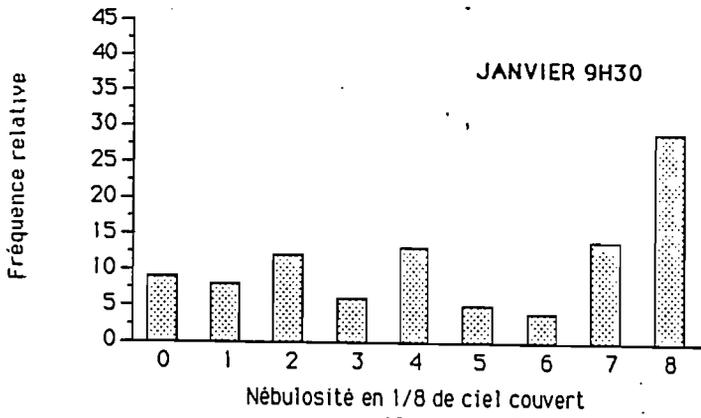


Figure A.1.3.4 - Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (mai-août) -

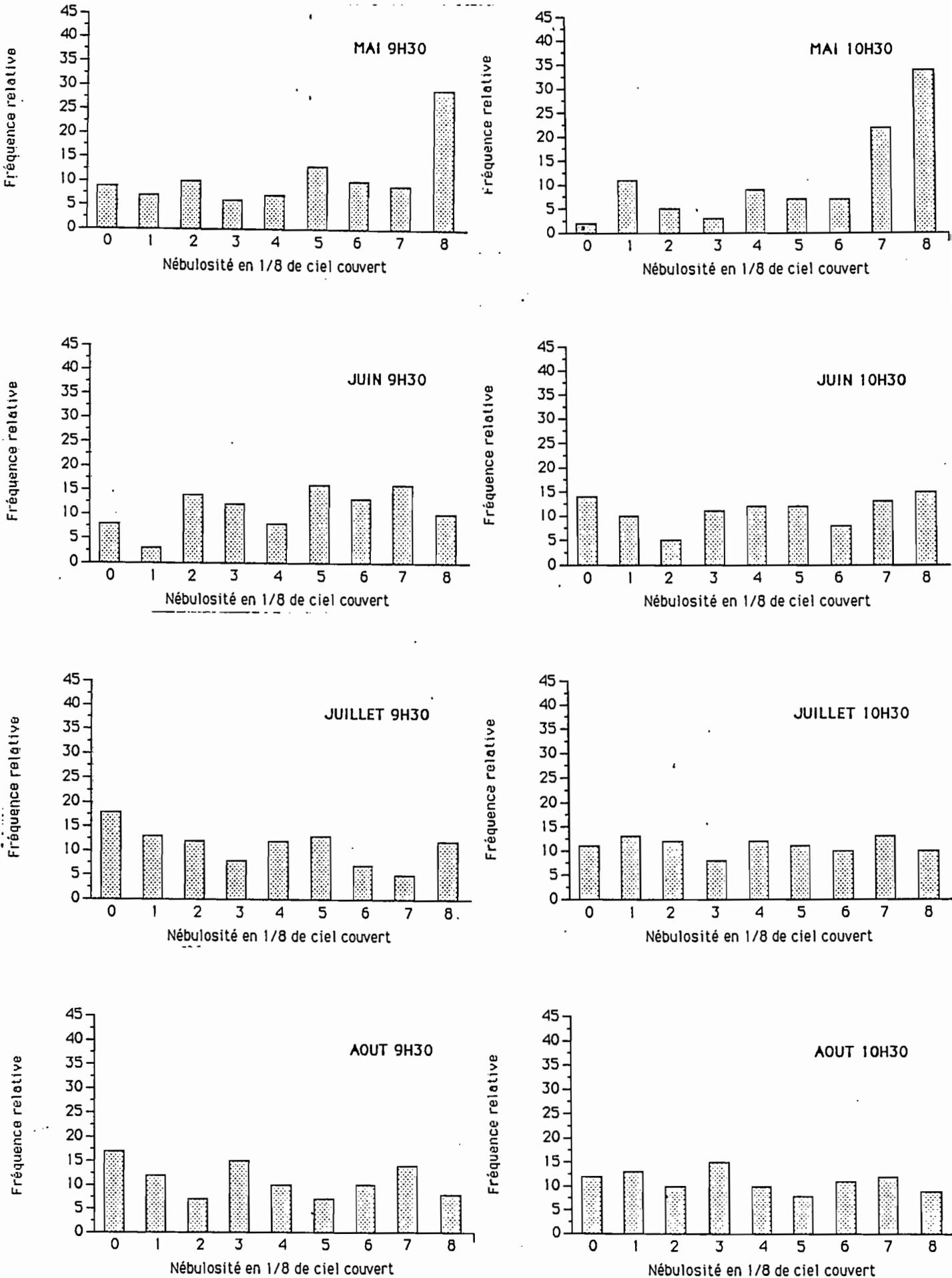
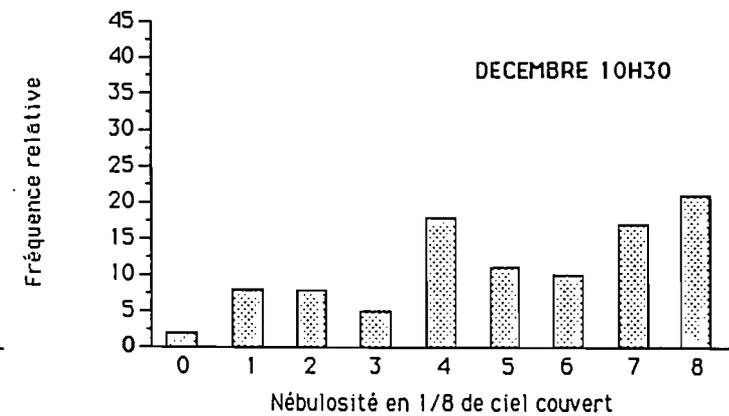
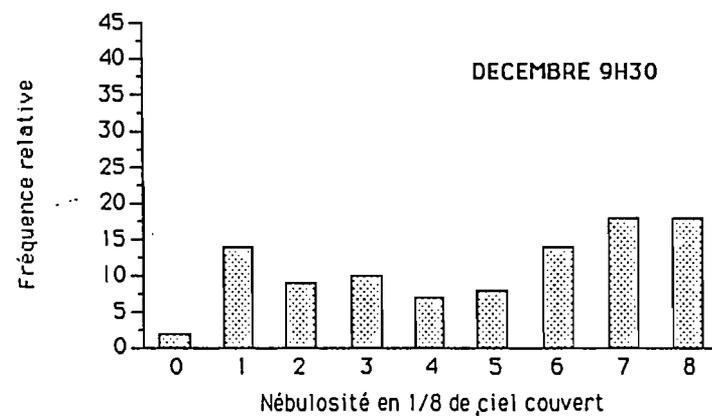
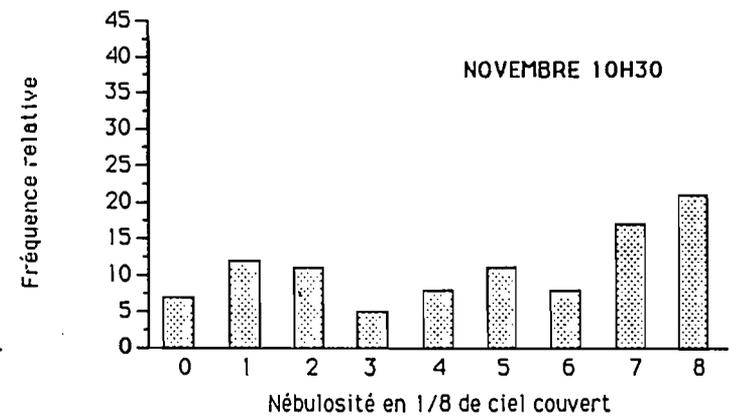
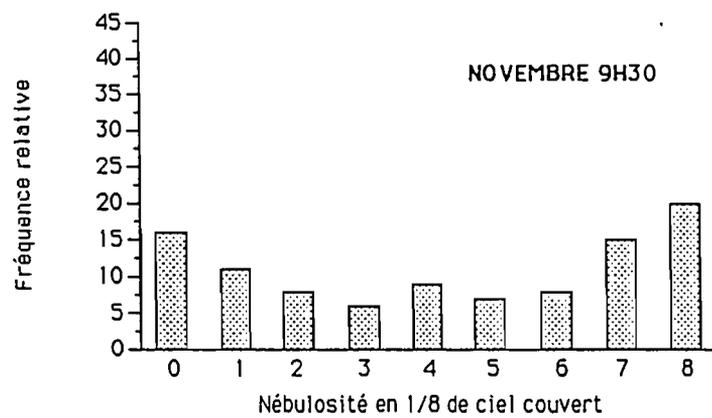
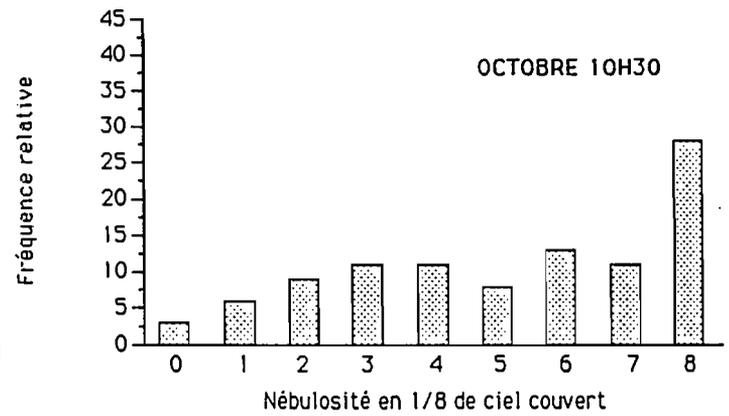
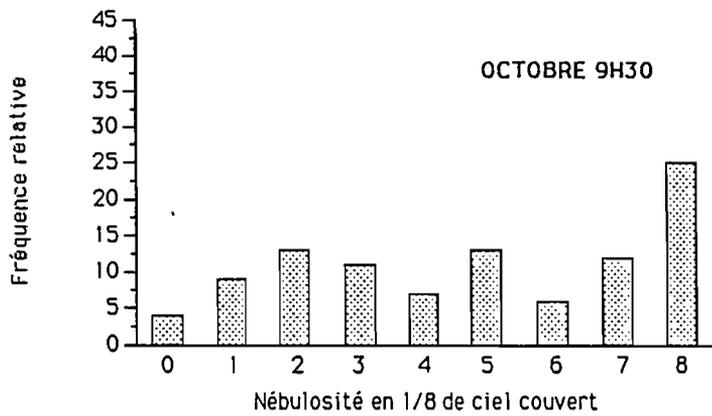
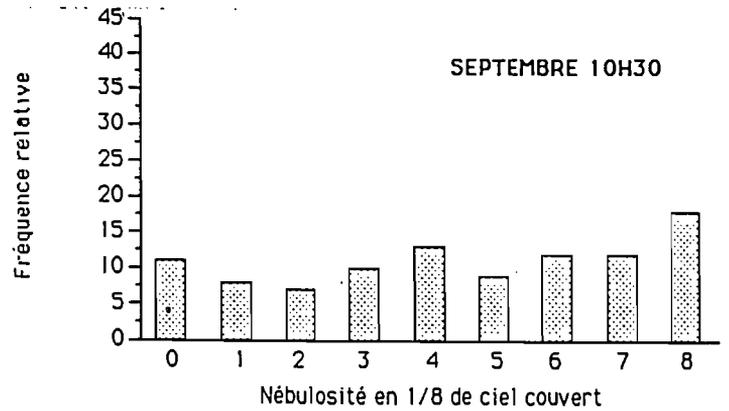
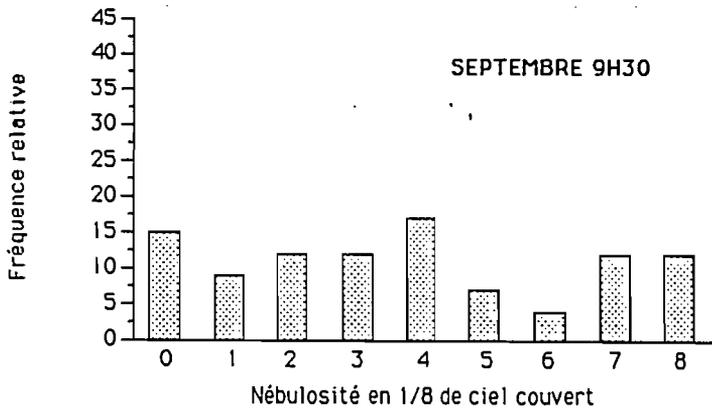


Figure A.1.3.5 - Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (septembre-décembre) -



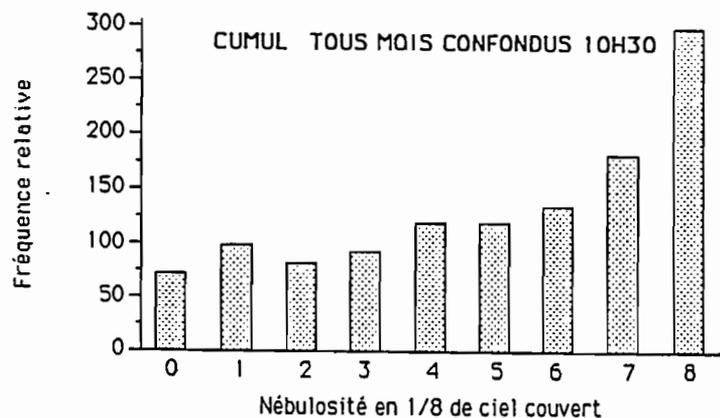
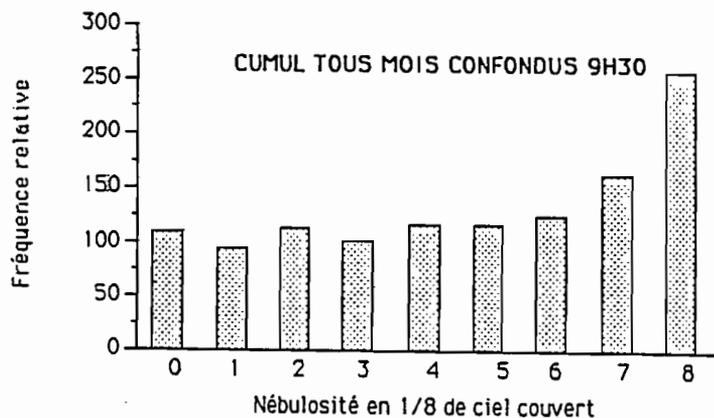


Figure A.1.3.6 - Somme sur 10 ans, tous mois confondus, de la nébulosité à 9h30 et 10h30 -

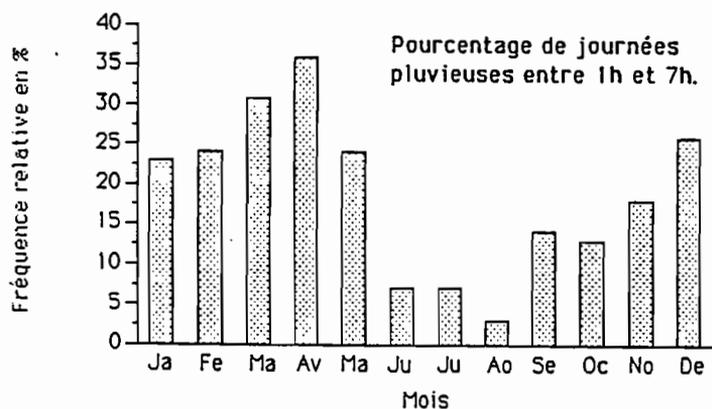
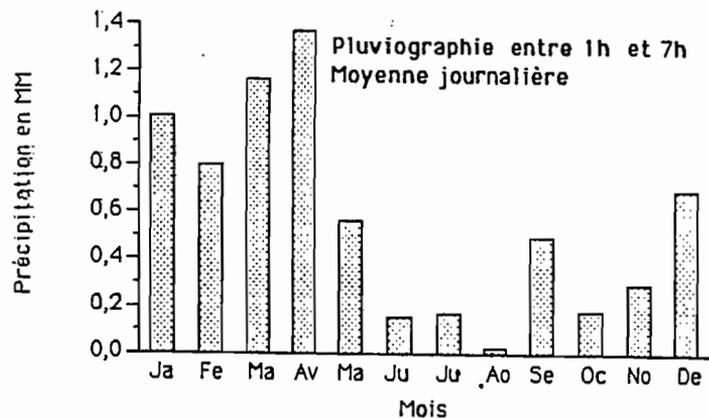


Figure A.1.3.7 -Moyenne et fréquence de la pluviographie quotidienne par mois -

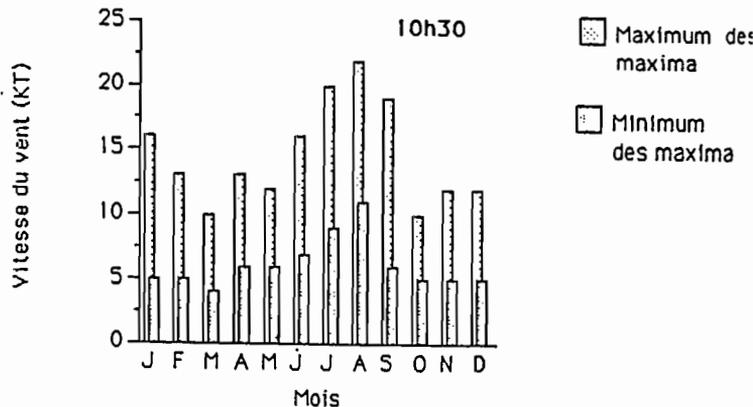
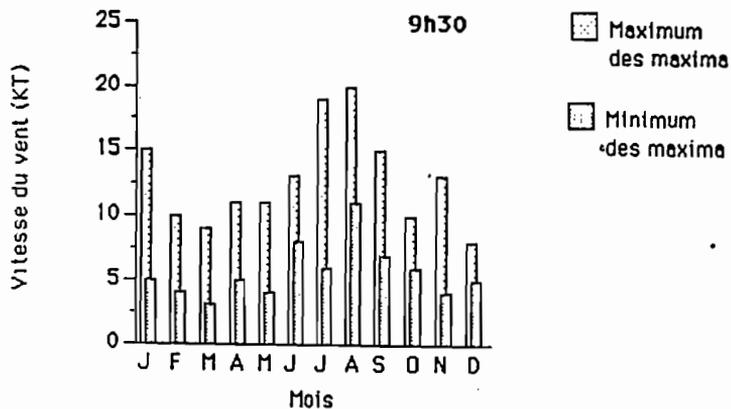


Figure A.1.3.8 - Vitesse du vent, maximum et minimum des maxima par mois -

**ANNEXE A.2.2 - ETUDE DU DESCRIPTEUR
"DENSITÉ DU BATI" -**

**ANNEXE 2.2 - ESTIMATION DE LA "DENSITÉ DU BATI" À PARTIR D'UNE
IMAGE THEMATIC MAPPER.**

ANNEXE 2.2.1 - STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR L'ENSEMBLE DE LA BASE -

Dans les tableaux qui suivent, l'écart-type est noté SIGMA, le minimum MIN, le maximum MAX, le coefficient de dissymétrie DIS et le coefficient d'aplatissement APL.

Tableau A.2.2.1 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le canal TM
4 -

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	30.26	11.47	8	121	0.64	1.75
T FAIBLE	34.23	10.39	8	141	0.89	4.69
FAIBLE	30.39	7.82	6	87	0.39	1.14
MOYENNE	29.50	6.58	9	69	0.49	1.29
FORTE	24.14	5.54	10	62	0.81	1.56
T FORTE	20.90	4.02	10	48	1.36	5.33

Tableau A.2.2.2 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le canal TM
5 -

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	36.02	18.29	4	210	0.90	2.80
T FAIBLE	40.31	15.21	4	223	2.09	16.25
FAIBLE	37.75	12.07	4	231	0.95	7.40
MOYENNE	38.30	10.08	5	147	0.57	2.68
FORTE	33.44	8.93	9	102	0.73	2.00
T FORTE	30.04	6.86	11	76	0.78	2.89

Tableau A.2.2.3 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : l'indice de végétation-

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	154.17	50.89	1	255	-0.19	-0.72
T FAIBLE	167.89	51.71	1	255	-0.14	-0.71
FAIBLE	133.83	44.62	1	255	0.36	-0.12
MOYENNE	123.51	36.62	1	255	0.68	0.64
FORTE	91.64	24.66	11	233	1.21	3.23
T FORTE	79.77	17.46	4	249	1.43	12.52

Tableau A.2.2.4 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le néo-canal (TM4-TM5) / (TM4+TM5) noté IND1-

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	131.43	54.25	1	255	-0.22	-0.47
T FAIBLE	124.20	46.61	1	255	0.25	0.04
FAIBLE	112.08	43.88	1	255	0.43	0.43
MOYENNE	100.91	38.39	1	255	0.52	0.96
FORTE	87.19	36.92	1	255	0.49	0.85
T FORTE	79.08	34.17	1	255	0.66	1.20

Tableau A.2.2.5 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Ecart-type sur la première composante principale, fenêtre 5*5 -

MODALITE	EFFECTIF	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	CDV
NON BATI	10822	144,32	098,19	01	255	0,68
T FAIBLE	07703	142,00	084,29	01	255	0,59
FAIBLE	12235	146,82	088,96	01	255	0,61
MOYENNE	18348	136,71	072,16	01	255	0,53
FORTE	4989	124,06	054,99	01	255	0,44
T FORTE	2413	111,00	032,20	01	255	0,29

Tableau A.2.2.6 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Ecart-type sur le canal 4 de Thematic Mapper, fenêtre 5*5 -

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	14310	58.44	1	255	0.21	-0.32
T FAIBLE	147.22	50.70	1	255	0.38	-0.11
FAIBLE	140.96	47.65	1	255	0.74	-0.03
MOYENNE	126.16	45.73	1	255	0.93	0.60
FORTE	113.86	38.97	43	255	1.38	1.87
T FORTE	93.62	31.86	44	255	1.75	4.11

Tableau A.2.2.7 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Moyenne sur la première composante principale, fenêtre 5*5 -

MODALITE	EFFECTIF	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	CDV
NON BATI	10 822	132,89	86,27	1	255	0,65
T FAIBLE	7 703	155,33	99,27	1	255	0,64
FAIBLE	12 235	156,94	92,40	1	255	0,59
MOYENNE	18 348	163,04	91,07	1	255	0,56
FORTE	4 989	144,08	51,52	1	234	0,36
T FORTE	2 415	128,91	7,14	1	204	0,06

Tableau A.2.2.8 - Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Moyenne sur le canal 4 de Thematic Mapper, fenêtre 5*5 -

MODALITE	EFFECTIF	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	CDV
NON BATI	10 822	151,75	98,22	1	255	0,67
T FAIBLE	7 703	166,29	115,84	1	255	0,70
FAIBLE	12 235	159,57	94,82	1	255	0,67
MOYENNE	18 348	151,75	57,31	1	255	0,38
FORTE	4 989	122,57	15,49	1	220	0,13
T FORTE	2 415	105,70	4,35	1	249	0,04

Tableau A.2.2.9 - Statistiques descriptives par modalité : Ecart-type sur la deuxième composante principale, fenêtre 5*5 -

MODALITE	MOYENNE	SIGMA	MIN	MAX	DIS	APL
NON BATI	141,17	60,02	1	255	0,22	-0,45
T FAIBLE	145,20	50,69	1	255	0,29	-0,01
FAIBLE	146,86	49,38	1	255	0,55	-0,32
MOYENNE	134,25	47,71	1	255	0,68	0,22
FORTE	115,68	40,29	46	255	1,43	1,18
T FORTE	95,49	34,60	34	255	1,68	4,03

ANNEXE 2.2.2 - ECHANTILLON DE TRAVAIL -

Annexe A.2.2.2.2 - Enquête morphologie urbaine (Marseille, 9-14 juin 1986) : collecte et exploitation des données.

Extrait d'un rapport de mission rédigé par A. MICHEL et F. DUREAU, Novembre 1986.

L'objectif de la mission réalisée à Marseille du 9 au 14 Juin 1986 (O. BARBARY, F. DUREAU, A. MICHEL, B. LORTIC) était de collecter des informations précises sur l'occupation du sol au sein des 80 districts INSEE de recensement, constituant l'échantillon de travail du programme sur "L'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines". C'est sur cet échantillon, représentatif des types de morphologie urbaine présents à Marseille, que sont mises au point les méthodes d'interprétation d'image satellite et que sont étudiées les relations bâti/population.

1 . PREPARATION DE LA COLLECTE DE DONNEES.

Préalablement à la mission à Marseille, différents travaux préparatoires ont été effectués.

. Tirage de l'échantillon de travail .

Il s'agit d'un tirage systématique stratifié, à un seul degré, sur la base des 3461 îlots INSEE composant la zone d'étude sur Marseille. Le critère de stratification est le type de morphologie urbaine, déterminé d'après des travaux d'analyse des données (voir rapport intermédiaire ATP pp. 16 à 79). Après partition du fichier des 3461 îlots INSEE en 9 sous-fichiers selon le type morphologique (8 types de bâti et un type de non bâti), les îlots ont été classés selon leur identifiant INSEE, afin d'avoir une dispersion géographique de l'échantillon sur toute la zone d'étude; on a ensuite procédé au tirage des îlots de l'échantillon de chaque type morphologique, de façon systématique (en ce qui concerne la description précise de la procédure d'échantillonnage, se reporter en Annexe 10 du rapport ATP/CNRS/CNES cité en bibliographie) .

- Acquisition de photographies aériennes à très grande échelle

La quasi-totalité de l'échantillon est couverte par des photographies aériennes couleurs naturelles datant de 1979, au 1/8000. Seuls 11 îlots situés à l'extrême nord de la zone d'étude et un îlot situé tout à fait au sud ne sont pas couverts par cette mission aérienne. Dans ce cas, nous avons dû recourir aux photographies Panchromatique Noir et blanc, au 1/15000, de 1981.

Pouvoir disposer de ces documents photographiques à très grande échelle constitue un atout très important en milieu urbain : comme nous l'a confirmé cette mission à Marseille, ces photographies aériennes sont un outil indispensable de "vérité-terrain" en milieu urbain, où il est souvent très délicat d'accéder aussi bien aux toitures, qu'aux centres des pâtés de maisons.

Nous avons donc utilisé les couvertures aériennes comme base du recueil de l'information sur l'occupation du sol, la mission ayant comme principal objectif l'actualisation des données observées sur photographies à la date d'enregistrement de l'image satellite (Février 1983).

- Elaboration des documents d'enquête

Trois types de travaux ont été réalisés préalablement à l'enquête proprement dite sur le terrain :

- Agrandissement des fonds de plan ICOREM à des échelles voisines du 1/1000, afin de pouvoir y reporter les observations faites à Marseille.
- Tracé du contour des îlots de l'échantillon sur les photographies aériennes au 1/8000 et 1/15000.
- Conception et réalisation des fiches de relevé sur le terrain. Outre une fiche destinée au repérage des photographies prises au sol (ou depuis des bâtiments), trois types de fiches ont été mises au point afin de décrire chacun des îlots de l'échantillon : l'une concerne les éléments bâtis, l'autre les éléments non bâtis. Au cas où des modifications importantes seraient intervenues depuis la date des photographies aériennes, une troisième fiche permet de les décrire en clair et à l'aide de croquis.

Ces trois types de fiches décrivant les îlots ont été testées sur quelques îlots de Bondy avant leur mise en forme définitive, afin de vérifier leur caractère opérationnel.

2. REALISATION DE LA COLLECTE DE DONNEES

La collecte a été réalisée par deux équipes de deux personnes, pendant une période de quatre jours. Dans l'ensemble, les fiches de relevé ont pu être renseignées sans problèmes particuliers, avec mesure des hauteurs au dendromètre, et des dimensions au sol au décimètre.

Signalons toutefois les difficultés particulières posées par la rubrique "Date de réfection des toitures" : il est souvent délicat d'obtenir une réponse précise et fiable à cette question, pourtant d'une grande importance pour la télédétection. D'autre part, notons l'inadéquation de la question sur la "présence de végétation sur les balcons" au cas de Marseille, cette dernière étant quasi-inexistante sur les balcons marseillais.

Les principaux enseignements méthodologiques à tirer de cette expérience de collecte sont les suivants :

- confirmation de l'apport des photographies aériennes à grande échelle (1/8000) en milieu urbain, qui fournissent une information très riche, tout particulièrement lorsque l'on recherche des "vérités-terrain" pour l'interprétation d'images satellite. Nous avons en effet pu constater au cours de l'enquête la difficulté d'accéder aux toitures ainsi qu'à l'intérieur de certains îlots très denses. Compte tenu de la résolution spatiale et spectrale du capteur Thematic Mapper, nous pouvons considérer que cette information constitue un apport totalement exogène à l'image satellite.
- les changements d'affectation du sol depuis la date des photographies aériennes demeurent peu nombreux. En effet, les 3/4 des îlots n'ont connu absolument aucun changement depuis 1978 (date de la mission aérienne au 1/8000) ; environ 15 % ont connu un changement entre les photographies aériennes et l'image satellite (Février 1983), et environ 10 % entre l'enregistrement de l'image satellite et la date de notre vérification sur le terrain (Juin 1986). C'est ce dernier cas qui est le moins favorable, puisqu'on ne dispose alors pas d'observation directe, au sol, de la situation au moment de l'enregistrement de l'image Thematic Mapper.

