Télédétection, 2000, vol. 1, pp. 285-303
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 2000 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous licence par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en France

Méthode navette image-terrain pour la réalisation des cartes d'occupation du sol en milieu urbain africain : le cas de Yaoundé (Cameroun)

RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO*

Département de géographie, Université de Douala, B.P. 8562, Douala-Déido, Cameroun

(soumis le 3 mai 1999 ; révisé le 28 juin 1999 ; accepté le 3 août 1999)

Le présent article est le résultat d'une recherche dont l'objectif principal est de maximiser l'extraction de l'information satellitale 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 d'information en matière d'occupation du sol. Pour atteindre cet objectif, nous avons opté pour une approche combinatoire multi-sources afin que le document final soit le résultat des apports respectifs de l'image satellitale, des données cartographiques et du travail de terrain. La zone d'étude choisie pour l'expérimentation est la ville de Yaoundé, capitale du Cameroun. Avec un taux de croissance annuel de plus de 7 %, sa population, en cette fin du vingtième siècle, est estimée à environ un million cinq cent mille habitants. L'expérimentation s'est déroulée en trois étapes. La première porte sur les traitements *a priori* de l'image HRV de SPOT du 7 février 1992. Elle a pour objectif principal la préparation des documents analogiques qui seront utilisés pour les enquêtes et observations de terrain. La deuxième étape, celle du travail de terrain, consiste quant à elle à observer et à mener des enquêtes afin de confronter les résultats analogiques (transitoires) issus des traitements non dirigés avec la réalité telle que directement observée ou recueillie. La troisième étape est celle de la correction et de la combinaison. À ce niveau, nous avons créé de nouveaux indices en tenant compte de la connaissance de la zone d'étude. C'est ainsi qu'il devient possible, par exemple de mener une classification dirigée et de donner un contenu fonctionnel à la nomenclature d'une carte d'occupation du sol. Par ailleurs, on peut désormais intégrer des informations exogènes comme les données cartographiques. Malgré les insuffisances liées principalement à la résolution spatiale des images HRV (XS), au regard de l'importante hétérogénéité du milieu urbain africain, le résultat final est une carte d'occupation du sol répondant aux principales préoccupations de l'aménageur urbain : fiabilité, perception globale de l'espace, fonctionnalité de la légende, apport temporel.

Mots-clés : télédétection; occupation du sol; Cameroun; aménagement; image-interprétation; Yaoundé

* Correspondant. Téléphone et télécopie (+237) 47 39 17 ; (+237) 40 46 61 ; c.é. : assako@hotmail.com

Combining image processing and field work to produce land cover maps of African cities : the case study of Yaoundé (Cameroon).

This article is the result of a research, of which the principal objective is to maximise the extraction of information from satellite images in view of producing an operational document in relation with urban management. This approach can have a great interest for the analysis of African cities characterised particularly by insufficiency of land use and land cover information. To attain this objective, we have opted for a multi-source and combinatory approach. The advantage of this process is that the final result, which is a land use map, shows the respective contributions of the satellite image, the cartographic data and the field work. The zone of study chosen for the experimentation is Yaoundé, the capital of Cameroon. At this end of the XXth century, its population is estimated at about 1,5 millions inhabitants for a growth rate of more than 7 %. The town is extended to more than 6 000 hectares and has a strong tentacular spatial growth. Because of this high population growth, anarchic quarters develop through out the city. An other consequence of the urban spatial growth is the rapid degradation of the peri-urban forest cover. The experimentation was done with geographical information system and image processing softwares like Roots, Idrisi, Surfer. Registered on the 07–02–1992, the HRV (XS) of SPOT image used has the advantage of having a weak cloud coverage and an acceptable level of pre correction (1 B). The thematic interest of this image is seen in the actuality of land cover. This satellite image was thematically combined with a topographical map whose scale is 1 : 10 000. Established in 1962, this map has a great chronological interest. The experimentation has been proceeded in three stages. The first consists on preliminary data processing carried out on the topographical map (elevation model, reconstitution of the hydrographic network) and on the HRV (XS) image (unsupervised classification, composite image, image interpretation, etc.). These treatments had as principal objective, the preparation of the analogic documents which will be used for the inquiries and field observations. The second stage, that of the field work, consists of observing and guiding the inquiries. It's the stage of confrontation between the analogic transitory results obtained from unsupervised image processing and the reality directly observed or collected on the field. The third stage is that of correction and combination. At this level, we have created new indexes, taking in consideration what we know about the zone of study. It thus becomes possible for example, of conducting a supervised classification and giving a functional content to the nomenclature of the land cover map. Elsewhere, we can henceforth integrate exogenous information in the cartographic data. In spite of insufficiencies based principally on the spatial resolution of HRV (XS) images, in regard of the important heterogeneity of the African urban cities, the final result is a map of land cover responding on the principal preoccupations of the urban management: credibility, global perception of the space, functionality of the map's key and temporal contribution. On the methodological plan, this experimentation has permitted in combining the elementary and regional approaches. One is pointillist, the other is global. But the combination of the two methods is essential in geographical analysis.

