Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 249–262
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DE L'IMAGE-INTERPRÉTATION À L'ESTIMATION DE LA POPULATION DE YAOUNDÉ AU CAMEROUN

RAOUL NANCI YOSSI[*1], EMMANUEL TONYE[†1], ALAIN AKONO[‡1] et JEAN-PAUL RUDANT[2].

[1] *Laboratoire d'Électronique et de Traitement du Signal, École Nationale Supérieure Polytechnique Université de Yaoundé I, Boîte Postale 8390, Yaoundé, Cameroun.*
Téléphone & télécopieur : (237) 22 45 47
Courriel [(,†,‡)] : rnanci@yahoo.com ; aakono@msn.com ; tonyee@hotmail.com*

[2] *Université de Marne-la-Vallée, Institut Francilien des Géosciences, Laboratoire des Géomatériaux 5, boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée, France*
Téléphone : (33)(0)1 49 32 90 72 ; télécopieur : (33)(0)1 49 32 91 37
Courriel : jean-paul.rudant@univ-mlv.fr

(soumis le 26 mars 2002 ; révisé le 2 juillet 2002 ; accepté le 28 octobre 2002)

La profusion des données urbaines à l'heure actuelle n'empêche pas les besoins de production d'informations fiables et à jour dans bien des démarches de gestion ou de planification urbaine. En effet, les données collectées par les organismes nationaux, comme les recensements exhaustifs de population, exigent de tels moyens techniques, financiers et humains qu'une périodicité satisfaisante (bisannuelle voire quinquennale) ne peut être obtenue. Le temps nécessaire à l'exploitation des données est trop long pour permettre de réaliser des études à brève échéance, telles les études de migration par exemple. La rapidité des transformations urbaines et les déficiences de l'information de base rendent les populations des villes sub-sahariennes particulièrement difficiles à observer. Cette situation conduit à rechercher des systèmes d'observation originaux, adaptés aux formes d'urbanisation ainsi qu'aux contextes locaux d'information et de moyens financiers. Dans cette étude, une image radar à synthèse d'ouverture (RSO) est utilisée de manière complémentaire à une image optique, pour déterminer les caractéristiques urbaines (délimitation spatiale, différentiation de l'occupation des sols, statistiques démographiques) de la ville de Yaoundé au Cameroun. En mettant en œuvre une base de données des paramètres de texture pour 23 clés d'identification, l'estimation de la population de la ville de Yaoundé a été faite. Elle a permis d'aboutir à un effectif total de population de 1373 000 habitants, D'après l'Annuaire Statistique du Cameroun de 1998, la population de Yaoundé était de 1 137 000 habitants en 1997. Le chiffre de 1373 000 habitants obtenu par notre méthode est assez proche de la réalité si l'on considère le taux de croissance démographique en vigueur, à savoir 4,7 % par an, soit 1 306 100 habitants prévus pour l'an 2000. On obtient ainsi un pourcentage d'erreur de 5,1 % sur la valeur prévue.

Mots-clefs : estimation de la population ; radar ; milieu urbain ; clef d'identification ; base de texture.

USE OF REMOTE SENSING AND IMAGE-INTERPRETATION OF YAOUNDÉ POPULATION IN CAMEROON

The prescript profusion of urban statisties does net preclude the need for the production of reliable and up-to-date information needed for urban management and planning. Most of the data gathered by national authorities, like population censuses, require such technical, financial and human means, that a satisfactory periodicity (biennial or quinquennial) cannot bc retained for them. The rapid pace of urban transformations and the deficiencies of fundamental data make it particularly difficult for populations of sub-Sabaran cities to bc surveyed. This situation bas resulted in the search for original observation systems, adapted to different forms of urbanisation, local information contexts and financial means. In this study, a synthetic aperture radar (SAR) image is used, complementary to an optical image, for the determination of some urban features (spatial delimitation, differentiation of soil occupation, population statistics) in Yaoundé city, Cameroon. By setting up a database of texture parameters for 23 identification keys, it was possible to make an estimation of the population of Yaoundé, and we arrived at a total population figure of 1373 000 inhabitants. According to the 1998 Cameroon Statistical Yearbook, the population of Yaoundé in 1997 stood at 1 137 000 inhabitants; the figure of 1 373 000 inhabitants obtained by the method we developed is therefore quite close to the reality if we consider the current population growth rate of 4,7 % per year, giving a forecast figure of 1 306 100 inhabitants in 2000. The error percentage obtained is 5,1 % on the forecast value.

Keywords : population estimation ; radar image ; urban area ; identification key ; texture database.

[*] Correspondant principal

1. INTRODUCTION

L'objectif général de notre travail est d'estimer la population d'une ville de l'Afrique sub-saharienne à partir du lien entre la morphologie urbaine et la population en utilisant la photointerprétation automatique. L'application des relations entre l'espace urbain identifié et la population a ouvert bien des portes à des expérimentations diverses. Les études menées dans ce domaine ont généralement pour but de résoudre des problèmes d'obtention d'informations auxquels se trouvent confrontés les urbanistes. Plusieurs méthodes ont ainsi été développées. Considérant la ville de Yaoundé de manière globale, quelques auteurs ont tenté d'estimer la population concernée (Champaud *et al*., 1992). Cependant, la non prise en compte de la diversité interne des quartiers ne permettait pas d'obtenir des résultats fiables. La caractérisation des quartiers en fonction de critères morphologiques, et tenant compte des superficies occupées, a sensiblement amélioré l'extrapolation de la population totale, connaissant le type de quartier et la densité de population par quartier. Il y a aussi lieu de citer les travaux menés par Paccard (1979) dont l'approche consiste à prendre en compte les diversités internes des quartiers par la définition d'une clef d'identification du bâti conduisant à un ensemble de 23 classes.

Dans une étude faite en 1982, Issaka et Hegedus ont utilisé un modèle de régression basé sur les caractéristiques spectrales de chaque pixel d'une image MSS de Landsat, dans le but d'estimer la population de 88 petites parcelles (500 m × 500 m) de quartiers résidentiels de Tokyo. La valeur moyenne de la réflectance des 4 bandes MSS (bandes 4, 5, 6 et 7) calculée sur une fenêtre de 10 × 10 pixels fut utilisée comme variable de la régression. La relation espace-population a été mise très tôt à profit, dès les années 1950 (Issaka *et al.*, 1982), à partir de photographies aériennes pour la constitution de bases de sondage. Fondée sur la variabilité de la morphologie des quartiers, il est possible de déterminer des échantillons permettant de recueillir rapidement des données relatives aux populations. D'abord appliquées dans les pays industrialisés, puis développées pour des besoins d'actualisation ou de création d'information dans les villes des pays en développement, ces méthodes ont trouvé un support performant avec l'imagerie satellitaire. L'expérimentation menée par Dureau (1990a, b) sur plusieurs villes dont Quito (Équateur), Yaoundé (Cameroun), Bogota (Colombie), a fait ses preuves. Utilisant l'image satellitaire, les échantillons sont sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques morphologiques après une stratification de l'espace urbain en fonction de la densité du bâti. La méthode est dite de sondage aréolaire à deux degrés. Elle a été testée dans des contextes urbains très variés : Cali (Colombie), Ibadan (Nigeria), Santiago (Chili). Cette méthode a permis de mettre au point une production rapide d'informations sociodémographiques quantitatives et spatialisées. Les dynamiques internes à la ville peuvent ainsi être suivies, à des coûts et avec des moyens compatibles avec les capacités des villes en développement.