Annexe 2.2.2.5 - Statistiques sur la densité du bâti -

Tableau A.2.2.10 - Densité du bâti par modalités. Sous-îlot seul -

	EFFECTIF	MOYENNE	ECART-TYPE	MINIMUM	MAXIMUM
N.BATI (1)	6	8,83	12,07	0	31
N.BATI (2)	8	0,63	0,86	0	2
N.BATI (3)	10	1,1	1,10	0	5
T,FAI (1)	8	13,88	23,17	1	70
T,FAI (2)	5	5,00	1,67	3	7
T,FAI (3)	13	12,08	3,38	6	15
FAIBLE (1)	12	18,42	21,08	0	79
FAIBLE (2)	21	16,29	2,96	12	23
FAIBLE (3)	18	21,67	4,61	16	35
MOY (1)	34	39,26	21,33	7	88
MOY (2)	15	30,80	4,98	24	41
MOY (3)	20	44,55	9,68	36	60
FORTE (1)	23	65,18	27,94	15	100
FORTE (2)	15	53,53	6,51	45	63
FORTE (3)	12	71,08	5,74	61	85
T,FORTE (1)	10	85,27	12,25	60	100
T,FORTE (2)	29	84,58	9,03	70	100
T,FORTE (3)	20	89,50	6,04	86	100

(1) modalités initiales

(2) modalités définies à partir des nuées dynamiques

(3) modalités définies à partir des valeurs typiques

Tableau A.2.2.11 - Densité du bâti par modalité, bande de 16m autour du sous-flot comprise -

	EFEC	MOY	EC-TYPE	MIN	MAX
N.BATI (1)	6	8,00	7,64	0	020
N.BATI (2)	17	4,41	3,61	0	010
T.FAI (1)	08	08,13	13,12	1	40
T.FAI (2)	21	15,67	3,18	11	21
FAIBLE (1)	12	17,33	15,50	0	58
FAIBLE (2)	9	26,67	3,02	23	31
MOY (1)	34	30,06	14,58	8	58
MOY (2)	11	35,73	3,19	32	41
FORTE (1)	23	46,13	19,95	7	69
FORTE (2)	16	47,88	4,40	42	55
T.FORTE (1)	10	58,20	10,51	40	70
T.FORTE (2)	19	63,42	4,37	57	70

(1) modalités initiales

(2) modalités définies à partir des nuées dynamiques

Figure A.2.2.1 - Graphique des statistiques concernant la densité du bâti dans les sous-îlots (y compris la bordure de 16m) selon les modalités initiales -

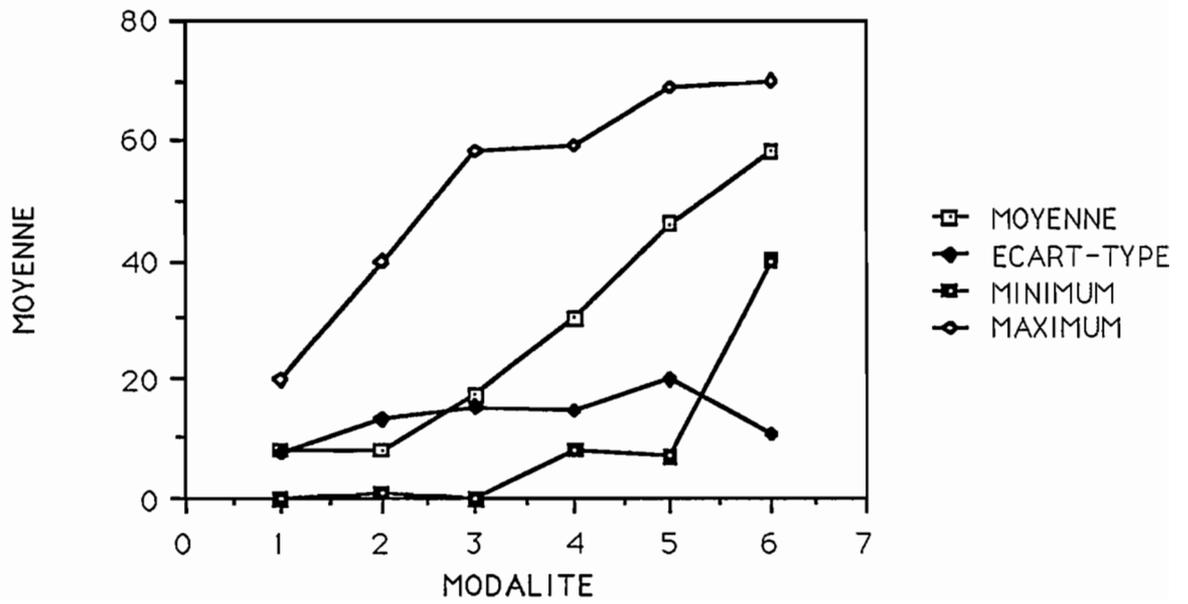
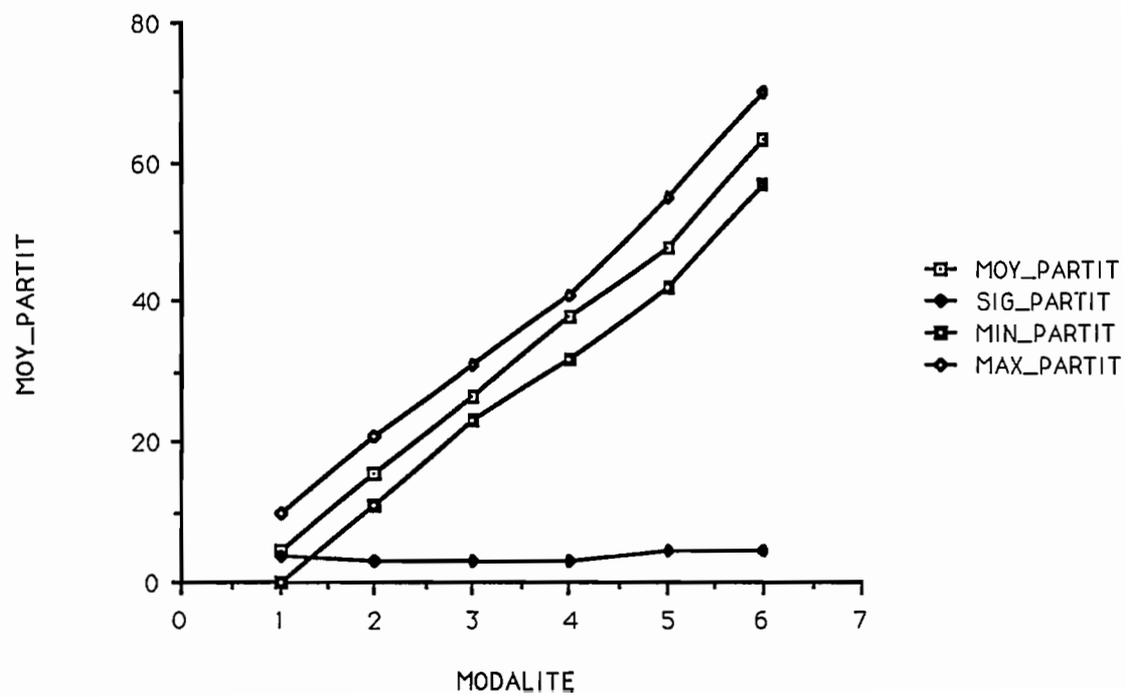


Figure A.2.2.2 - Graphique des statistiques concernant la densité du bâti dans les sous-îlots (y compris la bordure) selon les modalités redéfinies par la méthode des nuées dynamiques -



ANNEXE 2.2.3 - RÉGRESSION DANS L'ENSEMBLE SOUS-ILOTS INCLUANT UNE BANDE DE 16M AUTOUR DES SOUS-ILOTS -

Tableau A.2.2.12 - Coefficients de corrélation entre moyennes radiométriques des canaux et néo-canaux de TM et coefficients de densité de la couleur dominante des toitures dans les sous îlots incluant une bordure de 16 m -

	BATI	BRIQUE	MARRON	BLANC	GRIS	NOIR
CAN1	-,239	-,174	-,319	-,032	,353	,086
CAN2	-,334	-,160	-,384	-,121	,253	,069
CAN3	-,219	-,013	-,321	-,136	,177	,036
CAN4	-,691	-,311	-,524	-,318	-,073	-,064
CAN5	-,382	-,040	-,378	-,221	-,078	-,032
CAN7	-,022	,176	-,100	-,221	-,015	-,013
ACP1	-,429	-,094	-,439	-,245	-,053	,036
ACP2	,545	,115	,384	-,403	,262	,077
IVG	-,697	-,336	-,446	-,329	-,209	-,085
IND1	-,595	-,542	-,270	-,070	-,046	-,043
TEX1	-,527	-,468	-,260	-,105	-,036	-,059
TEX2	-,540	-,446	-,342	-,071	,100	-,013

Tableau A.2.2.13 - Régressions dans les sous-îlots (y compris la bordure) entre moyennes radiométriques et coefficients de densité du bâti -.

CANAUX	CORRELATION Multiple	ECART-TYPE Résiduel	S.C.E Résiduel	F FISHER Régression
IVG	.697	15.59	22123	86.00
BATI = -0.42 × IVG + 80.60				
ACP1,IND1	.826	12.32	13666	96.70
BATI = -0.67 × IND1 -0.46 × ACP1 + 160.45				
IVG, IND1, ACP1	.832	12.19	13232	66.81
BATI = -0.09 × IVG -0.58 × IND1 -0.40 × ACP1 + 152.85				

. Etude des sous-îlots aux résidus importants (supérieurs ou égaux à + ou - 2 écarts-type) pour les meilleures corrélations simples et multiples.

. Régression BATI / IVG :

- * 506K01 densité 3, valeur du résidu : -37.88. Ensemble de faible densité (11%), le reste, 68% de bitume et 21% d'eau entraîne une réflectance relativement faible d'où une densité calculée relativement forte et donc un résidu important.
- * 511D07 densité 5, valeur du résidu : -42.06. L'ensemble îlot et bande est faiblement bâti (7%), cependant la proportion importante de bitume (91%) entraîne une réflectance relativement faible d'où une densité calculée plus importante.
- * 528I04 densité 3, valeur du résidu : -32.64. L'ensemble îlot et bande est constitué par 58% de bitume rose et 42% d'eau. La réflectance dans les 2 néo-canaux (ACP1 et IND1) est donc faible, la densité calculée importante relativement.
- * 539K01 densité 2, valeur du résidu : -30.38. Ilot dont 2% de la surface est bâtie; la majeure partie de la surface est occupée par de la terre nue claire et du bitume. La réflectance de l'îlot est moyenne d'où un écart important entre la densité calculée et la densité mesurée.
- * 549D01I densité 3, valeur du résidu : -33.71. Cet îlot comporte 16% de bâti, sans compter 5% de chantier (dalle de béton). Le reste se partage entre la végétation (arbres et herbe), la terre nue, et surtout le bitume (36%). De plus on note la présence importante d'ombres résultant de la grande hauteur des bâtiment. Tous ces éléments contribuent à une moyenne de réflectance basse pour cet îlot et donc à une densité calculée importante.

. Régression multiple BATI/ACP1, IND1.

- * 511D07 densité 5, valeur du résidu : -32.06.
- * 513B02 densité 3, valeur du résidu : 25.81. Ensemble possédant une densité de

58% à dominante orange mais avec une forte proportion de toit terrasse blanc (23% de la surface de l'ensemble). Ce dernier fait explique peut-être en partie une réflectance relativement forte et donc une densité calculée plus faible que celle mesurée.

- * 515D06 densité 5, valeur du résidu : 30.91. Ensemble îlot et bande densément bâti (67%) majoritairement en tuile canal de couleur dominante orange. Aucune explication n'a pu être trouvée pour expliquer le résidu important.
- * 533A01 densité 5, valeur du résidu : 25.11. Cet îlot est constitué à 66% par un ensemble de bâtiment à dominante de couleur de toit orange, le reste étant occupé par du bitume (32%). Comme pour l'îlot précédent, aucune explication satisfaisante n'a pu être trouvée.

. Régression multiple BATH/CAN4,ACP1,IND1.

Comme dans le cas de la régression sur les îlots seuls, on constate la très faible valeur du F de Fisher partiel pour l'indice de végétation (2.91) ainsi que la valeur de l'écart-type pour ce même indice (0.06) qui est du même ordre de grandeur que le coefficient de régression (-0.09) de l'IVG. En conséquence, cette régression est abandonnée.

Conclusion partielle.

Ces derniers résultats décevants et moins bons que ceux obtenus en demeurant à l'intérieur de l'îlot nous incitent à laisser ces dernières régressions de côté et à nous consacrer en priorité aux régressions plus prometteuses de l'îlot seul.

ANNEXE 2.2.4 - CLASSIFICATIONS -

A.2.2.4.1) Seuillage du canal 4 au vu des résultats des matrices de cooccurrences.

Ces seuils ont été définis lors de l'analyse des îlots de l'échantillon de travail (ou encore d'initialisation) regroupés par modalités au moyen des matrices de cooccurrences.

Tableau A.2.2.14 - Paramètres extraits des matrices de cooccurrences calculés à partir de l'échantillon de travail des sous-îlots INSEE -

Modalité	Centre gravité du nuage		Second moment angulaire	Organisation du nuage	Homogénéité locale	Inertie
	X	Y				
1	38.33	37.92	4354	2.39	0.168	60.88
2	38.15	36.67	4707	2.38	0.217	52.04
3	31.30	31.33	3700	2.51	0.207	52.47
4	30.62	30.32	5099	2.43	0.257	29.13
5	26.27	25.91	3752	2.11	0.203	24.20
6	21.63	22.65	26 777	0.60	0.341	12.84

Après analyse de ces matrices et des paramètres synthétiques (Tableau A.2.2.14), il apparaît que 4 coupures sont envisageables:

- 34 à 55 CL 1-2 : Densité *non bâti* et *très faible*
- 27 à 33 CL 3-4 : Densité *Faible* et *Moyenne*
- 18 à 26 CL 5-6 : Densité *Forte* et *Très forte*
- 10 à 17 Non classés

Tableau A.2.2.15 - Matrice de confusion du seuillage du canal TM4 -

	Référence 1-2	Référence 3-4	Référence 4-5
Classe 1-2 (34-55)	16306	15861	729
Classe 3-4 (27-33)	9072	25102	2950
Classe 5-6 (18-26)	7758	15744	32671
N.Classé (10-17)	2748	1776	1321

Pourcentage de pixels bien classés : 47 %.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1-2	92 %	45 %	35 884 pixels.
3-4	63 %	43 %	58 483 pixels.
5-6	230 %	65 %	14 169 pixels.

Malgré une diminution sensible du nombre de classes (de 6 à 4), de nombreuses confusions se produisent encore. En particulier, une partie importante des pixels référencés dans la classe **Référence 1-2** sont classés en **Classe 5-6**.

On peut mesurer, lorsque l'on considère cette matrice, la différence entre une impression visuelle ou une tendance statistique (liaison entre le canal TM 4 et le descripteur *densité du bâti*) et la réalité statistique présentée sous la forme d'une matrice de confusion. L'utilisation de ces matrices, non systématique dans la littérature, pour quantifier le degré de fiabilité d'une classification, sanctionne de façon nette et précise les résultats. Elle ne laisse aucune place à la subjectivité d'une comparaison, souvent flatteuse, basée sur une interprétation visuelle de la confusion entre la référence et le modèle.

Compte tenu de ces résultats, d'autres types de classification doivent être tentés.

A.2.2.4.2) Classification supervisée de type barycentrique.

Le principe de cette classification supervisée est d'affecter chaque individu x à une classe i . Cette classe étant celle qui lui est la plus proche au sens de la distance de Sebesteen $D(x,i)$ soit :

$$D(x,i) = \sum_{c=1}^n ((x_c - \mu_{i,c}) / \beta_{i,c})^2$$

avec $\mu_{i,c}$: moyenne de la classe i dans le canal c
 $\beta_{i,c}$: écart-type de la classe i dans le canal c
 n : nombre de canaux
 x_c : valeur de l'individu dans le canal c

Cette classification est donc totalement supervisée.

L'inconvénient majeur de ce type de classification réside dans l'inexistence d'une classe de rejet, tous les pixels étant obligatoirement affectés à l'une des classes initiales même si les distances calculées au centre de toutes les classes sont très importantes. Aucune amélioration sur ce point n'est envisageable compte tenu de l'impossibilité de déterminer objectivement une valeur de rejet. Au cours de notre travail, ce cas s'est produit pour les pixels appartenant à la mer pour laquelle aucune statistique n'avait été calculée. Ces "pixels de mer" ont été affectés à la classe *très fort*, classe à laquelle ils étaient les plus proches... Afin de les éliminer, un masque a été effectué en seuillant les valeurs de pixels à 9 (inclus) dans le canal infra-rouge proche (TM 4).

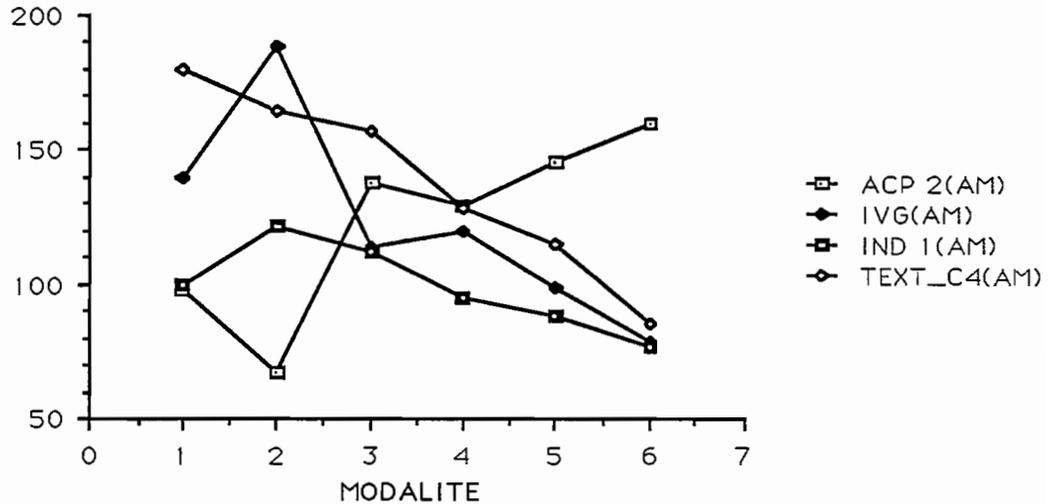
Les graphiques suivants démontrent la nécessité de réaffecter les îlots de l'échantillon de travail dans des modalités avant d'opérer une quelconque classification¹. Les valeurs qui ont servi à l'établissement de ces graphiques sont exposées dans le Tableau A.2.2.16.

**Tableau A.2.2.16 - Valeur des indices par modalités (anciennes (1) et nouvelles (2))
issue des îlots de l'échantillon -**

Modalité	ACP2	IVG	IND1	TEXT_C4
NON BATI				
MOY (1)	097.67	139.58	099.61	180.06
(2)	050.90	207.65	135.69	184.04
ECT (1)	38.52	41.75	45.97	53.06
(2)	58.24	53.96	45.22	50.52
EFFECTIF (1)	6			
(2)	8			
TRES FAIBLE				
MOY (1)	067.35	188.36	121.79	164.45
(2)	073.37	173.26	110.10	149.34
ECT (1)	41.46	36.22	35.91	54.52
(2)	41.82	41.89	44.43	55.15
EFFECTIF (1)	8			
(2)	5			
FAIBLE				
MOY (1)	137.83	113.88	112.18	156.87
(2)	128.71	120.92	106.16	156.35
ECT (1)	48.57	44.68	47.07	51.45
(2)	50.91	47.12	51.80	56.46
EFFECTIF (1)	12			
(2)	21			
MOYENNE				
MOY (1)	129.72	119.53	095.04	128.55
(2)	133.94	115.36	095.39	130.54
ECT (1)	43.40	34.54	36.32	50.66
(2)	40.66	36.58	34.72	42.79
EFFECTIF (1)	34			
(2)	15			
FORTE				
MOY (1)	145.32	098.59	088.12	115.26
(2)	145.45	094.52	081.66	115.93
ECT (1)	31.81	20.26	33.06	36.02
(2)	29.87	26.48	37.46	33.59
EFFECTIF (1)	22			
(2)	15			
TRES FORTE				
MOY (1)	160.34	079.00	077.00	085.57
(2)	152.25	086.05	078.3	105.77
ECT (1)	26.13	19.11	35.01	34.82
(2)	19.63	13.78	29.33	27.47
EFFECTIF (1)	11			
(2)	29			

MOY : moyenne
ECT : écart-type

Figure A.2.2.3 - Graphique des moyennes de reflectance **avant** réaffectation, calculées à partir des statistiques des îlots de l'échantillon, redistribués par modalité -

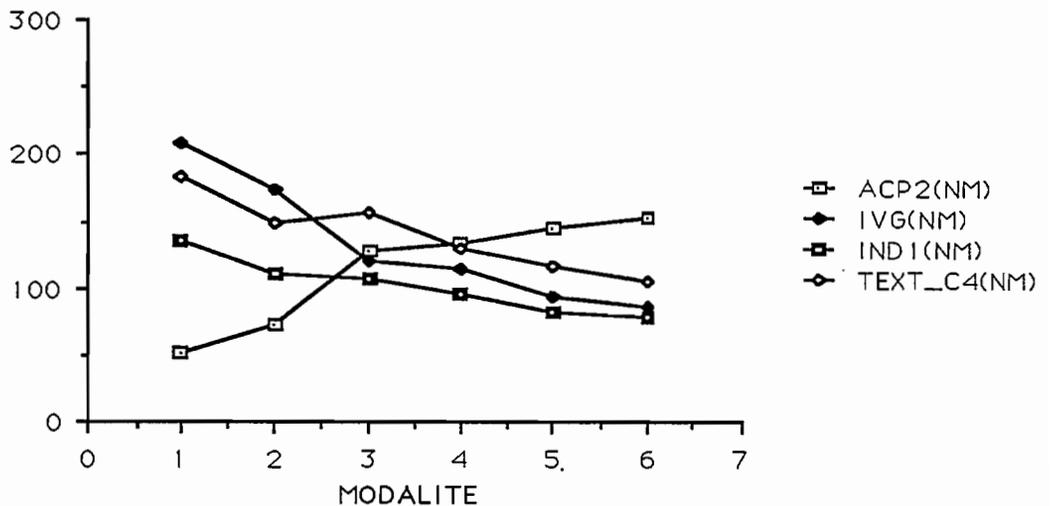


Abscisse : modalités du descripteur *densité du bâti*

Ordonnée : moyennes des différents néo-canaux dans ces modalités

Seuls les néo-canaux corrélés de façon significative au descripteur *densité du bâti* ont été représentés sur ces graphiques.

Figure A.2.2.4 - Graphique des moyennes radiométriques **après** réaffectation calculées à partir des statistiques des îlots de l'échantillon, redistribuées par modalité (méthode des nuées dynamiques)-



Abscisse : modalités du descripteur *densité du bâti*

Ordonnée : moyennes des différents néo-canaux dans ces modalités

La comparaison des statistiques issues des îlots de l'échantillon redistribuées par

modalité avant et après réaffectation de ces îlots (**Tableau A.2.2.16**) entraîne quelques remarques.

- mis à part l'écart-type local calculé sur le canal TM 4 (TEXT_C4), les moyennes radiométriques des îlots regroupées par modalité des autres néo-canaux sont liées à ces modalités. Cela n'était pas le cas avant la réaffectation des îlots.
- à l'exception de la modalité *non bâti*, les autres modalités ont tendance à avoir gagné en homogénéité, tout particulièrement la modalité *très forte*.
- du point de vue effectif des modalités, la réaffectation des îlots s'est principalement faite aux dépens des modalités *moyenne* et *forte* et au bénéfice des modalités *faible* et *très forte*; autrement dit, un transfert d'effectifs s'est produit des modalités intermédiaires aux modalités plus extrêmes. Cela ne sera pas sans répercussions comme nous le constaterons plus loin.

La réaffectation des îlots de l'échantillon permet donc d'obtenir des moyennes et des écarts-type cohérents pour initialiser la classification. De plus, elle semble bien correspondre à une réalité radiométrique. En effet, les courbes obtenues après réaffectation ressemblent davantage à celles obtenues lorsque l'on calculait ces mêmes statistiques par modalité (**Figure 2.2.7, 8 et 9**), comparativement à celles précédant la réaffectation.

Les moyennes et écarts-type utilisés dans la classification supervisée qui suit sont ceux obtenus par calcul sur les îlots de l'échantillon de travail après réaffectation et redistribution par modalité (Voir **Tableau A.2.2.16**).

Les classifications présentées ici ont été exécutées à partir des 3 canaux où l'on observe une baisse de la luminance lorsque la modalité varie de *non bâti* à *très forte* et qui sont peu corrélés entre eux. Il s'agit de l'indice de végétation (IVG), de l'indice (4-5)/(4+5) noté (IND1) et de l'écart-type local calculé sur le canal 4 (TEXT_C4).

Matrice de corrélation.

	IVG	IND1	TEXT_C4
IVG	1,00		
IND1	0,57	1,00	
TEXT_C4	0,37	0,35	0,00

Ce choix a été fait après plusieurs essais. Il a été retenu en raison de l'aptitude de ces indices à discriminer les classes; c'est en effet avec ces 3 indices que nous avons obtenu les plus grandes distances entre les centres de chacune des classes.

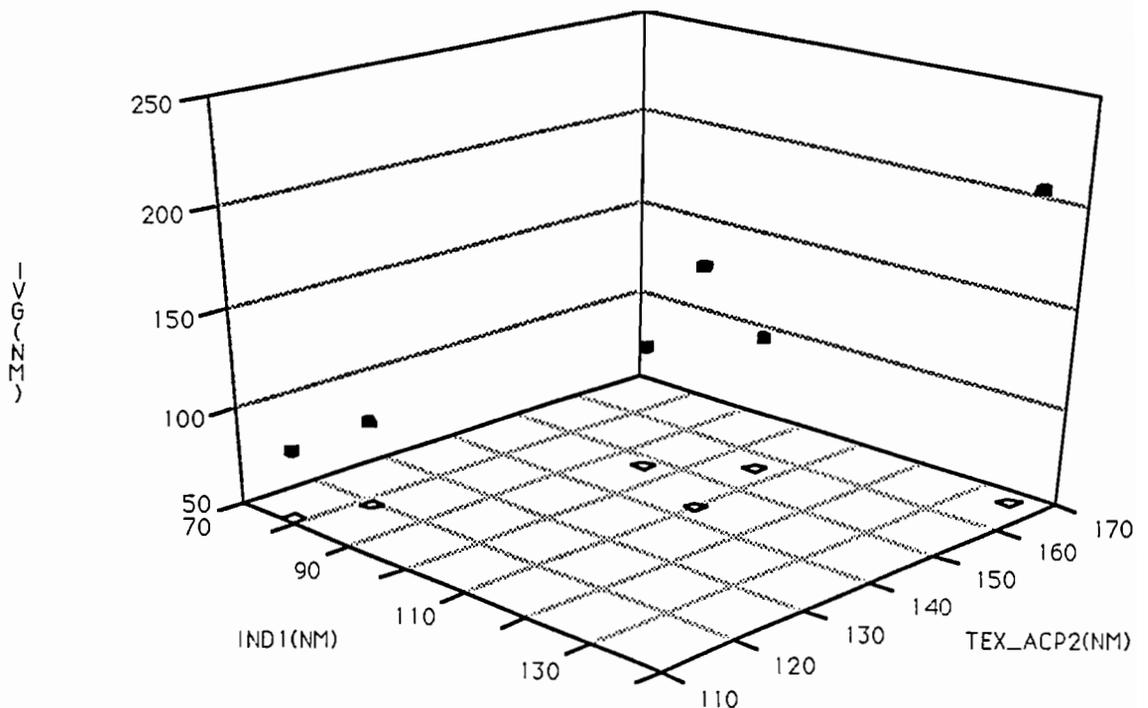
Cette matrice des distances entre centres des classes indique quelles sont les classes les plus proches, c'est à dire celles qui pourraient être regroupées sans dommage lors d'une classification ultérieure.

Tableau A.2.2.17 - Matrice des distances entre les centres des 6 classes de densité du bâti, classification suivant la distance de Sebesteen -

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe
CL 1	0					
CL 2	55	0				
CL 3	96	53	0			
CL 4	114	63	29	0		
CL 5	143	90	54	29	0	
CL 6	156	103	67	42	14	0

Au vue de cette matrice, nous voyons que les classes *moyenne* et *faible* ou *forte* ainsi que les classes *forte* et *très forte* sont les plus proches, des regroupements pourront être éventuellement envisagés. Il est satisfaisant de constater que les modalités les plus éloignées (le descripteur *densité du bâti* est ordonné) sont celles séparées par les distances les plus importantes. (Voir aussi **Figure 2.2.23**).

Figure A.2.2.5 - Représentation 3 dimensions des centres de classes de la densité du bâti, classification suivant la distance de Sebesteen -



a) *Classification des pixels.*

Tableau A.2.2.18 - Matrice de confusion. Classification des pixels suivant la distance de Sebesteen -

	Réf 1 N.Bâti	Réf 2 T.Faible	Réf 3 Faible	Réf 4 Moyen	Réf 5 Fort	Réf 6 T.Fort
Classe 1 N.Bâti	3865	6337	2555	1913	96	4
Classe 2 T.Faible	5022	6213	5110	6404	264	7
Classe 3 Faible	5465	5218	9063	13735	3648	535
Classe 4 Moyen	572	1143	2600	7036	1052	72
Classe 5 Fort	872	935	2260	6401	4940	1417
Classe 6 T.Fort	174	158	392	1067	1535	599

Pourcentage de pixels bien classés : 29 %.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1	93 %	24 %	15 970 pixels.
2	115 %	31 %	20 004 pixels.
3	171 %	41 %	21 980 pixels.
4	34 %	19 %	36 556 pixels.
5	146 %	43 %	11 535 pixels.
6	97 %	23 %	2 634 pixels.

Quelques remarques s'imposent :

- la classe *moyenne* a sensiblement diminué principalement au bénéfice de la classe *faible* et de la classe *forte*. Les effectifs des autres modalités demeurent constants.

- comme dans la précédente classification, les modalités les mieux classées sont celles qui ont gagné le plus d'individus.

Les résultats de cette classification sont médiocres et la fiabilité globale du même ordre de grandeur que celle effectuée par seuillage sur la régression multiple.

Cette classification est un peu décevante, cependant, si l'on regroupe les classes *non bâti* et *très faible*, *faible* et *moyenne*, et *forte* et *très forte*, on obtient un résultat fort convenable. On notera cependant un regroupement des valeurs les plus importantes à proximité de la diagonale principale.

b) *Classification des îlots.*

L'algorithme de classification est identique, la différence étant que les individus à classer sont ici des îlots INSEE (un ensemble de pixels) et non des pixels seuls. La matrice des distances entre classes présentée plus haut est donc valable ici, les

statistiques d'initialisation de la classification étant identiques.

Tableau A.2.2.19 - Matrice de confusion. Classification des îlots suivant la distance de Sebesteen -

	Réf 1 N.Bâti	Réf 2 T.Faible	Réf 3 Faible	Réf 4 Moyen	Réf 5 Fort	Réf 6 T.Fort
Classe 1 N.Bâti	0	0	0	0	0	0
Classe 2 T.Faible	1	0	3	14	0	0
Classe 3 Faible	2	2	4	15	10	2
Classe 4 Moyen	1	3	5	34	5	1
Classe 5 Fort	0	0	1	11	20	13
Classe 6 T.Fort	0	0	0	3	16	13

Pourcentage d'îlots bien classés : **40 %**.

Référence	Evaluation statistique	Îlots bien classés	Effectif
1	0 %	0 %	4 îlots
2	360 %	0 %	5 îlots
3	270 %	31 %	13 îlots
4	64 %	44 %	77 îlots
5	88 %	39 %	51 îlots
6	110 %	45 %	29 îlots

Deux modalités ont sensiblement augmenté leur effectif (du moins en proportion), il s'agit des classes *très faible* et *faible*. Cette augmentation s'est produite au détriment de la classe *non bâti* d'une part et de la classe *moyenne* essentiellement. Cette classification produit de moins bons résultats que le seuillage de la régression multiple. Cette constatation n'a pu être expliquée de façon satisfaisante.

A.2.2.4.3) Classification de type nuées dynamiques sur les îlots.

Tableau A.2.2.20 - Distances entre les centres de gravité des classes, classification suivant les nuées dynamiques -

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe
Classe 1	0					
Classe 2	58	0				
Classe 3	38	54	0			
Classe 4	44	62	39	0		
Classe 5	59	76	40	78	0	
Classe 6	62	102	49	61	59	0

Tableau A.2.2.21 - Matrice de confusion. Classification des îlots suivant les nuées dynamiques -

	Réf 1 N.Bâti	Réf 2 T.Faible	Réf 3 Faible	Réf 4 Moyen	Réf 5 Fort	Réf 6 T.Fort
Classe 1 N.Bâti	0	0	2	5	2	2
Classe 2 T.Faible	1	1	5	11	1	0
Classe 3 Faible	1	2	3	14	5	1
Classe 4 Moyen	0	1	3	26	0	0
Classe 5 Fort	2	1	0	15	17	2
Classe 6 T.Fort	0	0	0	6	26	24

Pourcentage d'îlots bien classés : **40 %**.

Référence	Evaluation statistique	Pixels bien classés	Effectif
1	275 %	0 %	4 îlots.
2	380 %	20 %	5 îlots.
3	85 %	23 %	13 îlots.
4	34 %	34 %	77 îlots.
5	73 %	33 %	51 îlots.
6	193 %	83 %	29 îlots.

La fiabilité globale de cette classification est identique à celle obtenue avec la méthode barycentrique. Les modalités *non bâti* et *très faible* sont surévaluées contrairement à la modalité *moyenne* qui est nettement amoindrie.

Il est un peu décevant d'obtenir un résultat global identique à partir d'une classification supervisée (méthode barycentrique) et non supervisée (nuées dynamiques). Le taux de tirage (2,31%) de l'échantillon d'initialisation est certainement trop faible et ne permet pas d'obtenir des statistiques suffisamment robustes et une représentativité nécessaire des différentes modalités de ce descripteur pour initialiser de façon correcte la classification supervisée.

¹ Cette réaffectation a été déduite de la valeur du coefficient de densité du bâti. Elle n'a pas fait intervenir de statistiques radiométriques.

