*Télédétection*, 1999, Vol. 1, pp. 71-94
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 1999 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous licence par
*Gordon and Breach Science Publishers*
Imprimé en Malaisie

# Le couplage d'une image satellitaire à des photographies aériennes obliques pour l'étude de la croissance démographique d'une ville du Monde arabe à partir du lien entre le bâti et la population : Application au cas de Marrakech

## Croissance démographique à Marrakech par télédétection

HENRY SABINE*

*Laboratoire de télédétection et analyses régionales, Université Catholique de Louvain, Bâtiment Mercator, Place Pasteur, 3, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique*

*(soumis le 9 juillet 1998; révisé le 23 novembre 1998; accepté le 29 janvier 1999)*

L'objectif général de notre étude est d'étudier la croissance démographique d'une ville du Monde Arabe à partir du lien entre la morphologie urbaine et la population. Dans un premier temps, notre démarche consiste à réaliser une classification du bâti sur l'ensemble des îlots d'une agglomération, selon une typologie par image-interprétation. Nous proposons ensuite d'associer une densité de population à une date précise. Enfin, nous complétons par des photographies obliques récentes et un support satellitaire d'une année antérieure. On peut tracer les îlots de changements sur le support et avoir ainsi la configuration de l'agglomération actuelle. On classe ensuite les îlots selon une typologie du bâti à laquelle on a associé une densité de population. Le résultat nous donne un chiffre de population actuel, base de travail pour de nombreuses autres études complémentaires. La simplicité, la rapidité et le faible coût des photographies aériennes obliques invitent le lecteur à s'intéresser à cette (nouvelle) technique. Le manque de données ne nous a pas permis l'analyse du phénomène de densification sous toutes ses formes. Nous pensons cependant que notre travail ouvre des portes pour l'uti-

* Sabine Henry, 163, rue des Pages, 5140 Boignée, Belgique, Tél. : + (32) 71 88 83 86, Télécopieur : + (32) 10 47 28 77, henry @ geog.ucl.ac.be

lisation de l'image-interprétation en milieu urbain par la construction d'un schéma arborescent et pour l'utilisation des photographies obliques dans un travail scientifique dans le but de compléter une situation antérieure. Il confirme le lien entre le bâti et la population ouvrant ainsi le champ d'action de la télédétection également au domaine démographique.

*Mots clefs* : croissance démographique, photographies aériennes obliques, typologie, Marrakech

**Coupling satellite image with oblique aerial photographs to study demographic growth of a town in the Arab world based on the relationship between its buildings and the population with specific application to the case of Marrakech.**

The main objective of this study is to examine the demographic growth of a town in the Arab world based on the relationship between urban morphology and population.The study area is the agglomeration of Marrakech in Morocco. This town include s some traditional districts (« *Médina* »), modern or European areas, planned constructions, informal zones, industries, collective farms, etc. Firstly, our approach consists of carrying out a classification by visual image interpretation of the buildings of all the blocks of an agglomeration, according to a predefined typology. The classification principe relies on a tree structure, where criteria to identify classes (like texture, structure, percent of vegetation, etc.) are progressively introduced and build finally a sort of tree. Numerous ramifications allow to define precisely twenty-three classes, including cemetery, vegetation, social building, informal construction, urban fallow, industries, etc. We associate a population density to a building type at a given date. Data come from population census as at the scale of demographic district. The main difficulty has been to find homogeneous districts corresponding to our urban categories. We obtain a population estimation at current situation. To obtain a recent population estimation, we complement the satellite image from a previous year with oblique aerial photographs. We are able to trace the blocks which change on the image and thus have the layout of the present agglomeration. We can then classify the blocks according to a typology of building to which a population density is associated. The result provide a current population figure, which forms a working basis for numerous other complementary studies. The simplicity, rapidity and low cost of oblique aerial photographs encourages the planner to become interested in this (new) technique. Lack of data has made it impossible to analyse the phenomenon of the increasing population in all its forms. We think, however, that our work will open doors for the use of photo interpretation in urban areas through the construction of an arborescent scheme and for the use of oblique photographs in scientific work with the aim of finishing off an earlier stage. It confirms the relationship between buildings and population.

*Keywords:* Demographic growth; oblique aerial photographs; typology; Marrakech

## 1. ÉTAT DE LA QUESTION ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Le phénomène de croissance urbaine en Afrique et dans les pays en développement en général a été largement mis à la une, constituant un des grands problèmes que l'humanité va devoir traiter au siècle prochain. En Afrique, le phénomène d'urbanisation s'est fortement et rapidement amplifié, laissant présager des conséquences inquiétantes sur la structure et le fonctionnement du système urbain. Parmi les nombreuses facettes de

la croissance urbaine (croissance du bâti, démographique, économique, etc.), nous nous concentrons sur la composante démographique du phénomène à partir du bâti.

La croissance migratoire est le fruit d'un transfert massif de populations venues de la campagne et attirées par la splendeur de la ville (voir la théorie des lumières dans Lututala, 1995) ou fuyant la région (et la condition) d'origine en espérant un avenir meilleur. À cet exode rural s'ajoute une croissance naturelle non négligeable en raison du jeune âge (entre 20 et 30 ans) des migrants, caractéristique fréquente de ce type de population. Cette croissance démographique qui affecte la ville se traduit dans l'espace par un processus d'urbanisation rapide dont les conséquences sur les autres facettes du phénomène sont multiples : développement anarchique du bâti, secteur informel, habitat spontané, etc. Dans le cadre de nombreux projets d'aménagement du territoire ou de planification urbanistique, les données démographiques permettent d'évaluer la population concernée par ce projet ou l'utilité du projet. Le décideur a donc souvent besoin de l'estimation la plus précise possible de la population cible. Dans les nombreux cas où la croissance démographique est rapide, en l'occurrence dans la plupart des pays en développement, les résultats des recensements exhaustifs sont rapidement dépassés (faible fréquence des recensements, lenteur pour la publication des résultats, qualité des résultats). Plus souple, plus rapide, économique en temps et en argent, l'enquête par sondage correspond mieux aux possibilités des villes à croissance démographique rapide. Sa réalisation exige un élément de travail précis : une base cartographique de la ville étudiée. La télédétection constitue alors une source de données particulièrement intéressante et elle est utilisée pour la constitution d'une base de sondage en raison de son observation continue et précise de la surface terrestre (Dureau et Barbary, 1991). L'utilisation de photographies aériennes en complément des images satellitaires permet de pallier les contraintes fixées par la résolution spatiale des satellites (Wilmet, 1996).