Assako Assako (1997) a montré que l'analyse de la typologie des quartiers implique non seulement les caractéristiques urbanistiques (matériaux de construction, composition architecturale, saturation du bâti), mais aussi l'identité socio-fonctionnelle : caractéristiques démographiques des quartiers, niveau de vie des habitants, spécialisation fonctionnelle. Le support d'analyse est une image HRV (XS) de SPOT de la ville de Yaoundé. Après la mise en forme des données (identification, extraction et concaténation des quartiers témoins) garantissant l'uniformité des traitements pour tous les quartiers, l'analyse a été faite en deux phases. La première phase a consisté à rechercher l'organisation de l'occupation de l'espace et la différenciation des quartiers. Pour apprécier l'organisation de l'occupation du sol, l'auteur a procédé à une classification non dirigée en quatre classes. Cette classification permet d'apprécier la composition inteme des quartiers de manière globale, grâce à une approche zonale et à un nombre de classe expressément réduit. Le résultat de cette classification a ensuite été amélioré par un traitement de voisinage en utilisant une fenêtre de 3 × 3. La deuxième phase a porté sur la réalisation d'une composition colorée de canaux bruts dont les résultats ont été directement comparés avec des photographies aériennes obliques prises à basse altitude. Cette étude a abouti à deux conclusions : *1)* l'intérêt de l'imagerie HRV (XS) dans l'analyse des villes africaines, malgré une résolution géométrique de 20 m et une résolution spectrale limitée à deux bandes fortement corrélées dans le visible (vert-jaune et rouge) et une bande dans le proche infrarouge ; *2)* les limites technique et thématique de la télédétection urbaine.

De plus en plus, de nouvelles techniques voient le jour, utilisant des démarches purement statistiques. Des modèles d'estimation de population ont été testés en utilisant comme paramètres de modélisation les données suivantes : le type de groupe d'occupation, le niveau d'éducation, le type d'habitat, le groupe religieux, le nombre de pièces d'un logement, la possession de TV, scooter, réfrigérateur et téléphone, le nombre de propriétaires terriens ainsi que la possession de terrain pour l'agriculture. Il fut démontré (Mukhopadhyay, 1999) que le choix du paramètre « nombre de pièces d'un logement » permettait d'obtenir de résultats satisfaisants. Des

modèles d'estimation de population basés sur la « régression linéaire » (technique statistique qui consiste à déduire de nouvelles occurrences d'une grandeur mesurée, à partir du tracé d'une droite optimale passant par l'ensemble des points de la mesure expérimentale en minimisant la somme des carrés des écarts résiduels) furent essayés dans ces expérimentations ainsi que des modèles d'estimation utilisant les filtres de Kalman (Mukhopadhyay, 1999). Tonyé *et al.* (2000) ont réalisé une étude sur l'utilisation des données RSO de ERS- 1, HRV de SPOT et un plan de localisation de la ville de Yaoundé (Cameroun). À la suite d'une amélioration des contrastes, le canal proche infrarouge XS3 (0,71-0,79 µm) a permis de faire ressortir le réseau minéral routier: organisation du réseau et qualité des voies dont le repérage a été amélioré, validé ou invalidé par des observations sur le plan de localisation de Yaoundé. La contribution principale de cette étude est l'élaboration d'une méthode de traitement des données multisources basée sur une combinaison de l'analyse de texture et de la morphologie mathématique. Les méthodes des matrices de cooccurrence du second ordre et de la morphologie mathématique sont utilisées pour la transformation des données de base. Les images morphologiques et texturales résultantes sont ensuite fusionnées pour produire le réseau routier ciblé comme indicateur de la délimitation urbaine et périurbaine.

Assako Assako (2000) présente le résultat d'une recherche dont l'objectif principal est de maximiser l'extraction de l'information satellitaire en vue de produire des documents opérationnels d'aide à la décision en aménagement urbain. Cette démarche peut s'avérer d'un grand intérêt pour l'analyse des milieux urbains africains particulièrement caractérisés par une insuffisance de l'information en matière d'occupation du sol. Pour atteindre cet objectif, il a opté pour une approche combinatoire multisources afin que le document final soit le résultat des apports respectifs de l'image satellitaire, des données cartographiques et du travail de terrain.

2. SITE D'ÉTUDE

Capitale du Cameroun, Yaoundé, est une ville d'Afrique centrale. Elle est située entre 3°30' et 4°30' de latitude Nord, et entre 11° et 12° de longitude Est (figure 1). Elle occupe une superficie de près de 256 km². Le taux annuel moyen d'accroissement de la population urbaine est estimé à 4,9 % entre 1990 à 1995 et à 4,7 % entre 1995 à 2000 d'après la World Urbanisation Prospects (ONU) dans l'Annuaire statistique du Cameroun (ASC, 1998). D'autres sources proposent des taux beaucoup différents : c'est le cas de Assako Assako qui annonce un taux de croissance annuelle d'environ 7,5 % de la population de Yaoundé (Assako Assako, 1996). Les résultats des travaux de Sietchiping (2003) montrent qu'entre 1973 et 1988, la ville de Yaoundé s'est étendue spatialement à un taux de moyen de 8,1 % par an, contrairement au chiffre de 3,6 % indiqué par les Recensements Généraux de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 1976 et 1987 (Démo87, 1993). Sa situation géographique lui impose un climat de type équatorial et donc assez pluvieux. La température moyenne à Yaoundé est de 23°C. La végétation y est abondante et le relief assez montagneux. De par sa qualité de capitale politique du Cameroun, Yaoundé se présente comme l'une des villes les plus peuplées du Cameroun, avec une densité de population moyenne de 4 441,4 habitants au km² en 1997. C'est une ville qui se développe très rapidement.

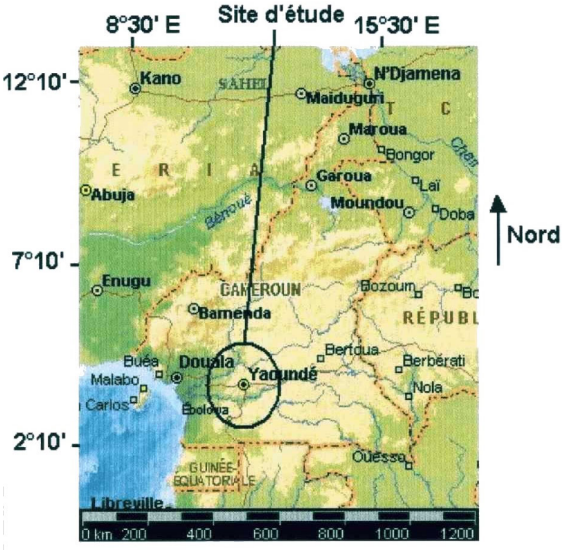


FIGURE 1 Localisation de la zone d'étude. *Location of the study.*

3. DONNÉES UTILISÉES

Des images provenant des capteurs des satellites SPOT et ERS-1 ont été utilisées, ainsi qu'une carte topographique et un plan de localisation de la ville de Yaoundé. L'image HRV de SPOT utilisée date du 07/12/1992 et elle a une résolution de 20 m (figure 2). La deuxième image satellitaire utilisée est une image RSO de ERS-1 datant du 23/08/1994. Elle a une résolution de 25 ni et elle a été acquise en bande C (5,4 GHz), avec une polarisation verticale VV et un angle d'incidence de 23° (figure 3). La carte topographique utilisée a été réalisée à partir des campagnes de photographies aériennes verticales de 1951 à 1952 (figure 4). C'est une carte à l'échelle du 1 / 200 000. Quant au plan de localisation de la ville de Yaoundé, il a été réalisé à partir des campagnes

de photographies aériennes verticales de 1990 à 1991 (figure 5) ; ce plan est à l'échelle du 1 / 15 000. Ces deux derniers documents ont été réalisés par l'Institut National de Cartographie du Cameroun.