**ANNEXE A.2.3 - TYPOLOGIE DE L'ESPACE À
PARTIR DES QUANTILES RADIOMÉTRIQUES -**

ANNEXE A.2.3 - TYPOLOGIE DES ESPACES BÂTIS

A.2.3.2) TYPOLOGIE DES ÎLOTS PEU DENSEMENT BÂTIS

a) *Tableaux des variables et des individus - Figures des profils radiométriques des individus par axe factoriel.*

Tableau A.2.3.1 - Premier axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
		C(2,1)	8.9	.638
C(2,4)	8.5			.593
C(3,5)	7.2			.538
		C(3,1)	7.1	.603
		C(1,1)	7.1	.500
C(5,5)	6.9			.571
C(1,5)	6.4			.492
C(7,4)	5.9			.586
		C(6,1)	7.1	.521
Individus				
N° 43	13.0			.634
		N° 55	8.4	.504
N° 77	7.4			.672
N° 47	7.4			.536

Tableau A.2.3.2 - Deuxième axe factoriel. Individus et variables importants.
Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(2,2) C(3,3)	6.5 6.5	C(3,5)	7.8	.305
		C(1,5)	6.9	.284
				.518
				.499
		C(2,4)	6.5	.241
		C(7,1)	6.0	.280
		C(5,1)	5.7	.214
		C(7,5)	5.5	.323
Individus				
N° 69	10.2			.448
		N° 55	9.7	.306
		N° 43	8.4	.208
N° 64	6.7			.600
		N° 9	6.6	.588
		N° 47	6.5	.250

Tableau A.2.3.3 - Troisième axe factoriel. Individus et variables importants.
Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(4,1)	22.8			.491
C(5,1)	12.4			.335
		C(1,1)	12.1	.322
		C(4,4)	9.3	.592
		C(4,5)	8.9	.263
Individus				
N° 14	16.2			.467
		N° 84	12.3	.524
		N° 88	10.6	.581
		N° 50	08.1	.307

Tableau A.2.3.4 - Quatrième axe factoriel. Individus et variables importants.
Echantillon des sous-flots peu densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(4,4)	10.4	C(5,2)	14.4	.362
		C(4,2)	10.3	.182
		C(7,2)	6.9	.299
C(7,4)	6.7			.197
C(5,4)	5.4			.134
				.127
Individus				
N° 86	21.7			.389
		N° 44	13.6	.371
N° 55	9.0			.108
N° 71	8.4			.336
		N° 67	7.8	.247

b) Classification par la méthode des nuées dynamiques.

Il s'agit uniquement de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes. L'agrégation autour de centres mobiles a été effectuée sur un tableau dans lequel figurent uniquement les variables qui participent à la formation des axes principaux. En effet, le logiciel utilisé n'autorise que 20 variables. Après plusieurs essais, le nombre de classes optimum, qui explique le plus important pourcentage de la variance totale (66,7%), s'est avéré être de 9.

CLASSE 1: N° 63 (grands bâtiments à toit zinc, gendarmerie), 94 (herbe et grands bâtiments).

CLASSE 2 : N° 14 (bâtiment au toit très reflectant, gare routière).

CLASSE 3 : N° N° 6 (grands bâtiments à toit marron et arbres), 7 (pavillonnaire et arbres), 19 (pavillonnaire et arbres), 22 (mixte CV /pavillonnaire et arbres), 42 (pavillonnaire et arbres), 51 (construction sous arbres), N° 55 (grand ensemble et construction en béton), 60 (tour d'habitation et arbres), 89 (arbres et herbe).

CLASSE 4 : N° N° 8 (entrepôts), 33 (grand ensemble et construction en CV), 37 (trottoir en bordure de mer), 49 (lycée), 56 (grand ensemble), 74 (grands bâtiments).

CLASSE 5 : N° 50 (pépinière), 70 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 84 (champs), 85 (pavillonnaire), 87 (champs cultivés), 88 (champs, arbres).

CLASSE 6 : N° 64 (pavillonnaire), 65 (pavillonnaire), N° 69 (pavillon alignés), 71 (serre et champs), 76 (pavillonnaire), 86 (champs), 91 (bâtiment hauts, herbe et bitume).

CLASSE 7 : N° 9 (grands entrepôts sur quais), 78 (grand ensemble), 79 (entrepôts industriels), 82 (grands bâtiments), 92 (grands bâtiments), 96 (grand ensemble).

CLASSE 8 : N° 38 (pavillonnaire et grands bâtiments à toiture brique), 44 (pavillonnaire), 48 (grands bâtiments à toit brique), 62 (pavillonnaire multicolore), 66 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 67 (pavillonnaire), 73 (pavillonnaire), 93 (grand ensemble).

CLASSE 9 : N° 43 (plage), 47 (stade), 75 (grands bâtiments), 77 (herbe et arbres), 83 (grand ensemble d'habitation).

Cette classification fait mieux la distinction entre les grands bâtiments à vocation industrielle et les grands ensembles d'habitation. Cependant, elle regroupe dans la classe 9 des sous-îlots dont le contenu apparaît comme très différent. On remarquera qu'un certain nombre de noyaux (groupe d'îlots) demeurent invariants quelque soit le type de classification effectué.

c) Classification obtenue par la prise en compte des néo-canaux.

Nous avons mené les mêmes traitements (AFC et CAH) en considérant comme variables les quantiles de certains néo-canaux qui nous ont semblé pertinents lors de notre précédente étude. Il s'agit de :

- la première composante principale, qui est en fait la somme de tous les canaux pondérée pour chacun des canaux bruts d'un coefficient équivalent (notée ACP1)
- la seconde composante principale, qui marque l'opposition entre les canaux du visible et ceux de l'infra-rouge (notée ACP2)
- l'indice de végétation (noté IVG)
- un indice lié à la minéralisation $(TM4-TM5)/(TM4+TM5)$ (noté MIL)
- un indicateur de texture: l'écart-type local calculé dans une fenêtre de 5*5 pixels (noté TEX).

Ces néo-canaux sont mieux connus d'un point de vue thématique; l'interprétation de l'analyse factorielle ne s'en trouve que facilitée.

Tableau A.2.3.5 - Variance des axes factoriels dans l'analyse des néo-canaux. Analyse des sous-îlots densément bâtis.-

AXES	% de variance expliquée	% de variance cumulée
1	25.7%	25.7%
2	18.6%	43.3%
3	15.4%	58.7%
4	8.3%	67.0%
5	6.4%	73.4%

Les variables sont davantage décorrélatées que dans le cas des canaux bruts.

Le premier axe factoriel est marqué par l'opposition entre (ACP21, IVG5) et (ACP25, IVG1), i.e les îlots à dominante végétale et ceux à dominante minérale.

Le second axe factoriel est généré essentiellement par l'indicateur de texture et oppose TEX1 (texture lisse) à TEX5 (texture chahutée).

L'opposition entre les îlots très reflectants (ACP15) et les îlots à dominante végétale font l'objet du troisième axe factoriel.

Le troisième axe oppose les îlots à tendance minérale (ACP21, IVG1) à des îlots à forte luminance marqués par une proportion moyenne de composants végétaux et à texture lisse (ACP11, ACP23, TEX1).

Pour finir, le cinquième axe regroupe curieusement pour les contributions négatives les îlots très reflectants (ACP11) à texture très lisse ou très chahutée (TEX1, TEX5) qui sont opposés aux îlots à dominante minérale et à luminance moyenne (ACP13, IVG1).

Contrairement à l'analyse factorielle précédente, quelques individus et quelques variables seulement (1 ou 2) contribuent de façon très importante à l'inertie expliquée par chacun des différents axes factoriels.

Classification ascendante hiérarchique en 13 classes.

Il a été nécessaire de couper l'arbre hiérarchique aussi bas afin d'obtenir des classes à effectif raisonnable. Comme dans le cas précédent, les premières classes ne comprennent que les individus radiométriquement singuliers et de ce fait, nous récupérons des classes à effectif très faible et une classe unique à très fort effectif. C'est cette dernière qu'il nous importe de segmenter en priorité.

CLASSE 1 : DOMINANTE GRAND BATIMENTS : 6 (grands bâtiments à toit marron et arbres), 7 (pavillonnaire et arbres), 8 (entrepôts), 9 (grands entrepôts sur quais), 22 (mixte CV /pavillonnaire et arbres), 33 (grand ensemble et construction en CV), 42 (pavillonnaire et arbres), 51 (construction sous arbres), 56 (grand ensemble), 60 (tour d'habitation et arbres), 67 (pavillonnaire), 74 (grands bâtiments), 79 (entrepôts industriels), 89 (arbres et herbe), 92 (grands bâtiments).

CLASSE 2 : 14 (bâtiment au toit très reflectant, gare routière).

CLASSE 3 : 19 (pavillonnaire et arbres).

CLASSE 4 : 37 (trottoir en bordure de mer).

CLASSE 5: PAVILLONNAIRE 38 (pavillonnaire et grands bâtiments à toiture brique), 44 (pavillonnaire), 65 (pavillonnaire), 66 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 70 (pavillonnaire, qq grands bâtiments), 69 (pavillons alignés), 76 (pavillonnaire).

CLASSE 6 : GRANDS BATIMENTS A DOMINANTE VEGETALE : 43 (plage), 47 (stade), 49 (lycée), 63 (grands bâtiments à toit zinc, gendarmerie), 77 (herbe et arbres), 78 (grand ensemble), 83 (grand ensemble d'habitation), 87 (champs cultivés), 94 (herbe et grands bâtiments), 96 (grand ensemble).

CLASSE 7 : 48 (grands bâtiments à toit brique), 62 (pavillonnaire multicolore), 82 (grands bâtiments).

CLASSE 8 : 50 (pépinière), 84 (champs), 85 (pavillonnaire), 88 (champs, arbres)

CLASSE 9 : 55 (grand ensemble et construction en béton).

CLASSE 10 : 64 (pavillonnaire), 75 (grands bâtiments).

CLASSE 11 : 73 (pavillonnaire).

CLASSE 12 : 86 (champs).

CLASSE 13 : 93 (grand ensemble).

Les résultats de cette classification sont décevants; comme nous pouvons le constater, seules 3 grandes classes à peu près identifiées émergent de cette classification. De nombreuses classes ne comptent qu'un individu dont la spécificité en terme de type d'occupation du sol ne semble pas justifier la création d'une classe pour lui tout seul. De plus, d'étranges regroupement inexplicables sont effectués. Peu de noyaux pertinents (regroupement d'îlots proches de par leur type d'occupation du sol) subsistent de la première classification; au contraire, des regroupements qui paraissaient cohérents ont disparu.

Compte tenu de nos résultats, cette expérimentation (classification à partir de néo-canaux) ne sera pas poussée plus avant. En particulier, les résultats obtenus pour la classification des îlots densément bâtis ne sera pas exposée.

A.2.3.3) TYPOLOGIE DES ÎLOTS DENSEMENT BÂTIS.

a) Tableaux des variables et des individus - Figures des profils radiométriques des individus

Tableau A.2.3.6 - Premier axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(7,4)	11.2			.750
C(3,4)	10.8			.839
C(5,4)	10.5			.700
C(4,3)	9.4			.667
C(2,3)	7.1			.693
C(5,5)	5.7			.408
		C(2,1)	05.6	.640
		C(5,1)	05.2	.532
		C(3,1)	04.8	.483
Individus				
N° 39	19.3			.542
N° 18	16.3			.743
N° 41	14.1			.694
N° 68	09.5			.573

Tableau A.2.3.7 - Deuxième axe factoriel. Individus et variables importants.
Echantillon des sous-îlots densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(5,3)	14.6			.533
C(7,3)	07.9			.511
		C(3,1)	7.8	.316
C(7,2)	07.2			.487
		C(5,1)	07.0	.286
		C(5,5)	06.9	.196
C(4,2)	06.7			.398
C(3,3)	06.6			.477
		C(7,1)	06.3	.232
Individus				
		N° 39	16.4	.281
N° 61	12.6			.394
N° 80	08.0			.605
N° 59	06.7			.581

Tableau A.2.3.8 - Troisième axe factoriel. Individus et variables importants
Echantillon des sous-îlots densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(1,4)	26.6			.605
		C(5,4)	10.7	.152
		C(7,4)	10.0	.141
C(5,2)	7.7			.271
		C(1,2)	7.6	.252
Individus				
N° 52	34.8			.582
		N° 68	17.2	.220
N° 39	8.6			.514
		N° 41	6.7	.070
		N° 54	6.1	.248

Tableau A.2.3.9 - Quatrième axe factoriel. Individus et variables importants
Echantillon des sous-îlots densément bâtis -

Contribution négative	Valeur %	Contribution positive	Valeur %	Qualité de la représentation
variables				
C(7,5)	16.6			.358
C(5,5)	12.8			.185
		C(7,1)	11.3	.211
C(3,5)	10.5			.334
		C(1,4)	9.0	.195
Individus				
N° 39	31.6			.179
		N° 52	17.3	.274
		N° 41	7.6	.075
		N° 53	6.1	.295

b) Classification par la méthode des nuées dynamiques.

Comme dans le cas des sous-îlots peu-densément bâtis, nous avons effectué cette classification en ne retenant que les 20 variables entrant de façon importante dans la formation des principaux axes factoriels. La partition en 9 classes que nous présentons ci-dessous est celle possédant le plus fort pourcentage de la variance totale.

CLASSE 1 : N° 4 (CV), 11 (CV), 13 (mixte CV pavillonnaire), 20 (CV), 24 (immeuble et parking bitumé), 28 (CV), 31 (CV dense), 32 (immeubles à toit multicolore), 58 (CV moyennement dense).

CLASSE 2 : N° 15 (entrepôts denses), 45 (résidentiel).

CLASSE 3 : N° 2 (poste), 5 (CV très dense), 21 (CV), 29 (CV), 30 (immeuble et parking bitumé), 32 (immeubles à toit multicolore), 35 (CV), 57 (mixte immeuble à toit blanc, brique et végétation), 81 (CV dense).

CLASSE 4 : N° 12 (CV), 34 (CV), 36 (CV), 80 (mixte CV, bâtiments), 95 (CV).

CLASSE 5 : N° N° 52 (immeubles avec toiture blanche).

CLASSE 6 : N° 1 (CV), 3 (CV et bâtiments toits blancs), 40 (CV très dense), 53 (immeubles à toit blancs).

CLASSE 7 : N° 10 (EHSS), N° 16 (Voir N°17), 17 (entrepôts très denses), 25 (caserne), 26 (mixte CV/entrepôts), 46 (mixte entrepôt et bâtiments avec toiture blanche), 90 (CV peu dense).

CLASSE 8 : N° 54 (CV), 59 (CV), 61 (immeuble toiture blanche et brique).

CLASSE 9 : N° 18 (immeuble toit brique, parking en bitume), 39 (CV moyennement dense), 41 (pavillonnaire), 68 (pavillonnaire allongé).

Cette classification est très proche de celle obtenue par la CAH. Les regroupements sont tout aussi cohérents. De plus, la méthode d'agrégation autour des centres mobiles ne crée pas de classes ne possédant qu'un seul individu, ce qui constitue pour nous un avantage. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode, c'est que l'on obtient un résultat différent à chaque fois que l'on réitère le processus de classification, puisque lors de l'initialisation la détermination des coordonnées des centres des classes se fait de façon aléatoire, contrairement à la CAH qui regroupe les individus deux à deux. C'est essentiellement pour cette raison que la classification hiérarchique ascendante sera finalement préférée.

Figure A.2.3.1 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 1 -

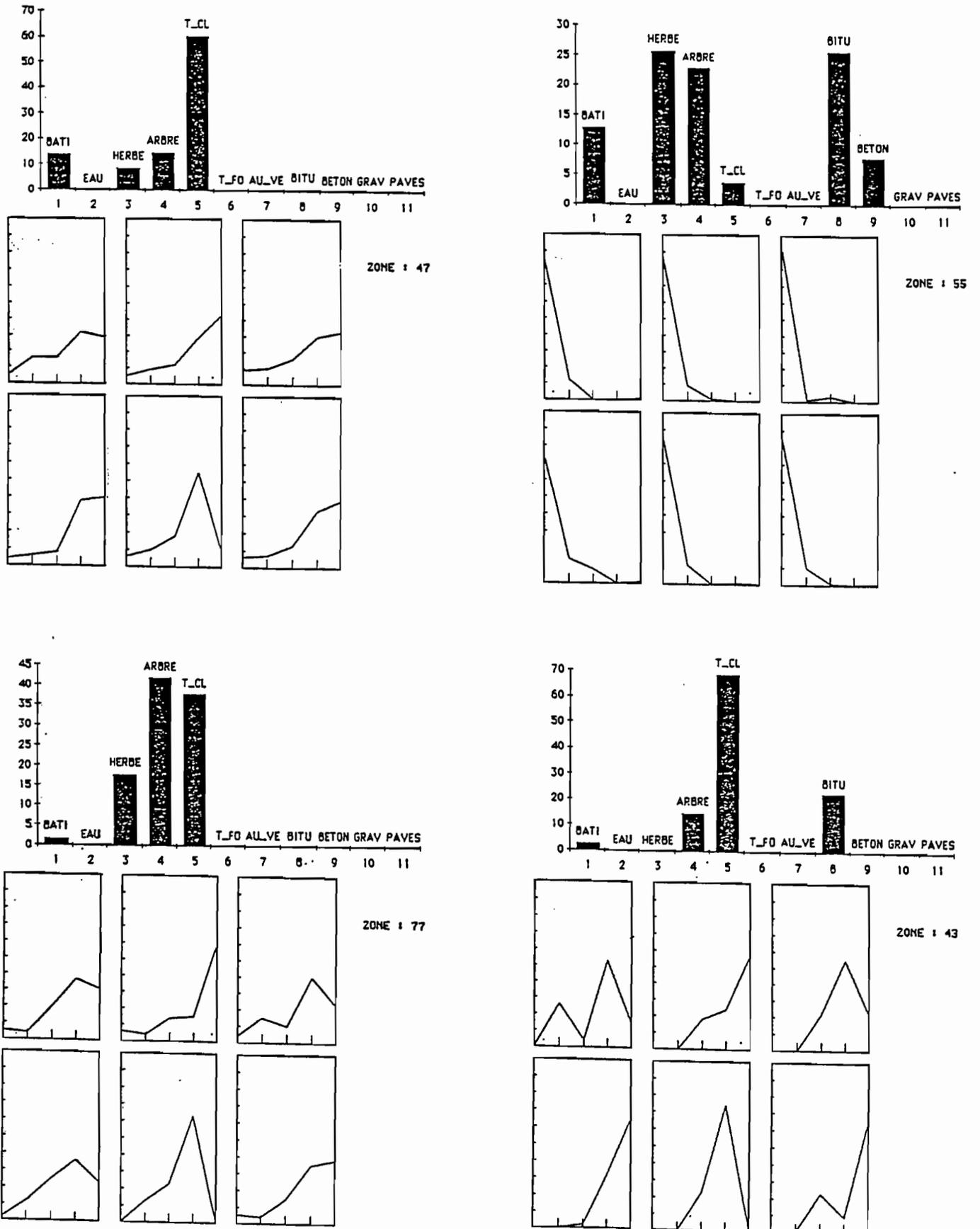


Figure A.2.3.2 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques.
Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 2 -

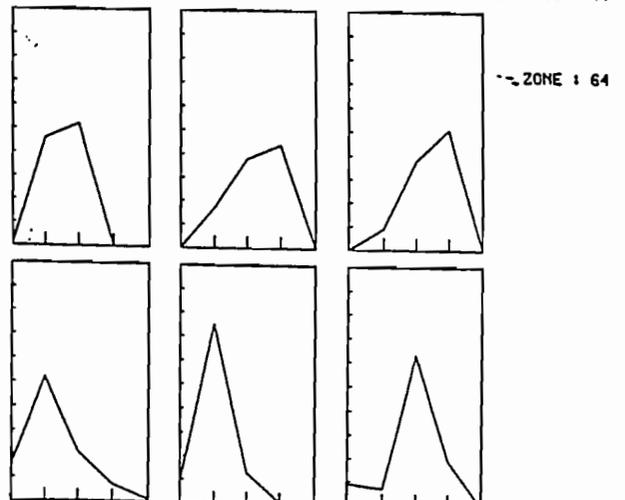
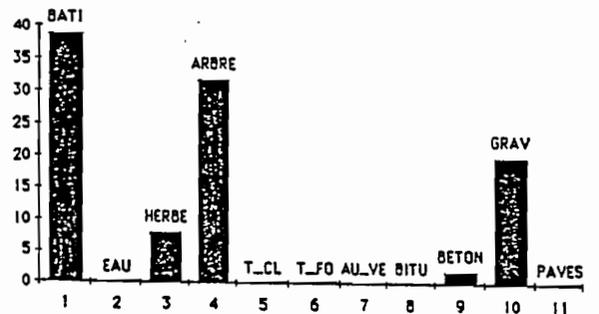
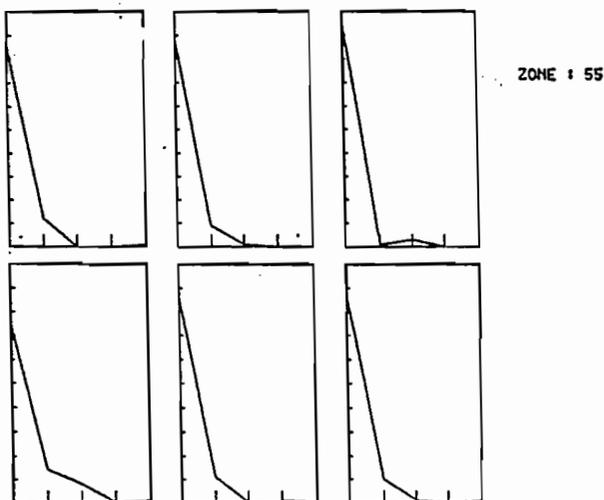
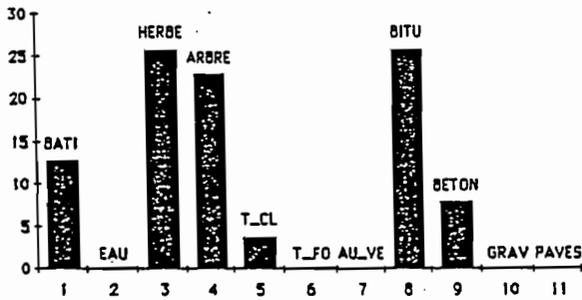
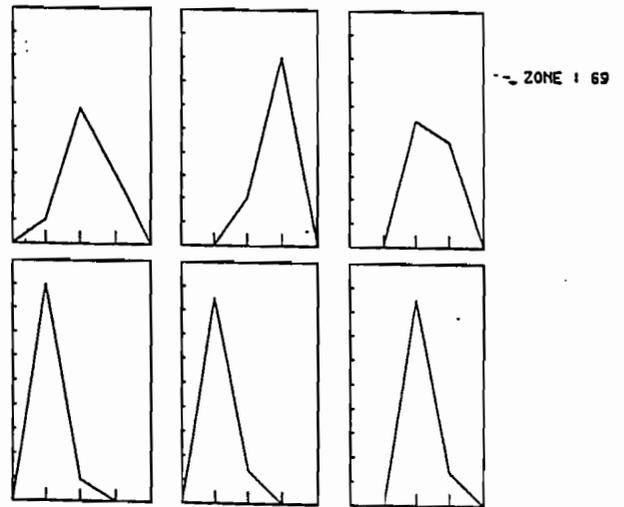
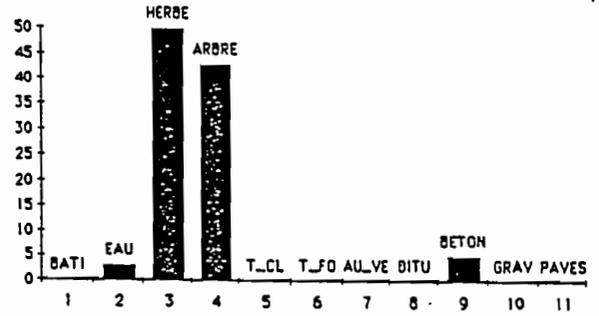
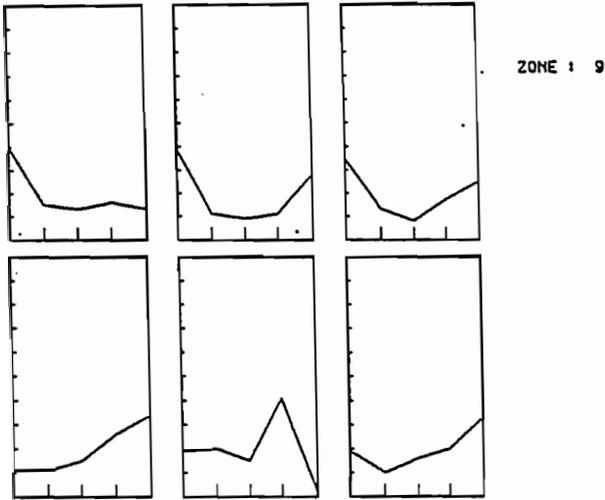
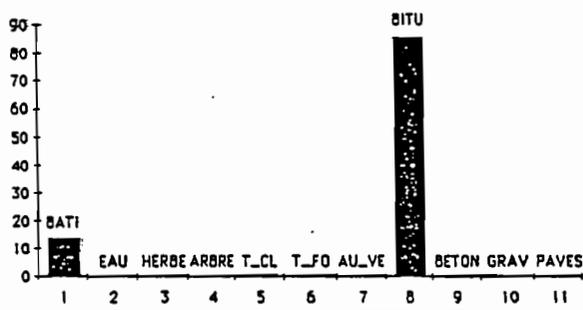


Figure A.2.3.3 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques.
Echantillon des sous-flots peu densément bâtis. Axe factoriel 3 -

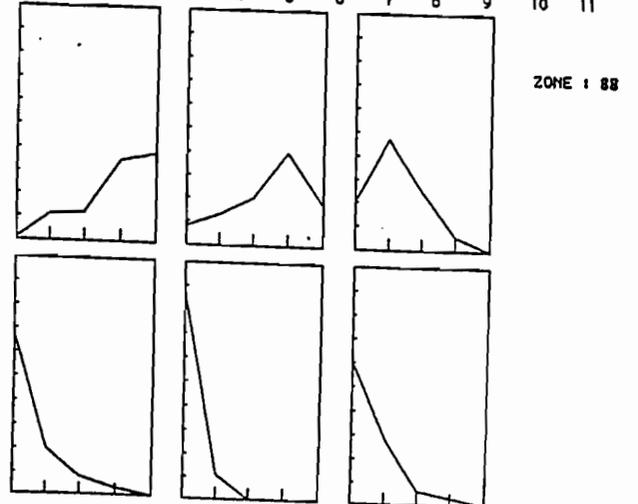
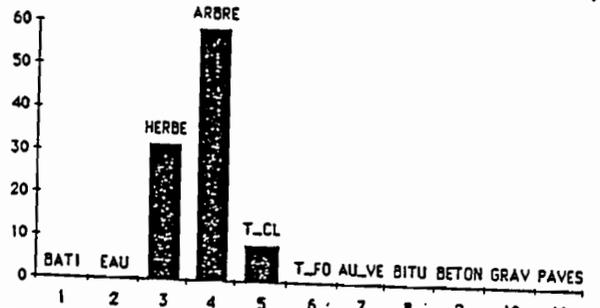
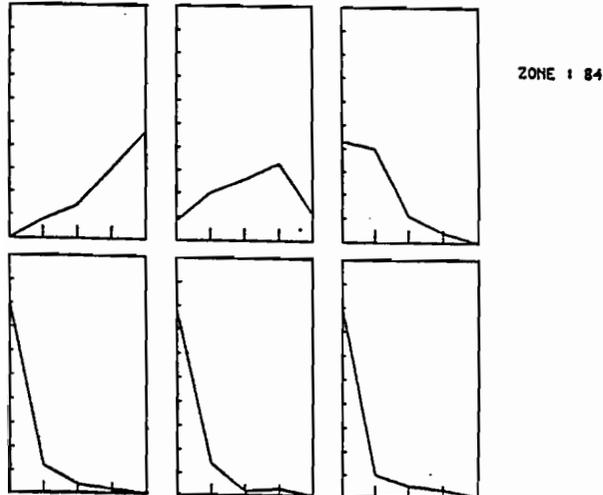
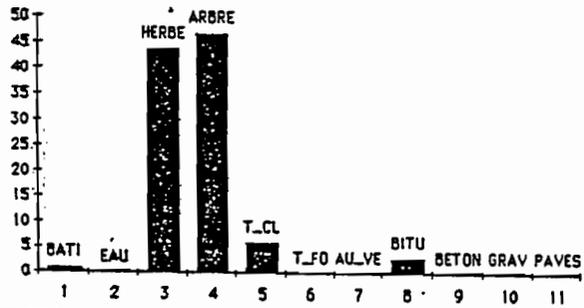
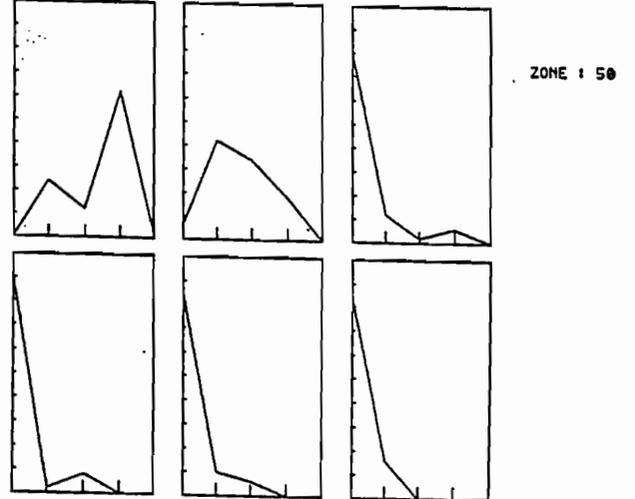
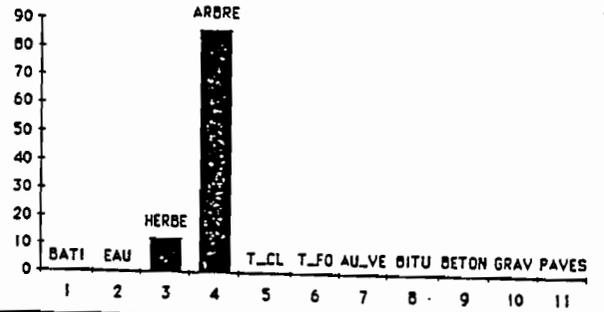
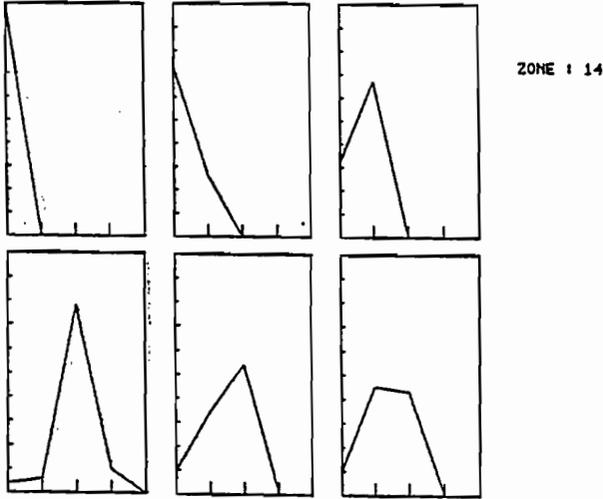
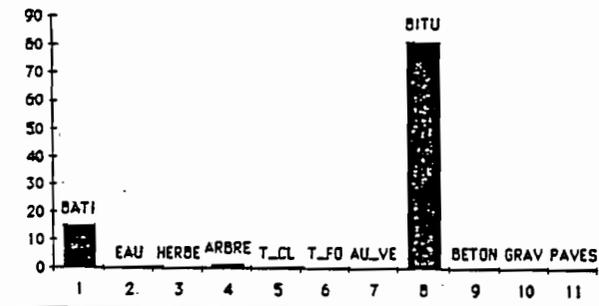


Figure A.2.3.4 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques.
Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 4 -