## 1.1. Objectif général et hypothèses de travail

L'objectif général de notre étude est d'étudier la croissance démographique d'une ville du Monde Arabe à partir du lien entre la morphologie urbaine et la population. Dans notre travail, nous tentons de tester les trois hypothèses suivantes :

- la segmentation des différents quartiers homogènes par image satellitaire (avec l'aide de quelques données ancillaires) est plus efficace que les segmentations habituelles (unités statistiques, etc.), la télédétection aide donc à l'élaboration d'une **typologie urbaine**;
- de plus, par cette technique, il est possible d'**évaluer l'ampleur de la croissance démographique** en milieu urbain par une estimation des densités de population à différentes dates; en effet, il existe un lien certain entre les caractéristiques du bâti sur l'image satellitaire et visibles sur les photographies aériennes, et le nombre d'individus y résidant, variant suivant le type de quartier, ce lien est fonction de nombreux éléments, comme par exemple l'association entre différents types de matériaux ;
- enfin, **les formes de la croissance démographique** varient suivant les types de quartiers, la disponibilité en espace libre, et le fait pour un quartier d'être sous l'autorité urbanistique d'une municipalité ou d'être localisé en dehors des limites administratives de la ville.

## 1.2. La zone d'étude

La zone d'étude de ce travail est l'agglomération de Marrakech (Maroc). Installée dans la plaine du Tensift, à 30 kilomètres des contreforts de l'Atlas, cette cité a profité d'une situation de carrefour des grandes pistes caravanières. Le plan de la ville fut édifié en moins d'un siècle (1070–1147) mais ne changea plus jusqu'au protectorat français. Trois principes fondamentaux en matière d'urbanisme vont alors permettre de conserver la ville traditionnelle : création d'une ville nouvelle pour les colons, séparation physique de la ville européenne et de la Médina, et conservation de l'aspect traditionnel de la Médina. À l'indépendance, les logements vides laissés par les français seront prisés par les notables de la Médina, et cette dernière accueillera une population naturelle et migrante importante. Enfin, les plus défavorisés vont s'installer dans les douars périphériques, forme particulière de bidonvilles. La ville compte aujourd'hui un peu moins d'un million d'habitants.

## 1.3. Travaux antérieurs

Deux techniques ont déjà été testées sur la base des relations entre les caractéristiques morphologiques et démographiques des habitations. La

première, testée par Green (1957) sur Birmingham (USA), en 1956, repose sur un dénombrement des unités d'habitation sur base de photographies aériennes. On multiplie alors le nombre de logements par le nombre moyen de personnes par logement issu du dernier recensement pour fournir une estimation de la population. Suite à cette méthode, des chercheurs comme Watkins et Morrow (1985) ont tenté d'évaluer la précision des résultats et ont alors été amenés à affiner cette méthode en tenant compte de façon plus importante de la relation morphologie-démographie. Le principe est celui du sondage stratifié : la création de sous-ensembles homogènes (appelés zones isophènes) permet de nuancer le nombre moyen de personnes par parcelle suivant le type de tissu urbain. L'application des méthodes de Green et de Watkins et Morrow à une ville des pays en développement exige des adaptations particulières à la problématique envisagée. En effet, la segmentation en zones isophènes n'est pas réalisable de la même manière si l'on travaille dans un pays industrialisé ou non. Le sens des zones isophènes varie également. Adeniyi (1983) a réalisé le même type d'étude sur la ville de Lagos (Nigéria). Il a travaillé par photo-interprétation pour les classes de bâti et par méthode de classification statistique pour les données démographiques.

À Marrakech, la mise en évidence des rues par rehaussement de contraste a permis d'identifier des îlots, même si de nombreuses difficultés se sont présentées en périphérie. Dans certaines villes ou parties de ville, comme à Kinshasa, l'absence de rues asphaltées ne permet pas d'identifier une zone isophène à un îlot.

De plus, le système urbain dans les pays en développement présente des typologies beaucoup plus complexes que celles rencontrées dans les pays européens. S'ajoutent aux quartiers de type européen une typologie traditionnelle (comme la Médina), des infrastructures particulières (comme les fermes collectives) et un ensemble de nouveaux types de quartiers traduisant la rapidité de la construction (l'habitat spontané en est un exemple).

## 1.4. Outils de travail

Nous disposons de plusieurs documents de travail :

- des cartes topographiques au 1 : 50 000 (NH-29-XXII révisées en 1983 par l'IGN France) et au 1 : 10 000 (réalisée en 1986 par la Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques);

- une couverture non-stéréoscopique des photographies aériennes verticales en noir et blanc datant de 1987 (1 : 7 500);
- une image HRV de SPOT : KJ 031–287 du 19–09–1991. SPOT 2, HRV 2, mode P+XS, niveau la (programmation spéciale), 2 048 sur 2 048 pixels (figure 1);

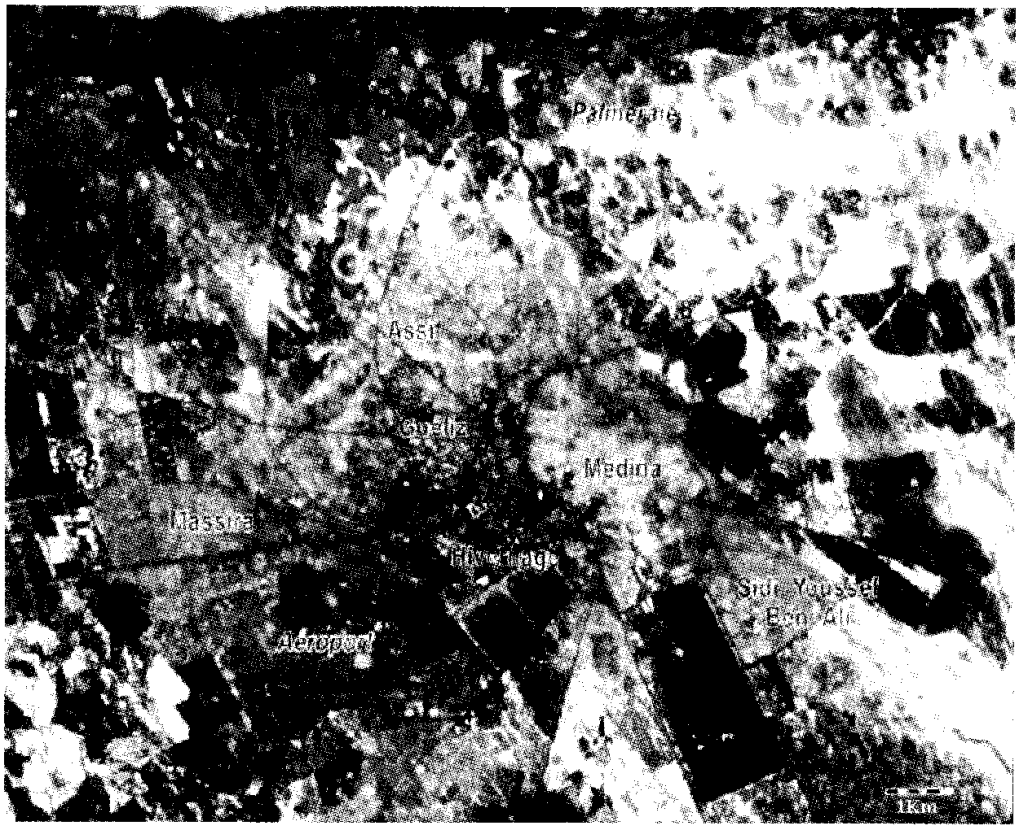



FIGURE 1 Image satellitaire HRV (P+XS) de SPOT de Marrakech en 1991. Satellite Image SPOT HRV (P + XS) of Marrakech in 1991 (voir photo couleur I à la fin de cette revue)

- une couverture des photographies aériennes obliques de la périphérie de la ville datant de 1996;
- une partie du recensement général de la population de Marrakech, information au niveau du district démographique en date de 1994.