Keywords: remote sensing; land cover; Cameroon; land planning; image interpretation; Yaoundé

1. INTRODUCTION

La méthode navette image-terrain traduit la nécessaire complémentarité entre l'imagerie satellitaire, les autres sources d'information géographique et l'observation directe de la réalité de terrain (Assako Assako, 1997b). Elle se déroule en trois étapes, chacune intervenant pour combler les lacu-

nes des résultats obtenus à l'étape précédente. La première consiste en la préparation du travail de terrain. Elle débouche sur la production des documents analogiques provisoires, servant de support au travail de terrain, de vérification et de validation ou d'invalidation. La deuxième étape est celle du travail de terrain. Elle permet, par le biais de l'image-interprétation visuelle, d'améliorer le zonage de l'occupation du sol en comparant l'image à la réalité. Plusieurs problèmes se posent à ce niveau : obstacles administratifs et policiers, insuffisance voire manque des documents de référence (cartes topographiques ou thématiques, photographies aériennes), vaste étendue de la zone d'étude, décalage entre le caractère synthétique de l'information satellitale contenue dans l'image et le grand nombre de détails perçus par l'oeil. La troisième étape est celle de l'intégration et de la correction. La connaissance du terrain permet désormais de donner un contenu fonctionnel à la nomenclature de l'occupation du sol. Ainsi, à la couverture, on peut ajouter de l'information relative à l'utilisation du sol.

2. DONNÉES ET OUTILS UTILISÉS

En plus des observations de terrain, difficiles à formaliser, nous avons utilisé deux types de données : une image satellitale HRV (XS) et des documents cartographiques (tableau I).

Pour combiner des données de sources et de nature aussi différentes, plusieurs logiciels sont nécessaires (Assako Assako, 1997a). Certains sont spécialisés dans le traitement d'un seul type de données (traitement d'images par exemple). D'autres sont limités à des tâches précises (logiciel de numérisation des objets géographiques). D'autres encore sont multifonctionnels, soit parce qu'ils permettent d'effectuer plusieurs tâches (numérisation et traitement cartographique par exemple), soit parce qu'ils permettent d'intégrer des données de nature et de sources différentes (cas des logiciels de systèmes d'information géographique). Dans le cadre de la présente expérimentation, nous avons bénéficié d'une plate-forme assez étoffée qui nous a permis de passer facilement de l'imagerie satellitale à la cartographie et d'intégrer les observations de terrain (tableau II).

TABLEAU I Présentation des sources de données utilisées. *Presentation of data sources*

Document	*Description et intérêt*	
Image satellitale	Satellite	SPOT
	Capteur	HRV1
	Date	07–02–1992
	Surface couverte	3 600 km^2
	Niveau de correction	1 B
	Mode d'enregistrement	Multibande (XS)
	Canaux	XS1, XS2, XS3
	Intérêt	Actualité de la couverture du sol
Carte topographique	Date	1962
	Échelle	1 : 10 000
	Intérêt	Topographie, repérage, recalage avec l'image
Plan des rues	Date	1992
	Échelle	1 : 10 000
	Intérêt	Repérage lors des observations de terrain
Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme (SDAU)	Dates	• 1982 • 1990 • 2000
	Échelle	1 : 25 000
	Intérêt	Occupation du sol : état en 1982 et prévisions pour 1990 et 2000

TABLEAU II Présentation des outils logiciels utilisés. *Presentation of the software used*