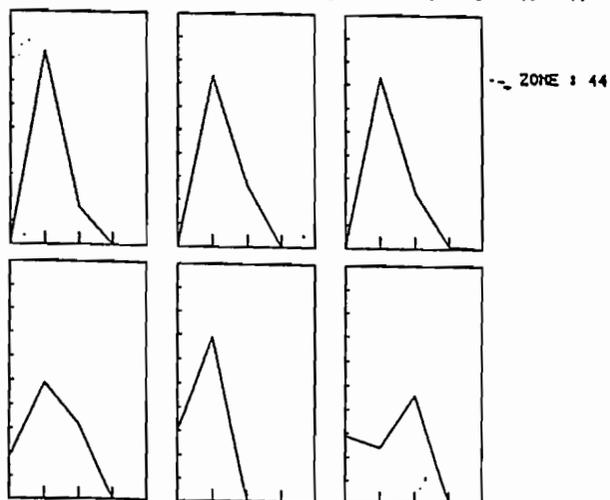
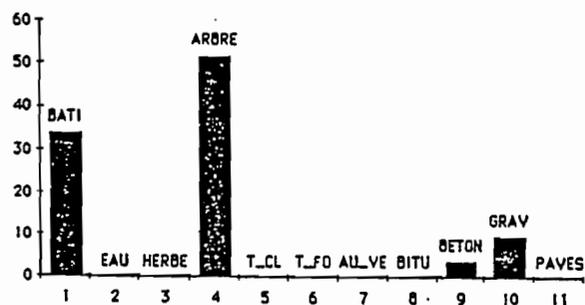
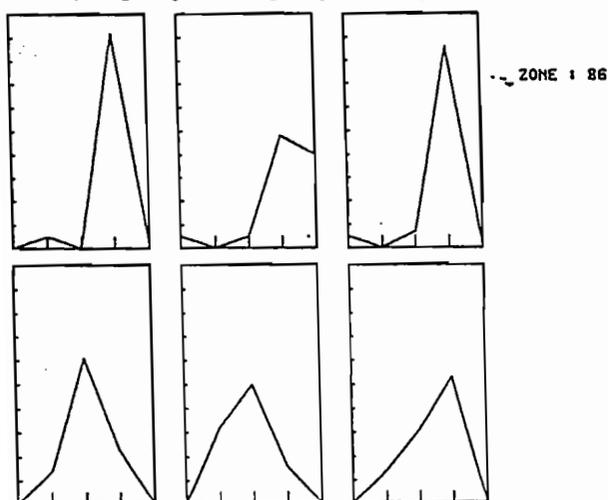
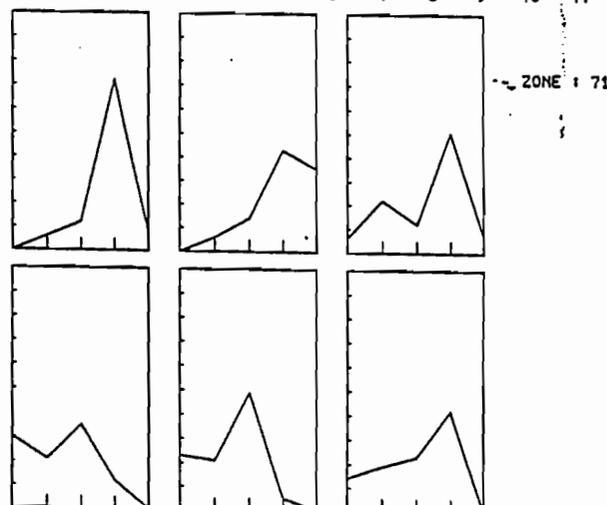
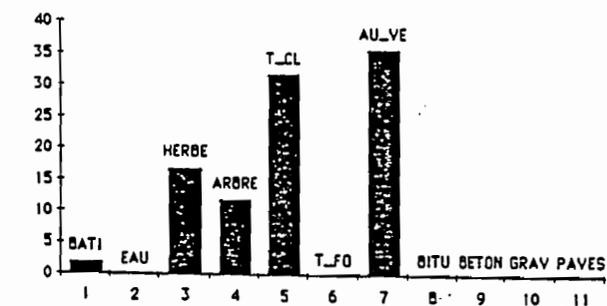
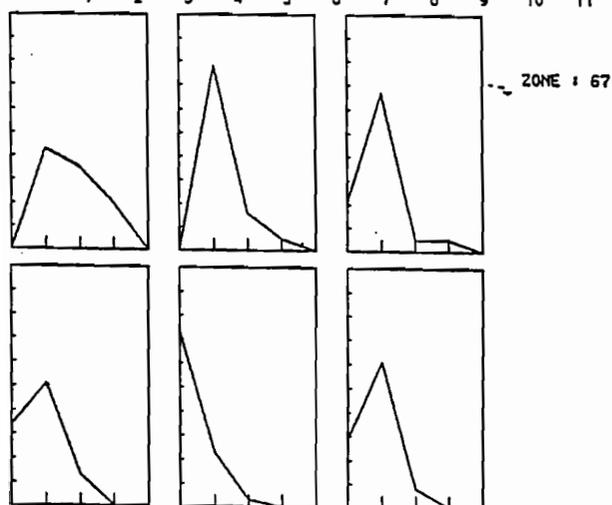
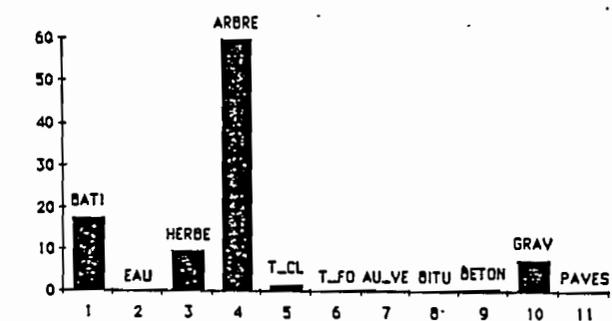
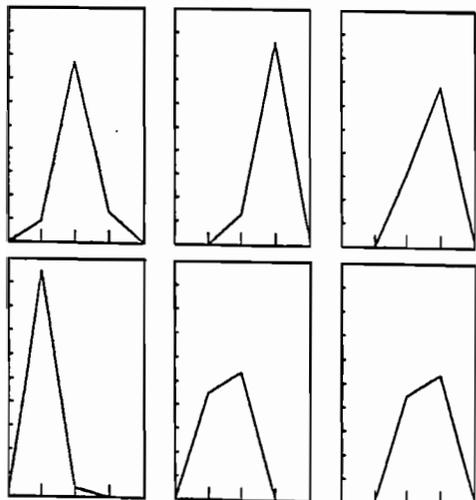
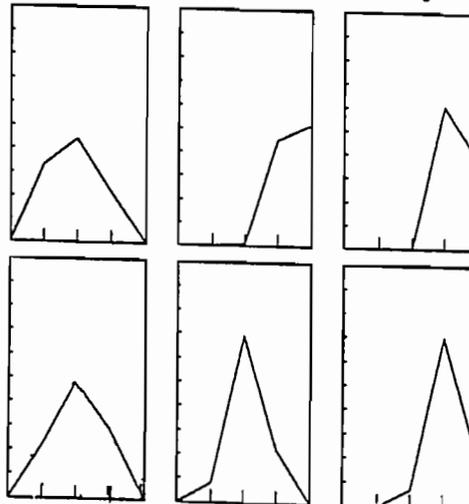
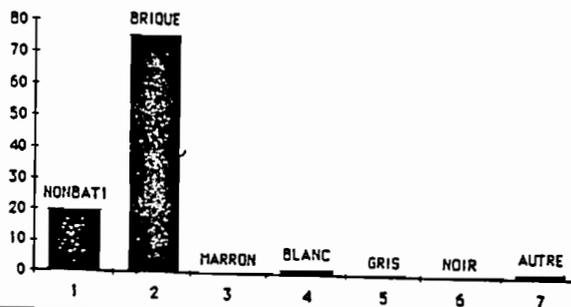


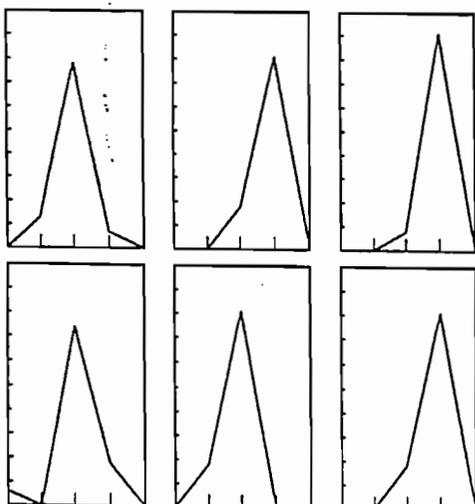
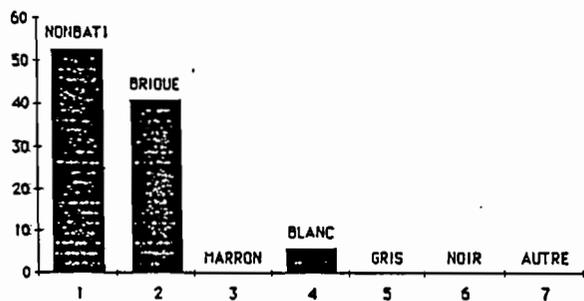
Figure A.2.3.6 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-flots densément bâtis. Axe factoriel 1 -



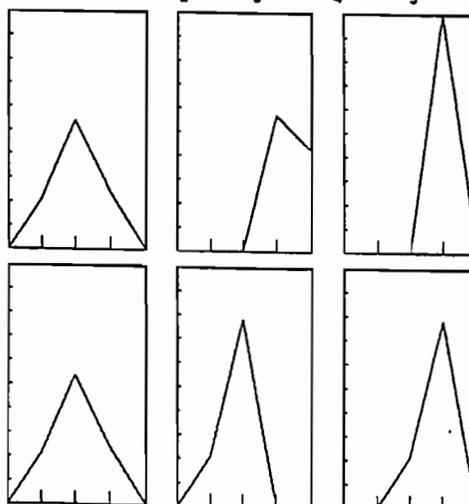
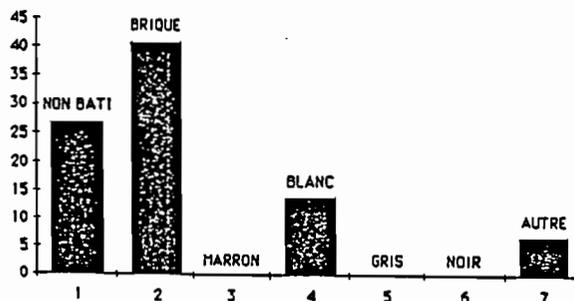
ZONE : 68



ZONE : 39



ZONE : 41



ZONE : 18

Figure A.2.3.7 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques.
Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 2 -

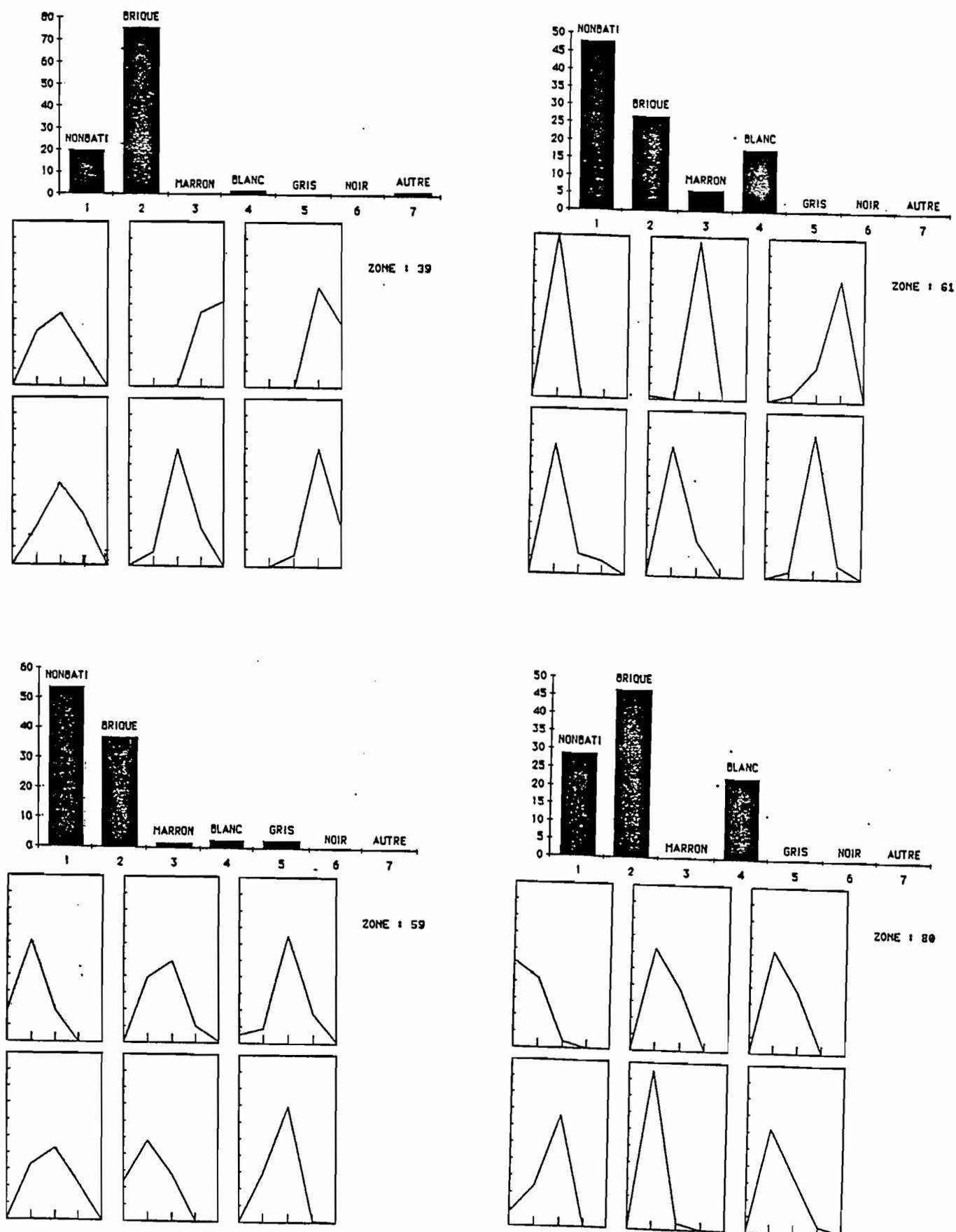


Figure A.2.3.8 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques.
Echantillon des sous-flots densément bâtis. Axe factoriel 3 -

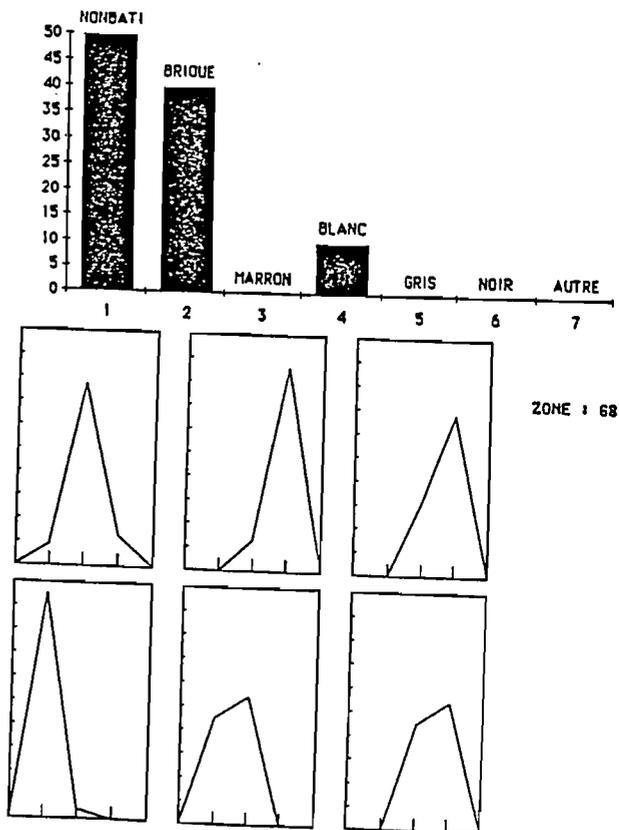
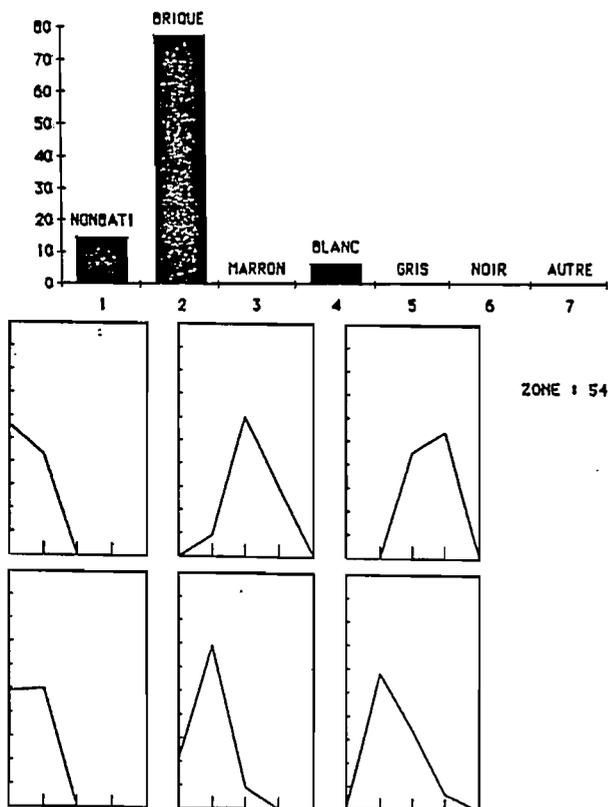
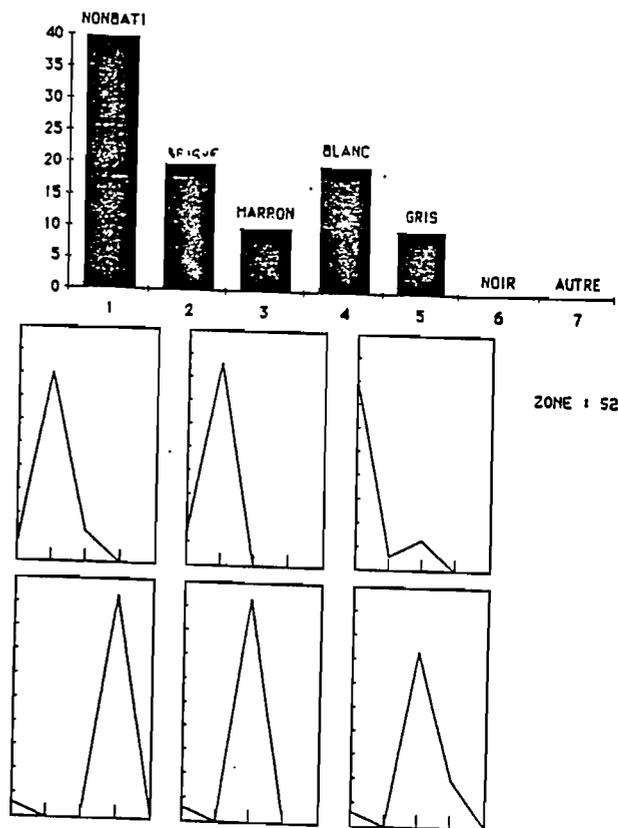
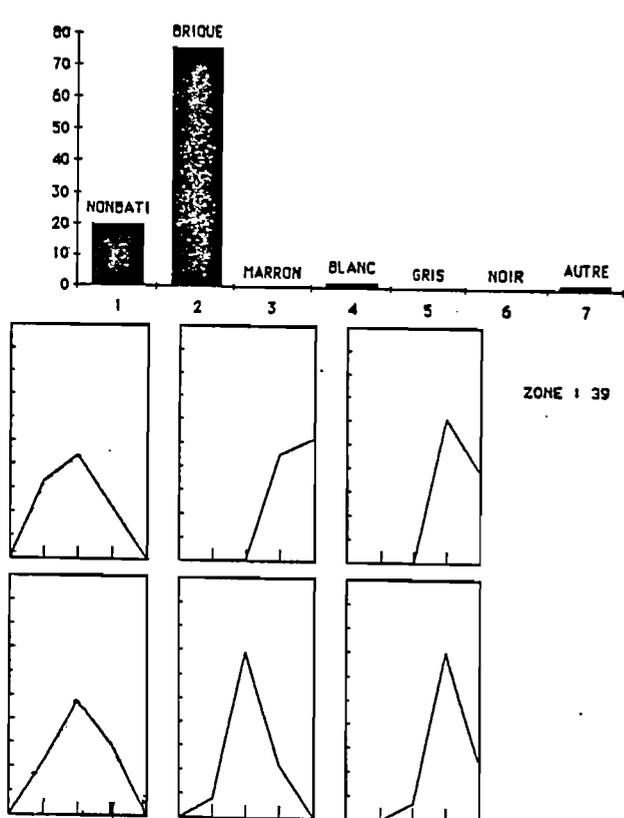
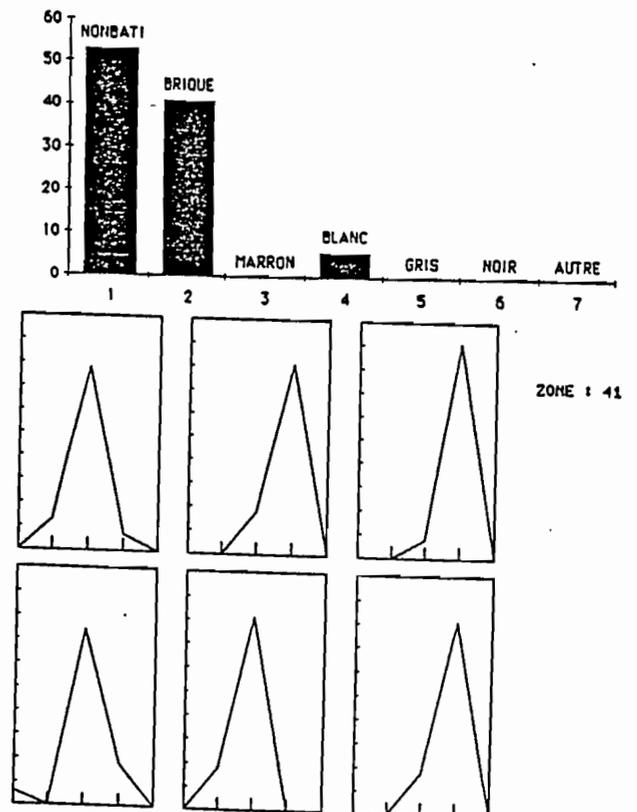
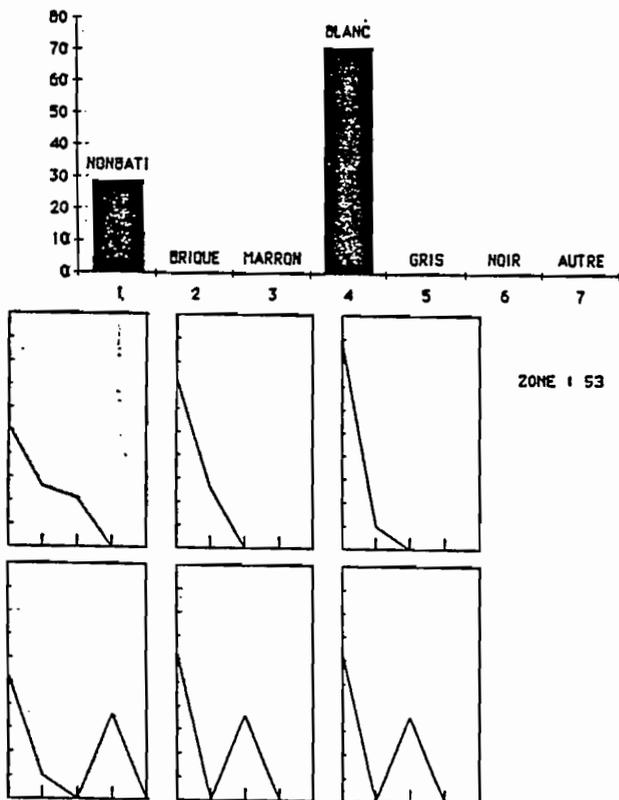
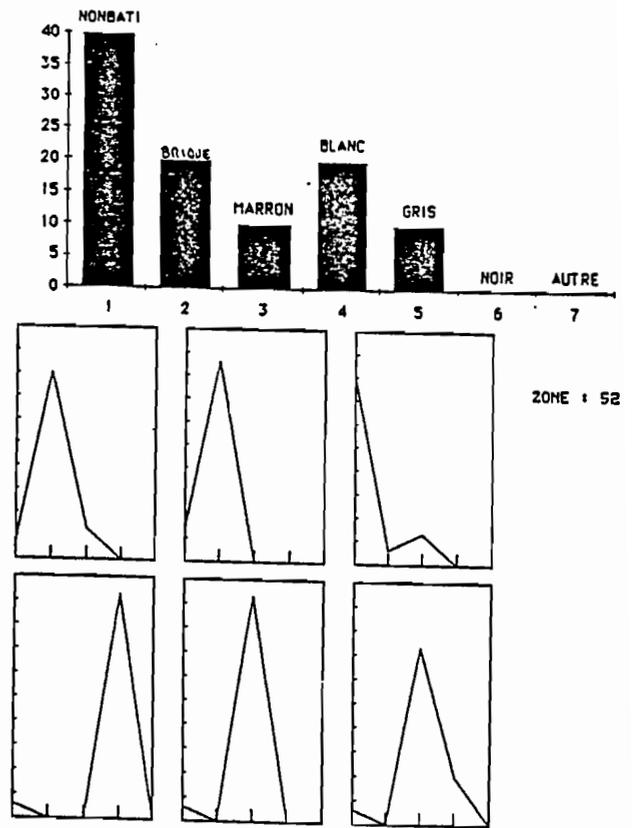
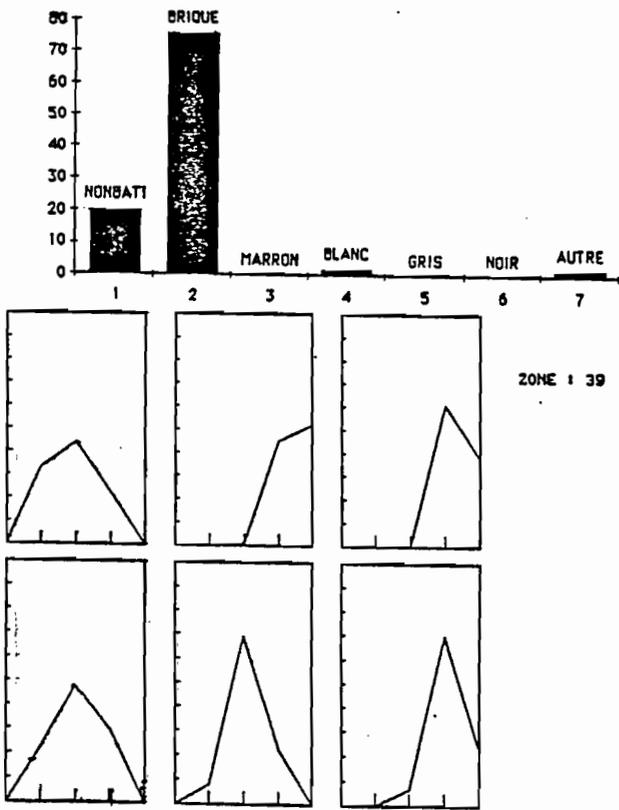


Figure A.2.3.9 - Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 4 -



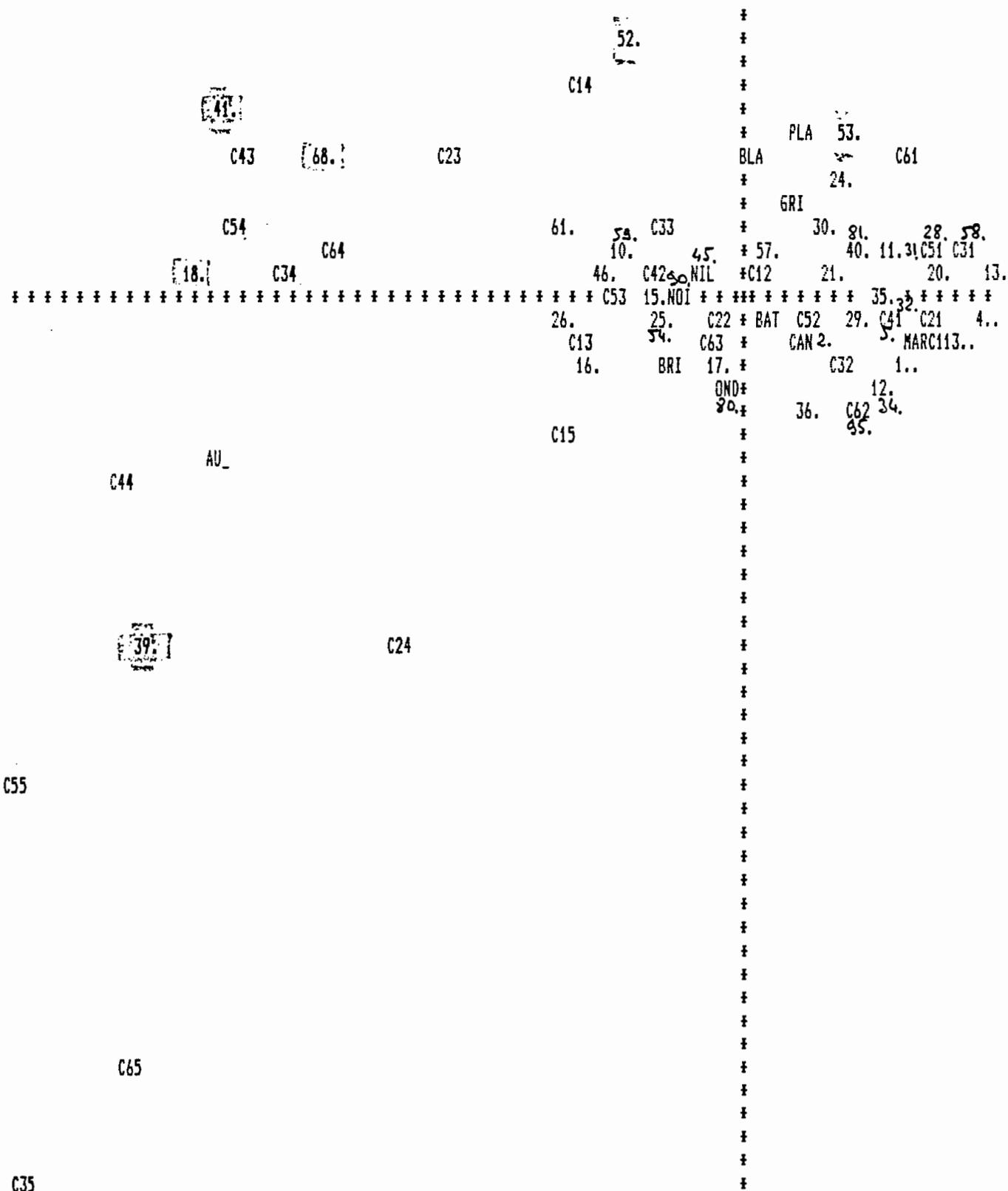


Figure A.2.3.10 - Analyse des sous-filots densément bâtis. Plan factoriel 1 4 -

**ANNEXE A.3.1 - MANUEL D'ENQUETE
MANUEL DE CODIFICATION -**

QUITO - Enquête morphologie urbaine
Octobre / Décembre 1988

INSTRUCTIONS AUX ENQUETEURS

Orstom - IPGH

SOMMAIRE

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

I. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

I. 1. Le programme de recherche

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

Deux idées sont à la base de ce programme :

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

Les satellites renseignent de manière continue sur l'occupation du sol en milieu urbain : il s'agit donc, dans la méthode que nous développons, d'utiliser cette information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines. Les travaux réalisés (par VERNIERE notamment) sur photographies aériennes ont montré que l'application de ce principe permet un allègement de l'échantillon d'enquête (donc, pour un même coût global et un même niveau de précision, une possibilité d'approfondir l'observation) et une spatialisation des résultats.