## 1.5. Méthodologie

Dans un premier temps, nous essayerons de définir les critères de photo-interprétation utilisés pour la construction de notre clef d'identifica-

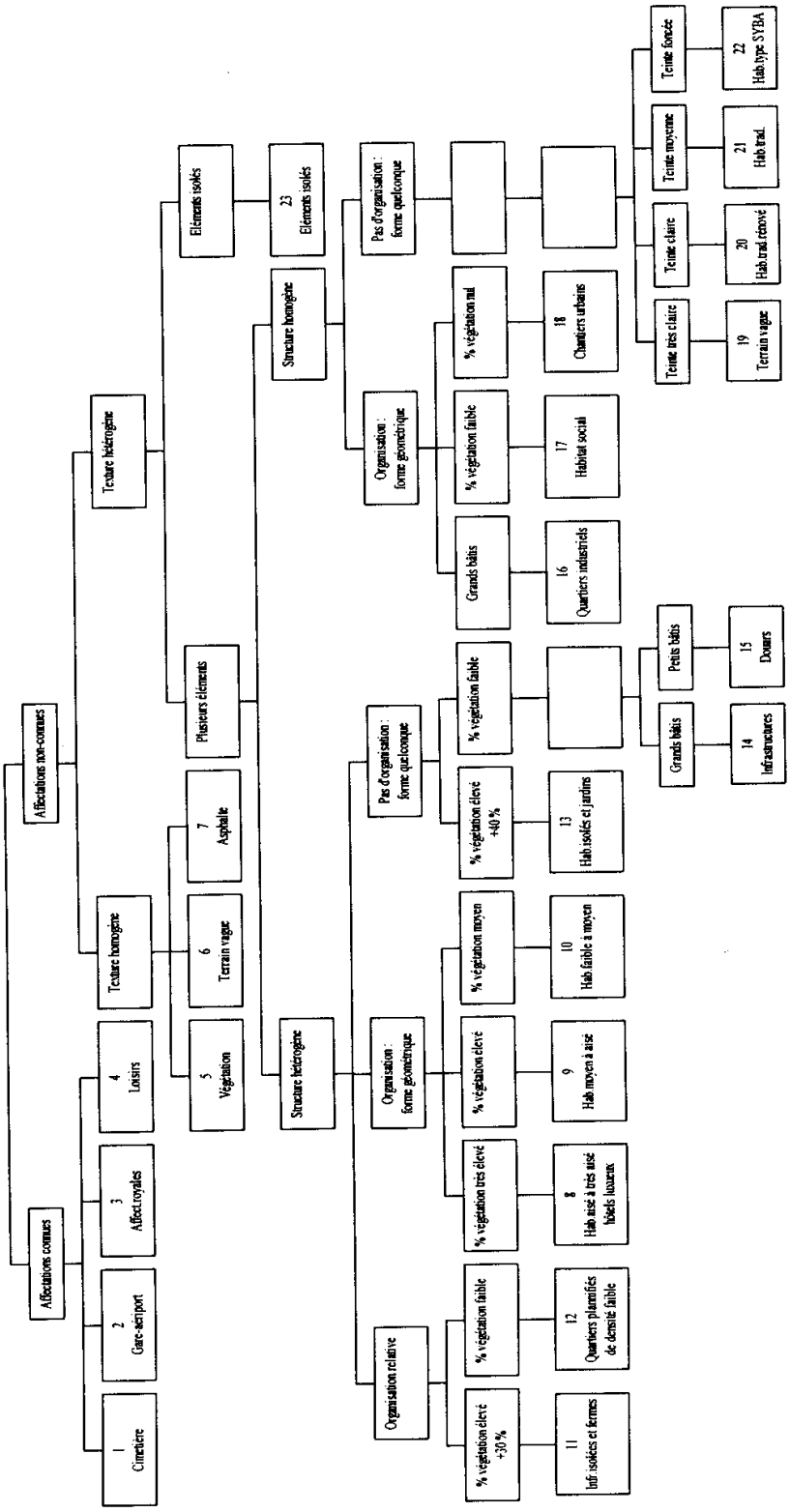



FIGURE 2 Clef d'identification du bâti Identification. Key of the buildings

tion afin de mettre en évidence la morphologie urbaine. Nous distinguerons ainsi 23 classes différentes de bâti. Ensuite nous allons tenter de réaliser le lien entre le bâti et la population en associant à chaque type de bâti une densité de population. Nous présenterons les nombreuses difficultés rencontrées. Enfin, l'aboutissement de ce travail est l'étude de la croissance démographique par une technique particulière qu'est l'utilisation des photographies aériennes obliques couplée à l'image satellitaire.

Au départ d'un support à une date précise, soit ici l'image satellitaire de 1991, nous avons complété la situation de 1991 par des photographies aériennes obliques actuelles (novembre 1996). Nous repérons et définissons sur les photographies les zones de changements afin de les reporter correctement sur l'image (travail sur un support informatique et papier, voir figure 3). Chaque nouvel îlot résultant du changement est alors classé suivant une typologie du bâti se rapprochant de celle établie plus haut et nous lui affectons une densité de population en fonction du taxon auquel nous l'avons rattaché. Nous obtenons ainsi une estimation de la population en 1996.

Les photographies aériennes obliques constituent un domaine particulier de la photo-interprétation. Leur axe de prise de vue fait un angle d'au moins dix degrés avec la verticale absolue. La plupart des photographies aériennes utilisées dans des études scientifiques sont prises avec un angle inférieur à 4° : ce sont les photographies aériennes verticales. De 4° à 10°, les photographies sont légèrement obliques et peuvent être redressées en laboratoire. La photographie oblique présente de nombreux avantages : elle peut être prise avec un matériel relativement simple et accessible, son aspect est plus agréable, plus familier, et son coût moins élevé. Face à tous ces avantages, l'utilisation des photographies obliques dans le milieu scientifique a été mis à l'écart en raison d'inconvénients comme l'inconstance de l'échelle et la présence d'angles morts (Carré, 1971 et 1972).