Logiciel	*Intérêt*
ROOTS	Numérisation des objets géographiques : courbes de niveau, polygones, points
SURFER	Système d'information géographique, gestion de la topographie et réalisation du modèle numérique d'altitude, autres traitements cartographiques
IDRISI	Traitement d'image : classifications dirigée et non dirigée, composition colorée, filtres, intégration image- carte, statistiques, croisement des variables (canaux), etc.
PCI	Traitements d'image

3. PRÉPARATION DU TRAVAIL DE TERRAIN

Effectuée en laboratoire, cette première étape de la méthode est celle de la préparation des documents servant de support et de référence au travail de terrain. Ces documents répondent à trois types de préoccupations : la reconnaissance de la zone d'étude, la recherche des repères sur l'image utilisée et la segmentation *a priori* de l'occupation du sol.

3.1. Reconnaissance de la zone d'étude

Elle concerne surtout les conditions physiques de la zone d'étude. Nous en avons surtout retenu le relief, assez accidenté à Yaoundé. Cette information est utile au travail de terrain à double titre : elle donne une idée assez précise de la composition géomorphologique du site et elle permet d'identifier les points d'observation.

3.1.1. Topographie du site de Yaoundé

À l'aide du logiciel ROOTS, nous avons numérisé les courbes de niveau de la carte topographique de Yaoundé de 1962 au 1 : 10 000. Le fichier vecteur résultat de cette numérisation a été transféré vers le logiciel SURFER, spécialement dédié au traitement du relief (formes et altitudes). C'est donc à partir de ce fichier vecteur des courbes de niveau que nous avons réalisé un modèle numérique d'altitude auquel nous avons superposé le réseau hydrographique. Ce document fournit une information particulièrement intéressante pour le travail de terrain. En donnant la configuration générale du terrain d'étude, il permet d'identifier la plupart des obstacles du site. Il améliore également la compréhension des formes d'occupation du sol et du développement urbain comme on le verra plus loin sur la carte finale de l'occupation du sol finale.

3.1.2. Apport de l'information altitudinale

L'information altitudinale est, elle aussi une donnée fondamentale pour les enquêtes de terrain effectuées à pied, surtout dans une ville de montagnes comme Yaoundé (Assako Assako, 1998). En effet, comme il s'agit de couvrir un vaste espace, il est préférable d'identifier des points d'observation, afin de limiter les déplacements. Ceux-ci doivent être disséminés sur l'ensemble de la zone à étudier. Le choix de ces points d'observation est

donc directement fonction de l'altitude mais aussi des formes de relief. Pour couvrir la totalité de la ville, six points ont été choisis (figure 1).

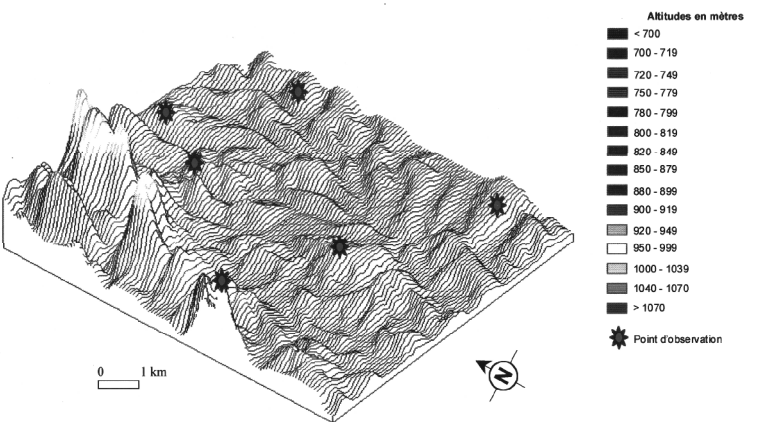


FIGURE 1 Choix des points d'observation en fonction de l'altitude et du relief pour réduire les déplacements sur le terrain. *Localisation of viewpoints in relation with altitudes and relief to limitate field displacements* (voir image couleur V à la fin de cette revue)

Ces six points ont été choisis sur des sommets de collines afin d'augmenter le champ d'observation. Il s'agit notamment du plateau Atemengue, des collines du quartier Mini Ferme, des collines du quartier Carrière, des hauteurs du quartier Mbala, de la colline du quartier Ekounou et du stade omnisports (figure 2). La visibilité s'apprécie dans les huit directions autour du point d'observation. Il s'agit d'un des modules proposés par les logiciels de traitement numérique de l'altitude. Le principe consiste à fixer, sur un modèle numérique de terrain, des points à partir desquels la vue d'un observateur est supposée se déplacer dans les huit directions anisotropes alentour. Les surfaces qui interrompent le champ visuel constituent des obstacles qui cachent derrière elles des surfaces plus basses. On obtient donc en sortie une image binaire constituée des zones vues et de celles qui ne le sont pas.