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

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

localisées

-La télédétection comme système autonome d'observation démographique

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

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

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

1. 2. L'enquête morphologie urbaine

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

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

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

2. TECHNIQUE D'ENQUETE

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

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

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

3. ORGANISATION DU TRAVAIL

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

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

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

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

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

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

4. COLLECTE DE L'INFORMATION

4. 1. Principes de base

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

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

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

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

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

4. 2. Description des bâtiments

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

Définition du bâtiment

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

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

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

Limites du bâtiment

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

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

Numéro du bâtiment

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

Stade de construction

Il s'agit de distinguer :

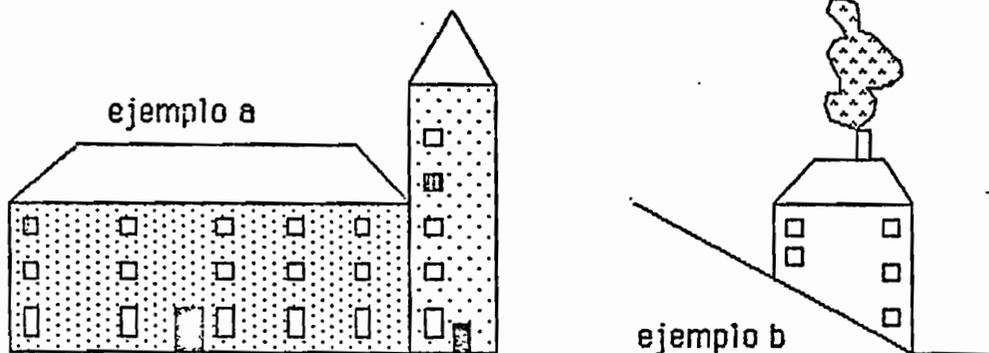
- En construction : bâtiment en chantier (à partir du moment où les fondations sont recouvertes d'un matériau de construction) non encore habitable (par exemple, toiture non terminée, vitres non posées...etc)
- Terminé : bâtiment habitable, dont l'étanchéité est assurée (toit, portes et fenêtres), même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

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

Nombre d'étages

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

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

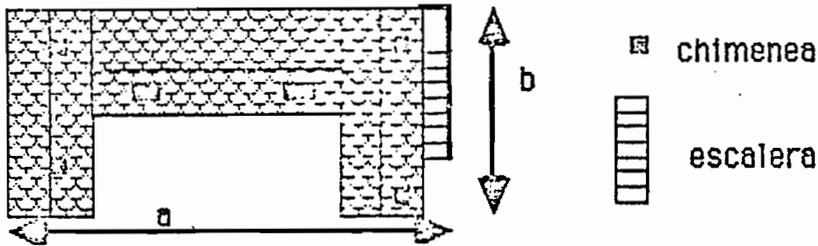


Si en raison d'une forte pente, un bâtiment compte 2 étages sur un des côtés et 3 étages sur un autre, en contrebas, indiquer le nombre d'étages minimal et maximal (2/3 dans l'exemple b), et ne pas oublier de noter la pente du sol sur le plan d'îlot.

Dimensions au sol

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

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

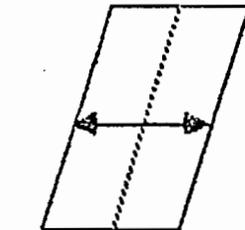
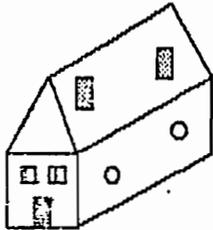


Sur la fiche de description des bâtiments, les mesures des côtés sont exprimées en mètres.

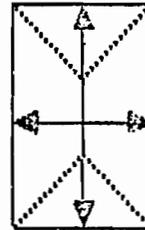
Nombre de pans du toit

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

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



Toit à 2 pans



Toit à 4 pans

Matériau prédominant du toit

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

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

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

Couleur prédominante du toit

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

Forme du matériau du toit

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

Exemples de formes possibles selon les matériaux :

Dalle de béton, carrelage, paille : _____

Eternit :  ou _____

Tuiles :  ou _____

Nombre de cheminées

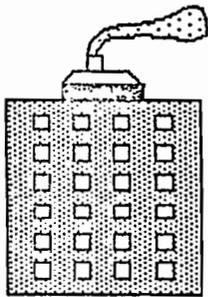
Indiquer le nombre de cheminées présentes sur le toit du bâtiment.

Présence de poteaux

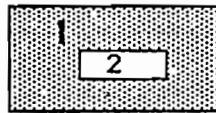
Nous retrouvons ici le cas des bâtiments habitables dans les étages inférieurs et dont le dernier étage est constitué d'une dalle en béton, d'où émergent des fers à béton ou des poteaux en bétons.

Présence de penthouse

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



Edificio de 6 pisos
con un penthouse



Croquis sobre el plano

Nombre de citernes

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

Présence de végétation

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

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

Autres observations sur les bâtiments

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

4. 3. Description du non bâti

Définition

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

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

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

Pente du sol

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

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

Identification

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

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

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

Végétation

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

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

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

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

Voirie

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

QUITO - Morphologie - Oct./Dec. 1986

Description du non bâti

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

E
A
U

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

V
E
G
E
T
A
T
I
O
N

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

V
O
I
R
I
E

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

V
O
I
T
U
R
E
S

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

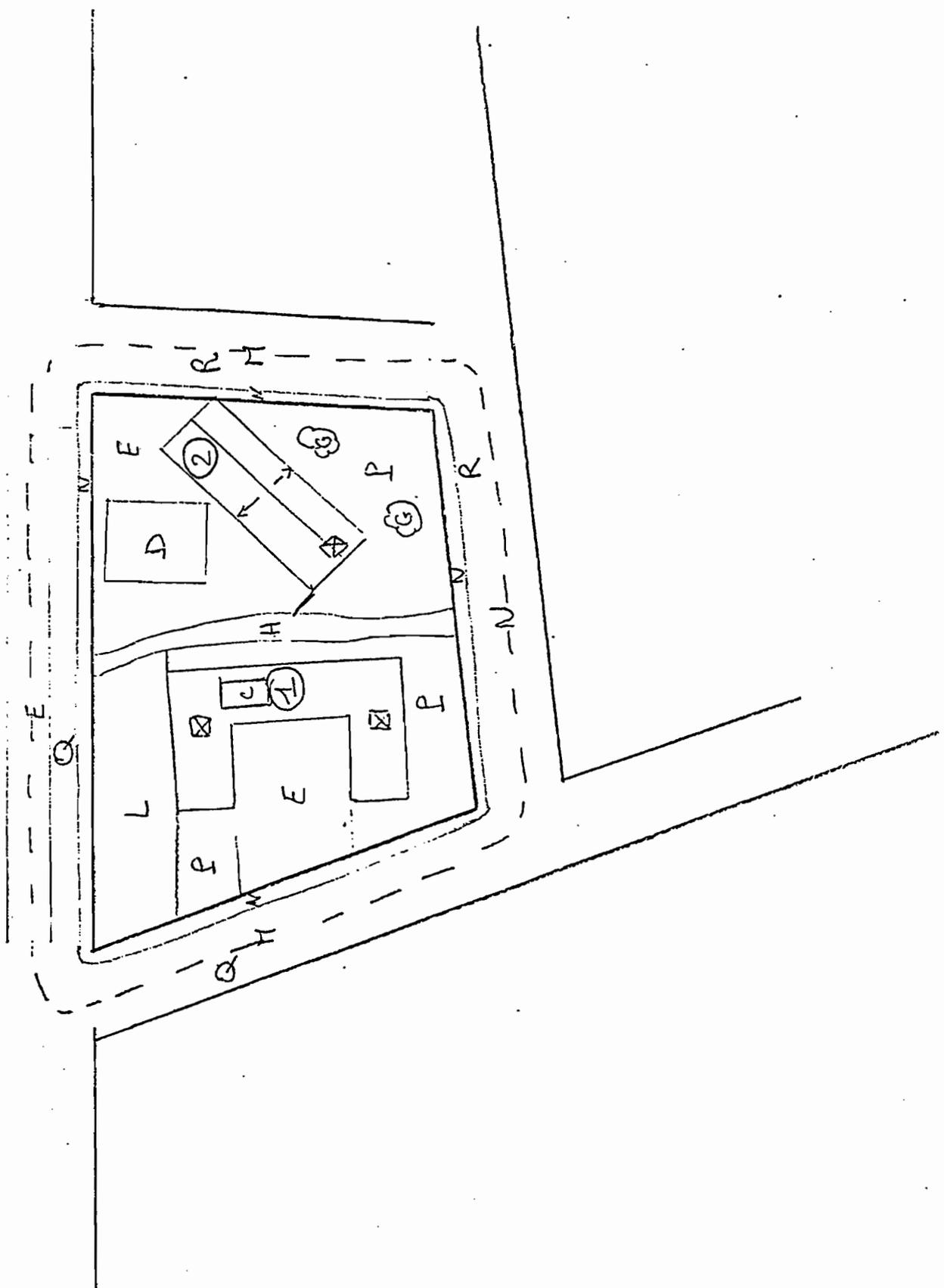
AUTRES

- T - mur de cloture

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

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

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



QUITO-Morphologie-Oct./Dec 1986

Numero d'îlot :		DESCRIPTION DES BÂTIMENTS				
Date:	Heure:					
Numero du batiment correspondant au repère porté sur le plan						
D I M E N S I O N S	<u>Bâtiment:</u> Terminé	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	En construction	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<u>Nombre d'étages (y compris RDC)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Dimensions au sol :</u> Côté a	-----	-----	-----	-----	-----
	Côté b	-----	-----	-----	-----	-----
	(Indiquer ces côtés sur le plan)					
	<u>Nombre de pans du toit (0 si plat)</u>	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Matériau prédominant du toit</u>					
T O I T	Dalle de béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Eternit ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Zinc ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Tuiles vernies	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Tuiles sans vernis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Paille ou similaires	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Autres(shingle, carrelage..)	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Couleur prédominante du toit</u>					
	(Blanc, Marron foncé, Marron clair, Gris, Brique, Noir, Rouge ou Vert)	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Forme du matériau du toit</u>					
	(Faire un croquis en coupe)					
A U T R E S	<u>Autres éléments sur le toit</u>					
	Nombre de cheminées	-----	-----	-----	-----	-----
	Presence de poteaux en béton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Presence de penthouse (à décrire)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nombre de tanques	-----	-----	-----	-----	-----
	<u>Presence de végétation</u>					
	Sur les balcons saillants	-----	-----	-----	-----	-----
	Sur le toit	-----	-----	-----	-----	-----
	<i>Autres observations sur le batiment</i>	-----	-----	-----	-----	-----

Orstom - IPGH

QUITO-Morphologie-Oct./Dec 1986

Numero d'îlot: 48

OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES

Date: 1/10/86 Heure: 15h

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

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

CODIFICATION ENQUETE MORPHOLOGIE QUITO

Françoise DUREAU
ORSTOM Dept D UR 8
Mars 1987
Version corrigée

GENERALITES SUR LA CODIFICATION

NOMBRE D'ILOTS SAISIS ET CODES

* 199 ilots ont été codés et saisis, c'est à dire :

- ilots 101 à 166 inclus, sauf l'îlot 155 (n'a fait l'objet que de photos)
- ilots 201 à 276 inclus, sauf les ilots 243 (parc à côté de la Patria) et 265 (parc de la Caroline)
- ilots 302 à 362 inclus, sauf l'îlot 351 (usine qui n'a fait l'objet que de photos).

Le descriptif de ces 199 ilots (recto de la fiche de codification) correspond au fichier QMANZANS.

* A ces 199 ilots, correspondent 2133 genres de bâtiments, décrits dans le fichier QBATIMENT (saisie des données du verso de la fiche de codification)

I . RECTO DE LA FICHE DE CODIFICATION

IDENTIFIANTS

N° Manzana

Numéro à 3 chiffres de 101 à 166, de 201 à 276 et de 302 à 362 affectés avant l'enquête morphologie aux îlots composant l'échantillon.

N° INEC

* Identifiant INEC en 7 chiffres (Zone en 3 chiffres, Secteur en 2 chiffres et Manzana en 2 chiffres) tel qu'il peut être lu sur les cartes au 1/10.000, suivi d'un code à 1 chiffre précisant si :

- 1 = la manzana INEC a été conservée entièrement pour l'enquête morphologique
- 2 = la manzana n'a été enquêtée qu'en partie
- 3 = la manzana enquêtée est plus grande que la manzana INEC

* *Dans le cas où la manzana enquêtée correspond à 2 manzanas INEC entières, deux fiches de codification ont été établies ; sur chacune, a été décrite morphologiquement la portion de "manzana 1988" correspondant à la manzana INEC. C'est le cas de la manzana 237, qui correspond en fait à 2 manzanas INEC ; il y a donc deux fiches, l'une notée 237, l'autre notée 275.*

* *Si la manzana enquêtée morphologiquement en octobre-novembre 1988 n'existe pas sur les plans INEC de 1982 au 1/10000 (hors limites INEC de Quito, ou non existante en 1982), elle reçoit le code 999.99.99.9.*

N° enquêteur

Codes :

- 1 = Ligia
- 2 = Xavier
- 3 = Olivier
- 9 = îlot ayant uniquement fait l'objet de photos.

SURFACES

Une fois connues les surfaces des îlots de l'échantillon par TIGRE, les surfaces mesurées sur carte devraient être corrigées ; il ne faut utiliser les chiffres de surface notés sur la fiche de codification qu'avec prudence. Ils ne sont destinés qu'à permettre le calcul des ratios (ex : % non bati) n'ayant qu'une valeur *relative*, % à rassembler en classes.

Surface îlot

Surface de l'îlot en m^2 , non compris la voirie bordant l'îlot. Quand l'îlot est représenté sur la carte au 1/15000 de l'IGM, il est mesuré sur cette carte ; dans le cas contraire, la mesure est faite sur les plans INEC au 1/10.000 (Voir note dans le coin haut droite des fiches de codification des manzanas). Dans tous les cas, la mesure est faite avec une grille millimétrée sur support stable.

La voirie interne à l'îlot est incluse dans ce calcul de surface.

Surface 1/2 voirie

Moitié de la surface en m^2 de la voirie encadrant l'îlot.

Mêmes principes de mesure que pour la surface de l'îlot.

Surface totale

Surface totale = surface îlot + surface 1/2 voirie. Exprimée en m^2 .

TYPE MORPHOLOGIQUE**Carte Caza/Godard**

Il s'agit des modalités de la légende de la carte "Esbozo de tipología del habitat", établie par P. CAZAMAJORE et H. GODARD en 1984, soit :

- 1 = Zone industrielle
- 2 = Zone de végétation
- 3 = Centre des affaires et de commerces de luxe
- 4 = Zone non urbanisée en 1984 (le code 16 des fiches de codification a été recodé 4 dans le fichier, car même signification)
- 5 = Zone urbaine "diverse" jusqu'en 1983
- 6 = Habitat classe haute
- 7 = Habitat mixte classes haute et moyenne
- 8 = Habitat classe moyenne
- 9 = Programmes de vivienda de l'Etat classe moyenne
- 10 = Programmes de vivienda de l'Etat classe populaire
- 11 = Habitat mixte classes haute et populaire
- 12 = Habitat mixte classes moyenne et populaire
- 13 = Habitat populaire consolidé ou en voie de consolidation
- 14 = Habitat populaire non consolidé
- 15 = Taudification verticale (centre) et horizontale (quartiers périphériques)

Ont été ajoutées les modalités :

- 17 = Commerce
- 99 = Type non défini

Enquêteur et Photo

Les mêmes codes sont utilisés pour le type défini par l'enquêteur et pour celui noté au moment de la prise de photo et au vu des diapos.

Après examen des modalités retenues par chacun des enquêteurs, ont été retenus les types suivants (les classes 1 à 6 se rapportant aux catégories d'habitat) :

- 1 = Alta ou Burgesia alta
- 2 = Media alta
- 3 = Media media
- 4 = Media baja
- 5 = Media y Baja
- 6 = Baja
- 7 = Industriel
- 8 = Scolaire
- 9 = Commercial
- 10 = Equipements sociaux
- 11 = Végétation (hors terrains agricoles)
- 12 = Agricole
- 13 = Bureaux

Un îlot dont seulement une partie est consacrée à l'habitation est classé avec les codes 1 à 6 selon le standing de l'habitat ; les codes 7 à 13 sont utilisés exclusivement pour les îlots ne comptant aucun bâtiment d'habitation.

BATI**Surface batio**

Il s'agit de la surface correspondant à la somme des surfaces de tous les bâtiments de la manzana, qu'ils soient terminés ou non.

Densité du bâti

Cinq niveaux de densité, établis d'après le plan de l'enquêteur et les diapos :

- 1 = Non bâti (pas un seul bâtiment sur la manzana)
- 2 = Densité très faible
- 3 = Densité faible
- 4 = Densité moyenne
- 5 = Densité forte
- 6 = Densité très forte

Implantation du bâti dans l'îlot

Codée d'après le plan établi par l'enquêteur et les diapos :

- 1 = Pas de type d'implantation particulier. Bâti homogène sur tout l'îlot, sans directions particulières.
- 2 = Bâtiments concentrés au centre de l'îlot, le bord des rues étant non bâti
- 3 = Bâtiments non alignés, concentrés sur le pourtour de l'îlot, près des rues, le centre de l'îlot étant vide
- 4 = Bâtiments concentrés dans un coin de l'îlot, le reste étant à peu près non bâti
- 5 = Bâtiments concentrés dans deux angles opposés de l'îlot, le reste étant à peu près non bâti
- 6 = Bâtiments alignés régulièrement près des rues, le centre de l'îlot étant vide
- 7 = Répartition des bâtiments homogène, selon un plan régulier sur tout l'îlot (en semis, et non en barre)
- 9 = Bâtiments concentrés le long de la rue principale
- 10 = Maisons accolées formant des barres continues (dans ce cas, la barre constitue *un seul* bâtiment ; c'est cette barre qui est décrite dans le tableau descriptif des bâtiments terminés, au dos de la fiche de codification)
- 11 = A rassembler avec code 10. Pas de différence significative entre ces 2 classes
- 12 = Idem 10, mais les maisons n'étant pas strictement accolées, la "barre" est divisée en n bâtiments semblables, qui sont tous décrits dans le tableau du dos de la fiche de codification.

Nombre de bâtiments

Le nombre de bâtiments total (= terminés + en construction), le nombre de bâtiments terminés et le nombre de bâtiments en construction correspondent aux bâtiments décrits par les enquêteurs sur les questionnaires.

Les pent-houses sont comptabilisés et décrits comme tout autre bâtiment de plein pied.

Répartition des bâtiments terminés par genre

Dans la colonne correspondant à chaque genre, est porté le nombre de bâtiments correspondant à ce genre ; ne sont comptabilisés et donc décrits au verso de la fiche de codification que les bâtiments terminés.

Pente du toit

S'il n'existe pas de direction majoritaire des faîtes, le code est 5 (cette variable ayant été recodée après saisie, considérer les modalités inscrites dans le fichier QMANZANS et non celles notées dans les fiches de codification).

S'il existe une direction majoritaire, le code est :

- 1 = Nord / sud
- 2 = Est / ouest
- 3 = Nord est / sud ouest
- 4 = Nord ouest / sud est

S'il n'existe pas de bâtiments terminés dans la manzana, le code est 9.

Penthouse, Poteaux fer/béton et Cheminées

Pour chacune de ces trois variables, est noté le nombre de bâtiments présentant l'un de ces éléments sur son toit.

terminés

Végétation sur balcons saillants

- 1 = Aucune végétation sur des balcons saillants
- 2 = Végétation sur balcons saillants peu importante
- 3 = Végétation sur balcons saillants très importante

* Dans le cas d'un *ilot ne comptant aucun bâtiment*, toutes les variables de la section "Bâti" sont codées 0 pour les nombres de bâtiments, et 9 ou 99 pour les autres variables de la section.

NON BATI

Toute la description du NON BATI ne concerne que l'intérieur de l'îlot, à l'exclusion de la voirie entourant l'îlot.

Pente du sol

Direction (mêmes codes pour dominante et sous-dominante) :

- 1 = Nord
- 2 = Nord est
- 3 = Est
- 4 = Sud est
- 5 = Sud
- 6 = Sud ouest
- 7 = Ouest
- 8 = Nord ouest

Niveau : 1 = aucune pente (sol quasiment plat)
 2 = pente faible
 3 = pente forte
 4 = pente très forte

Dans le cas où il n'existe pas de pente du tout, les codes sont :

Dominante : Direction = 9, Niveau = 1
 Sous-dominante : Direction = 9, Niveau = 9

Eau

Le type de surface en eau reprend les rubriques prévues dans le manuel d'enquête, et il est codé :

- 1 = Rivière
- 2 = Canal
- 3 = Réservoir d'eau, bassin (sans toit)
- 4 = Piscine

Si pas de surface en eau dans la manzana, le code est 9.

La surface en m² est estimée d'après le plan établi par l'enquêteur et les diapos de la manzana ; elle correspond au total des surfaces en eau, tous types 1 à 4 confondus, de la manzana.

Végétation dans l'îlot

Le type de surface occupée par de la végétation reprend les rubriques prévues dans le manuel d'enquête, et il est codé :

- 1 = Pelouse (en fait, toute surface en herbe non consacrée spécifiquement à du pâturage)
- 2 = Fleurs
- 3 = Arbres
- 4 = Arbustes sans fleurs

- 5 = Arbustes avec fleurs
- 6 = Potager
- 7 = Pâturage
- 8 = Champ cultivé

Si pas de surface occupée par de la végétation dans la manzana, le code est 9.

La surface en m² est estimée d'après le plan établi par l'enquêteur et les diapos de la manzana ; elle correspond au total des surfaces occupées par de la végétation, tous types 1 à 8 confondus, de la manzana.

Dans le cas où il n'existe pas de végétation sous-dominante (pas du tout de végétation dans l'îlot ou végétation d'un seul type, noté "dominant"), le code du type de végétation sous-dominante est 9.

Voirie dans l'îlot

On appelle "voirie" toute surface non bâtie et non occupée par de la végétation.

Le type de surface occupée par de la voirie reprend les rubriques prévues dans le manuel d'enquête, et il est codé :

- 1 = Bitume
- 2 = Pavés ou dalles en béton
- 3 = Pierres
- 4 = Terre ou sable
- 5 = Carrelage
- 6 = Matériaux de bâtiment entreposés sur le sol
- 8 = Terre battue (tennis)

Si pas de surface occupée par de la voirie dans la manzana, le code est 9.

La surface en m² est estimée d'après le plan établi par l'enquêteur et les diapos de la manzana ; elle correspond au total des surfaces occupées par de la voirie, tous types 1 à 8 confondus, de la manzana.

Dans le cas où il n'existe pas de voirie sous-dominante (pas du tout de voirie dans l'îlot ou voirie d'un seul type, noté "dominant"), le code du type de voirie sous-dominant est 9.

Murs de clôture

Il s'agit de murs de séparation à l'exclusion des murs constitutifs des bâtiments (soutenant leur toiture).

A l'intérieur de l'îlot, les codes sont :

- 1 = Aucun mur de clôture
- 2 = Murs de clôture peu nombreux
- 3 = Murs de clôture très nombreux

Sur le périmètre de l'îlot, le code correspond au % du périmètre de l'îlot occupé par des murs.

1/2 VOIRIE BORDANT L'ÎLOT**Trottoir**

Dans le cas où la chaussée de circulation est bordée par un trottoir pour le cheminement des piétons, on utilise les codes suivants pour décrire les matériaux dominants et sous-dominants des trottoirs :

- 1 = Bitume
- 2 = Pavés ou dalles en béton
- 3 = Pierres
- 4 = Terre ou sable
- 5 = Carrelage
- 6 = Matériaux de bâtiment entreposés sur le sol
- 7 = Pelouse
- 8 = Arbres

Dans le cas où tous les trottoirs bordant l'îlot sont construits dans le même matériau, le matériau dominant est codé d'après les codes cités ci-dessus, et le matériau sous-dominant est codé 9.

Dans le cas où il n'existe pas de trottoir, le code des matériaux dominants et sous-dominants est 9.

Chaussée

Dans le cas où il y a une chaussée de circulation, on utilise les codes suivants pour décrire les matériaux dominants et sous-dominants des chaussées :

- 1 = Bitume
- 2 = Pavés ou dalles en béton
- 3 = Pierres
- 4 = Terre ou sable
- 5 = Carrelage

Dans le cas où toutes les chaussées bordant l'îlot sont construites dans le même matériau, le matériau dominant est codé d'après les codes cités ci-dessus, et le matériau sous-dominant est codé 9.

Dans le cas où il n'existe pas de chaussée (limite d'îlot = quebrada, mur ou végétation) le code des matériaux dominants et sous-dominants est 9.

Le terre-plein central n'est pas considéré comme faisant partie de la chaussée ; c'est pourquoi il n'est pas prévu de code désignant de la végétation pour les chaussées.

Pelouse, Arbres et Arbustes

Ces trois variables décrivent le % de la longueur de voirie bordant l'îlot occupé par chacun de ces types de végétation, que ce soit sur les trottoirs ou sur les terre-plein centraux.

Dans la quasi-totalité des cas, cette végétation est intermittente, c'est à dire que la pelouse alterne avec le béton sur les trottoirs, et que les arbres ne forment pas une ligne continue de végétation mais sont espacés entre eux de quelques mètres ; c'est néanmoins la longueur totale occupée par cet agencement (pelouse/béton, par exemple) qui est prise en compte pour le calcul du %.

Voitures

En stationnement : % de longueur de bordure d'îlot occupé par des voitures en stationnement (au maximum)

En circulation : % de longueur de bordure d'îlot occupé par des voitures en circulation. Ce qui correspond, en fait, au % du périmètre de l'îlot disposant d'une chaussée où peuvent circuler des voitures.

2. VERSO DE LA FICHE DE CODIFICATION

* N° Manzana, N° INEC et N° Enquêteur : idem recto de la fiche de codification.

* Ne sont décrits que les bâtiments considérés comme terminés par l'enquêteur.

* Le nombre de bâtiments de chaque genre est noté sur le recto de la fiche de codification ; il peut y avoir au maximum 17 genres pour une seule manzana. Sont regroupés dans chaque genre les bâtiments de la manzana qui ont des caractéristiques du bâti semblables ou très voisines.

* Les codes utilisés pour les descripteurs des bâtiments sont ceux notés sur le verso de la fiche de codification, soit :

<u>Matériau du toit</u>	<u>Forme du matériau du toit</u>	<u>Couleur du toit</u>	
Dalle de béton	1 	1 Blanc	9 Bleu clair
Eternit ou similaires	2 	2 Orange	10 Bleu foncé
Zinc ou similaires	3 	3 Marron clair	11 Gris
Tuiles vernies	4 	4 Marron foncé	12 Noir
Tuiles non vernies	5 	5 Brique	13 Autre
Paille ou similaires	6 Autre	6 Rouge	99 Non observé
Carrelage	8 Non observé	7 Vert clair	
Autres		8 Vert foncé	
Non observé			

* Les codes 9 ou 99 n'ont en fait pas été utilisés pour les descripteurs des bâtiments, puisqu'il n'est pas apparu de cas "non observé".

* Couleur du toit

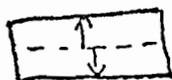
A l'issue de la codification, il s'est avéré nécessaire de regrouper des modalités pour le descripteur "couleur du toit", les qualificatifs "clair" et "foncé" pour les couleurs bleu et vert n'ayant pas la même signification selon les enquêteurs. On a donc finalement :

- Couleur code 7 : vert clair ou vert foncé (code 8 supprimé)
- Couleur code 9 : bleu clair ou bleu foncé (code 10 supprimé)

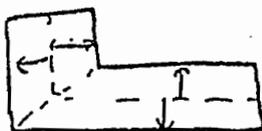
* Le code 14 = jaune a été ajouté, afin de rendre compte de quelques cas d'Eternit jaune.

* **Nombre de pans du toit**

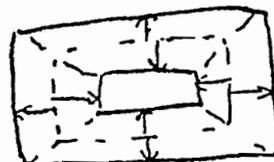
Dans le cas de bâtiments en angle, la codification a été fait comme suit :



2 pans



2 pans



2 pans

* **Forme du matériau du toit**

A été ajoutée la modalité 6 =

(ex : marché national, dans le sud de Quito)

* **Surface au sol**

Il s'agit de la surface moyenne des bâtiments composant le genre de bâtiment dans la manzana.

L'analyse des surfaces de bâtiments selon les enquêteurs (histogrammes, tableaux de fréquences et indicateurs statistiques) a conduit à augmenter les surfaces mesurées par l'enquêtrice de 20 %, afin d'homogénéiser ses mesures avec celles de l'enquêteur ; au vu des tests effectués, il était net que l'enquêtrice avait systématiquement sous-estimé les dimensions des bâtiments, alors que celles de l'enquêteur étaient correctes.