Deux principes de base pour les photographies obliques sous-tendent les techniques qui vont suivre :

1. trois points alignés en réalité sont disposés en ligne sur la photographie oblique;
2. une surface carrée sur le terrain est représentée par un trapèze sur la photographie oblique (les photographies verticales ont l'avantage de reproduire correctement le carré de départ).




8. Habitat de classe aisée à très aisée (hôtels luxueux)
9. Habitat de classe moyenne à aisée
10. Habitat de classe faible à moyenne
12. Quartiers planifiés de densité faible
13. Habitat isolés et jardins
15. Douars
17. Habitat social
20. Habitat traditionnel rénové
21. Habitat traditionnel
22. Habitat traditionnel de type SYBA
Echelle approximative : longueur de la zone encadrée n°15 = 1km

FIGURE 3 Exemples les plus représentatifs des classes de bâtis. Most representative examples of building classes (voir photo couleur II à la fin de cette revue)

Au vu des données utilisées, cette recherche présente la particularité de travailler sur des documents à échelles très variables. C'est pourquoi il fut indispensable de trouver un objet commun aux différentes échelles et sur lequel nous pouvions baser notre étude. Nous avons choisi un objet urbain de la taille d'un îlot. Wilmet (1996) le définit comme un espace compris entre les voiries qui en assurent l'accès. Nous reprenons donc une zone où l'agencement (structure) des différents éléments permettent d'aider à l'interprétation.

## 2. L' ÉTUDE DE LA MORPHOLOGIE URBAINE

Avant d'aborder l'étude d'une ville, nous sommes confrontés à un premier problème : la définition même de l'agglomération sur laquelle nous allons travailler. Ce concept présente des définitions fort différentes suivant les critères choisis et le point de vue de la personne qui réalise le travail. Dans notre cas, nous avons choisi quatre critères directement décelables par la télédétection satellitaire (densité importante du bâti, structuration du réseau routier, nature de l'occupation du sol et la forme la plus compacte possible de l'agglomération) auxquels nous avons ajouté un critère administratif (appartenance à une des cinq municipalités de Marrakech) et un critère économique (lieux isolés, liés à la ville par des relations économiques, comme un club de vacances). Ce périmètre d'agglomération est tracé par image-interprétation (de la même manière qu'une photographie aérienne) au départ de ces différents critères et de notre connaissance de la ville. Nous n'avons effectué aucun traitement informatique.

Après avoir défini la zone de travail, nous l'avons segmentée en zones homogènes au point de vue de la teinte, de la texture et de la structure visibles sur l'image satellitaire. Nous avons élaboré alors une typologie précise des îlots de la ville, permettant de faciliter le lien direct avec la population : regroupement des zones sans habitat, des îlots d'habitats informel, traditionnel, moderne, etc. Cette classification des différents types d'habitat a été réalisée au niveau de l'îlot et non du pixel par image-interprétation.

### 2.1. Les critères de photo-interprétation

À la lecture de nombreux travaux (Baudot, 1994; De Keersmaecker, 1989 citée par Wilmet, 1996) on a montré l'insuffisance des résultats d'une classification automatique du bâti (dirigée ou non-dirigée). C'est spécialement le cas pour le milieu urbain, exigeant une précision importante au départ de données hétérogènes. Face à ce constat et face à la faiblesse de nos résultats par classification automatique, nous avons voulu revenir à une technique que les spécialistes suivaient jusque dans les années 1970 : la photo-interprétation. Comme le souligne très justement Burger (1957, p. 12) dans son ouvrage sur l'utilisation des photographies aériennes pour l'aménagement du territoire, l'interprétation se base sur une analyse des éléments pertinents de la photographie aérienne. Suivant les procédés mis en oeuvre, on peut obtenir par déduction des renseignements qui ne sont pas

visibles de manière directe sur la photographie. Le résultat des traitements réalisés sur la photographie aérienne dépend de l'expérience et de la culture générale des personnes, de leur capacité à comprendre les multiples aspects géographiques et humains de la représentation aérienne de la terre. L'intuition doit être vérifiée par une analyse comparative et déductive.

La première phase du travail consiste donc à sélectionner des critères qui seront suffisamment discriminants pour être opérationnels en milieu urbain. Dans le cas qui nous préoccupe, certains critères concernent plus particulièrement l'îlot, d'autres par contre ciblent les éléments constitutifs de cet îlot.

Cette photo-interprétation a été réalisée au départ à partir de l'image satellitaire (on parle alors d'image-interprétation). Pour plus de facilité et une meilleure vue d'ensemble (importance de la comparaison), le travail d'image-interprétation a été effectué à partir d'une impression de l'image satellitaire de Marrakech en composition colorée HRV (P+XS3, P+XS2, P+XS1) de SPOT. Les photographies aériennes (verticales et obliques) et les vérifications sur le terrain viendront par la suite aider le chercheur à corriger cette classification par photo-interprétation.

### *2.1.1. Critères de l'image-interprétation choisis*

A) Forme horizontale ou contour des objets

Le principe est que les objets naturels sont souvent irréguliers tandis que les éléments anthropiques adoptent des courbes douces ou des droites rectilignes.

B) Grandeur ou taille

Nous traiterons les dimensions relatives aux objets environnants. Nous formerons deux groupes d'îlots à partir de ce critère : d'une part, les éléments isolés, de petite taille, qui seront identifiés à un bâtiment ou à une fonction particulière et, d'autre part, l'ensemble des autres îlots, de taille variable. Il arrive donc qu'un seul bâtiment de grande taille forme un îlot.

C) Teinte ou ton

En règle générale, l'objet paraît très clair quand la lumière est fortement réfléchie dans tout le spectre. Toutefois, un même objet peut apparaître sous d'autres teintes car la réflexion dépend de la nature de la surface, de la texture et de l'angle d'incidence. On utilisera le critère de teinte pour distinguer un objet par contraste par rapport à son environnement.

D) Texture

D'après Wilmet (1996), la texture correspond à l'agencement spatial de pixels de même valeur numérique ou jugée comme tel par un processus de décision. Tout comme la teinte, on parlera également de texture générale au niveau de l'îlot. Une texture homogène caractérisera les zones formées de pixels semblables. On parlera de texture hétérogène pour les autres. Ce critère nous permet de distinguer des îlots qui présentent la même teinte générale mais dont la texture est différente.