C'est là une pratique très utile lors du travail de terrain en milieu urbain. Le chercheur n'est plus obligé de parcourir toute la zone d'étude. Il peut se contenter de quelques points d'observation à partir desquels, il lui est possible d'apprécier la composition et la structuration de l'occupation du sol. Cette technique est d'autant plus importante qu'en vision horizontale, l'oeil perçoit un très grand nombre de détails difficiles, voire impossibles à syn-

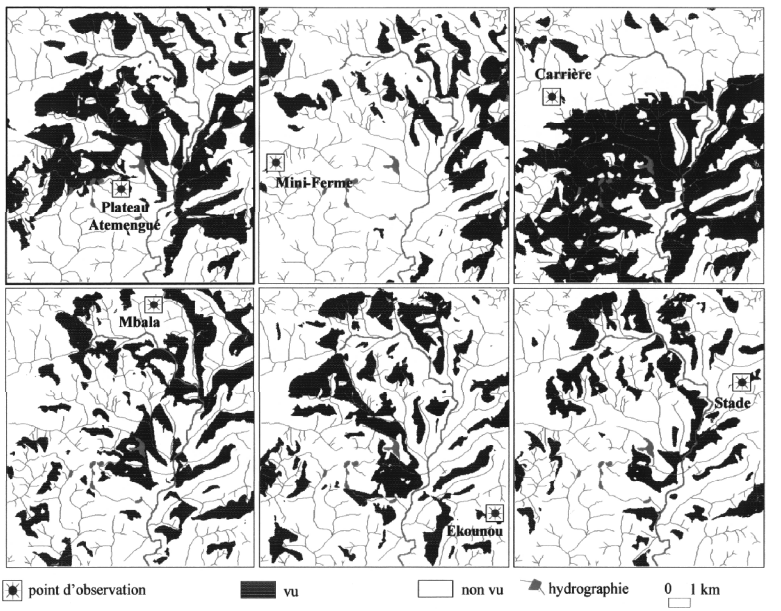


FIGURE 2 Visibilité du site de Yaoundé à partir des différents points d'observation. *Visibility of Yaounde site from the various observation points* (voir image couleur VI à la fin de cette revue)

thétiser. En prenant donc de la hauteur, on obtient des espèces de photographies aériennes obliques où des regroupements thématiques sont plus aisés.

La structuration de l'espace urbain africain s'accommode particulièrement de cette technique, compte tenu de la complexité de sa nature et de son extrême hétérogénéité. En effet, les formes de couverture du sol s'imbriquent les unes dans les autres, sans transition apparente. C'est ainsi qu'on observe du bâti au voisinage immédiat des zones en eau; un bâti populaire très dense dans les interstices d'un lotissement; des champs pratiqués sur des venelles reliant les cases d'un quartier anarchique, etc. Nous verrons plus loin que cette imbrication excessive des formes d'occupation du sol rend malaisée la conduite des traitements dirigés.

3.2. Recherche des repères sur l'image

Le but du travail de terrain est de parvenir à une interprétation de l'information satellitale en fonction de la réalité observée sur le terrain. L'image

étant un support sans toponymie, il convient, par comparaison avec des documents cartographiques, d'y fixer des repères qui facilitent la reconnaissance de la zone d'étude. À travers les différents canaux bruts et néo-canaux issus des premiers traitements, cette recherche des repères retient surtout les traits saillants de l'occupation du sol. Il peut s'agir des équipements ponctuels ou linéaires structurants (usine, gares, piste d'aéroport, monuments, etc.), d'objets géographiques spécifiques (lacs, étangs, grande rivière, etc.), des voies de communications et des grands carrefours.