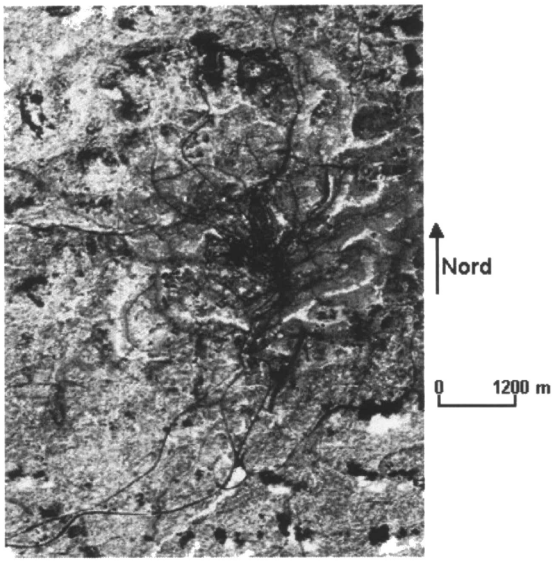


FIGURE 2 Extrait d'image HRV de SPOT de Yaoundé, canal XS3. *Part of a HRV SPOT image of Yaoundé, XS3 Band.*

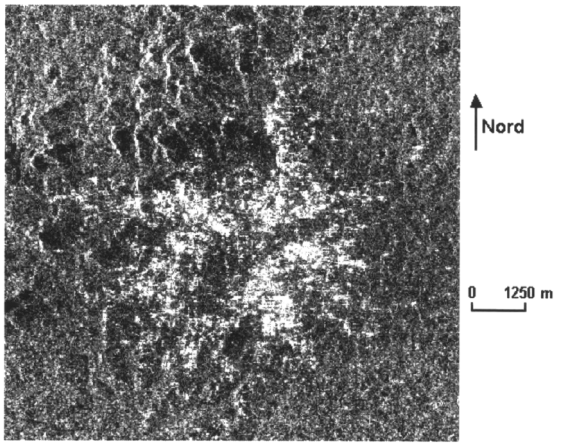
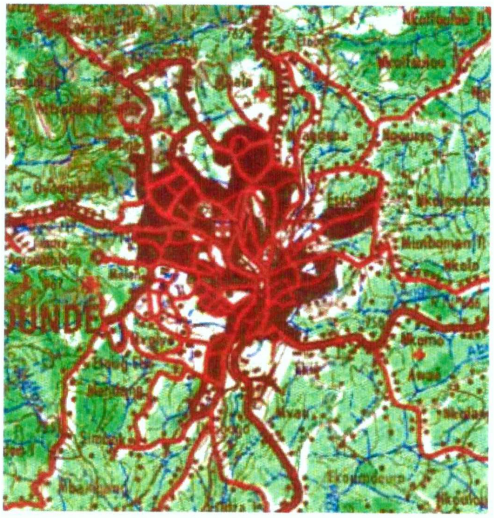


FIGURE 3 Extrait d'image RSO de ERS-1 de Yaoundé. *Part of a SAR ERS-1 image of Yaoundé.*



(Source : Institut National de Cartographie du Cameroun – INC –, 1981)

FIGURE 4 Portion de la carte topographique de Yaoundé. Carte originale au 1/200 000. *A part of a topographic map of Yaoundé. The original map is at 1/200 000 scale.*

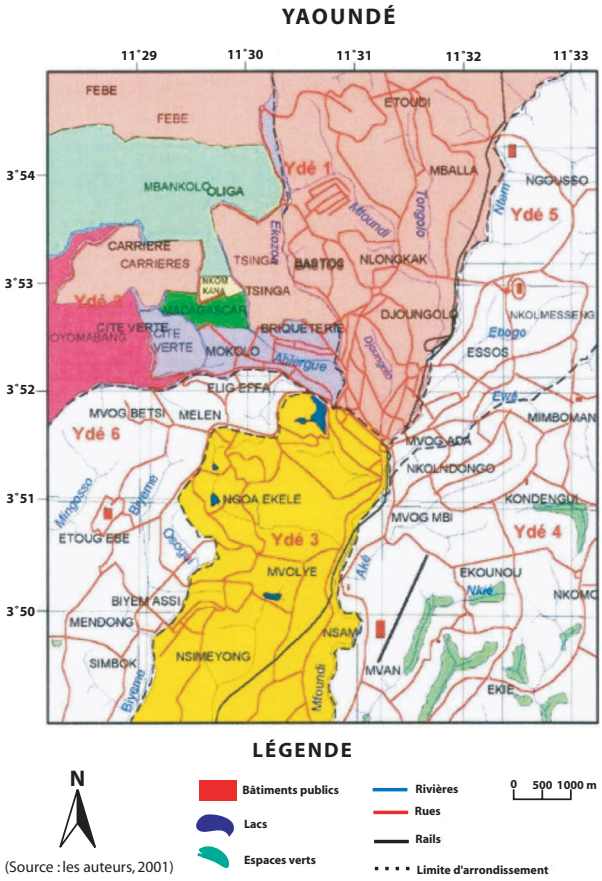


FIGURE 5 Plan d'occupation de la ville de Yaoundé. Carte originale au 1/55 000. *A map of Land Use of Yaoundé city. The original map is at 1/55 000 scale.*

4. MÉTHODOLOGIE

4.1. Introduction

La méthodologie qui a conduit ce travail s'organise de la manière suivante :

– constitution des néo-canaux ;
– détermination des différentes clefs du bâti ;
– identification des clefs du bâti dans l'image et constitution de la base des clefs ;
– caractérisation des clefs retenues ;
– classification.

4.1.1. Constitution des néo-canaux

À partir de l'analyse de texture et de l'étude morphologique effectuées sur l'image RSO originale, on a produit un ensemble de néo-canaux. Dans cette étude, nous avons retenu les néo-canaux obtenus à partir des paramètres de textures du 1er et du 2e ordre comme la moyenne, l'écart type, la variance, la dissymétrie, le paramètre de kurtose, la variance, le contraste, l'entropie, l'énergie. Ceux-ci ont été complétés par des néo-canaux provenant de l'analyse morphologique à savoir l'érosion, la dilatation, la squelettisation, l'ouverture et la fermeture.

4.1.2. Détermination des différentes clefs d'identification du bâti

Le choix d'un ensemble pertinent de clefs d'identification du bâti constitue un élément très important de notre méthode. En effet, nous avons sur ce plan retenu l'approche déjà énoncée par Paccard (l979), ce qui nous a conduits à 23 clefs d'identification permettant de caractériser l'occupation du sol à Yaoundé.