E) Structure

Dans ce cas-ci, d'après le même auteur, les pixels peuvent avoir une valeur différente mais ils forment une topologie particulière au sein de l'image. Ainsi un îlot qui présente une succession périodique de pixels différents sera considéré comme homogène. Ce critère constitue l'avantage le plus puissant qu'apporte l'image-interprétation par rapport à la classification automatique basée uniquement sur un critère radiométrique. Alors qu'ils ont une valeur radiométrique moyenne semblable, certains quartiers diffèrent totalement par une organisation visible par image-interprétation. L'agencement des pixels devient un critère déterminant pour identifier certains types d'îlots. Au niveau des éléments qui composent l'îlot, une attention particulière concerne le réseau routier. Sa structuration et sa densité apporteront de la même manière une information discriminante. Il est important de souligner que le rapport entre la taille de l'objet et la résolution du satellite va influencer d'une manière non-négligeable la structure perçue sur l'image. Ainsi, en raison de la taille réduite des éléments du bâti en Médina et de l'espace faible entre ceux-ci, la structure d'un îlot d'habitat traditionnel sera considérée comme homogène. À l'opposé, dans le quartier de l'hivernage, les pixels se structurent de manière hétérogène, parce que dans ce quartier, les éléments urbains ont une dimension importante et qu'ils sont facilement discernables les uns des autres.

F) Environnement

Le critère de l'environnement prend en compte un ensemble de relations entre l'objet et ses voisins. Il arrive même qu'il soit possible de soupçonner l'existence d'objets invisibles comme tels : par exemple, les fils électriques à la vue de pylônes. Ici aussi, nous devons faire appel à nos connaissances préalables.

G) Les affectations connues

Dans n'importe quelle ville, il est des lieux qui sont connus de tous et reconnaissables aussi bien sur une carte que sur une image satellitaire. Il s'agit des cimetières, des domaines militaires, des propriétés royales, etc.

## 2.2. La clef d'identification

Le principe d'une clef d'identification est assez simple rendant ainsi son utilisation aisée. Au départ d'un ensemble dans lequel nous souhaitons distinguer des classes, les critères d'identification vont intervenir progressivement suivant un procédé dichotomique. L'ordre d'intervention de ceux-ci se révèle extrêmement important. Ainsi, à chaque niveau, nous serons confrontés à un carrefour, nous devrons donc faire un choix et chaque choix erroné influencera l'identification des classes. Au départ des critères exposés ci-dessus, nous avons construit petit à petit un schéma arborescent dont les nombreuses ramifications nous permettent d'affiner progressivement le niveau de l'identification. Finalement, 23 classes différentes composent notre classification (figure 2) privilégiant ainsi la précision par rapport à la simplification habituelle des classifications (on conserve couramment 6 à 8 classes différentes pour une lecture adéquate).

La première ramification permet de traiter différemment les îlots dont les affectations sont bien connues de tous. L'aéroport, la gare, des cimetières, les différentes affectations royales ainsi que les grandes infrastructures touristiques (les grandes concentrations d'hôtels) et de loisirs se retrouvent sur la plupart des plans ou cartes de la ville. Le domaine militaire quant à lui présente la particularité de n'être pas souvent répertorié sur les plans et cartes. Ses limites demeurent imprécises voire sont occultées pour des raisons stratégiques. C'est la raison pour laquelle il n'a pas été considéré comme connu. Cette première ramification nous permet ainsi d'affecter correctement ces objets particuliers.

La deuxième ramification concerne l'homogénéité de la texture de l'îlot. Ainsi d'une part, tout taxon urbain sera traduit visuellement par une hétérogénéité de la texture et d'autre part une texture homogène caractérisera un îlot uniforme comme une zone de végétation, d'asphalte ou un terrain vague. Ces trois types d'îlots sont distingués suivant leur teinte.

À ce stade, nous avons décidé de traiter différemment les îlots représentant des éléments isolés (troisième ramification). De taille réduite (moins de 10 ha). ils ne sont caractérisés que par un seul bâtiment, qu'une seule infrastructure bien visible sur l'image satellitaire en raison de son détachement par rapport aux îlots avoisinants d'un même quartier, les bâtiments d'une importante entreprise par exemple.

La quatrième ramification constitue sans doute l'apport le plus important de l'image-interprétation pour ce genre d'étude : la structure. D'un côté, un îlot sera caractérisé par une structure globale homogène lorsque l'association de différentes textures est organisée de manière uniforme (petites

taches de pixels). De l'autre côté, nous percevrons d'importantes taches ou des lignes de pixels reflétant une structure globale hétérogène.

La cinquième ramification concerne l'organisation et la forme de l'îlot. En matière d'urbanisme, l'action de planification se traduira par un réseau structuré de la voirie. Ces deux dernières ramifications se révèlent extrêmement importantes dans la distinction des types d'habitat. Elles séparent les quartiers d'habitat traditionnel des quartiers d'extension ou européanisés. Suivant ces deux dernières ramifications, les critères de distinction qui vont suivre seront différents. Pour les îlots dont la structure globale est hétérogène, c'est la proportion relative de végétation qui discrimine le statut de l'îlot. Ce critère socio-économique (basé sur l'identification de quartiers aisés au départ des jardins domestiques identifiés par leur type de végétation) a déjà largement fait ses preuves dans de nombreux travaux. De plus, nous avons ajouté un critère de taille du bâti permettant de catégoriser directement les grandes infrastructures de la ville dans une classe à part (grands bâtis).

Les deux critères ci-dessus se retrouvent lorsque la structure globale est homogène et que la forme est géométrique. Si le tracé de l'îlot présente une configuration quelconque, nous avons choisi la clarté de la teinte comme critère de distinction. Ce critère reflète les matériaux utilisés et l'état général du bâti. Ainsi, dans la Médina, un Ryiad (bâtiments d'inspiration andalouse qui entourent les jardins intérieurs) (Paccard, 1979) rénové sera traduit par une signature spectrale particulière (valeurs radiométriques faibles). La construction de notre clef dichotomique (figure 2) en insérant progressivement des critères d'image-interprétation a permis de distinguer 23 classes de bâti (figure 3). Nous disposons de cette manière d'un outil de base pour réaliser le lien entre les constructions et la population, ceci en le nuançant suivant les types de quartiers établis précédemment.

## 3. L'ÉTUDE DE LA POPULATION

À chaque type de quartier est associée une densité de population donnée par le recensement de 1994 sur base de la classification en quartiers-types (tableau I). Nous aboutissons ainsi, par une extrapolation différenciée suivant les types de quartier, à un chiffre de population, pour 1991, sur l'ensemble de la ville.