C'est aussi l'occasion de repérer les zones sensibles : celles qui, du fait de leur activité ou de leur occupation sont inaccessibles au chercheur (zones militaires ou les environs d'un palais présidentiel).

3.3. Extraction *a priori* de l'occupation du sol

La phase préparatoire est aussi celle des traitements d'image *a priori*. Ces traitements sont ainsi désignés parce que effectués à un moment où le chercheur est censé ne pas connaître la zone d'étude. Parmi les plus représentatifs, nous en avons réalisé deux : la composition colorée et la classification non dirigée.

3.3.1. Composition colorée et zonage a priori de l'image

Réalisée avec le module COMPOSIT du logiciel IDRISI, la composition colorée a permis d'obtenir une information à la fois élémentaire et combinée. Elle est élémentaire dans la mesure où elle ressort le contenu informatif de chaque pixel, ce qui résout le caractère englobant de la classification qui, comme nous le verrons plus loin, procède par regroupement. La perception des détails est donc plus nette.

Elle est combinée parce que la composition colorée est le résultat d'une synthèse chromatique où se combinent 256 niveaux de bleu, 256 niveaux de rouge et autant de niveaux de vert, en synthèse additive des couleurs. On obtient donc en sortie un document riche de plus de seize millions de couleurs. Le caractère élémentaire et la richesse chromatique font de la composition colorée un document de base en télédétection : elle traduit assez fidèlement l'état de l'occupation du sol. C'est d'ailleurs pourquoi la plupart des analyses de paysage, d'aménagement et de gestion des ressources naturelles utilisant l'imagerie satellitale s'en servent comme support.

Par le zonage *a priori*, nous y avons ajouté une information supplémentaire, amorce d'une image-interprétation visuelle. Ce zonage est primaire parce qu'il permet d'identifier les grandes formes de couverture du sol. Cependant, on peut amorcer un zonage secondaire, en esquissant des subdivisions à l'intérieur des grandes classes d'occupation du sol. Pour ce faire, on considère les notions de densité, de structure et de texture des différents types d'occupation du sol. Ainsi, à l'intérieur des espaces bâtis, on peut par exemple distinguer ceux qui sont denses de ceux qui sont plus clairsemés. Tout en gardant le caractère élémentaire de l'information, on parvient à une identification des formes significatives de l'occupation du sol.

Il faut reconnaître que, réaliser *a priori* l'image-interprétation basée sur la composition colorée donne des résultats grossiers. La limite de l'information obtenue comme résultat provient de la richesse même de la composition colorée. En effet, il n'est pas aisé à l'oeil humain de synthétiser seize millions de couleurs. C'est ainsi qu'il est souvent plus convenable de procéder par un regroupement au moyen d'une classification non dirigée.

3.3.2. Classification non dirigée

La classification non dirigée ou automatique d'une image permet généralement de ressortir les traits majeurs de l'occupation du sol. En ce sens, elle permet de simplifier la richesse chromatique excessive de la composition colorée. Après avoir produit des résultats concluants dans l'analyse des milieux naturels, elle a vu son application s'étendre à l'analyse de l'espace urbain où, malgré la forte hétérogénéité de sa composition, des recherches ont produit des méthodes de reconnaissance automatique des différents tissus (Armand et Hernandez, 1987). La plupart des logiciels de traitement d'images proposent un module correspondant. En ce qui concerne le logiciel IDRISI, il s'agit du module « Cluster ». Il permet d'effectuer une classification non dirigée à partir d'un néo-canal composition colorée. L'un des paramètres les plus intéressants de ce module est qu'il permet à l'utilisateur, entre autres options, de fixer le nombre de classes désirées.

La figure 3 a quinze classes : les zones en eau ou marécageuses, la voirie, la végétation (cinq types) et le bâti (huit types). Elle donne une vision détaillée, voire pointilliste de l'occupation du sol. En ce sens, elle permet même d'identifier le réseau routier, malgré des perturbations dans les zones de forte densité du bâti. En revanche, ce pointillisme complique l'interprétation visuelle de l'occupation du sol et dénature en quelque sorte