N° Manzana N° INEC N° enquêteur (Liqua=1, Xavier=2)
 (Entière=1, en parties=2)

Surface îlot Surface 1/2 voirie Surface totale
 (En m² - Mesure sur IGM 1/15000)

TYPE Carte Caza/Godard Enquêteur Photo

BATI Surface (m²) (D'après quest./plan)
 Densité du bâti (D'après plan/quest./photo) Implantation du bâti dans l'îlot

Nombre de bâtiments : Total Terminés En construction

Répartition des bâtiments terminés par genre :

Genre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Nbre																	

Pente du toit (direction majoritaire des faîtes) (Sans pente 0, N/S1, E/W2, NE/SW3, NW/SE4)
 Nbre de bâtiments terminés avec penthouse
 Nbre de bâtiments terminés avec poteaux fer/béton
 Nbre de bâtiments terminés avec cheminées
 Présence de végétation sur balcons saillants (Aucun 1, Peu nomb. 2, Très nomb. 3)

NON BATI
 Pente du sol : Dom. : Direction (Ss pente=0, N=1, NE=2, E=3, Niveau (Aucun 1, Faible 2, Ss-dom. : Direction (SE=4, S=5, SW=6, W=7, NW=8) Niveau Forte 3, Très forte 4)

Eau : Type Surface (m²)
 Végétation dans l'îlot : Hors bâti : Type dom. Type ss-dom. Surface (m²)
 Couvrant le bâti : Type dom. Type ss-dom. Surface (m²)
 Voirie dans l'îlot : Matériau dom. Matériau ss-dom. Surface (m²)
 Présence de murs de clôture : dans l'îlot (Aucun 1, Peu nomb. 2, Très nomb. 3)
 sur le périmètre de l'îlot (En % du périmètre de l'îlot)

1/2 VOIRIE BORDANT L'ÎLOT Trottoir : Mat. dom. Mat. ss-dom. Chaussée : Mat. Dom. Mat. Ss-dom.
 Pelouse Arbres Arbustes (en % longueur de bordure)
 Voitures : En stationnement En circulation

CODIFICATION QUITO - FICHE MANZANA

N° Manzana	<input type="text"/>	n° INEC :	<input type="text"/>	N° enquêteur	<input type="text"/>	(Ligia=1. Xavier=2)
N° du genre de bâtiment dans la manzana	Descripteurs des bâtiments terminés					
	Matériau du toit	Forme mat. du toit	Couleur mat. du toit	Nbre pans du toit	Nbre étages (Rdc inclus)	Surface au sol (m2)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

Matériau du toit

- 1 Dalle de béton
- 2 Eternit ou similaires
- 3 Zinc ou similaires
- 4 Tuiles vernies
- 5 Tuiles non vernies
- 6 Paille ou similaires
- 7 Carrelage
- 8 Autres
- 9 Non observé

Forme du matériau du toit

- 1 
- 2 
- 3 
- 4 
- 5 
- 6 Autre
- 9 Non observé

Couleur du toit

- | | |
|----------------|----------------|
| 1 Blanc | 9 Bleu clair |
| 2 Orange | 10 Bleu foncé |
| 3 Marron clair | 11 Gris |
| 4 Marron foncé | 12 Noir |
| 5 Erique | 13 Autre |
| 6 Rouge | 99 Non observé |
| 7 Vert clair | |
| 8 Vert foncé | |

**ANNEXE A.3.6 - NOMENCLATURES DES
TYPOLOGIES DE L'ESPACE BÂTI QUITÉNIEN -**

ANNEXE A.3.6 - TYPOLOGIE DE L'ESPACE BATI -

Tableau A.3.6.1 - Contribution des variables (axes factoriels) aux classes, échantillon des îlots densément bâtis -

Type	Classe	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Centre ville colonial densité très forte, (toiture foncée, bitume)	(1)	94 %	1 %	3 %	-2%	1%
Centre ville dense (toiture à dominante foncée : tuile /béton)	(2)	9 %	68 %	10 %	12%	2%
Centre ville dense (toiture à dominante claire : béton /tuile)	(3)	-67 %	9 %	-9 %	0 %	-15%
Pavillonnaire dense (toiture tuile, végétation éparsé)	(4)	48 %	-43 %	-9 %	0 %	-1 %
Petits bâtiments toits clairs (toiture béton,ou Eternit)	(5a) (5b)	-43 % -53 %	-16 % -2 %	-2 % -12 %	4 % -14 %	35 % 18 %
Grands bâtiments (toits très clairs)	(6)	-65 %	-11 %	22 %	-2	0%

Tableau A.3.6.2 - Coordonnées du centre de gravité des classes dans l'espace des 5 axes factoriels, échantillon des îlots densément bâtis -

Type	Classe	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Centre ville colonial densité très forte, (toiture foncée, bitume)	(1)	0,8	0,1	0,1	-0,1	0,1
Centre ville dense (toiture à dominante foncée : tuile /béton)	(2)	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0
Centre ville dense (toiture à dominante claire : béton /tuile)	(3)	-0,5	0,2	-0,2	0,0	-0,2
Pavillonnaire dense (toiture tuile, végétation éparse)	(4)	0,6	-0,7	-0,4	0,0	-0,1
Petits bâtiments toits clairs (toiture béton ou Eternit)	(5) (5b)	-0,6 -0,7	-0,2 -0,1	-0,2 -0,4	0,1 -0,3	0,5 0,4
Grands bâtiments (toits très clairs)	(6)	-0,6	-0,2	0,2	-0,1	0,0

Tableau A.3.6.3 - Contribution des variables (axes factoriels) aux classes, échantillon des îlots peu densément bâtis -

Type	Classe	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Dominante agricole (champ, peu de terre nue) Densité de construction très faible	(7)	89 %	-1 %	1 %	9%	0%
Champ à activité chlorophyllienne réduite	(8)	62 %	13 %	7 %	-14%	-3%
Franges urbaines Densité très faible	(9)	-19 %	75 %	-1 %	-1 %	4%
Pavillonnaire peu dense	(10)	-82 %	9 %	-9 %	0 %	0 %
Evolutif minéral - toits sombres - toits clairs	(11a) (11b)	-74 % -70 %	-18 % -9 %	8 % -8 %	0 % 2 %	0 % -11%
Entrepôts ¹ et végétation - toits clairs - toits foncés	(12a) (12b)	-35 % +8 %	-25 % -50 %	-29 % -2 %	1% 3%	11% 37%
Bâtiments seuls Toits réfléchissants	(13)	-26 %	-24 %	43 %	0 %	6 %

¹ Par entrepôts, nous entendons des bâtiments de grande taille sans connotation fonctionnelle

Tableau A.3.6.4 - Coordonnées du centre de gravité des classes dans l'espace des cinq axes factoriels, échantillon des îlots peu densément bâtis -

Type	Classe	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Dominante agricole (champ, peu de terre nue) (Densité de construction très faible)	(7)	0,7	-0,1	0,1	0,2	-0,1
Champ à activité chlorophyllienne réduite	(8)	0,6	0,3	0,3	-0,3	-0,2
Franges urbaines Densité très faible	(9)	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1
Pavillonnaire peu dense	(10)	-0,5	0,1	-0,1	0,0	0,0
Evolutif minéral - dominante sombre - dominante clair	(11a) (11b)	-0,9 -0,9	-0,3 -0,2	0,3 -0,2	0,0 0,1	0,0 -0,3
Entrepôts, végétation - toitures claires - toitures foncées	(12a) (12b)	0,5 0,1	-0,5 -0,4	-0,5 -0,1	0,1 0,1	0,3 0,4
Bâtiments seuls Toits réfléchants	(13)	-0,8	-0,6	0,8	-0,1	0,3

Tableau A.3.6.5 - Les nomenclatures des typologies -

N°	Caza/Godard	Enquêteurs Photo-Morpho	CAH Barbary	CAH Télédétection
1	Zone industrielle	Standing H ^t	Non bâti	Vieux centre colonial
2	Végétation	" Moyen-H ^t	Péri-urbain	Centre ville dom tuile
3	Quartier affaires	" Moyen	Populaire R d C	Centre ville dom béton
4	Non urbain 84	" Moyen-Bas	Populaire étages	Pavillonnaire dense
5	Z urbaine diverses	" Bas	Vieux centre	Petits batiments toit clair
6	Standing H ^t	" Très bas	Habitat standing	Grands bâtiments toits clairs
7	Stg H ^t -Moyen	Industriel	Industries	Dominante agricole
8	Stg Moyen	Scolaire	Immeubles	Champs chlorophylle réduite
9	Vivienda Moyen	Commercial	Viviendas	Franges urbaines
10	Vivienda Pop	Equit sociaux		Pavillonnaire peu dense
11	Standg H ^t -Popu	Végétation		Tissu évolutif minéral
12	Standg Moy-Popu	Agricole		Entrepôts et végétation
13	Habitat pop CO ¹	Bureaux		Batiments seuls toits clairs
14	Habitat populaire NC ²			
15	Taudification verticale et horizontale			

¹ CO : Consolidé

² NC : Non Consolidé

Tableau A.3.6.8 - Croisement Cazamajor-Godard/C.A.H télédétection -

CG	Tld	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1										1	1	3	3	
2														
3														
4						1		5	3	6	1	1	1	
5			1								2			
6	1									1	2			
7			2					1			3			
8		6	3			1		1			3	5		1
9		1	5			1		1			1	2		1
10			1			1					1			
11														
12			1								1	1		
13		2	2		1	1		4	2	17	9	5	2	1
14														
15		5	2	1	1	2	1	1		2	1	5		

Tableau A.3.6.9 - Croisement CAH O.BARBARY/C.A.H télédétection -

Tld Morpho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1													
2							10	3	19	4	2	2	
3		2	1	2	1				2	4	2		
4		1	2		2		1		3	3	3	1	
5	7	7	1			1			1	2	4		
6	1	1	4		1		1	1	1	5	5		1
7			1			1	1	1		3	3	5	2
8		1	1							4			
9			3		2				1				

**ANNEXE A.3.8 - ENQUETE
DÉMOGRAPHIE/MIGRATIONS -**

ANNEXE A.3.8 - ENQUETE DÉMOGRAPHIE/MIGRATION -

Outre les objectifs méthodologiques maintenant clairement identifiés, F. DUREAU définit dans une communication présentée lors des Journées Démographiques de l'ORSTOM, les objectifs thématiques de l'enquête démographie/migrations effectuée sur le plan de sondage défini à partir de l'image satellite¹. "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."²

Les précisions qui suivent concernent la mise en oeuvre de cette enquête et sont extraites de la même communication.

. Le questionnaire.

"A chaque logement de l'échantillon correspond un questionnaire, reproduit intégralement en annexe de cette communication.

La première fiche du questionnaire a pour objet de saisir les *caractéristiques démographiques et socio-économiques* de chacune des personnes vivant dans le logement enquêté; en dehors de modifications mineures, elle correspond à la fiche d'enquête utilisée lors d'une première enquête démographique auprès de 1100 ménages quiténiens (enquête Bâti/population, premier passage en avril 1987, deuxième passage auprès du même échantillon d'îlots en novembre 1987).

La **fiche 2** permet d'analyser les statuts d'occupation du logement et les modes d'accès à la propriété, éléments essentiels pour appréhender les *modes d'insertion des migrants en milieu urbain*.

Les **fiches 3 et 4** sont centrées sur la question des *systèmes résidentiels*. Si la fiche 4 correspond à un recueil classique de *biographies migratoires et professionnelles* avec un seuil de durée de résidence fixé à 6 mois, la fiche 3 vise à cerner la pratique des chefs de ménage en matière de systèmes résidentiels et d'activités, et à préciser l'efficiences des concepts de "*densité de résidence*" et "*densité d'activité*" : cette fiche 3 correspond au recueil *intégral*, sur une période de 2 ans, de tous les lieux de séjour et activités, sans critère de durée minimum. Doivent donc y figurer tous les lieux de séjour, y compris les voyages, et toutes les activités, même exercées durant un laps de temps très court.

Enfin, par la **fiche 5** relative aux caractéristiques d'activité et de résidence des membres de la famille ne vivant pas dans le ménage enquêté, nous tentons de *replacer les pratiques résidentielles et professionnelles des chefs de ménage enquêtés dans le groupe social, éventuellement spatialement éclaté, dans lequel elles s'inscrivent..*"

. La sélection de l'échantillon à Quito.

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

Ce sont les trois superviseurs chargés de l'enquête qui ont procédé au recensement des logements : pour chaque îlot de l'échantillon, ils ont réalisé un schéma du pâté

¹ Les Figures A.3.8.1 et A.3.8.2 illustrant le processus de sélection des unités primaires et secondaires sont issues de la thèse de O. BARBARY, Op cité.

²F. DUREAU, 1988 - A propos de l'analyse des systèmes résidentiels, Présentation de l'enquête Migration réalisée à Quito (EQUATEUR) en décembre 1987, Communication aux Journées Démographiques de l'ORSTOM, Paris, 17 P.

de maisons (**Figure A.3.8.2**) sur lequel figuraient les renseignements nécessaires à l'identification de l'îlot par l'enquêteur, le dessin de l'ensemble des bâtiments de l'îlot, le nombre de logements occupés dans chacun des bâtiments, ainsi que la liste des logements constituant l'échantillon à enquêter. Exception faite des pâtés de maisons comptant jusqu'à dix logements, pour lesquels l'enquête a été exhaustive, une règle précise de sélection systématique des logements à enquêter a été pratiquée par tous les superviseurs.

La collecte des données sur le terrain.

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; rappelons que les superviseurs avaient à charge, outre l'organisation et le contrôle du travail des enquêteurs, le recensement des logements occupés dans les îlots de l'échantillon."

Concernant la mise en oeuvre pratique de cette enquête, F. DUREAU relève deux points essentiels, **le contexte social plutôt favorable qui a donc entraîné peu de non réponse**, ainsi que **l'impossibilité d'enquêter dans le nord-ouest de la ville** en particulier dans deux coopératives en raison d'un conflit qui les oppose. Les résultats de cette enquête ne comprennent donc pas ces deux coopératives.

L'exploitation des données recueillies fait l'objet d'un paragraphe dans la même communication. Elle est aussi décrite de façon plus détaillée dans la thèse de O. BARBARY.

. Les résultats de l'enquête.

Tableau A.3.8.1 - Estimations des caractères démographiques à Quito et leur précision sur l'ensemble de la base -

Caractères	-1- POPTOT	-2- POPFEM	-3- POPHOM	-4- POPMOY	-5- AGEMOY
Estimation	1 120 991	572 216	548 775	4,535	43,96
Coeff. de variation	6,73 %	6,85 %	6,70 %	1,10 %	1,02 %
Interv. de conf. à 95%	+/- 150 885	+/- 78 394	+/- 73 536	+/- 0,10	+/- 0,90
Caractères	-6- PCMEN1	-7- PCMEN7	-8- PCMENP	-9- SEXRAT	-10- PCPM5A
Estimation	4,70	9,84	46,01	0,959	9,36
Coeff. de variation	11,96 %	6,80 %	2,49 %	1,50 %	2,86 %
Interv. de conf. à 95%	+/- 1,12	+/- 1,34	+/- 2,29	+/- 0,029	+/- 0,535
Caractères	-11- PCPP60	-12- PCPNEQ	-13- PCPNEE	-14- PCP6NS	-15- PCP6ES
Estimation	5,77	63,22	1,94	2,64	18,26
Coeff. de variation	5,40 %	1,38 %	14,69 %	7,94 %	3,68 %
Interv. de conf. à 95%	+/- 0,62	+/- 1,74	+/- 0,57	+/- 0,42	+/- 1,34

Le **Tableau A.3.8.1** qui précède est extrait de la thèse de O. BARBARY. Il présente les estimations démographiques obtenues après extrapolation ainsi que leur intervalle de confiance à 95%.

Figure A.3.8.1 - Illustration du processus de sélection dans les différentes strates sur une partie de la base de sondage (1) -

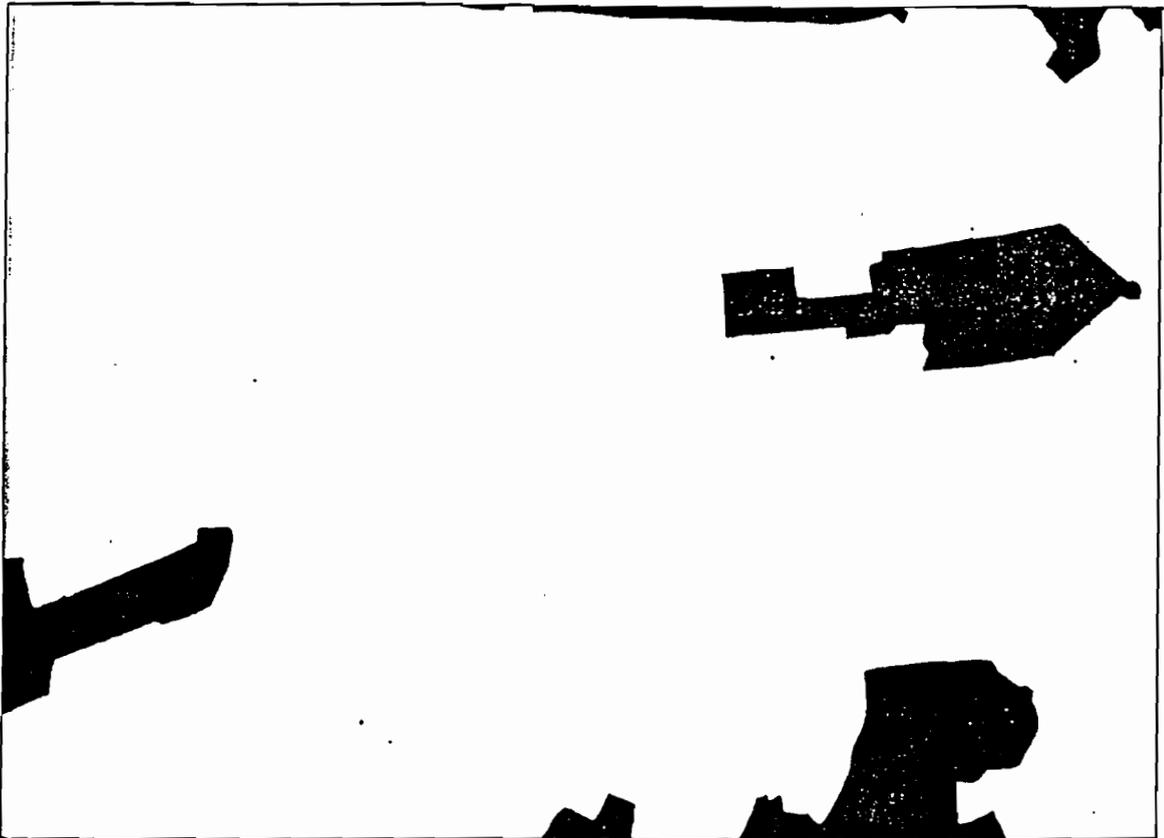
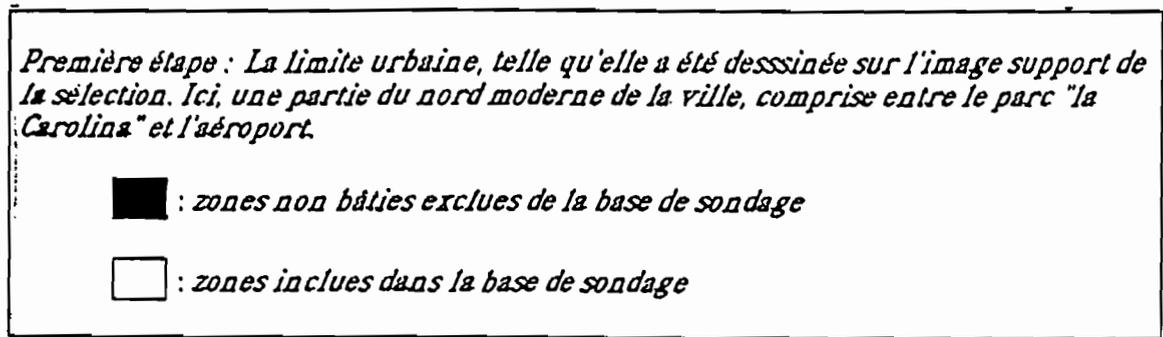


Figure A.3.8.1 - Illustration du processus de sélection dans les différentes strates sur une partie de la base de sondage (2) -

Deuxième étape : Stratification de la base de sondage sur le critère de la densité du bâti :

 : zones non bâties exclues de la base de sondage

1. Densité très peu dense
2. Densité peu dense
3. Densité moyenne
4. Densité forte
5. Densité très forte.



Figure A.3.8.1 - Illustration du processus de sélection dans les différentes strates sur une partie de la base de sondage (3) -

Troisième étape : Dans chaque strate, la grille superposée à l'image permet la sélection des unités primaires de l'échantillon. L'allocation aux différentes strates est gérée en faisant varier la taille de la maille de la grille pour sélectionner, dans chaque strate, le nombre d'îlots voulu.
Ici, les grilles plaquées sur les strates 3 et 4.

■ : zones non bâties exclues de la base de sondage

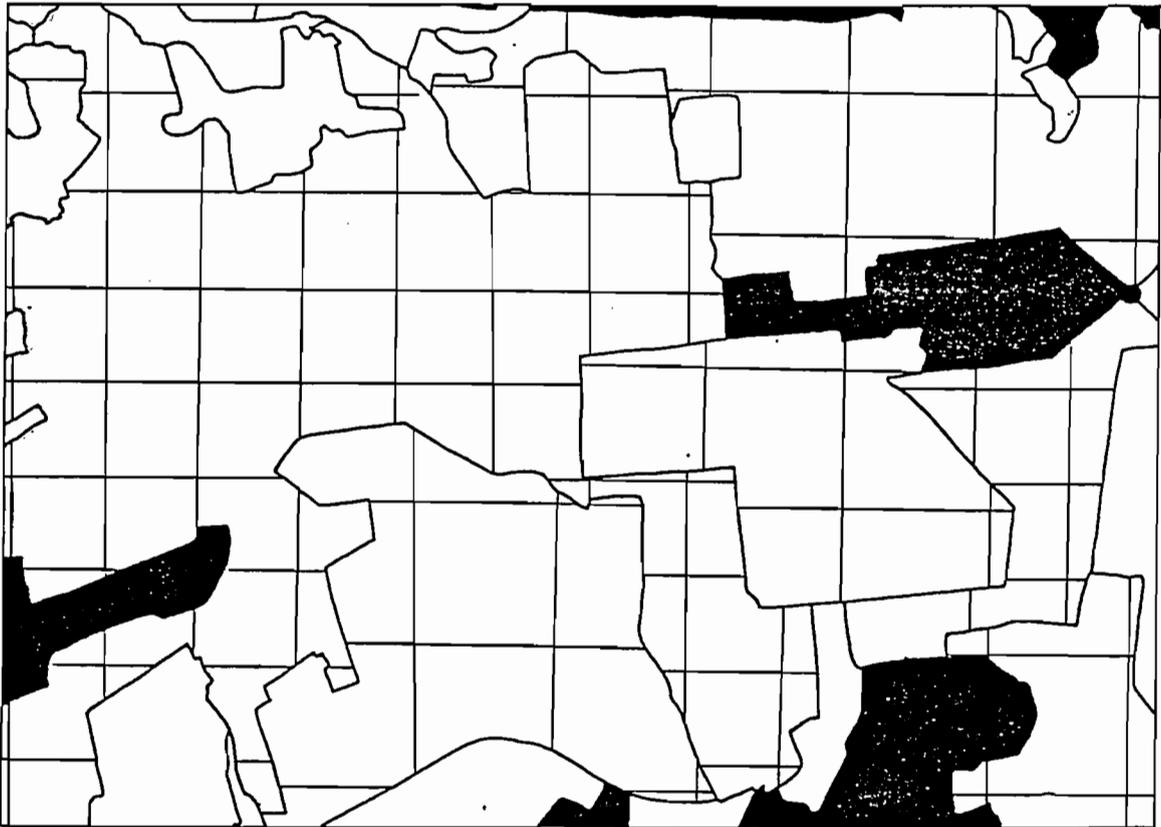


Figure A.3.8.1 - Illustration du processus de sélection dans les différentes strates sur une partie de la base de sondage (4) -

Quatrième étape : Les ilots à enquêter sont identifiés sous chaque point de la grille. Ici, les ilots sélectionnés dans les strates 3 et 4.

■ : zones non bâties exclues de la base de sondage

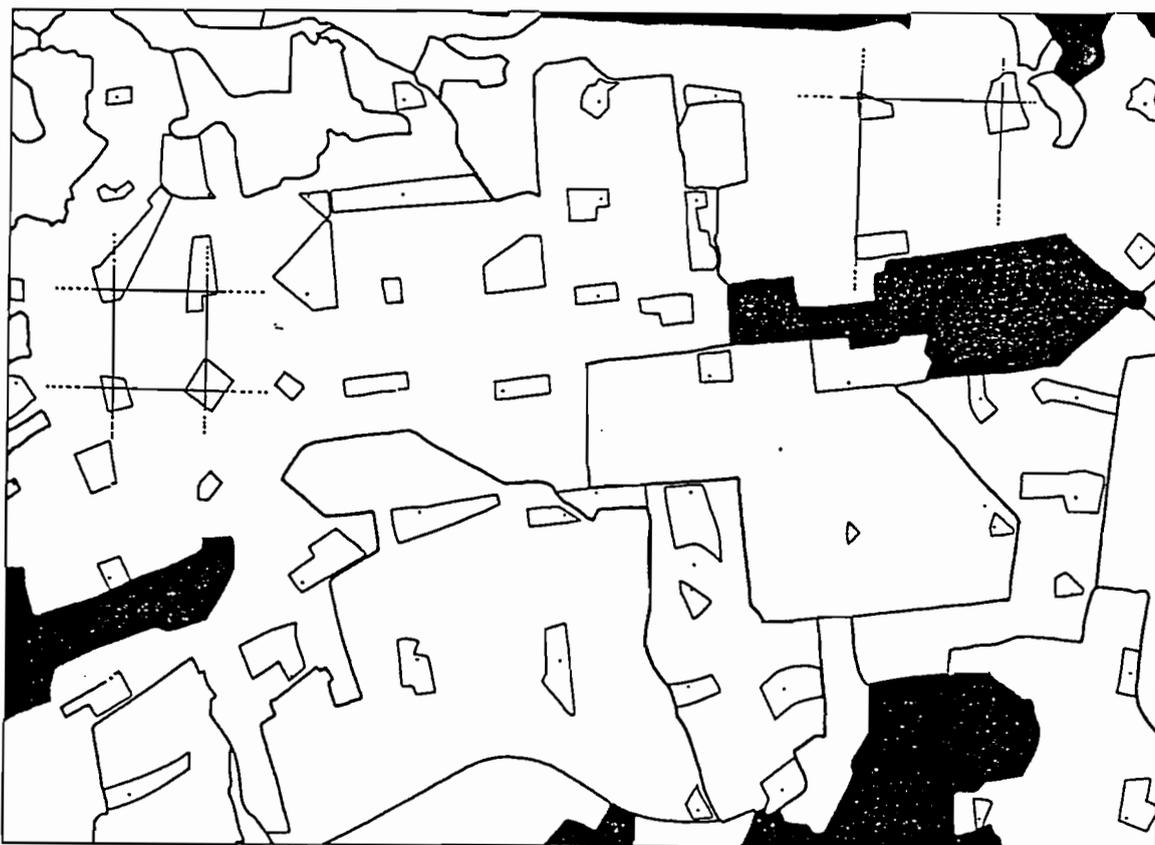
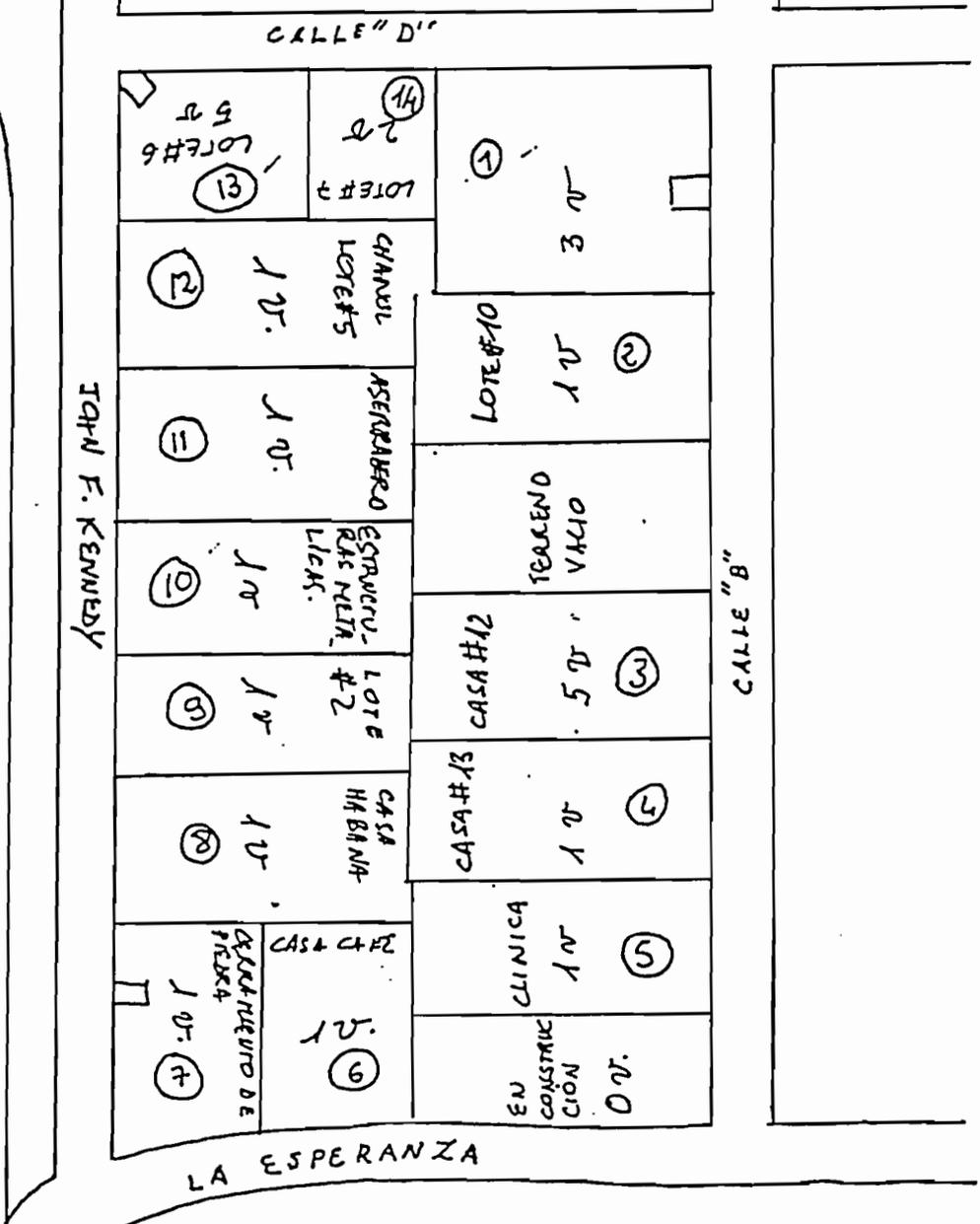


Figure A.3.8.2 - Schéma du pâté de maisons établi à l'issue du recensement des ménages, servant pour la sélection des ménages à enquêter -

Nombre SUPERVISOR <u>HENRY ALBAN</u> Nombre ENCUESTADOR <u>JUAN PUENTE</u>	N° Manzana <u>253</u> Número de viviendas: TOTAL <u>125</u>
---	--

ESQUEMA DE LA MANZANA



MUESTRA DE VIVIENDAS

Lista de las viviendas o método de selección 1 vivienda en cada de los edificios.
 Siguiendo 1-4-6-8-10-12-14-13-
Viviendas en el edificio 3.
 Método de selección de la viviendas de sustitución

Recolección /Codificación

- Encuesta
- Verif. encuesta (superv)
- Verif. encuesta (Orstom)
- Correcciones question.
- Codificación
- Verif. codificación

Nom de l'enquêteur :		Nom de pièces util. pour dormir <input type="checkbox"/>	I . VARIABLES SUR CHACUNE DES PERSONNES VIVANT DANS LE LOGEMENT			
N° Ilot <input type="text"/>	Type de logement :	Conditions d'ocup. du logement:				
N° Bâtiment <input type="text"/>	Logement individuel <input type="checkbox"/> → Maison <input type="checkbox"/> Appartement <input type="checkbox"/> Chambre <input type="checkbox"/>	Inhabitable <input type="checkbox"/> Habit. non occupé <input type="checkbox"/> Habit. oc. non enq <input type="checkbox"/> Habit oc. enquêté <input type="checkbox"/>				
N° Logement <input type="text"/>	Logement collectif <input type="checkbox"/> → Type : Nombre de pers. <input type="text"/>					

RUBRIQUES	N° de personne <input type="text"/>					
Nom et prénom						
Statut de résidence	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>	Résid. présent <input type="checkbox"/> Résid. absent <input type="checkbox"/> Non rés. présent <input type="checkbox"/>
Quel lien de parenté (ou autre relation) avez-vous avec le chef de ménage ?	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Sexe	Homme ☐ Femme ☐	Homme ☐ Femme ☐	Homme ☐ Femme ☐	Homme ☐ Femme ☐	Homme ☐ Femme ☐	Homme <input type="checkbox"/> Femme <input type="checkbox"/>
Quelle est votre situation matrimoniale ?	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>	Célib. <input type="checkbox"/> Divorcé <input type="checkbox"/> Viv.ma <input type="checkbox"/> Veuf <input type="checkbox"/> Marié <input type="checkbox"/> Séparé <input type="checkbox"/>
Quelle est votre date de naissance, ou quel âge avez-vous ?	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)
Où êtes-vous né ? : Pays Province Paroisse Nom de la localité	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Depuis quelle date vivez-vous dans ce logement, ou depuis combien d'années ?	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)
Où viviez-vous avant de résider dans ce logement ?	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>	Autre log. dans Quito <input type="checkbox"/> Adresse (quartier, rue) Hors de Quito <input type="checkbox"/>
Depuis quelle date vivez-vous à Quito, ou depuis combien d'années ?	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)	<input type="text"/> jour <input type="text"/> mois <input type="text"/> année <input type="text"/> années <input type="text"/> mois (si Jan)

127

2. VARIABLES SUR LES CONDITIONS D'OCCUPATION DU LOGEMENT

A quel titre occupez-vous ce logement ?