TABLEAU I Densités de population suivant le type de bâti à Marrakech. Population densities corresponding to the type of building in Marrakech

| *Type de bâti* | *Densité [hab./ha]* | *Surface totale[hab.]* | *Population totale [100hab.]* | *Pop. Corrigée [100hab.]* |
|---|---|---|---|---|
| 1 : Cimetière | *0* | 61,1 | 0 | |
| 2 : Gare Aéroport | *3,4* | 168,8 | 6 | |
| 3 : Affectations royales | *3,4* | 532,2 | 18 | |
| 4 : Loisirs | *3,4* | 145,1 | 5 | |
| 5 : Végétation | *0* | 39,6 | 0 | |
| 6 : Terrain vague | *0* | 319,8 | 0 | |
| 7 : Asphalte | *0* | 3,1 | 0 | |
| 8 : Hab. aisé à très aisé | 10,6 | 78,4 | 8 | |
| 9 : Hab. moyen à aisé | 93,15 | 201,4 | 19 | |
| 10 : Hab. dens. faible à moyen | 289,5 | 118, 5 | 130 | |
| 11 : Infrastructures isolées | 7,7 | 302,7 | 23 | 21 |
| 12 : Hab. planif. dens. faible | 99,9 | 201,9 | 202 | 181 |
| 13 : Hab. dispers. et jardins | 3,4 | 604,0 | 20 | |
| 14 : Infrastructures | 182 | 826,5 | 1504 | |
| 15 : Douars | 343,7 | 381,2 | 1310 | |
| 16 : Bâtis industriels | 6,2 | 160,2 | 10 | |
| 17 : Hab. social | 206,7 | 473,8 | 979 | |
| 18 : Chantiers urbains | 31,6 | 210,0 | 66 | 60 |
| 19 : Terrain vague | *0* | 193,0 | 0 | |
| 20 : Hab. trad. rénové | 452,9 | 174,8 | 791 | 710 |

| *Type de bâti* | *Densité [hab./ha]* | *Surface totale[hab.]* | *Population totale [100hab.]* | *Pop. Corrigée [100hab.]* |
|---|---|---|---|---|
| 21 : Hab. trad. peu rénové | 451,2 | 346,1 | 1562 | 1402 |
| 22 : Hab. trad. de type SYBA | 731,2 2 | 178,6 | 1306 | 1172 |
| 23 : Eléments isolés | *3,4* | 30,0 | 1 | |
| Autre | 127,1 | 70,7 | 90 | |
| Total | | | 9 389 | 8 984 |

Les densités de population sont mesurées à partir de données d'un recensement. Nous avons tenu à garder la même méthodologie pour toutes les classes représentées, malgré certaines contradictions. Ainsi, la densité de l'habitat faible à moyen (10) est supérieure à celle de la classe de l'habitat social (17).
*valeur estimée*
(réalisé par S. Henry à partir des données du Recensement Général de la Population de Marrakech de 1994, 1997).

L'étude de la population se basant sur la configuration du bâti de 1991, mais au départ de données démographiques de 1994, nous devons dans certains cas rectifier nos données avant d'obtenir notre chiffre de population à une date précise. Nous admettons en effet que certaines classes de bâti ne croissent que par extension, d'autres par contre (comme dans la Médina) se sont densifiées. Nous devons donc absolument corriger nos chiffres par un modèle de croissance de population. En démographie, les modèles de croissance de la population sont régulièrement utilisés dans le but d'actualiser un chiffre de population. Ici, dans un but méthodologique, nous avons choisi le modèle de croissance de population le plus simple, une croissance exponentielle de la population pour obtenir la population de 1991.

Au départ des 23 classes de bâti, nous avons sélectionné au Ministère de la Population un ou plusieurs districts démographiques représentatifs de chaque classe. Les districts choisis sont les plus homogènes possible et sont localisés sur l'ensemble de la ville afin que chaque classe de notre typologie du bâti soit couverte par au moins un district démographique. Malheureusement, le critère du tracé des districts au Ministère de la Population ne repose pas sur l'homogénéité du bâti mais sur une moyenne du nombre de ménages (plus ou moins 200). Si, pour les classes les mieux représentées, nous n'avons eu aucun problème pour trouver des districts associés, par contre, certains ne correspondaient pas uniquement à une seule classe. Pour quelques classes tels les éléments isolés, la végétation, ou encore les terrains vagues, l'association îlot-district n'était pas réalisable.

Après avoir calculé les densités de population de chaque type de districts, nous multiplions alors ces densités par la surface de tous les îlots appartenant au même type répartis sur l'ensemble de la zone étudiée (surface calculée dans un premier temps en pixels). Pour chaque classe, nous obtenons ainsi un chiffre de population. Remarquons que la surface prise en compte recouvre la voirie, le bâti, et les espaces nus de l'îlot pour être accordée au calcul de la surface du district démographique. Il nous reste à choisir d'extrapoler nos données au départ de la classification du bâti ou de la correction de celle-ci. La méthode présentée dans ce travail, bien que faisant appel à l'imagerie satellitaire, n'exclut pas (bien au contraire) l'utilisation de données ancillaires et de séjours sur le terrain. Dans ce type d'approche, une bonne connaissance de la zone d'étude est indispensable pour éviter les erreurs d'interprétation visuelle de l'image. Par contre, nous pensons qu'un court séjour sur le terrain combiné avec l'étude de

l'image satellitaire nous pouvons obtenir un chiffre de population proche de la réalité. C'est pourquoi nous avons réalisé cette extrapolation au départ de la correction de la classification.

Si ce procédé paraît un peu simpliste, dans les faits de nombreuses difficultés se présentent. La correspondance îlot-district n'est pas aussi facilement réalisable pour toutes les classes. Cinq classes (deux types de terrains vagues, la végétation, les zones d'asphaltes et les cimetières) sont automatiquement jugées sans population. Elles ne trouvent donc pas de correspondance au niveau des districts ou sont jumelées avec d'autres classes dans un même district. Nous leur avons accordé une densité nulle.

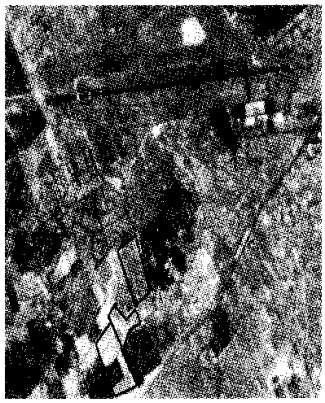
Ensuite, certaines classes sont représentées par plusieurs districts dont la fourchette de valeurs s'avère parfois très étendue. Les cas de la classe « infrastructure » et la classe « douar » en sont de bons exemples. Un douar est un cercle de tente mais il a pris au Maroc le sens administratif de village, d'après Pascon (1983). Dans notre étude, le terme « douar » doit être compris comme une croissance d'habitat spontané autour d'un noyau d'habitat rural, à la périphérie de la ville. Ces deux types de classes présentent en effet des variétés de forme particulière dans l'espace. La densité choisie comme représentative est alors la moyenne de nos données.

En l'absence d'information cohérente, nous avons dû estimer la densité de population de certaines classes par comparaison avec les données existantes.

Quelques classes ne sont constituées que de quelques îlots dans toute l'agglomération, réduisant ainsi les possibilités de trouver des données vraiment exploitables. Elles n'ont pu être représentées que par une seule donnée, résultats statistiquement peu acceptables. Enfin, bien heureusement, cinq classes présentent plusieurs données suffisamment homogènes. Le lecteur pourrait être étonné de cette pauvreté de résultats tout à fait fiables (5 classes sur 23), mais il est important de préciser que ces cinq classes regroupent l'habitat social, l'habitat traditionnel rénové, l'habitat traditionnel peu rénové, l'habitat traditionnel de type SYBA (Sidi Youssef Ben Ali, le plus important et le plus ancien douar périphérique) et les quartiers planifiés de densité faible, soit 49 % de la population totale (444 500 hab.).