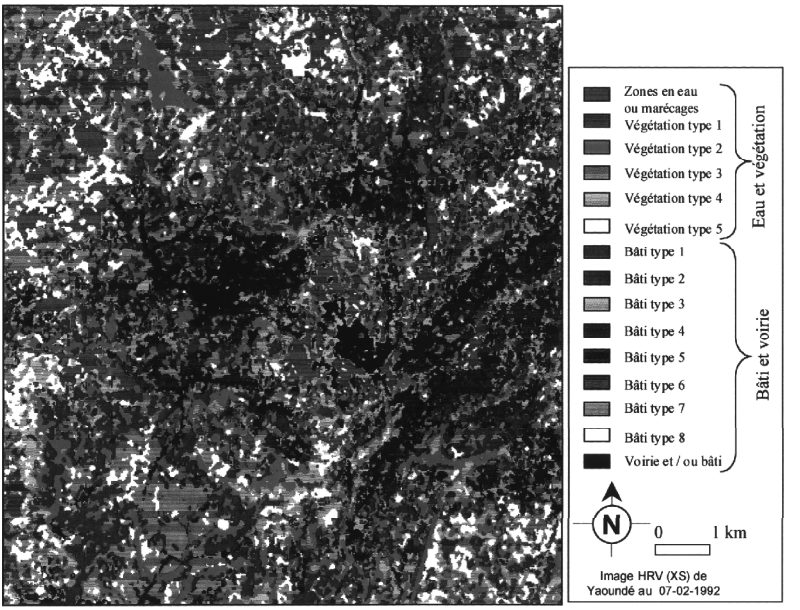


FIGURE 3 Classification non dirigée en 15 classes : une discrimination plus fine mais une légende imprécise. *Unsupervised classification in 15 clusters: an acute discrimination for an approximate legend* (voir image couleur VII à la fin de cette revue)

la réalité de l'organisation du bâti en milieu urbain africain, notamment caractérisée par la quasi homogénéité des formes elle-même liée à une spécialisation architecturale diffuse et quasi imperceptible des quartiers.

Quelque pertinente qu'elle puisse être, la classification non dirigée présente une lacune certaine : elle donne une information déjà synthétisée par le regroupement des individus (pixels) opéré sur la seule base de la distance numérique. Or, des pixels numériquement proches peuvent traduire des réalités thématiques très différentes et inversement (Bonn et Rochon, 1992). Eu égard à cette lacune, on applique d'autres algorithmes de traitement d'images qui, sans plus tenir compte seulement des valeurs numériques, intègrent la disposition géographique des pixels pour extraire les formes significatives qui structurent l'espace : c'est le principe de base des traitements comme la morphologie mathématique (Callot *et al.*, 1993). Dans le cadre de la présente expérimentation, le travail de terrain sera un prélude à une classification dirigée sur la base des parcelles-tests au contenu thématique connu.

4. TRAVAIL DE TERRAIN

Le travail de terrain comprend deux volets : administratif et scientifique. Lorsqu'on effectue un travail de terrain dans une ville africaine à l'aide d'une image satellitaire, il convient de se renseigner au préalable sur la possibilité ou non de mener des enquêtes, sur l'accessibilité ou non de certaines zones urbaines.

Le volet scientifique consiste en trois phases : l'observation visuelle directe de la réalité, la conduite des enquêtes et la confrontation des résultats des traitements *a priori* (classifications non dirigées et composition colorée, dans notre cas précisément). Lorsque les moyens le permettent, il est préférable de compléter cette démarche par des photo-radiomètres, afin de comparer la radiométrie directement relevée sur le terrain et celle donnée par les pixels de l'image. Il est également convenable d'utiliser le *Global Positionning System* (GPS), afin de recaler l'image et la projection cartographique. Cette opération permet d'obtenir une information plus précise sur la position des formes significatives de l'occupation du sol.

Pour mener à bien le travail de terrain, il faut disposer des documents assez précis. Ainsi, en plus du plan de la ville au 1 : 10 000, nous avons agrandi les résultats de classification et de composition colorée au 1 : 25 000 par le procédé de restitution des photographies d'écran.

Il est préférable d'effectuer le travail de terrain à pied. Cela permet de vérifier les moindres détails. Mais lorsqu'on a une vaste zone d'étude, on peut exploiter la visibilité offerte par les points d'observation, comme le montre la figure 2. Cette approche convient mieux aux villes de montagnes. Dans le cas de Yaoundé, nous avons combiné les deux méthodes pour obtenir plus de précisions.