4.1.3. Identification des clefs du bâti dans l'image et constitution de la base des clefs

Un processus semi-automatique d'acquisition des échantillons des différentes clefs d'identification du bâti est mise en couvre. Le choix des échantillons est effectué par l'utilisateur par photo-interprétation et elle s'appuie sur les indications observées dans les néocanaux. La carte topographique et le plan de la ville permettent d'obtenir des points amers pour les cas ambigus : les points illisibles sur l'image RSO. Une fois qu'un échantillon de clef est localisé dans l'image de base, celui-ci ainsi que ses homologues dans les néo-canaux sont recopiés et emmagasinés dans un fichier. C'est lors de cette phase qu'est fixée la taille d'un échantillon ; celle-ci dépend de la complexité de l'image et de la précision souhaitée des résultats. Dans notre cas, nous avons choisi une taille d'échantillon de 3×3 pixels et celle-ci est constante pour tous les échantillons. Pour tenir compte de certaines différences constatées entre plusieurs échantillons de la même clef, nous avons opté pour l'archivage de quatre échantillons différents par clefs.

4.1.4. Caractérisation des clefs retenues

Au moment de leur emmagasinage, les échantillons prélevés sont accompagnés de leurs homologues dans les néo-canaux ainsi que de toutes les autres informations nécessaires à leur caractérisation. C'est le cas des coordonnées de localisation de l'échantillon dans l'image de base, c'est-à-dire la densité de population associée à cette clef d'identification du bâti. Cette dernière constitue l'élément fondamental dans la détermination de la population. C'est de sa qualité que vont dépendre la qualité et la fiabilité du résultat définitif. Nous avons donc utilisé les données des organismes compétents de gestion des communautés urbaines. Habituellement, l'analyse des images multidates par l'appréciation de la variation de l'occupation des sols permet de corréler la croissance démographique de l'espace considéré (Paccard, 1979). Dans notre démarche, une image monodate est classifiée par identification discriminatoire à l'aide des clefs auxquelles sont associées des densités de population. Il est à noter que les différentes images utilisées pour ce travail ont été acquises à des dates différentes. On est en droit de se poser la question de savoir si cela ne va pas poser un handicap à la méthode, Les clés d'identification élaborées pour ce travail n'ont pas changé en dimension dans la période allant de 1992 à 2000. Il ne s'est pas créé de nouveau bidonville, ni de nouveau marché, ou de nouveau quartier; ceux-ci ont plutôt changé en densité. Une actualisation des densités de population pour chaque clef d'identification du bâti nous semble suffisante pour permettre la projection de la population sur l'année 2000.

4.1.5. Classification

Un algorithme de recherche automatique des occurrences de chacune des clefs identifiées en se basant sur ses propriétés à la fois dans l'image de base et dans les néo-canaux est mis en œuvre et permet ainsi la classification. L'application de la distribution de densité de population à cette classification permet d'obtenir la population estimée. Sur la figure 6, on présente une synthèse de la méthodologie utilisée. Nous allons maintenant présenter les différentes techniques utilisées.

4.2. Pré-traitements des images

Les pré-traitements se justifient par la nécessité de réaliser une photo-interprétation objective des données collectées. Compte tenu de la diversité des données, il est nécessaire de procéder à un ensemble de corrections géométriques, puis au recalage en vue de leur superposition. À cet effet, la méthode consistant à trouver dans ces images des points de repères identiques et de les faire correspondre entre eux a été utilisée. Ceci permet d'obtenir une superposition acceptable des différentes images.

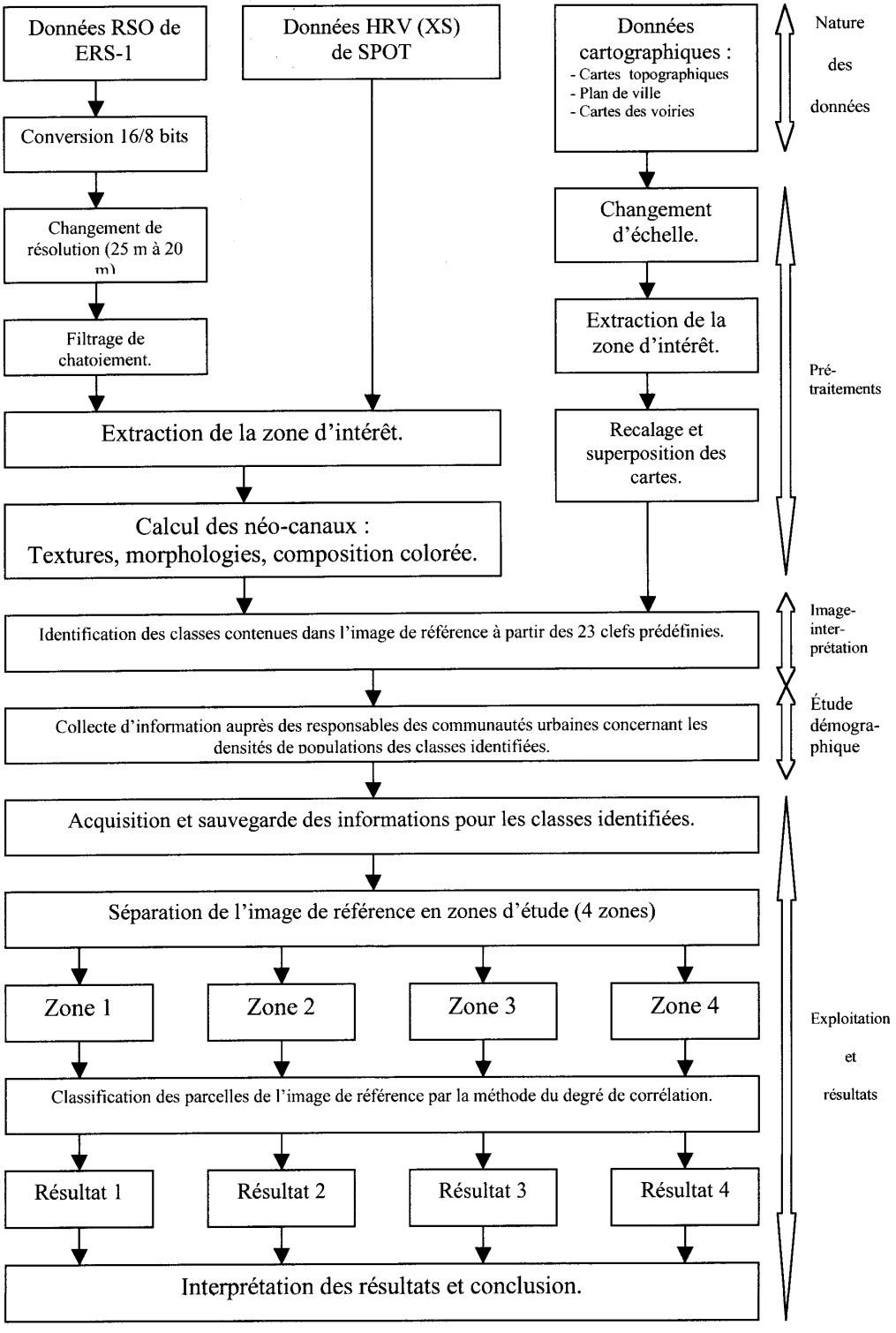


FIGURE 6 Synthèse de la méthodologie utilisée. *Flowchart of the used methodology.*

Les images RSO étant réputées d'avoir une interprétation visuelle difficile, dans un premier temps, nous avons effectué une analyse statistique qui a consisté au calcul de l'histogramme et des grandeurs statistiques telles que la moyenne, la variance et l'écart type des images. En second lieu, on s'est intéressé à son observation dans d'autres modes tels que les images de texture de 1er et de 2e ordre, et les images de morphologie mathématique. Pour mettre en application ces différents traitements, un programme a été développé avec l'environnement C++ de Borland : CARDAR (Cartographie radar).