Nous obtenons une population de 898 400 hab. pour l'agglomération de Marrakech en 1991. Les six classes habitées par près d'une centaine de milliers d'habitants chacune regroupent la population la moins favorisée, à l'exception des infrastructures, classe la plus représentée couvrant une





Echelle approximative: longueur de la piste d'aéroport : 3 km

Les zones encadrées en noir sur l'image satellitaire de 1991 étaient couvertes par de la végétation. Sur la photographie aérienne oblique (1996), nous pouvons apercevoir la progression du bâti ou la présence d'infrastructures routières présageant de nouvelles constructions.

FIGURE 4 Exemple de mise à jour de l'image satellitaire grâce à une photographie aérienne oblique. Example of the upstanding of the satellite image based on an oblique aerial photograph (voir photo couleur III à la fin de cette revue)

grande partie de la ville. Nous pouvons comparer nos résultats à trois données, nous permettant d'avoir une idée de la qualité des nôtres. Au départ d'estimation de population en fonction de la densité des bâtiments évaluée à partir de photographies aériennes, Baudot (1994) a estimé la population potentielle de Marrakech à 969 650 hab. soit 71 250 h de plus que nous pour la même année. Le recensement nous annonce un chiffre officiel de 672 506 hab. en 1994, soit 328 400 hab. de moins que nos chiffres de 1991 sur lesquels nous avons appliqué un modèle de croissance. Une dernière estimation de la population concerne la Médina et nous a été communiquée par les urbanistes de la préfecture de Marrakech-Médina. Ceux-ci obtiennent une population de 189 367 hab. De notre côté, si nous calculons le nombre d'individus au départ des îlots appartenant à la Médina, nous obtenons une population de 194 500 hab. en 1994, soit une différence tout à fait acceptable de 5 000 hab. Si les recensements ont tendance à sous-estimer les valeurs du nombre d'individus et si les estimations tendent plutôt vers une surestimation des données réelles en calculant la capacité d'accueil du bâti (population potentielle), le véritable chiffre de population doit se situer dans cette fourchette de 900 000 hab. à 970 000 hab.

## 4. LA CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE

Nous disposons jusqu'à présent de la morphologie urbaine à une date ainsi que d'une estimation de la population à cette même date. Dans le but d'analyser la croissance démographique de Marrakech, nous avons élaboré une méthode simple et rapide nous permettant d'estimer de façon la plus précise possible la population actuelle (novembre 1996). Cherchant des points de repères visibles à la fois sur les photographies et sur l'image satellitaire, nous avons retracé sur l'image les îlots de bâti nouvellement construit ou ayant subi des changements importants (figure 4). Il est clair que la construction d'un seul bâtiment ne peut être prise en compte par le chercheur. Dans notre cas, nous avons photographié à bord d'un biplace de tourisme la périphérie de Marrakech. Soixante-deux clichés couvrent les changements du bâti visibles du haut d'un avion. La partie ouest est mieux représentée grâce à la position avantageuse du soleil en cette fin de journée. Le logiciel ERDAS nous permet par la suite de superposer les îlots de changement de 1996 à la situation de 1991, nous livrant ainsi la morphologie urbaine actuelle.

La même méthode que précédemment est alors appliquée sur chaque îlot : nous les affectons à une classe de bâti à laquelle est associée une densité de population afin d'obtenir un chiffre de population partiel (en effet, le procédé mis en œuvre est considéré comme un test en raison de l'omission de certaines zones de changement) pour 1996 (novembre). On obtient ainsi une estimation de la population en 1996 (tableau II).

TABLEAU II Populations supplémentaires à Marrakech. Supplementary populations in Marrakech

| *n° îlot* | *Classe* | *Densité [hab./ha]* | *Surface[ha]* | *Population [100hab.]* |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | 99,9 | 5,8 | 6 |
| 2 | 15 | 343,7 | 11,8 | 41 |
| 3 | 15 | 343,7 | 1,6 | 5 |
| 4 | 15 | 343,7 | 7,1 | 24 |
| 5 | 15 | 343,7 | 0,7 | 2 |
| 6 | 9 | 93,15 | 27,1 | 25 |
| 7 | 25 | 3,4 | 1,1 | 0,04 |
| 8 | 26 | 0 | 9,5 | 0 |
| 9 | 15 | 343,7 | 10,3 | 35 |

| *n° îlot* | *Classe* | *Densité [hab./ha]* | *Surface[ha]* | *Population [100hab.]* |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 2 4 | 99,9 | 0,16 | 0,1 |
| 11 | 16 | 6,2 | 80,3 | 5 |
| 12 | 16 | 6,2 | 54,9 | 3 |
| 13 | 9 | 93,15 | 25,7 | 24 |
| 14 | 12 | 99, 9 | 80,9 | 81 |
| 15 | 15 | 343,7 | 8,6 | 30 |

Même procédé pour les 35 îlots restants.
*Les classes 24, 25 et 26 n'étaient pas présentes dans la situationantérieure.*
*24 : lotissements prévus par l'Office du Haouz sur des terres irriguées.*
*25 : anciennes Qasba ("palais fortifié, caserne, quartier militaire" d'après Pascon, 1983).*
*26 : fabrique de briques.*
(réalisé par S. Henry, 1997).

## 5. DISCUSSION

Étudier l'entièreté d'une ville de près d'un million d'habitants pose un problème de support de travail auquel répond adéquatement la télédétection. Elle permet les comparaisons et rapprochements entre quartiers éloignés, ainsi que l'obtention d'information sur des quartiers peu ou pas accessibles (douars où la sécurité est précaire). Par contre, la résolution de l'image HRV (P+XS) de SPOT n'apporte pas une identification automatique et sans équivoque, spécialement pour les tissus urbains serrés comme ceux de la Médina.

Travailler au niveau de l'îlot (et non du pixel) revient à choisir comme base de travail un élément identifiable sur tous les supports (image satellitaire, photographies aériennes verticales et obliques, cartes topographiques, etc.) grâce aux éléments délimitant les îlots tels que la voirie ou les cours d'eau. En effet, en milieu urbain, la détermination du type de quartier nécessite la prise en considération d'un espace suffisamment important. Ainsi, les méthodes de photo-interprétation apportent plus de précision en tenant compte de l'information structurale de l'îlot.