- Le chef de ménage est propriétaire
- Une autre personne vivant dans le logement est propriétaire → Numéro de la personne _____
- Locataire → Montant du loyer mensuel (sucres) _____
- Anticresis → Montant mensuel (sucres) _____
Montant de l'anticresis-même (sucres) _____
- Occupation de faveur (gratuit ; prêt d'un ami, parent ou collègue)
- Pour service → Type de service :
Montant du loyer mensuel (sucres) _____
- Autre type d'occupation → Préciser :
- Refus de réponse
- Date et coût de la construction ou de l'achat du logement :
- DON ou HERITAGE _____
Date
- ACHAT _____
Date Coût (sucres)
- CONSTRUCTION :
achat du terrain _____
Date Coût (sucres)
construc. du bâtiment _____
Date Coût (sucres)

Si le propriétaire ne vit pas dans le logement :
de quel type de propriétaire s'agit-il ?

- Personne physique ne vivant pas dans le logement → Lien de parenté du chef de ménage avec le propriétaire :
- Société privée
- Organisme semi-public
- Organisme public
- Organisme municipal
- Organisme diplomatique
- Organisation syndicale
- Coopérative
- Organisme religieux
- Autre type de propriétaire
- Refus de réponse
- Aucun
- Lien de parenté :
- Refus de réponse

3. LIEUX DE RESIDENCE ET ACTIVITES DU CHEF DE MENAGE DURANT LES DEUX DERNIERES ANNEES

Calendrier	Date du changem. de résid.	LIEU DE RESIDENCE (Quelque soit la durée) <i>Pays, province, paroisse, localité, adresse</i>	Date du changem. d'activité	ACTIVITE PRINCIPALE <i>Profession, branche d'activité, statut professionnel, revenus mensuels</i>	RAISON DU CHANGEMENT DE RESIDENCE OU D'ACTIVITE
Décem. 87					
Novem. 87					
Octobre 87					
Septem. 87					
Août 87					
Juillet 87					
Juin 87					
Mai 87					
Avril 87					
Mars 87					
Février 87					
Janvier 87					
Décem. 86					
Novem. 86					
Octobre 86					
Septem. 86					
Août 86					
Juillet 86					
Juin 86					
Mai 86					
Avril 86					
Mars 86					
Février 86					
Janvier 86					

4. BIOGRAPHIE MIGRATOIRE ET PROFESSIONNELLE DU CHEF DE MENAGE DEPUIS SA NAISSANCE

Age (ans)	Date (jo., mo., an.)	LIEU DE RESIDENCE (> 6 mois) Pays, province, paroisse, localité ou localité, quartier et adresse, s'il s'agit de Quito	ACTIVITE Profession, branche d'activité, statut professionnel, revenus mensuels (suces)	RAISON DU CHANGEMENT DE RESIDENCE OU D'ACTIVITE																																								
<i>Naiss.</i> d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											
d	<table border="1"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>																																<i>Prof</i> <i>Eran</i> <i>Statut</i> <i>Revenus</i> <table border="1"><tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr></table>											

5 - VARIABLES SUR LES PARENTS DU CHEF DE MENAGE ET DE SON CONJOINT NE VIVANT PAS DANS LE LOGEMENT ENQUETE

Liens de parenté	Nom et prénom	Sexe <i>M=Homme F= Femme</i>	Age ou année de naissance	Si décédé(e) année du décès	Lieu de résidence actuel <i>Pays, province, paroisse, localité ou localité, quartier et adresse, s'il s'agit de Outo</i>	Activité principale actuelle	Relation économique act. avec ce parent <i>(Voir notes)</i>
PERE du chef de ménage		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
MERE du chef de ménage		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
CONJOINT du chef de ménage		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
FILS du conjoint du chef de ménage		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
DAES du conjoint du chef de ménage		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
FILS du chef de ménage du conjoint ①		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
②		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
③		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
④		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑤		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑥		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑦		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑧		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑨		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑩		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑪		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑫		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
⑬		<input type="checkbox"/>	<input type="text"/> ou <input type="text"/> <i>age année nai.</i>	<input type="text"/>		Prof..... Bran..... Statut.....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

1 - Le chef de ménage ne reçoit rien et n'envoie rien à ce parent

2 - Le chef de ménage reçoit une aide financière de ce parent

3 - Le chef de ménage reçoit une aide en nature (ex: produits agricoles) de ce parent

4 - Le chef de ménage héberge un enfant de ce parent

5 - Ce parent reçoit une aide financière du chef de ménage

6 - Ce parent reçoit une aide en nature du chef de ménage

7 - Ce parent héberge un fils du chef de ménage

8 - Refus de réponse

ANNEXE A.3.9 - ELEMENTS DE COUTS -

**A.3.9) RÉCAPITULATIF DES COÛTS RELATIFS AU DÉVELOPPEMENT DU
VOLET TÉLÉDÉTECTION DE LA MÉTHODE¹.
ÉLÉMENTS DE CALCUL DES COÛTS D'APPLICATION.**

**Tableau A.3.9.1 - Coût, durée, matériel et logiciel indispensables pour la réalisation du volet téléédé
de l'opération démographie -**

Phase	Matériel		Matériaux		Personnel	
	Type	Type	Coût (Frcs)	Type	Durée	Coût
Enquête morphologie - Manuel et 4 fiches - Sélection - Préparation des plans - Enquête - Photos terrain - Repérages îlots image - Codification et saisie	MacIntosh+	10 Exs et 199 îlots	600	Chercheur	2	7 98 1 60
	Pantographe	Plan 1/10 000	400	Chercheur	1	
	App Photo	Plans 1/500	300	Dessinateur	9	
	SUN	Diapositives	600	Enquêteurs	50*2	
	IBM PC	Tirages Ph 1/15 000 ²	500	Super+Cherc	10+10	
		Fiches	240	Chercheur	11	
Mesure de la surface des îlots	SUN Clinomètre Planimètre ³	Plans - fiches	120	Enq+Cherch	2	100 1 50
			4 000	Enq+ Cherc	32+6	
		Plan 1/1 000	6 000	Chercheur	5	
Détermination de la limite urbaine	SUN	CCT Spot	600	Chercheur	1/2	
	SUN	Tirage Ph 1/ 30 000 ⁴		Idem	9	
	SUN			Idem	3/2	
Classification suivant la densité du bâti	SUN-IBM PC	CCT Spot-Fichier îlot		Chercheur	2	
	SUN	CCT Spot		Idem	1	
	IBM-PC	Fichier îlot		Idem	1	
Stratification		Tirage Ph 1/15 000	500	Chercheur	2*17 ⁵	

¹ Ce paragraphe reprend et complète les informations issues de la note de F.DUREAU "Eléments de calcul des coûts d'enquête à Quito", Août 1988, Quito, 13 pp, dans laquelle l'auteur ventile suivant différents postes, les dépenses totales entraînées par la réalisation de l'opération.

² Tirage sur papier du panchromatique noir et blanc à échelle exacte 1/15 000

³ pour un planimètre manuel compter 1 500 Frcs.

⁴ Tirage sur papier de la composition colorée SPOT à l'échelle exacte 1/30 000

⁵ Ce travail de 17 jours pour 2 chercheurs se décompose comme suit :

Tracé de la limite urbaine sur image SPOT 1/ 30 000 : 2 jours , 2 personnes

Tracé de la stratification en 6 niveaux de densité du bâti sur image SPOT 1/30 000 : 4 jours, 2 personnes

Mesure de la superficie des strates : 2 jours, 2 personnes

Report de la stratification sur image SPOT 1/15 000, dessin des grilles de tirage, tirage des points d'enquête et dessin des îlots de l'échantillon : 9 jours, 2 personnes.

Dans le **Tableau A.3.9.1** qui précède, nous avons ventilé les différents coûts en matériel, temps et personnel qui nous ont été nécessaires pour mener à bien les différentes étapes du travail proprement télédétection dans le cadre du programme de recherche.

Précisions importantes :

Ne sont pas exposés, les durées inhérentes à la mise au point de la méthode et au développement de programmes informatiques de traitement d'image appropriés; de même, les salaires des chercheurs ne sont pas comptabilisés.

Précisions concernant les coûts

A titre d'indication, nous présentons ici les coûts de quelques équipements informatiques ou matériaux susceptibles d'être utilisés dans le cadre d'une utilisation semblable.

*** Coût de l'équipement informatique**

- Station SUN 3/110C avec unité de disque dur 140 Mo	200 000 Frcs
- Traceur Benson à rouleau	90 000 Frcs
- Recopie d'écran	100 000 Frcs
- IBM AT disque dur 20 Mo avec imprimante	15 000 Frcs
- MacIntosh SE	25 000 Frcs

*** Coût des logiciels**

- statistiques : STATITCF	500 Frcs
- gestion de fichiers : DBASE III+	6 700 Frcs
- traitement d'image : PLANETES développé par le L.I.A de l'ORSTOM	Gratuit

*** Images satellite**

Bandes magnétiques 6250 BPI

* LANDSAT Thematic Mapper 7 canaux	
- scène entière (180*180 Km) au catalogue	19 800 Frcs
- quart de scène (90*90 Km) au catalogue	9 900 Frcs
- supplément pour programmation	9 600 Frcs
- supplément pour couvert nuageux maximum	1 650 Frcs

* SPOT HRV (60*60 Km) niveau 1B	
- scène panchromatique ou les 3 canaux multispectraux au catalogue	9 500 Frcs
- découpage de deux scènes sur une même trace	15 000 Frcs
- supplément pour programmation	2 000 Frcs

Films

- Landsat Thematic Mapper, échelle 1/1 000 000 (7 canaux)	6 720 Frcs
- Spot HRV, échelle 1/400 00 canal panchromatique	5 000 Frcs
- Spot HRV, échelle 1/400 00 XS1, XS2, XS3	4 600 Frcs

Récapitulation

Selon les évaluations de F.DUREAU et sur la base des coûts d'une opération telle que celle qui s'est déroulée à Quito, l'application de la méthode dans une ville de 1 million d'habitants nécessitant une enquête touchant 400 îlots et 3000 ménages se décomposerait comme suit¹ :

Équipement informatique (IBM PC) et logiciels (statistiques)	38 600 Frs
Achat de 1 scènes SPOT niveau 1B (y compris traitement d'image)	25 000 Frs
Enquête morphologie complète (avec codification et saisie)	14 950 Frs
Collecte démographique (avec codification et saisie)	49 950 Frs

Coût total **128 500 Frs**

Cette estimation n'inclut pas le salaire du personnel qualifié (évalué à 7 mois).

¹Cette estimation est très dépendante des équipements informatiques et des capacités de traitement d'image existant sur le site.

ANNEXE - BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE -

PUBLICATIONS ET NOTES DE TRAVAIL DE L'EQUIPE ORSTOM.

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

Articles.

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

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

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

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

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

Communications à des colloques.

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.

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

DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1988 - Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (Equateur). Communication soumise au colloque ISTED, Lyon, 1988.

- DUREAU F., 1988 - A propos de l'analyse des systèmes résidentiels. A propos de l'enquête Migrations réalisée à Quito (EQUATEUR) en décembre 1987. Communication présentée au colloque Migration, changements sociaux et développement, ORSTOM, Paris 20-22 septembre 1988, 17 P.
- MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987 - El uso de la teledeteccion para la observacion de las poblaciones urbanas. Investigacion en curso en Quito (ECUADOR). Communication au II Simposio Latinoamericano sobre sensores remotos, Columbia, Bogota, 16-20 Novembre 1987, 34 P.
- MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987 - L'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines. Une recherche en cours à Quito, (EQUATEUR). Communication au colloque SPOT, Paris, 23-27 Novembre 1987, 9 P.
- MICHEL A., LORTIC B., BARBARY O., DUREAU F., SOURIS M., 1988 - Segmentation et classification sur 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.
- 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.

Littérature grise non publiée

- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1986 - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport intermédiaire - Avril 1986. Paris, 190 P.
- Equipe ORSTOM (UR 406, ATOB, Unité d'infographie), 1987 - Intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique : suivi de la morphologie et de la démographie d'une ville. Rapport final - Août 1987. Paris, 53 P. +538 P.
- BARBARY O., 1986 - Apport d'une stratification morphologique des districts INSEE de recensement dans l'estimation par sondage des effectifs de population à Marseille. Quito, 47 P.
- BARBARY O., 1988 - Elaboration de plans de sondage pour l'estimation de données spatio-temporelles, en prenant en compte les informations fournies par la télédétection. Application aux données démographiques en milieu urbain des pays en développement Thèse de mathématiques appliquées aux sciences de l'homme sous la direction de M. BARBUT, EHESS, Paris, en cours.
- 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.
- DUREAU F., 1986 - Marseille : tirage de l'échantillon de travail. Quito, 9 P.

- DUREAU F. et MICHEL A., 1986 - Quito : enquête morphologie urbaine. Instructions aux enquêteurs (2 versions : français et espagnol). Quito, 19 P.
- DUREAU F., 1987 - Quito : enquête bâti/population. Instructions aux enquêteurs (2 versions : français et espagnol). Quito, 27 P.
- DUREAU F., 1987 - Quito : Encuesta demografia/migraciones. Instrucciones para los encuestadores. Quito, 25 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, 98 P.
- MICHEL A., 1986 et version actualisée 1987 - Le point sur la télédétection urbaine en 1986 à travers la bibliographie française et anglo-saxonne sur le sujet. Recueil des fiches de dépouillement des articles et ouvrages, ORSTOM, 49 P.
- MICHEL A., 1987 - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution : étude statistique du descripteur "densité du bâti", présentation des classifications. (Image TM Marseille 1983). Paris, 99 P.
- MICHEL A., 1987 - Influence des facteurs météorologiques sur la probabilité d'obtention d'une image satellite SPOT ou Thematic Mapper. Etude sur le site de Quito. Quito 14 P.

Bibliographie thématique.***Bibliographie télédétection, ouvrages généraux.***

American Society of Photogrammetry, 1982 - Manual of remote sensing, Sheridan Press, Fall Church, 2 Vol.

CNES, SPOT Image, 1986 - Guide des utilisateurs de données SPOT, 2 Vol, Manuel de référence, Guide pratique.

PRATT W.K., 1978 - Digital image processing, John Wiley Ed, New-York, 750 P.

SCHOWENGERDT R.A., 1983 - Techniques for image processing and classification in remote sensing, Academic Press, New-York, 250 P.

SWAIM P.H., DAVIES S.M., 1978 - The quantitative approach, Mac Graw Hill, New-York.

TOWNSHEND S.R.G., 1981 - Terrain analysis and remote sensed images, Ed G.Allen & Unwin, London, 232 P.

THOMAS I.L., BENNING U.M., CHING N.P., 1987 - Classification of remotely sensed images, Ed Adam Hily, Bristol.

Liste des articles analysés, essentiellement consacrés à la télédétection en milieu urbain

Une fiche de dépouillement standard (**Figure A.1.2.1**) a été utilisée pour analyser de façon homogène tous les articles.

ANUTA P.E., BARTOLUCCI M., DEAN M.E., LOZANO D.F., MALARET E., McGLEN C.D., VALDES J.A., VALENZUELLA C.R., 1984 - Landsat 4 MSS and Thematic Mapper data quality and information content, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol 22, N°3.

BALLUT A., LECUP J., LENCO M., 1985 - Traitement en classification supervisée de l'occupation de l'espace de l'image Ile de France du 23/3/1973 sur station précablée active, Utilisation d'image satellite pour décrire l'état et le suivi de l'occupation du sol et de la végétation en Ile de France, IAURIF, pp 22 - 52.

BALLUT A., 1979 - Les limites de la télédétection en milieu urbain, Thèse de 3^{ième} cycle, EHESS, Paris.

BARDINET C., 1982 - Morphologie urbaine et télédétection : les cas d'Annaba (Algérie) et de N'Djaména (Tchad) par Landsat, Journées de télédétection en milieu urbain, 13 Mai 1982, CNRS IGN, Paris, pp 100-120.

BOASSON E., HOWARTH P.J., 1983 - Landsat digital enhancement for change detection in urban environment, Remote sensing of environment, N°13, pp 149-160.

- BOUILLOT J., CAMPAGNE P., FLOURIOT J., LAPORTE J.M., SOUDOPLATOFF S., 1984 - Recherches méthodologiques sur l'utilisation de la télédétection en aménagement urbain, Simulation SPOT Niamey.
- BOQUET E., 1987 - Exemples d'utilisation d'images satellite comme source d'informations géographiques, Actes du Forum FI3G, Juin 1987, pp 539-551.
- BOZET M., DOTU M., INSTALLE M., WILMET J., 1980 - Filtrage spatial des données Landsat en vue de la cartographie urbaine, Annales des Mines, Avril, Mai 1980.
- BOZET M., DOTU M., INSTALLE M., WILMET J., 1978 - Méthode de classification et d'interprétation des données du satellite Landsat pour l'étude des structures urbaines en Europe Occidentale, Bulletin trimestriel de la Société Belge de Photogrammétrie et de télédétection, N°131-132, pp 3-16.
- CARTER P., GARDNER W.G., JACKSON M.J., SMITH T.H., 1980 - Urban land mapping from remotely sensed data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 46, N°8, pp 1041-1050.
- CNRS, 1982. - Débats des journées télédétection en milieu urbain (6-7 mai 1982). CERG, Paris, 141 P.
- CUSHNIE J.L., 1984 - Improving the accuracy of computer classification of Thematic Mapper data, Satellite Remote Sensing, Proceeding of the 10th anniversary, International conference held in Reading, UK, pp 329-339.
- COLWELL R.N., POULTON C.E., 1985 - SPOT simulation for urban monitoring : a comparison with Landsat 4 TM and MSS imagery and with high altitude color infra red photography, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N° 8, pp 1093-1101.
- DEANGELIS R.N., MILAZZO V.A., 1984 - Application of simulated SPOT data to mapping land cover patterns and changes in urban fringe environments, SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 177-186.
- DE KEERSMAECKER M.L., 1987 - Etude par télédétection des quartiers résidentiels en milieu urbain : la détermination de leurs caractéristiques socio-économiques, Actes du colloque FI3G, Juin 1987, pp 517-528.
- DINSTEIN I.H., HARALICK R.M., SHANMUGAM K., 1973 - Textural features for image classification, IEEE Transaction on Systems, Man and cybernetic, Vol 3, N°6, pp 610-621.
- DOLAN G.M., MARTIN S.R., WARNICK L.J., 1984 - Comparative evaluation of simulated SPOT, Landsat TM and NHAP CIR data for urban land cover and impervious surface identification, SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 148-156.
- DURAND LASSERVE A., RUANGSIRI P., CHANLIKIT D., 1982 - Urban settlement and delineation of land use categories in Bangkok metropolitan area, Land cover inventory and land use changes using Landsat data, Bangkok, 13 P.

- FERIER D., LOODTS J., 1979 - Analyse multispectrale de Bruxelles, Bulletin trimestriel de la Société Belge de Photogrammétrie et de Télédétection, N°133-134, pp 7-41.
- FORSTER B.C., 1980 - Urban control for Landsat data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 46, N°4, pp 539-545.
- FORSTER B.C., 1985 - Principle and rotated component analysis of urban surface reflectance, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N°4, pp 475-477.
- IGN, 1984. - Recherches méthodologiques sur l'utilisation de la télédétection spatiale en aménagement urbain. IGN, Paris, 19 P.
- KENNARD R.E., TOLL D.L., 1984 - Investigation of SPOT spectral and spatial characteristics for discrimination land use and land cover in Prince Georges'County, Maryland, SPOT Simulation Application handbook, Proceedings of the 1984 SPOT Symposium, May 20-23, Scottsdale, Arizona, pp 165-170.
- FUEKI T., HONG J. K., SHIBANO K., YANG L.S., 1985 - Analysis of urban spatial structure of Marseille by Landsat Thematic Mapper.
- HAACK B.N., 1984 - Multisensor data analysis of urban environment, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 50, N° 10, pp 1471-1477.
- HORD R.M., BROONER W., 1976 - Land use map accuracy criteria, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 42, N° 5, pp 671-677.
- HUSSON A., OLIVA P., 1982 - Classification supervisée des ensembles urbains et péri-urbains de la région d'Aix en Provence, Journées de télédétection en milieu urbain, 13 Mai 1982, CNRS IGN, Paris, pp 28-42.
- IISAKA J., HEGEDUS E., 1982 - Population estimation from Landsat imagery, Remote Sensing of Environment, pp 259-272.
- IOKA M., KODA M., 1986 - Performance of Landsat 5 TM data in land cover classification, International Journal of Remote Sensing, pp 1715-1728.
- JENSEN J.R., 1978 - Spectral and textural features to classify elusive land cover at urban fringe, The Professionnal Geographer, Vol 31, N°4, pp 401-409.
- LAPORTE J.M., 1983 - Etude de la texture sur des simulations d'image du satellite de télédétection SPOT, Thèse de 3^{ième} cycle, Paris VII.
- LIMA ROSARIO DA TRIDALE, F., 1985 - Etude par télédétection de l'organisation de l'espace dans la commune de Carbonne, DESS, Paris VI, 37 P.
- LO C.P., 1985 - Some problems of computer assisted mapping of land use from Landsat data : the Hong Kong case.
- MADEC V., PEBAYLE J., 1984 - Intérêt du futur satellite SPOT pour l'étude du milieu urbain, IAURIF, Rapport de stage.
- NGUYEN P.T., 1984 - La simulation SPOT pour l'étude du milieu urbain.

- PEBAYLE J., 1986 - L'intérêt en géographie des données du satellite SPOT, Thèse de Doctorat 3^{ième} cycle, Université de Paris I, 232 P.
- PEDRON C., 1987 - Bilan intermédiaire des travaux conduits dans le cadre de la convention d'étude LERTS/CNES - Mairie de Toulouse, 49 P.
- QUATTROCHI D.A., 1985 - Analysis of Landsat 4 Thematic Mapper data for classification of the Mobile, Alabama metropolitan area, Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Harbor, Michigan, May 9-13, pp 1393-1402.
- RICHARD J.A., 1984 - Thematic Mapping from multitemporal image data using the principal component transformation, Remote sensing of environment, N° 16, pp 35-46.
- RIMBERT S., 1982 - Expérience CNES 81/ 0208, Rapport APT CNRS N°1080, LTC Strasbourg 30 P + figures.
- SOUDOPLATOFF S., 1984 - Apport de la simulation SPOT aux études urbaines, Rapport IGN.
- SOYER J., WILMET J., 1982 - Lubumbashi et le Sud Est du Haut Shaba : interprétation de données Landsat, Bulletin de la Société Belge d'Etudes Géographiques, N°1, pp 87-100.
- TOLL D.L., 1985 - Landsat 4 Thematic Mapper scene characteristics of suburban and rural area, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 51, N°9, pp 1471-1482.
- TOLL D.L., 1985 - Effect of Landsat Thematic Mapper sensor parameters on land cover classification, Remote Sensing of Environment, Vol 17, pp 129-140.
- TOLL D.L., 1984 - An evaluation of simulated Thematic Mapper data and Landsat MSS data for discrimination suburban and regional land use, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 50, N°12, pp 1713-1724.
- WANG S.C., 1984 - Analysis methods for Thematic Mapper data of urban regions, Machine Processing of Remotely Sensed Symposium, pp 134-143.
- Morphologie mathématique et détection de contours sur image satellite ou photographies aériennes.*
- BASSEVILLE M., 1979 - Détection de contours : méthodes et études comparatives, Annales des Télécommunications, Tome 34, n°11, 12, pp 559-579.
- COSTER M., CHERMANT J.L., 1985 - Précis d'analyse d'image, pp 335-380, éd CNRS.
- DESTIVAL I., 1987 - Recherche automatique des réseaux linéaires sur les images SPOT, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Bulletin n° 108.

- JEANSOULIN R., 1982 - Reconnaissance automatique du parcellaire, Compte rendu du colloque "Le système SPOT d'observation de la terre", pp 259-274, Ed G Rochon, A Chabreuil, Paris.
- MILGRAM M., COQUEREZ J.P., 1986 - Fermeture des contours par un opérateur local, Traitement du Signal, Vol 3, N° 6, pp 302-311.
- NAGAO M., MATSUYAMA T., 1980 - A structure analysis of complexe aerial photograhs, Plenum Press, New-York and London, 199 P.
- SALMERON E., 1986 - Mise en coïncidence automatique des contours extraits d'images aériennes et d'éléments cartographiques, Thèse de 3^{ième} cycle, Université Technologique de Compiègne, 175 P.
- SERENDERO M.A., BERTHOD M., 1987 - Extraction des réseaux fins par un suivi directionnel de lignes de crêtes et de vallées, Colloque SPOT 1, 23-27 Novembre 1987, 8 P.
- SERRA J., 1986 - Image analysis and mathematical morphology, Academic Press.

Urbanisme et géographie

- ANTOINE Ph., DUBRESSON A., MANOU-SAVINA A., 1987 - Abidjan coté cours, Ed Karthala-ORSTOM, Paris, 274 pp.
- BEAUJEU-GARNIER J., 1980, - Géographie urbaine, Armand Colin, Paris, 360 P.
- BOURDIN A., HIRSCHHORN et Al, 1985 - Figures de la ville : Autour de Max WEBER, Aubier, Paris, 200 P.
- CASTELS M., 1975 - La question urbaine, Maspéro, Paris.
- MARCHAND B., RIMBERT S., CICERI M-F., 1977 - Introduction à l'analyse de l'espace, Masson, Paris, 173 P.
- MERLIN P., 1973 - Méthodes quantitatives et espace urbain, Masson, Paris.
- RACINE J.B., REYNAUD H., 1973 - L'analyse quantitative en géographie, PUF, Paris, 316 P.
- TRIBILLON J.F., 1988 - Villes en développement, La découverte, Paris, 320 P.

Statistiques - Analyse des données

- BENZECRI J.P. et Al, 1982 - L'analyse des correspondances, Dunod, Paris, 619 P.
- DE LAGARDE J., 1983 - Initiation à l'analyse des données, Dunod, Paris, 158 P.
- VOLLE M., 1978 - L'analyse des données, Economica, Paris.

**ANNEXE - LISTE DES LOGICIELS UTILISÉS ET
DÉVELOPPÉS -**

LISTE DES LOGICIELS UTILISES.

Logiciel de traitement d'image :

- * Programmes de l'Unité de Traitement Informatique (U.T.I) de l'Atelier de Télédétection de l'O.R.S.T.O.M à Bondy (A.T.O.B) sur *MINI 6*.
- * Logiciel PLANETES de l'Unité de Télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliqué (L.I.A) de l'O.R.S.T.O.M à Bondy sur station de travail *SUN*

Système de gestion de base de données spatialisées :

- * *SAVANE* de l'Unité d'Infographie du L.I.A de l'O.R.S.T.O.M sur *MINI 6* et sur station de travail *SUN*.

Logiciels de statistiques et gestion de fichiers:

- * *DBASE III* sur Micral 30 compatible IBM PC.
- * *STATITCF* sur Micral 30 compatible IBM PC.
- * *STATWORKS* sur MacIntosh Plus.

Logiciel de graphique et tableur:

- * *CRICKETGRAF* sur MacIntosh Plus.
- * *EXCEL* sur MacIntosh Plus.
- * *SUPERPAINT* sur MacIntosh Plus.

Logiciel de traitement de texte :

- * *WORD 3.0* sur MacIntosh Plus.

LISTE DES LOGICIELS DÉVELOPPÉS.

CONFUS : Compare une image classée avec une image de référence. Génère une matrice de confusion ainsi qu'une image binaire (bien ou mal classé).

COOCUR : calcule en fonction d'une zone et pour une image la matrice des cooccurrences, les paramètres classiques et génère une image du nuage. La distance ainsi que l'orientation sont paramétrables.

FERCOM : génère une image de la distance au point contour le plus proche et ferme les contours.

HISQUA : affiche sur Tektronix 4014 les quantiles d'une zone.

HISTOB : affiche sur Tektronix 4014 l'histogramme d'une zone.

KLM : combine différents canaux pour créer une image d'indices.

LINEAM : affiche sur Tektronix 4014 les éléments linéaires pour une ensemble de valeurs de pixels.

QUANTI : calcule la répartition des quantiles d'équipopulation pour chaque zone et crée un fichier permettant la visualisation des quantiles et de l'histogramme.

RADLAN : transforme une image compactée en une image matricielle.

REGRES : génère une image par combinaison de canaux (linéaire et polynomiale)

SEBEST : classe les pixels ou les zones en fonction de la distance de Sebesteen.

SQUATT : ajoute ou enlève des pixels dans une image binaire en fonction des configurations prédéfinies.

STADES : calcule des statistiques descriptives par zone et par modalité.

TEXTUR : génère une image de l'écart-type local et de la moyenne dans un voisinage 3*3 ou 5*5.

LION : écrit en collaboration avec M. SOURIS, module du système de gestion de base de données localisées *SAVANE* permettant la création d'un attribut dans la base en fonction des statistiques descriptives radiométriques des zones considérées.

**ANNEXE - LISTE DES TABLEAUX, FIGURES ET
PHOTOGRAPHIES -**

LISTE DES TABLEAUX.

PREMIERE PARTIE. ACQUIS METHODOLOGIQUES, SITUATION DE LA RECHERCHE ET PRATICABILITE DE LA METHODE.

CHAPITRE 1.1 PERTINENCE DE L'UTILISATION DE LA MORPHOLOGIE URBAINE POUR COLLECTER DES DONNEES DEMOGRAPHIQUES ACQUIS METHODOLOGIQUE ISSU DE L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION AEROPORTEE ET SATELLITAIRE POUR RECUEILLIR DES DONNEES DEMOGRAPHIQUES.

Tableau 1.1.1 Utilisation de données de télédétection aérienne et spatiale pour des estimations démographiques.....	23
Tableau 1.1.2 Quelques exemples d'estimations de population à partir de photographies aériennes et images satellite.....	24

CHAPITRE 1.4 PRATICABILITE FACE AUX CONTRAINTES METEOROLOGIQUES.

Tableau 1.4.1 Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image LANDSAT Thematic Mapper pour une nébulosité maximum donnée.....	35
Tableau 1.4.2 Probabilité (en pourcentage) d'obtenir une image SPOT pour une nébulosité maximum donnée	35
Tableau 1.4.3 Evaluation de la fréquence des acquisitions d'image en fonction de la nébulosité	38

ANNEXES PREMIERE PARTIE.

CHAPITRE 1.3 POSITIONNEMENT DU PROBLEME PAR RAPPORT A LA BIBLIOGRAPHIE DE LA TELEDETECTION EN MILIEU URBAIN.

Tableau A.1.3.1 Comparaison des classifications. Images MSS.....	9
Tableau A.1.3.2 Comparaison des classifications. Images TM	12
Tableau A.1.3.3 Comparaison des classifications. Image MSS et TM.....	13

CHAPITRE 1.4 PRATICABILITE FACE AUX CONTRAINTES METEOROLOGIQUES

Tableau A.1.4.1 Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 9h30	19
Tableau A.1.4.2 Fréquence mensuelle cumulée de la nébulosité à 10h30	20

DEUXIEME PARTIE MISE AU POINT DE LA METHODE A PARTIR D'UN MODELE EXPERIMENTAL MARSEILLE

CHAPITRE 2.1 INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES ET DONNEES SATELLITAIRES : REPERCUSSIONS METHODOLOGIQUES ET MISE EN OEUVRE

Tableau 2.1.1 Relation morphologie. Liste des attributs.....	63
Tableau 2.1.2 Relation population. Liste des attributs	63

CHAPITRE 2.2 ESTIMATION DE LA "DENSITE DU BÂTI" A PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER

Tableau 2.2.1 Moyenne et écart-type des canaux TM.....	71
Tableau 2.2.2 Coefficients de corrélation entre canaux	74
Tableau 2.2.3 Statistiques descriptives par modalité du descripteur densité du bâti : Paramètres extraits des matrices de cooccurrences	89
Tableau 2.2.4 Statistiques sur la surface des îlots de l'échantillon par modalité	97

Tableau 2.2.5 Les corrélations entre moyennes radiométriques des sous-îlots, densité de bâti et pourcentage des couleurs dominantes des toitures.....	103
Tableau 2.2.6 Les régressions les plus performantes entre moyennes radiométriques et coefficients de densité du bâti dans les sous-îlots de l'échantillon	104
Tableau 2.2.7 Matrice de confusion. Classification des pixels par seuillage de la régression multiple.....	111
Tableau 2.2.8 Matrice de confusion. Classification des îlots par seuillage de la régression multiple à l'aide des seuils définis par nuées dynamiques.....	113
Tableau 2.2.9 Matrice de confusion. Classification des îlots par seuillage de la régression multiple à l'aide des valeurs typiques.....	114
Tableau 2.2.10 Gains de précision pour 11 caractères démographiques (en % du coefficient de variation des caractères démographique non stratifiés).....	121

CHAPITRE 2.3 TYPOLOGIE DES ESPACES BÂTIS A PARTIR DES QUANTILES RADIOMETRIQUES

Tableau 2.3.1 Répartition des effectifs suivant les seuils des quantiles.....	125
Tableau 2.3.2 Variance des axes factoriels. Analyse des sous-îlots peu densément bâti.....	127
Tableau 2.3.3 Variance des axes factoriels. Analyse des sous-îlots densément bâtis.....	137
Tableau 2.3.4 Coefficients de variation des estimateurs démographiques calculés sur l'échantillon de l'enquête morphologie.....	146

ANNEXES DEUXIEME PARTIE.