4.3. Statistiques des images

Le terme statistique de l'image renvoie aux différentes grandeurs statistiques qui caractérisent l'image : niveau de gris maximum, niveau de gris minimum, niveau de gris moyen, moyenne des carrés, écart type, variance.

4.4. Paramètres de texture du 1er ordre

Les paramètres de texture du 1er ordre, en particulier la moyenne, l'écart type, la variance, la dissymétrie et le paramètre de kurtose, sont calculés à partir des expressions disponibles dans Tonyé *et al.* (2000). Sur le tableau 1, on présente la liste des formules utilisées pour le calcul des paramètres de texture et leur signification ou leur intérêt. Sur ce tableau, L représente le nombre de niveaux de gris distinct dans la fenêtre choisi, P(i) est la probabilité d'apparition d'un niveau de gris, et Moy_img[x,y] est la valeur moyenne des niveaux de gris dans une fenêtre de taille NL × NC centrée autour du pixel positionné en (x,y). Pour nos applications, la fenêtre choisie est de 3 × 3.

4.5. Paramètres de texture du 2^{e} ordre

Les paramètres de texture du 2^{e} ordre, en particulier le contraste, l'entropie, l'énergie, sont calculés par la méthode de la matrice de cooccurrence des niveaux de gris (Tonyé *et al.*, 2000). Sur tableau 2, on présente la liste des formules utilisées pour le calcul des paramètres de texture, ainsi que leur signification ou leur intérêt. Sur ce tableau, L représente le nombre de niveaux de gris distincts dans la fenêtre choisie, i et j sont deux niveaux de gris de la fenêtre, d est la distance inter-pixels, θ est la direction d'alignement de deux pixels, P(ij,d, 0) est la probabilité d'apparition du couple de niveau de gris (ij) distant de d et dans la direction 0. Pour tous les calculs des paramètres de 2^{e} ordre, la taille de la fenêtre retenu est de 5 × 5 avec une distance inter-pixels d = 2 et une direction d'alignement θ =0 a été utilisée. Ces valeurs, donnant de meilleurs résultats, ont été choisies après plusieurs essais expérimentaux.

4.6. Morphologie mathématique

Pour ce travail, nous avons retenu les opérations morphologiques suivantes : l'érosion, la dilatation, la squelettisation, l'ouverture et la fermeture (Tonyé *et al.*, 2000).

L'érosion consiste en la réduction des entités sur une image binaire. On fait promener un élément structurant sur les pourtours des entités. Le centre de l'élément structurant donne le contour de l'entité réduite. Une érosion peut être répétée plusieurs fois sur une même image on parle alors d'érosion de taille n ou d'ordre n : $E^{Bn}(X)$.

La dilatation consiste en l'augmentation de la taille des entités sur une image binaire. On fait promener un élément structurant sur les pourtours des entités. Le centre de l'élément structurant donne le contour de l'entité agrandie. Une dilatation peut être répétée plusieurs fois sur une même image : on parle alors de dilatation de taille n ou d'ordre n : $D^{Bn}(X)$. La squelettisation consiste à réduire l'épaisseur des entités d'une image à la dimension d'un pixel. Lors du processus de squelettisation, les entités sont amincies par le biais d'un élément structurant, jusqu'à ce qu'il y ait stabilité, La squelettisation s'effectue par une succession d'opérations appelées amincissement jusqu'à l'obtention d'une structure stable ne pouvant plus être amincie.

L'image d'ouverture est obtenue en faisant subir successivement à l'image binaire une érosion puis une dilatation. Elle a pour but d'éliminer les presqu'îles étroites de l'image originale.

À l'inverse de l'ouverture, l'image de fermeture est obtenue en faisant subir successivement à l'image binaire d'abord une dilatation puis une érosion. Cette fois, c'est une opération qui ferme les golfes et les petits trous de l'image originale. On peut trouver plus de détails sur la morphologie mathématique dans Serra (l 982).

4.7. Image-interprétation

L'identification et l'interprétation visuelle des différentes informations contenues dans l'image de base et les néo-canaux ont pour but de retrouver les différentes clefs d'identification du bâti. Pour réaliser une bonne image-interprétation, on doit disposer d'un ensemble d'outils aidant à mieux discerner les objets et les formes présents dans l'image. Les trois éléments qui ont été pris en compte dans la détermination des clefs sont :

1) un ensemble d'images multisources de la zone d'intérêt ; dans le cas présent, une image HRV et un extrait d'image RSO (figures 2 et 3) ont été utilisés ;

2) des cartes topographique et d'occupation des sols réalisées sur la région ;

TABLEAU 1 Expressions des paramètres de texture d'ordre 1. *Expressions of the used textural parameters of order 1.*

Paramètre de texture	Expression	Signification
Moyenne	$\mathrm{Moy_Img}[x,y] = \frac{1}{NL \cdot NC} \sum_{j=0}^{NL-1} \sum_{i=0}^{NC-1} \mathrm{Img}(i,j)$	L'image de moyenne a pour particularité d'éliminer les artéfacts, ou d'éliminer des bruits du genre gaussien qui pourraient altérer l'interprétation de l'image.
Moyenne des carrés	$\mathrm{Moy_Carr}[x,y] = \frac{1}{NL \cdot NC} \sum_{j=0}^{NL-1} \sum_{i=0}^{NC-1} [\mathrm{Img}(i,j)]^2$	Étape nécessaire dans le calcul des paramètres suivants
Écart type	$\mathrm{EcType}[x,y] = \sqrt{\mathrm{Moy_Carr}[x,y] - (\mathrm{Moy_Img}[x,y])^2}$	L'écart type est une mesure de la dispersion des niveaux de gris autour de la moyenne
Variance	$\mathrm{VAR}[x,y] = \mathrm{Moy_Carr}[x,y] - (\mathrm{Moy_Img}[x,y])^2$	Correspond au carré de l'écart type
Dissymétrie	$\mathrm{DISS}[x,y] = \frac{1}{(\mathrm{EcType}[x,y])^3} \times \left[\sum_{i=0}^{L-1} (i - \mathrm{Moy_Img}[x,y])^3 \times P(i) \right]$	Permet la mesure de la dissimilarité de l'histogramme. Il s'agit de son orientation par rapport à la moyenne.
Kurtose	$\mathrm{KUR}[x,y] = \frac{1}{(\mathrm{EcType}[x,y])^4} \times \left[\sum_{i=0}^{L-1} (i - \mathrm{Moy_Img}[x,y])4 \times P(i) \right]$	Donne une indication sur l'aspect pointu, effilé ou plutôt aplati de l'histogramme.