Si le principe habituel d'une classification est de simplifier nos données en quelques types représentatifs, la clef d'identification permet de diversifier les classes pour permettre de préciser d'avantage les densités de population. La définition précise des critères de photo-interprétation assure les résultats de la méthode. Remarquons que le lien entre les constructions et le nombre d'habitants demeure moins évident dans certains quartiers dont il faudrait réaliser un relevé exhaustif. De plus, dans l'ensemble de la ville,

les îlots ne sont pas parfaitement homogènes. Dans les bâtis traditionnels, plusieurs habitations ont été transformées en hôtels typiques et bon marché. La consommation d'espace urbain est différente suivant les disponibilités offertes par l'agglomération. Ainsi, pour les douars, la variabilité des concentrations de bâti traduit la disponibilité en terrain acceptant une population informelle. Nous pouvons regretter que nous n'avons pas eu les moyens d'appliquer à une autre ville du Monde Arabe notre clef d'identification. Pour qu' elle soit valable, elle devrait couvrir l'ensemble des types de bâtis présents dans le Monde Arabe.

Travailler à partir du bâti pour avoir un chiffre de population nous a permis d'obtenir un chiffre de population effective (en prenant en compte tous les résidents à Marrakech et pas seulement ceux qui y sont domiciliés) et potentielle (en englobant les bâtis vides dans notre étude). L'avantage de calculer le nombre d'habitants vivants réellement tous les jours dans la ville de Marrakech est utilisé dans les études tenant compte de la population (comme les études de consommation). Par contre, les possibilités de vérification des résultats démographiques font cruellement défaut. Pour cette étude, nous ne disposions que de trois chiffres de population à des dates différentes. Notre étude a également souffert du nombre de districts démographiques disponibles. La difficulté consiste à trouver des districts homogènes composés seulement d'une classe de notre typologie.

Enfin, les prises de vues obliques (avec un bon appareil photographique amateur, un avion de tourisme, etc.) sont faciles et rapides à prendre. Le coût est incomparable avec les photographies aériennes verticales. Bien sûr, la précision des résultats obtenus par la comparaison avec une image satellitaire ou une couverture de photographies aériennes verticales est fort différente de celle obtenue par les photographies obliques, mais tout dépend de l'information dont on a réellement besoin.

## 6. CONCLUSION

Notre étude ne nous permet pas d'affirmer que notre échantillon est représentatif du phénomène de croissance démographique à Marrakech mais il est relativement révélateur de la méthode à utiliser. Elle consiste dans un premier temps à réaliser une classification du bâti sur l'ensemble des îlots d'une agglomération, selon une typologie par image-interprétation. Nous proposons ensuite d'associer une densité de population à une

date précise. Le travail par image-interprétation présente deux avantages : d'une part, l'image satellitaire permet une vue d'ensemble d'une agglomération et d'autre part, le chercheur par l'image-interprétation, peut ajouter une information structurale à sa typologie. Enfin, la méthode permet de compléter, par des photographies obliques récentes, un support satellitaire d'une année antérieure. Nous pouvons tracer les îlots de changements sur le support et avoir ainsi la configuration de l'agglomération actuelle. Nous classons ensuite les îlots selon une typologie du bâti à laquelle nous avons associé une densité de population. Le résultat nous donne un chiffre de population actuel, base de travail pour de nombreuses autres études complémentaires. La simplicité, la rapidité et le faible coût des photographies aériennes obliques invitent le lecteur à s'intéresser à cette (nouvelle) technique. Toutefois, il est important de préciser que l'hypothèse d'étudier les formes de la croissance démographique (nombre d'hommes, de femmes, d'individus de plus de 65 ans, etc.) n'a pu être vérifiée en raison de notre source d'information (l'image satellitaire). Par contre, grâce à la télédétection nous avons eu l'occasion de mettre en évidence les phénomènes d'extension urbaine, nous regrettons d'avoir été limités par la nature de nos sources de données temporelles et de n'avoir pu étudier le phénomène de densification urbaine.

Nous pouvons donc conclure que notre étude nous a permis d'évaluer une partie de la croissance démographique. Le manque de données et la différence de nature entre 1991 et 1996 ne nous ont pas donné la possibilité d'analyser le phénomène de densification sous toutes ses formes. Nous pensons cependant que notre travail ouvre des portes pour l'utilisation de la photo-interprétation en milieu urbain par la construction d'un schéma arborescent ayant comme unité de base l'îlot. Le principal avantage est la prise en considération de la structure pixellaire dans l'élaboration d'une typologie du bâti. Soulignons également l'utilisation des photographies obliques dans un travail scientifique dans le but de compléter une situation antérieure. La mise à jour des développements de la frange péri-urbaine est facilitée par cette technique. Enfin, notre étude confirme le lien entre le bâti et la population ouvrant ainsi le champ d'action de la télédétection également au domaine démographique.

## Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier Y. Baudot pour ses conseils et pour nous avoir fait partager son expérience de terrain, ainsi que J. Wilmet pour son encadrement.

## Références

Adeniyi, P.O. (1983) An aerial photographic method for estimating urban population. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, n° 4, p. 545–560.

Baudot, Y. (1994) Télédétection aérospatiale et analyse géographique de la population des villes des PVD. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 351 p.

Burger, A. (1957) Photographies aériennes et aménagement du territoire. Dunod, Paris, 128 p.

Carré, J. (1971) Lecture et exploitation des photographies aériennes. Eyrolles, Paris, tome 1, 213 p.

Carré, J. (1972) Lecture et exploitation des photographies aériennes. Eyrolles, Paris, tome 2, 212 p.

CRU (1969) Photographie aérienne et urbanisme. Comité réseau universitaire, Paris, 244 p.

De Keersmaeker, M.-L. (1989) Potentialités de la télédétection satellitaire pour l'étude de la structure interne des villes: Applications au cas de Bruxelles. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, 479 p.

Dureau, F. et Barbary, O. (1991) L'enquête par sondage sur image satellite : une solution pour améliorer l'observation des populations citadines. Communication aux journées d'étude sur la qualité de l'information dans les enquêtes, Télécom Paris, ASU (Administration scolaire et universitaire), CNRS, Paris, 13–14 juin 1991, 31 p.

Green, N.E. (1957) Aerial photographic interprétation and the social structure of the city. Photogrammetric Engineering, vol. 23, p. 89–99.

Lututala M.B. (1995) Les migrations africaines dans le contexte socio-économique actuel, une revue critique des modèles explicatifs *in* H. Gérard et V. Piché (eds.) La sociologie des populations, PUM/AUPELF, Montréal, p 391–416.

Paccard, A. (1979) Le Maroc et l'artisanat traditionnel islamique dans l'architecture. Volume 1, Édition Atelier 74, 507 p.

Pascon, P. (1983) Le Haouz de Marrakech. Edition CURS (Centre universitaire de Recherche scientifique), CNRS et INAU (Institut national d'aménagement et d'urbanisme), Rabat, 392 p.

Watkins, J.F. et Morrow, H.A. (1985) Small area population estimates using aerial photography. Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing, vol. 51, n° 12, p. 1933–1935.

Wilmet, J. (1996) Télédétection aérospatiale. Méthodes et applications. Sides, Fontenay-sous-Bois, 300 p.