ANNEXE 2.2 ESTIMATION DE LA "DENSITE DU BÂTI" A PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

Tableau A.2.2.1 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le canal TM 4.....	28
Tableau A.2.2.2 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le canal TM 5.....	28
Tableau A.2.2.3 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : l'indice de végétation	29
Tableau A.2.2.4 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : le néo-canal (TM4-TM5)/(TM4+TM5) noté IND1.....	29
Tableau A.2.2.5 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Ecart-type sur la première composante principale fenêtre 5*5.....	30
Tableau A.2.2.6 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Ecart-type sur le canal 4 de Thematic Mapper fenêtre 5*5.....	30
Tableau A.2.2.7 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Moyenne sur la première composante principale fenêtre 5*5.....	31
Tableau A.2.2.8 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Moyenne sur le canal 4 de Thematic Mapper fenêtre 5*5.....	31
Tableau A.2.2.9 Statistiques descriptives par modalité de densité du bâti : Ecart-type sur la deuxième composante principale, fenêtre 5*5.....	32
Tableau A.2.2.10 Densité du bâti par modalités. Sous-îlot seul.....	35
Tableau A.2.2.11 Densité du bâti par modalité, bande de 16m autour du sous-îlot comprise.....	36
Tableau A.2.2.12 Coefficients de corrélation entre moyennes radiométrique des canaux et néo-canaux de TM et coefficients de densité de la couleur dominante des toitures dans les sous îlots incluant une bordure de 16 m	39
Tableau A.2.2.13 Régressions dans les sous-îlots y compris la borbure entre moyennes radiométriques et coefficients de densité du bâti.....	40
Tableau A.2.2.14 Paramètres extraits des matrices de cooccurrences calculés à partir de l'échantillon de travail des sous-îlots INSEE.....	42

Tableau A.2.2.15 Matrice de confusion du seuillage du canal TM4	43
Tableau A.2.2.16 Valeur des indices par modalités (anciennes (1) et nouvelles (2)) issue des îlots de l'échantillon	45
Tableau A.2.2.17 Matrice des distances entre les centres des 6 classes de densité du bâti, classification suivant la distance de Sebesteen	48
Tableau A.2.2.18 Matrice de confusion. Classification des pixels suivant la distance de Sebesteen	49
Tableau A.2.2.19 Matrice de confusion. Classification des îlots suivant la distance de Sebesteen	50
Tableau A.2.2.20 Distances entre les centres de gravité des classes, classification suivant les nuées dynamiques	51
Tableau A.2.2.21 Matrice de confusion. Classification des îlots suivant les nuées dynamiques	51

ANNEXE 2.3 TYPOLOGIE DES ESPACES BÂTIS A PARTIR DES QUANTILES RADIOMETRIQUES.

Tableau A.2.3.1 Premier axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis	54
Tableau A.2.3.2 Deuxième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis	55
Tableau A.2.3.3 Troisième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis	55
Tableau A.2.3.4 Quatrième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis	56
Tableau A.2.3.5 Variance des axes factoriels dans l'analyse des néo-canaux. Analyse des sous-îlots densément bâtis	57
Tableau A.2.3.6 Premier axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots densément bâtis	60
Tableau A.2.3.7 Deuxième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots densément bâtis	61
Tableau A.2.3.8 Troisième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots densément bâtis	61
Tableau A.2.3.9 Quatrième axe factoriel. Individus et variables importants. Echantillon des sous-îlots densément bâtis	62

TROISIEME PARTIE. STRATIFICATION DE LA VILLE DE QUITO (EQUATEUR) A PARTIR D'IMAGES SPOT : PREMIERE MISE EN OEUVRE DE LA METHODE DE SONDAGE.

CHAPITRE 3.1 TRAVAUX PRELIMINAIRES ENQUETE MORPHOLOGIE DU BÂTI.

Tableau 3.1.1 Comparaison des méthodes de mesure de la surface des îlots	161
Tableau 3.1.2 Influence de la taille sur la précision de la mesure de la surfaces des îlots	162
Tableau 3.1.3 Influence de l'orientation et de la pente sur la précision de la mesure	163

CHAPITRE 3.3 CREATION D'UNE BASE DE DONNEES SUR LE SITE DE QUITO.

Tableau 3.3.1 Matrice de confusion extraction automatique de la voirie / numérisation du réseau	179
--	-----

CHAPITRE 3.4 PREMIERE CLASSIFICATION SUR "LA DENSITE DU BÂTI".

Tableau 3.4.1 Croisement de la classification et de la limite obtenue visuellement	186
---	-----

Tableau 3.4.2 Classification barycentrique des pixels suivant la densité du bâti. Matrice de confusion.....	190
Tableau 3.4.3 Liste des variables démographiques utilisées pour la comparaison des gains de variance.....	191
Tableau 3.4.4 Coefficient de variation des estimateurs des variables démographiques avec différentes stratifications (Programme VARECH sous DBASEIII).....	192

CHAPITRE 3.5 CLASSIFICATION DES ZONES. EN FONCTION DE LA DENSITE DU BÂTI.

Tableau 3.5.1 Paramètres statistiques de la régression "densité du bâti" en fonction de l'indice de végétation	194
Tableau 3.5.2 Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe), régression polynomiale de l'indice de végétation.....	197
Tableau 3.5.3 Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe), régression polynomiale de l'indice de végétation.....	198
Tableau 3.5.4 Coefficients des variables centrée réduites dans l'équation linéaire des axes discriminants la densité du bâti	199
Tableau 3.5.5 Matrice des distances entre centres de gravité des classes issues de l'analyse discriminante, densité du bâti	200
Tableau 3.5.6 Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Classification suivant les néo-canaux discriminants. Prévion de fiabilité.....	200
Tableau 3.5.7 Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Classification suivant les néo-canaux discriminants.....	202

CHAPITRE 3.6 TYPOLOGIE DE L'ESPACE BÂTI LES QUANTILES.

Tableau 3.6.1 Bornes des quantiles dans chaque canal	204
Tableau 3.6.2 Coefficients de corrélation dans le spectre visible	205
Tableau 3.6.3 Contribution des variables à l'inertie totale expliquée par les axes factoriel : échantillon des îlots densément bâtis.....	206
Tableau 3.6.4 Contribution des variables à l'inertie totale, échantillon des îlots peu densément bâtis.....	214

CONCLUSIONS DE LA TROISIEME PARTIE.

Tableau 3.8.1 Coefficients de variation des estimateurs démographiques sous différentes stratifications.(Programme VARECH environnement DBASE 3)	227
Tableau 3.8.2 Eléments de comparaison SPOT-HRV/LANDSAT Thematic Mapper dans le cadre de la réalisation d'une stratification de l'espace urbain à objectif démographique.....	229

ANNEXES TROISIEME PARTIE.

ANNEXE A.3.6 TYPOLOGIE DE L'ESPACE BÂTI LES QUANTILES.

Tableau A.3.6.1 Contribution des variables (axes factoriel) aux classes, échantillon des îlots densément bâtis.....	109
Tableau A.3.6.2 Coordonnées du centres de gravité des classes dans l'espace des 5 axes factoriels, échantillon des îlots densément bâtis	110
Tableau A.3.6.3 Contribution des variables (axes factoriel) aux classes, échantillon des îlots peu densément bâtis.....	111
Tableau A.3.6.4 Coordonnées du centre de gravité des classes dans l'espace des cinq axes factoriels, échantillon des îlots peu densément bâtis.....	112
Tableau A.3.6.5 Les nomenclatures des typologies.....	113
Tableau A.3.6.6 Croisement Enquête Photo/C.A.H télédétection.....	114

Tableau A.3.6.7 Croisement Enquête Morphologie/C.A.H télédétection	115
Tableau A.3.6.8 Croisement Cazamajor-Godard/C.A.H télédétection	116
Tableau A.3.6.9 Croisement CAH O.BARBARY/C.A.H télédétection.....	117

ANNEXE A.3.8 ENQUETE DEMOGRAPHIE/MIGRATION.

Tableau A.3.8.1 Estimation des caractères démographiques à Quito et leur précision sur l'ensemble de la base	121
---	-----

ANNEXE A.3.9 RECAPITULATIF DES COÛTS RELATIFS AU DEVELOPPEMENT DU VOLET TELEDETECTION DE LA METHODE.

Tableau A.3.9.1 Coût, durée matériel et logiciel indispensables pour la réalisation du volet télédetection de l'opération démographie.....	134
---	-----

LISTE DES FIGURES.

PREMIERE PARTIE ACQUIS METHODOLOGIQUES, POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE ET PRATICABILITE DE LA METHODE.

CHAPITRE 1.4 PRATICABILITE FACE AUX CONTRAINTES METEOROLOGIQUES.

Figure 1.4.1 Probabilité en pourcentage d'obtention d'une image de 0/8 de ciel couvert. Comparaison SPOT / LANDSAT Thematic Mapper..... 36

ANNEXE PREMIERE PARTIE.

CHAPITRE 1.3 POSITIONNEMENT DU PROBLEME PAR RAPPORT A LA BIBLIOGRAPHIE DE LA TELEDETECTION EN MILIEU URBAIN.

Figure A.1.3.1 Exemple d'une fiche de dépouillement bibliographique remplie 5

CHAPITRE 1.4 PRATICABILITE FACE AUX CONTRAINTES METEOROLOGIQUES.

Figure A.1.4.1 Bordereau du relevé météorologique quotidien, recto 21

Figure A.1.4.2 Bordereau du relevé météorologique quotidien, verso 22

Figure A.1.4.3 Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (janvier-avril)..... 23

Figure A.1.4.4 Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (mai-août)..... 24

Figure A.1.4.5 Histogramme des fréquences de nébulosité à 9h30 et 10h30 (septembre-décembre)..... 25

Figure A.1.4.6 Somme sur 10 ans, tous mois confondus, de la nébulosité à 9h30 et 10h30 26

Figure A.1.4.7 Moyenne et fréquence de la pluviographie quotidienne par mois 26

Figure A.1.4.8 Vitesse du vent, maximum et minimum des maxima par mois 26

DEUXIEME PARTIE. MISE AU POINT DE LA METHODE A PARTIR D'UN MODELE EXPERIMENTAL MARSEILLE.

CHAPITRE 2.1 INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES ET DONNEES SATELLITAIRES : REPERCUSSIONS METHODOLOGIQUES ET MISE EN OEUVRE.

Figure 2.1.1 Superposition d'un quadrillage SPOT et Thematic Mapper sur une cartographie 1/2 500. Centre ville. Tissu mixte pavillonnaire et immeubles d'habitation 48

Figure 2.1.2 Superposition d'un quadrillage SPOT et Thematic Mapper sur une cartographie 1/5 000 et 1/2 500. Industrie et équipements. Grands ensembles d'habitation 50

Figure 2.1.3 Localisation de la zone d'étude sur Marseille 59

Figure 2.1.4 L'implantation géographique des trois types d'information à intégrer dans la base de données géographiques sur Marseille 65

CHAPITRE 2.2 ESTIMATION DE LA "DENSITE DU BÂTI" A PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

Figure 2.2.1- Distributions radiométriques des canaux bruts..... 72

Figure 2.2.2 Variation des canaux bruts suivant les modalités du descripteur densité du bâti 75

Figure 2.2.3 Histogramme du canal TM4 suivant les modalités du descripteur densité du bâti	77
Figure 2.2.4 Variation des néo-canaux suivant les modalités du descripteur densité du bâti	80
Figure 2.2.5 Histogrammes bidimensionnels par zone indice de végétation / canal 4	78
Figure 2.2.6 Variation des composantes principales en fonction des modalités du descripteur densité du bâti.....	81
Figure 2.2.7 Variation des écarts-type locaux en fonction des modalités du descripteur densité du bâti.....	85
Figure 2.2.8 Fiche d'enquête décrivant le bâti.....	91
Figure 2.2.9 Fiche d'enquête décrivant le non bâti	92
Figure 2.2.10 Fiche de codification de l'occupation de l'espace.....	94
Figure 2.2.11 Graphique des surfaces des sous-îlots par modalité de densité	98
Figure 2.2.12 Histogramme des fréquences du coefficient densité du bâti	99
Figure 2.2.13 Graphique des modalités initiales de densité du bâti.....	100
Figure 2.2.14 Graphique du coefficient densité du bâti après réaffectation selon la méthode des nuées dynamiques	100
Figure 2.2.15 Graphique de la régression simple : densité du bâti / IVG.....	105
Figure 2.2.16 Graphique de la régression polynomiale : densité du bâti / IVG.....	106
Figure 2.2.17 Graphique de la régression multiple.: densité du bâti / ACP1, IND1.....	107
Figure 2.2.18 Organigramme de la démarche suivie pour mettre en évidence la densité du bâti sur image LANDSAT Thematic Mapper.....	120
Figure 2.2.19 Comparaison des gains de précision apportés par quatre stratifications morphologiques à l'estimation de 6 caractères démographiques mesurés en effectif (en % du coefficient de variation des caractères démographique non stratifiés)	122

CHAPITRE 2.3 TYPOLOGIE DES ESPACES BÂTIS A PARTIR DES QUANTILES RADIOMETRIQUES.

Figure 2.3.1 Analyse des sous-îlots peu densément bâtis. Plan factoriel 1 2.....	128
Figure 2.3.2 Analyse des sous-îlots peu densément bâtis. Plan factoriel 1 3.....	130
Figure 2.3.3 Analyse des sous-îlots peu densément bâtis. Plan factoriel 2 3.....	131
Figure 2.3.4 Arbre de la classification hiérarchique ascendante des îlots peu densément bâtis.....	133
Figure 2.3.5 Analyse des sous-îlots densément bâtis. Plan factoriel 1 2.....	138
Figure 2.3.6 Analyse des sous-îlots densément bâtis. Plan factoriel 1 3.....	140
Figure 2.3.7 Analyse des sous-îlots densément bâtis. Plan factoriel 2 3.....	141
Figure 2.3.8 Arbre de la classification hiérarchique ascendante des îlots densément bâtis.....	143
Figure 2.3.9 Profils radiométriques des 10 types urbains définis à l'issue des classifications hiérarchiques ascendantes.....	145
Figure 2.3.10 Comparaison des gains de précision obtenu pour 4 caractères démographiques en fonction de la stratification considérée	147

ANNEXES DEUXIEME PARTIE.

ANNEXE A.2.2 ESTIMATION DE LA "DENSITE DU BÂTI" A PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

Figure A.2.2.1 Graphique des statistiques concernant la densité du bâti dans les sous-îlots (y compris la bordure de 16m) selon les modalités initiales.....	37
Figure A.2.2.2 Graphique des statistiques concernant la densité du bâti dans les sous-îlots y compris la bordure selon les modalités redéfinies par la méthodes des nuées dynamiques.....	38

ANNEXE 2.2.4 LES CLASSIFICATIONS.

Figure A.2.2.3 Graphique des moyennes de reflectance avant réaffectation, calculées à partir des statistiques des îlots de l'échantillon, redistribués par modalité	46
Figure A.2.2.4 Graphique des moyennes radiométriques après réaffectation calculées à partir des statistiques des îlots de l'échantillon, redistribuées par modalité (méthode des nuées dynamiques)	46
Figure A.2.2.5 Représentation 3 dimensions des centres de classes de la densité du bâti, classification suivant la distance de Sebesteen	48

ANNEXE A.2.3 TYPOLOGIE DES ESPACES BÂTIS A PARTIR DES QUANTILES RADIOMETRIQUES.

Figure A.2.3.1 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 1	64
Figure A.2.3.2 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 2	65
Figure A.2.3.3 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 3	66
Figure A.2.3.4 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots peu densément bâtis. Axe factoriel 4	67
Figure A.2.3.5 Analyse des sous-îlots peu densément bâtis. Plan factoriel 1 4	68
Figure A.2.3.6 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 1	69
Figure A.2.3.7 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 2	70
Figure A.2.3.8 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 3	71
Figure A.2.3.9 Correspondance entre données terrain et variables radiométriques. Echantillon des sous-îlots densément bâtis. Axe factoriel 4	72
Figure A.2.3.10 Analyse des sous-îlots densément bâtis. Plan factoriel 1 4.....	73

**TROISIEME PARTIE. STRATIFICATION DE LA VILLE DE QUITO (EQUATEUR) A PARTIR D'IMAGES SPOT :
PREMIERE MISE EN OEUVRE DE LA METHODE DE SONDAGE.**

Figure 3.0.1 Plan d'expérimentation sur Quito.....	150
---	-----

CHAPITRE 3.1 TRAVAUX PRELIMINAIRES ENQUETE MORPHOLOGIE DU BÂTI.

Figure 3.1.1 Croquis enquêteur réalisé sur le terrain	160
Figure 3.1.2 Report du croquis sur Mac Intosh+. Logiciel MacDraft	160
Figure 3.1.3 Extrait d'une carte 1/2 000 du Municipio.....	160
Figure 3.1.4 Précision des mesures de surface sur le terrain.....	164
Figure 3.1.5 Précision des mesures de surface sur écran	164
Figure 3.1.6 Précision des mesures de surface sur tirage photographique.....	165

CHAPITRE 3.4 PREMIERE CLASSIFICATION SUR "LA DENSITE DU BÂTI".

Figure 3.4.1 Gains de précision en fonction des différentes stratifications utilisées.....	193
---	-----

CHAPITRE 3.5 CLASSIFICATION DES ZONES. EN FONCTION DE LA DENSITE DU BÂTI.

Figure 3.5.1 Régression polynomiale entre l'indice de végétation et la densité du bâti dans les îlots de l'échantillon morphologie.....	195
--	-----

CHAPITRE 3.6 TYPOLOGIE DE L'ESPACE BÂTI. LES QUANTILES.

Figure 3.6.1 Contribution relative des variables : axe factoriel 1, îlots densément bâtis.....	206
Figure 3.6.2 Contribution relative des variables : axe factoriel 2, îlots densément bâtis.....	207
Figure 3.6.3 Contribution relative des variables : axe factoriel 3, îlots densément bâtis.....	209
Figure 3.6.4 Contribution relative des variables : axe factoriel 4, îlots densément bâtis.....	211
Figure 3.6.5 Contribution relative des variables : axe factoriel 5, îlots densément bâtis.....	211
Figure 3.6.6 Signatures spectrales des types urbains dans l'espace des trois premiers axes factoriels, échantillon des îlots densément bâtis	212
Figure 3.6.7 Représentation des individus regroupés en types sur le premier plan factoriel , îlots densément bâtis	213
Figure 3.6.8 Contribution relative des variables : axe factoriel 1, îlots peu densément bâtis.....	215
Figure 3.6.9 Contribution relative des variables : axe factoriel 2, îlots peu densément bâtis.....	216
Figure 3.6.10 Contribution relative des variables : axe factoriel 3, îlots peu densément bâtis.....	216
Figure 3.6.11 Contribution relative des variables : axe factoriel 4, îlots peu densément bâtis.....	217
Figure 3.6.12 Contribution relative des variables : axe factoriel 5, îlots peu densément bâtis.....	218
Figure 3.6.13 Signatures spectrales des types urbains dans l'espace des trois premiers axes factoriels, échantillon des îlots peu densément bâtis	218
Figure 3.6.14 Représentation des individus regroupés en types sur le premier plan factoriel , îlots peu densément bâtis	220

CONCLUSIONS PARTIE 3 ET CONCLUSION GENERALE.

Figure 3.8.1 Etapes de la mise au point des outils méthodologiques.....	224
Figure 3.8.2 Etapes de la détermination de la limite urbaine et de l'évaluation de la densité du bâti.....	225
Figure 3.8.3 Etapes de l'élaboration de la typologie du tissu urbain.....	226
Figure 3.8.4 Gain de précision sous plan de sondage à probabilité proportionnelle à la surface avec allocation optimale aux strates de Neyman de différentes variables démographiques	228
Figure 3.8.5 Plan de sondage de l'enquête Migrations (Quito, décembre 1987).....	231

ANNEXES A.3.8 CONCLUSIONS.

Figure A.3.8.1 Illustration du processus de sélection dans les différentes strates sur une partie de la base de sondage (de 1 à 4)	122
Figure A.3.8.2 Schéma du pâté de maisons établi à l'issue du recensement des ménages, servant pour la sélection des ménages à enquêter	126
Fiche 1 Variables sur chacune des personnes vivant dans le logement (1 et 2).....	127
Fiche 2 Variables sur les conditions d'occupation du logement	129
Fiche 3 Lieux de résidence et activités du chef de ménage durant les deux dernières années.....	130
Fiche 4 Biographie migratoire et professionnelle du chef de ménage depuis sa naissance.....	131
Fiche 5 Variables sur les parents du chef de ménage et de son conjoint ne vivant pas dans le logement d'enquête.....	132

LISTE DES PHOTOGRAPHIES.

DEUXIEME PARTIE. MISE AU POINT DE LA METHODE A PARTIR D'UN MODELE EXPERIMENTAL MARSEILLE.

CHAPITRE 2.1 INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES ET DONNEES SATELLITAIRES : REPERCUSSIONS METHODOLOGIQUES ET MISE EN OEUVRE.

Photo 2.1.1 Limites de quelques îlots de l'échantillon morphologie reportées sur l'image panchromatique SPOT de Juin 1986 de Quito.....	54
Photo 2.1.2 Contours des districts de recensement INSEE, projection Lambert 3.....	60
Photo 2.1.3 Détail du zonage morphologique sur la mosaïque de photographies aériennes	60
Photo 2.1.4 Canal 4 (infra-rouge proche) de LANDSAT Thematic Mapper.....	60

CHAPITRE 2.2 ESTIMATION DE LA "DENSITE DU BÂTI" A PARTIR D'UNE IMAGE THEMATIC MAPPER.

Photo 2.2.1 Image du descripteur densité du bâti sur l'ensemble de la zone d'étude.....	69
Photo 2.2.2 Image des îlots de l'échantillon.....	69
Photo 2.2.3 Image de la jointure spatiale entre la densité du bâti et les îlots de l'échantillon.....	69
Photo 2.2.4 Image du canal 4 de Thematic Mapper, fenêtre nord de la zone d'étude.....	79
Photo 2.2.5 Image Thematic Mapper de l'indice de végétation, zone d'étude.....	79
Photo 2.2.6 Image Thematic Mapper de l'indice $(TM4-TM5)/(TM4+TM5)$, zone d'étude	79
Photo 2.2.7 Image Thematic Mapper de la première composante principale, zone d'étude	82
Photo 2.2.8 Image Thematic Mapper de la seconde composante principale, zone d'étude.....	82
Photo 2.2.9 Image Thematic Mapper de l'écart-type local calculé sur le canal infra-rouge proche (TM4), zone d'étude.....	82
Photo 2.2.10 Composition colorée des canaux 1, 4 et 7 de LANDSAT Thematic Mapper.....	84
Photo 2.2.11 Composition colorée des canaux 1, 2 et 3 de LANDSAT Thematic Mapper.....	84
Photo 2.2.12 Matrices de cooccurrences de niveaux de gris calculées sur le canal TM 4 en fonction des modalités du descripteur densité du bâti.....	88
Photo 2.2.13 Application de la régression multiples à l'image Thematic Mapper entière.....	112
Photo 2.2.14 Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la classification de pixels avec superposition de la limite des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres.....	112
Photo 2.2.15 Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la classification des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres . Valeurs typiques.....	116
Photo 2.2.16 Fenêtre cadrée sur le centre ville de l'image de la référence photo-aérienne avec superposition des districts de recensement INSEE. Pixel de 10 mètres.....	116
Photo 2.2.17 Exemple de relation entre photographie-aérienne, enquête photo au sol et classification "densité de bâti" par pixel sur image LANDSAT TM.....	118
Photo 2.2.18 Superposition des zones morphologiques sur une composition colorée des canaux 1,4 et 7 de Thematic Mapper. Les différents modes	

d'occupation du sol distingués sur photographies aériennes apparaissent aussi sur ce documents satellitaire.....	116
Photo 2.2.19 Stratification de l'espace urbain marseillais suivant <i>la densité du bâti</i> à partir de la classification des districts de recensement INSEE suivant leur luminance dans quelques canaux de LANDSAT TM.....	123

TROISIEME PARTIE : STRATIFICATION DE LA VILLE DE QUITO (EQUATEUR) A PARTIR D'IMAGES SPOT : PREMIERE MISE EN OEUVRE DE LA METHODE DE SONDAGE.

CHAPITRE 3.1 TRAVAUX PRELIMINAIRES ENQUETE MORPHOLOGIE DU BÂTI.

Photo 3.1.1 Composition colorée de l'image SPOT du 26 novembre 1986	154
Photo 3.1.2 Composition colorée des canaux 2, 3 et 4 de l'image LANDSAT Thematic Mapper du 15 septembre 1986.....	154
Photo 3.1.3 Îlots de l'échantillon de l'enquête morphologie. Partie centrale de l'image, superposable à l'image SPOT de Juin. Pixel de 10 mètres	158
Photo 3.1.4 Délimitation de quelques îlots appartenant à l'échantillon morphologie sur la carte INEC à l'échelle 1/10 000	158
Photo 3.1.5 Extrait de l'image panchromatique SPOT de Juin 1986, report des contours de quelques îlots appartenant à l'échantillon morphologie	158

CHAPITRE 3.2 SEGMENTATION DE L'IMAGE FONDEE SUR L'EXTRACTION AUTOMATIQUE DE LA VOIRIE.

Photo 3.2.1 Image SPOT Juin 1986. Panchromatique + Infra-rouge proche : la voirie apparait dans les valeurs les plus faibles de l'image et se distingue sur un fond plus clair (valeurs plus élevées).....	170
Photo 3.2.2 "Fermeture" de l'image précédente.....	170
Photo 3.2.3 Seuillage de l'image originale soustraite à sa "fermeture"	170
Photo 3.2.4 "Amincissement" de l'image précédente	173
Photo 3.2.5 Image des distances au point contour le plus proche.....	173
Photo 3.2.6 Ajout (rouge) et suppression (jaune) de pixels sur l'image	173
Photo 3.2.7 Image des réseaux extraits.....	175
Photo 3.2.8 Image des réseaux extraits visuellement	175

CHAPITRE 3.3 CREATION D'UNE BASE DE DONNEES SUR LE SITE DE QUITO.

Photo 3.3.1 Assemblage au 1/2 000 de 4 cartes au 1/1 000 prêt pour la saisie	178
Photo 3.3.2 Extrait de l'image générée à partir de la mini-base, pixel de 2,5 mètres.....	178
Photo 3.3.3 Composition colorée. Bleu : image de la carte numérisée. Vert : image panchromatique SPOT.....	178
Photo 3.3.4 Composition colorée. Vert : extraction automatique de la voirie. Gris : image panchromatique SPOT	180
Photo 3.3.5 Composition colorée. Bleu : réseau numérisé. Vert : extraction automatique de la voirie. Gris : panchromatique SPOT	180

CHAPITRE 3.4 PREMIERE CLASSIFICATION SUR "LA DENSITE DU BÂTI".

Photo 3.4.1 Détermination visuelle de la limite urbaine sur un tirage de l'image panchromatique SPOT de Juin 1986.....	185
Photo 3.4.2 Détermination de la limite urbaine; hypercube 4 classes et limite visuelle. Image échantillonnée 1 pixel sur 9	185
Photo 3.4.3 Détermination de la limite urbaine; hypercube 4 classes lissé et limite visuelle. Image échantillonnée 1 pixel sur 9	185

Photo 3.4.4 Détermination de la limite urbaine; croisement entre la délimitation automatique et la détermination visuelle (hypercube 4*2 classes). Image échantillonnée 1 pixel sur 9	188
Photo 3.4.5 Détermination de la limite urbaine; hypercube 4 classes et limite visuelle. Extrait du Sud de l'image pixel de 10 mètres	188

CHAPITRE 3.5 CLASSIFICATION DES ZONES. EN FONCTION DE LA DENSITE DU BÂTI.

Photo 3.5.1 Classification de zones suivant la densité du bâti en 6 classes, régression polynomiale en fonction de l'indice de végétation, avec limites de zones	196
Photo 3.5.2 Classification de zones suivant la densité du bâti en 6 classes, régression polynomiale en fonction de l'indice de végétation.....	196
Photo 3.5.3 Densité du bâti, analyse discriminante : axe 1.....	201
Photo 3.5.4 Densité du bâti, analyse discriminante : axe 2.....	201
Photo 3.5.5 Classification de zones suivant la densité du bâti en 4 classes, analyse discriminante	201

CHAPITRE 3.6 TYPOLOGIE DE L'ESPACE BÂTI. LES QUANTILES.

Photo 3.6.1 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	210
Photo 3.6.2 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	210
Photo 3.6.3 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	210
Photo 3.6.4 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	208
Photo 3.6.5 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	208
Photo 3.6.6 Limite de quelques îlots de l'échantillon morphologie sur la composition colorée de l'image SPOT de Juin 1986.....	208

CONCLUSIONS.

Photo 3.8.1 Superposition colorée de deux images SPOT panchromatiques, juin : cyan, novembre : rouge.....	235
--	-----

TABLE DES MATIERES DES ANNEXES.

A.1.3) Le point sur la télédétection urbaine à travers la bibliographie française et anglo-saxonne.	4
A.1.3.1) Documents de référence.....	6
A.1.3.2) Image LANDSAT MSS.....	6
A.1.3.3) Image LANDSAT Thematic Mapper	10
A.1.3.4) Comparaison Thematic Mapper / MSS / SPOT / Photographies aériennes.....	12
A.1.3.5) SPOT-HRV.....	13
A.1.4) Praticabilité face aux contraintes météorologiques.	16
A.1.4.1) Le site de Quito (EQUATEUR).....	17
 Annexes DEUXIEME PARTIE.....	 27
A.2.2) Estimation de la "densité du bâti" à partir d'une image Thematic Mapper	28
Annexe 2.2.1 Statistiques descriptives sur l'ensemble de la base	28
Annexe 2.2.2 Echantillon de travail	33
Annexe A.2.2.2.2 Enquête morphologie urbaine (Marseille, 9-14 juin 1986).....	33
Annexe 2.2.2.5 Statistiques sur la densité du bâti -.....	35
A.2.2.3) Les régressions dans l'ensemble sous-îlots et bande de 16 mètres autour des sous-îlots.....	39
A.2.2.4) Classifications.....	42
A.2.2.4.1) Seuillage du canal TM 4 au vu des résultats des matrices de cooccurrences.	42
A.2.2.4.2) Classification supervisée de type barycentrique	43
A.2.2.4.3) Classification de type nuées dynamiques sur les îlots.....	50
A.2.3) Typologie de l'espace à partir des quantiles radiométriques	53
A.2.3.2) Typologie des îlots peu densément bâtis.....	54
A.2.3.3) Typologie des îlots densément bâtis.	60
 A.3.1) Manuel d'enquête - Manuel de codification.	 74
A.3.6) Nomenclatures des typologies de l'espace bâti Quiténien.....	108
A.3.8) Enquête démographie/migrations.....	118
A.3.9) Eléments de coût.....	133
Bibliographie sélective.....	137
Liste des logiciels utilisés et développés.	147
Liste des Tableaux, Figures et Photos.....	149