TABLEAU 2 Expressions des paramètres de texture d'ordre 2 utilisés. *Expressions of the used textural parameters of order 2.*

Paramètre de texture	Expression	Signification
Contraste	$\mathrm{CONT}[x,y] = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i-j)^2 \times P(i,j,d,\theta)$	Représente la mesure de la variation locale des niveaux de gris de l'image. Sa valeur numérique devient élevée lorsqu'il existe de nombreuses transitions caractérisées par une différence de niveaux de gris importante.
Entropie	$\mathrm{ENT}[x,y] = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} P(i,j,d,\theta) \times \mathrm{Log}_2[P(i,j,d,\theta)]$	Elle est élevée lorsque les P(i,j,d,θ) sont presque tous égaux et faible dans le cas contraire.
Énergie	$\mathrm{ENE}[x,y] = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} [P(i,j,d,\theta)]^2$	Elle donne la mesure de l'homogénéité de l'image.

3) un ensemble de critères d'interprétation des observations effectuées a été élaboré; parmi les éléments de ces critères, on a d'abord l'information sur les ordres de grandeur et de taille. Cette donnée va permettre de fixer une taille minimale pour les classes d'objets de l'image. La notion de « teinte » ou « tonalité », bien perçue par l'œil de l'interprète, constitue un facteur important dans la différenciation des régions voisines ou de nature semblable. La bonne perception des formes horizontales, verticales et des contours va aussi aider dans la reconnaissance et l'identification des objets déjà connus, mais difficilement détectables dans l'image. C'est aussi la clef de la reconnaissance des ruelles et des zones homogènes (quartiers, *etc.*). Les textures (variance, énergie, contraste, entropie) constituent aussi des éléments essentiels dans l'interprétation des observations. En effet, dans les images optiques ou radar, certains détails ne sont pas visibles directement à l'observation. Pour identifier ces détails, on a besoin d'effectuer des transformations de l'image originale. C'est le cas des transformations de textures précédemment présentées (tableaux 1 et 2). Les structures morphologiques issues de différentes opérations (dilatation, squelettisation, érosion) sont aussi à prendre en compte. Enfin, il y a la perception de l'interprète qui joue un rôle essentiel pour une bonne interprétation. Celui-ci doit avoir une expérience suffisante des images satellitaires pour être efficace.

L'image-interprétation étant visuelle, une interface logicielle a été développée qui permet de désigner, de sélectionner et de sauvegarder les différents représentants de chaque clef, afin de s'en servir lors

des traitements futurs. Dans l'interface logicielle développée, deux manières d'effectuer la sélection des classes sont proposées. Il y a d'abord une acquisition des clefs, dite directe, où l'utilisateur travaille directement sur l'image brute. Les pointages de clefs sont faits sur l'image. Cette procédure implique une parfaite connaissance des positions et des zones identifiées. Il y a aussi une acquisition des clefs, dite indirecte, où l'utilisateur travaille sur une carte de la région bien renseignée ou sur une image dont les détails sont renforcés. Lorsque cette deuxième procédure est utilisée, une liaison entre la zone désignée sur la carte par l'utilisateur et la zone correspondante dans l'image brute est automatiquement effectuée en arrière-plan, Sur la figure 7, nous présentons un exemple d'image-interprétation réalisée sur un extrait d'image RSO prise sur la ville de Yaoundé.

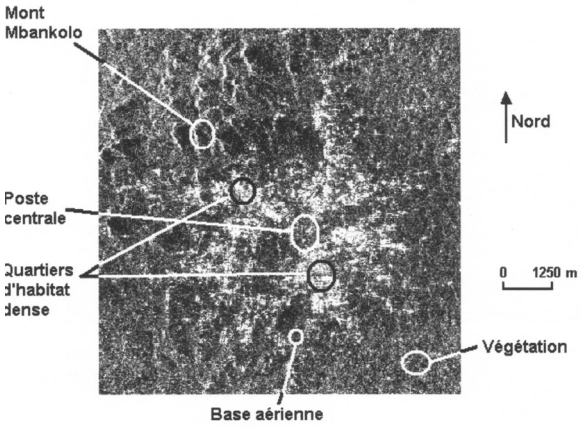


FIGURE 7 Image-interprétation sur un extrait d'image RSO de ERS-1 sur la région de Yaoundé. *Image-interpretation on an extraction of a SAR ERS-1 image of Yaoundé area.*

4.8. Clef d'identification du bâti

Compte tenu de la diversité des structures et des objets qui constituent l'occupation du sol dans une agglomération urbaine, on a essayé de regrouper toutes les formes d'occupation du sol en un ensemble de classes ayant chacune des caractéristiques propres qui permettront de la définir. Cette répartition en classes des différentes formes d'occupation du sol va constituer la clef d'identification du bâti (Paccard, 1979). Sur le tableau 3, on présente la liste des 23 classes répertoriées équivalentes aux 23 clefs d'identification.

4.9. Principe de classification des parcelles

4.9.1. Comparaison de deux images

Avant d'aborder la classification des parcelles, il est nécessaire d'introduire le principe de comparaison de deux images. On définit le degré de corrélation entre deux points homologues P(u,v) et P'(u',v') de deux images IMg_1 et IMg_2 dans un voisinage de $2m \times 2n$ (taille de la fenêtre d'observation, avec ni et n des entiers naturels positifs et non nuls) la quantité DCORR(P,P') donnée par l'équation 1 (Radu et Monga, 1999)

$$DCORR(P,P') = \underbrace{\sum_{x=m}^{x=m}\sum_{y=n}^{y=n}\left[IMg_1(u-x,v-y) - IMg_2(u'-x,v'-y)\right]^2}_{} \quad (1)$$

Le degré de corrélation permet de comparer une parcelle quelconque de l'image brute avec une des classes (clefs d'identification) acquises, présentées plus haut. Le résultat de cette comparaison déterminera à laquelle de ces classes une parcelle devra être attribuée. L'image de corrélation obtenue par le calcul des valeurs du degré de corrélation des différents points de l'image présente des valeurs de niveaux de gris faibles pour les points de forte ressemblance (à la limite, la valeur du degré de corrélation est nulle pour les points similaires dans les deux images) et des valeurs de niveaux de gris élevés pour les points de faible ressemblance.

4.9.2. Classification des parcelles

Maintenant que la technique de comparaison est présentée, la suite du processus va consister à l'attribution de chacune des parcelles de l'image brute à l'une des classes choisies par l'opérateur dans l'image. Ainsi, une parcelle de l'image sera attribuée à l'une des classes prédéfinies si elle présente avec cette classe les meilleures images de corrélation dans tous les modes d'observation. Une fois qu'une parcelle Xi est découpée dans l'image initiale, il se fait parallèlement un découpage de la même parcelle dans les images de texture et de morphologie. Puis, pour chacun de ces modes comme pour la parcelle brute, on calcule l'image de corrélation avec son homologue dans chacune des classes Cj disponibles dans le fichier d'emmagasinement des classes. On se retrouve avec autant d'images de corrélation qu'il y a de classes désignées par l'utilisateur. Nous notons DISS(i, j) l'image de corrélation correspondant à la parcelle (i) avec la classe (j). Afin de pouvoir réaliser de façon automatique une comparaison des différentes images de corrélation, nous introduisons le terme *degré de corrélation réduit* qui est le rapport présenté par l'équation 2 :

$$C_x = \frac{\text{Valeur de corrélation moyenne}}{\text{Valeur de corrélation maximale}} \quad (2)$$

TABLEAU 3 Liste des 23 classes répertoriées équivalentes aux 23 clefs d'identification. *List of the collected 23 classes. These classes are equivalent to the 23 identification keys.*

Noms de la classe	Classification			Type d'attribution
C1	Affectations connues			Cimetière
C2				Gare – Aéroport
C3				Affectations publiques
C4				Loisirs
C5	Affectations non connues Texture homogène		Texture homogène	Végétation
C6				Terrain vague
C7				Asphalte
C8	Affectations non connues, texture hétérogène	Structure hétérogène	% végétation très élevé	Habitations aisées à très aisées
C9			% végétation élevé	Habitations moyennes à aisées
C10			% végétation moyen	Habitations faibles à moyennes
C11			% végétation élevé + 50 %	Formations isolées et fermes
C12			% végétation faible	Quartiers planifiés à densité faible
C13			% végétation élevé + 50 %	Habitations isolées et jardin
C14			Faible végétation Petits bâtis	Infrastructures
C15			Faible végétation Petits bâtis	Villages
C16		Structure homogène	Grands bâtis	Quartiers industriels
C17			Végétation faible	Habitat social
C18			Végétation nulle	Chantiers urbains
C19			Teinte très claire	Terrain vague
C20			Teinte claire	Habitat traditionnel rénové
C21			Teinte moyenne	Habitat traditionnel
C22		Plusieurs éléments	Teinte foncée	Habitat type bidonville
C23		Éléments isolés		Éléments isolés

À chaque image de corrélation d'une parcelle (i) calculée avec une classe (j), va donc correspondre le *degré de corrélation réduit* Cx_{ij} défini par l'équation 3 :

$$Cx_{ij} = [B \cdot C_x \text{ (parcelle brute)}] + [T \cdot C_x\text{(parcelle de texture)}] + [M \cdot C_x\text{(parcelle de morphologie)}] \quad (3)$$

Dans l'équation 3, B, T, M sont des nombres sans dimension représentant respectivement les pourcentages de contribution de la parcelle brute, des parcelles de texture et des parcelles de morphologie à la valeur totale du degré de corrélation. Dans le cadre de cette étude, des coefficients égaux à 1 ont été choisis. La parcelle (i) sera attribuée à la classe (j) pour laquelle l'indice Cxij est minimal.

5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Dans l'image de Yaoundé, nous avons répertorié les zones présentant une assez bonne homogénéité dans la distribution des pixels pour en faire des sous-images et ainsi réduire, non seulement les degrés d'ambiguïté, mais aussi le temps de calcul. Le principe consiste à évaluer, pour chacune des sous-images, la population correspondante et de rassembler ces résultats pour en déduire le résultat global. En nous basant sur des études démographiques disponibles sur la zone et sur les enquêtes effectuées sur le terrain, nous avons produit un tableau de distribution des densités de population par classe (tableau 4). La classification des parcelles dans chacune des portions a donné les résultats suivants :

1) largeur d'une parcelle 3 pixels ;
2) hauteur d'une parcelle 3 pixels ;
3) résolution spatiale d'un pixel : 145 m² ;
4) superficie d'une parcelle : 362 500 m².

Sur le tableau 5, on présente le récapitulatif des résultats de la classification obtenus par la méthode du degré de corrélation pour la zone 1 et, sur le tableau 6, on présente les résultats pour l'ensemble des quatre zones. Sur le tableau 7, on montre le suivi de l'évolution de la population de Yaoundé de 1970 à 1997 et la valeur trouvée pour l'an 2000.

TABLEAU 4 Répartition des densités de population par classe. *Distribution of the population density per classes.*

Nom de la classe	Type d'attribution	Densité de population estimée (habitants / m²)	Exemples de quartiers y correspondant
C1	Cimetière	0,000 01	Ngousso Etoudi
C2	Gare – Aéroport	0,001	Base aérienne Gare voyageur
C3	Affectations publiques	0,001	Ministères Poste centrale
C4	Loisirs	0,000 1	Stade omnisport Parcours VITA
C5	Végétation	0,001	Zones non habitée Périphérie de la ville
C6	Terrain vague	0,000 1	–
C7	Asphalte	0,000 001	Routes
C8	Habitations très aisées à aisées	0,02	Quartiers Bastos, Damas, Ngousso Hôtels
C9	Habitations moyennes à aisées	0,05	Tsinga, Etoudi Essos, Biyem-Assi
C10	Habitations faibles à moyennes	0,1	Briqueterie Mvog-Mbi, Melen
C11	Formations isolées et fermes	0,025	Hôpital général Usines, plantations
C12	Quartiers planifiés de densité faible	0,04	Mendong, Mimboman
C13	Habitations isolées et jardin	0,0233	Mont-Fébé
C14	Infrastructures	0,001	Universités, Palais des congrès, marchés
C15	Villages	0,04	Périphéries
C16c	Quartiers industriels	0,002	Brasseries
C17	Habitat social	0,2	Cité-Verte, SIC, Nlongkak
C18	Chantiers urbains	0,001	–
C19	Terrain vague	0,0001	–
C20	Habitat traditionnel rénové	0,04	École de police
C21	Habitat traditionnel	0,15	–
C22	Habitat type bidonville	Au cas par cas	–
C23	Éléments isolés	Au cas par cas	–

TABLEAU 5 Récapitulatif des résultats de la classification obtenus par la méthode de corrélation, pour la zone 1. *Results of the classification obtained by the correlation method for the first zone.*

N° de l'échantillon	Code classe	Densité	Méthode de corrélation	
			Nombre d'échantillon trouvé	Population estimée
1	C5	0,001	0	0
2	C5	0,001	0	0
3	C5	0,001	2,48	899
4	C15	0,04	0	0
5	C15	0,04	48,48	702 960
6	C15	0,04	6,74	97 730
7	C15	0,04	1	14 500
8	C19	0,004	0,74	1073
9	C19	0,004	0	0
10	C19	0,004	0,74	1073
11	C12	0,04	1,74	25 230
12	C12	0,04	0	0
Total				843 465

TABLEAU 6 Récapitulatif des résultats de la classification obtenus par la méthode de corrélation pour l'ensemble des quatre zones. *Results of the classification obtained by the correlation method for the whole four zones.*

Portion	Méthode de corrélation
	Population estimée
Zone 1	843 465
Zone 2	359 068
Zone 3	88 710
Zone 4	81 745
Total	1 373 000

TABLEAU 7 Suivi de l'évolution de la population de Yaoundé de 1970 à 1997, et valeur trouvée pour l'an 2000. *Follow-up of the evolution of Yaoundé population from 1970 to 1997, and th found value for the year 2000.*

Année	Population		
	Annuaire statistique 1998	Champaud *et al.* (1992)	Cette méthode
1970	301 000	–	–
1976	318 000	–	–
1980	375 828	–	–
1987	649 000	–	–
1997	1 137 000	–	–
2000	1 306 100	1 500 000	1 373 000

(Source : Annuaire statistique du Cameroun, édition de 1998)

TABLEAU 8 Suivi de l'évolution de lapopulation de Yaoundé entre 1995 et 2000 suivant différents taux de croissance proposés dans la littérature. *Follow-up of the evolution of Yaoundé population between 1995 and 2000 by the use of different population growing rate as given in the literature.*

	Taux de croissance 4,73 % ASC (1995-2000)	Taux de croissance 7,5 % Assako (1996)	Taux de croissance 8,1 % Sietchiping (1973-1988)	Champaud *et al.* (1992)	Cette méthode (2000)
Population estimé	1 306 100	1 412 500	1 436 300	1 500 000	1 373 000
Erreur relative	–	2,8 %	4,4 %	8,5 %	5,1 %

6. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'estimation, sous la réserve des hypothèses sur les densités de population par classe et de la qualité de la photo-interprétation, nous donne une population de 1 373 000 habitants pour l'année 2000 avec le degré de corrélation comme opérateur de comparaison.

Selon l'Annuaire Statistique du Cameroun (ASC, édition de 1998), la population de Yaoundé était de 1 137 000 habitants en 1997. Le chiffre de 1 373 000 habitants obtenu par la méthode de corrélation est assez proche de la réalité, quand on considère le taux de croissance démographique en vigueur, à savoir 4,7 % par an, soit 1 306 100 habitants prévus pour l'an 2000. On obtient un pourcentage d'erreur de 5,1 % sur la valeur prévue. En considérant l'étude réalisée par Chanipaud *et al.* (1992), une population de 1 500 000 habitants était prévue pour la ville de Yaoundé en l'an 2000. Par rapport à l'ASC, cette dernière étude présente une erreur relative de 14,8 %, ce qui est largement supérieur à l'erreur reliée à notre méthode. En outre, les résultats prévus par l'ASC peuvent être considérés comme une référence, du fait que les données contenues dans ce document résultent des recensements précis effectués sur le terrain. En effet, les recensements de population sont effectués sur une base régulière dans la ville de Yaoundé ces dernières années et les résultats de ces recensements sont consignés dans l'Annuaire Statistique du Cameroun. Les résultats obtenus par cette étude étant assez proches de ceux prévus par l'ASC, on peut en déduire qu'ils sont proches de la réalité.

7. CONCLUSION

Nous avons réussi à développer une méthode d'estimation de la population dans les milieux urbains en région sub-saharienne. Notre méthode est basée sur l'identification d'un ensemble de 23 types d'occupation des sols auxquels ont été associées des densités de populations. Cette méthode consiste en l'attribution de chacune des parcelles de l'image à l'une des classes préalablement identifiées. Le critère de différenciation utilisé est le degré de corrélation des parcelles avec les types d'occupation du sol, ce paramètre étant observé dans plusieurs modes de l'image (texture, morphologie).

La qualité des résultats obtenus est satisfaisante mais pas suffisante. Ceci est dû aux éléments de départ de notre travail, De meilleurs résultats peuvent être obtenus en approfondissant quelques-unes des aspects de ce travail. Il s'agit notamment de l'acquisition des images. Pour une meilleure image-interprétation, il serait plus avantageux d'avoir des images satellitaires de très bonne résolution, comme celles de la camera numérique du satellite IKONOS pour lesquelles les résolutions sont de l'ordre de 1 m. Il en est de même des images des capteurs HRVG du satellite SPOT-5 pour lesquelles les résolutions varient de 5 à 10 m. Au niveau des pré-traitements, un accent plus particulier doit être mis sur l'aspect recalage. En effet, ce processus est nécessaire quand on veut superposer des images ayant des origines différentes. Dans cette étude, le recalage a été effectué par mise en correspondance d'un ensemble de points identifiés dans chaque image. Cependant, il existe d'autres techniques de recalage qui pourraient améliorer ce travail. L'un des autres aspects à relever est celui de l'étude démographique ayant conduit à l'attribution des densités de population par classe. Un plus grand accent devra être mis sur celui-ci, de manière à obtenir des chiffres plus proches de la réalité.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au support financier de]'Agence universitaire de la francophonie (AUF), dans le cadre du projet d'action de recherche en réseau (ARR) n°2015RR203 du Réseau Télédétection. L'image radar a été fournie par l'Agence spatiale européenne (ESA), dans le cadre du projet A03-402. Nous remercions les professeurs Jean-Marie Dubois et Goze Bertin Bénié de l'Université de Sherbrooke (Canada), pour leur coopération à nos projets.

Références bibliographiques

Assako Assako, R. J. (l 996) Contribution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géoréférencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat, Université de Paris X-Nanterre, 327 p.

Assako Assako, R. J. (l 997) Différenciation des quartiers de Yaoundé à l'aide d'une image HRV (XS). Dubois, J.-M.M., Donnay, J.-P., Ozer, A., Boivin, F. et Lavoie, A. (réd.) Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Éd. AUPELF, Montréal, p. 145-153.

Assako Assako, R. J. (2000) Méthode navette image-terrain pour la réalisation des cartes d'occupation du sol en milieu urbain africain : le cas de Yaoundé (Cameroun). Télédétection, vol. 1, n°4, p. 285-305.

Champaud, J., Chaume, R., Cherel, J. P. et Noël, J. (l 992) Croissance urbaine, environnement et imagerie-satellite. Rapport de projet de l'ORSTOM / CEE, Montpellier.

Démo 87 (1993) Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat du Cameroun, volume 11, tome 12, villes de Douala et de Yaoundé.

Dureau, F. (1 990a) Télédétection urbaine à l'ORSTOM : villes et citadins du Tiers Monde.

Cahier n°4, Dossier sur la télédétection urbaine à l'ORSTOM, Paris, p. 5-12.

Dureau, F. (1990b) Observation de la terre par télédétection spatiale, principes généraux villes et citadins du Tiers Monde. Cahier n°4, Dossier sur la télédétection urbaine à FORSTOM, Paris, p. 13-22.

Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, 1. (1973) Textural féatures for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, n°6, p. 610-621.

Harvey, J. T. (1999) Application of satellite remote sensing to small area population estimation. IASS Satellite Conférence, August 1999, Rija, Latvia, p. 65-79.

Issaka, J. and Hegedus, E. (1982) Population estimation from LANDSAT imagery. Remote Sensing of the Enviromnent, vol. 12.

Ministère de l'économie et des finances (1998) Annuaire Statistique du Cameroun. Direction de la Statistique et de la Comptabilité Nationale, p. 16, 21, 30, 198, 199.

Lemarchand, P. (dir.) (l 994) L'Afrique et l'Europe. Atlas du 20e siècle. Éditions Complexes, Bruxelles.

Mukhopadhyay, P. (1999) Small area estimation of population for the district of Hugli. IASS Satellite Conférence, Rija, Latvia, August 1999, p. 263-267.

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

Radu, H. et Monga, 0. (1999) Vision par Ordinateur: Outils fondamentaux, 2'édition. Éditions Hermès, Paris, 190 p.

Serra, J. (J 982) Image analysis and mathernatical morphology. Academie Press, London, 628 p.

Sietchiping, R. (2003) Évolution de l'espace urbain de Yaoundé, au Cameroun, entre 1973 et 1988 par télédétection. Télédétection, vol. 3, n' 2-3 (accepté pour publication).

Tonyé, E., Akono, A., Ndi Nyoungui, A. et Assako Assako, R. J. (2000) Extraction du réseau routier sur une image RSO de ERS-2 et sur une image HRV (XS) de SPOT par analyse de texture et morphologie mathématique : application à la ville de Yaoundé (Cameroun). In Dubois, J.-M. M., Caloz, R. et Gagnon, P. (réd.) La télédétection en Francophonie : analyse et perspectives. Éditions de l'AUF, Montréal, p. 95-104.

Tonyé, E., Akono, A. et Ndi Nyoungui, A. (2000) Le traitement des images de télédétection par l'exemple. Gordon and Breach Sciences Publishers, Paris, 179 p.