5. TRAITEMENTS DE CORRECTION

5.1. Objet des traitements de correction

Ils représentent l'étape des choix et des décisions. Très souvent, le chercheur est appelé à trancher entre l'information satellitale, l'information cartographique et l'information directement observée sur le terrain. Cela peut aussi bien concerner l'identification des types d'occupation du sol que l'étendue des zones. On parvient ainsi, par exemple, à scinder une zone

homogène sur l'image ou à en modifier les contours. À l'opposé, il arrive qu'on assemble des types de couvertures du sol tout à fait différents de par leur nature, mais qui présentent une unité fonctionnelle. C'est, par exemple, le cas des aéroports, constitués de pistes d'atterrissage et de parcs de stationnement (minéral routier), des espaces verts (végétation) et des bâtiments de contrôle que peuvent jouxter les usines et les autres entrepôts d'une zone industrielle (minéral immobilier).

L'une des opérations les plus significatives est la classification dirigée dont nous présentons ci-après le principe et les modalités pratiques.

5.2. La classification dirigée

5.2.1. Principe

La classification dirigée est le complément indispensable de la classification automatique. Mais, à l'opposé de cette dernière, elle se fait sur la base d'une solide connaissance des réalités de terrain. Elle a pour objectif de repérer sur l'image des zones dont la couverture est dûment reconnue par l'utilisateur. Celui-ci sait par exemple que telle zone observée sur le terrain correspond à telle région précise de l'image. Il peut donc étendre à l'image entière une discrimination dont les caractéristiques ont été générées à partir des zones-tests.

5.2.2. Procédure

Pour répondre au principe ci-dessus exposé, la classification dirigée se déroule en trois étapes complémentaires.

La première consiste à **numériser les zones-tests** sur la base d'une composition colorée. Avec le logiciel IDRISI, l'utilisation de la composition colorée pour la numérisation des zones-tests demeure le meilleur moyen. Il faut cependant dire que d'autres logiciels de traitement d'images permettent un multifenêtrage grâce auquel plusieurs canaux d'une seule image peuvent être affichés simultanément ou successivement pour la numérisation d'un même fichier vecteur.

Ce sont les zones-tests numérisées à cette étape, directement sur l'écran d'affichage de la composition colorée qui seront utilisées plus tard comme signatures. C'est ainsi que chacune d'elles doit être identifiée par un numéro. Le nombre de zones-tests numérisées représente celui de signatu-

res (ou échantillons) et traduit le nombre de classes de la future image classée.

La numérisation nécessite beaucoup de précautions. L'utilisateur ne doit choisir que des zones effectivement observées et dont il connaît parfaitement la structure et la composition. Par ailleurs, ces zones doivent présenter, sur l'image, la couverture la plus homogène possible, afin d'éviter des regroupements aberrants. Il s'agit d'une tâche délicate car, comme nous l'avons souligné plus haut, en milieu urbain africain, il est difficile d'avoir de vastes zones homogènes.

Dans le cadre de la présente expérimentation, nous avons choisi six zones:

- le lac central (espace homogène en eau, mais de faible étendue);
- un marécage assez homogène dans la zone montagneuse du nord-ouest;
- une zone assez homogène de forêt dans le nord-ouest montagnard;
- une zone hétérogène : mélange de bâti lotissement, bâti populaire relativement dense (quartier Ekounou);
- une zone très hétérogène : mélange de lotissement et d'une urbanisation anarchique très dense (quartier Essos);
- un élément linéaire assez homogène (axe routier goudronné en centre ville).

La deuxième étape est celle de la **création des signatures** à partir des parcelles-tests numérisées à l'étape précédente. Les numéros d'identification attribués aux zones-tests lors de leur numérisation sont remplacés par des dénominations plus explicites. Lors de cette étape, le module MAKESIG du logiciel IDRISI extrait pour chaque signature, les statistiques (minimum, maximum et moyenne) dans tous les canaux devant être utilisés plus tard lors de la classification proprement dite. C'est à cette étape que s'élaborent les centres des classes en fonction desquels les pixels seront classifiés sur l'ensemble des canaux utilisés.

La troisième étape est celle de la **classification proprement dite**. Les canaux déclarés sont classés en fonction des centres de classes générés à l'étape précédente selon l'une des trois méthodes suivantes : la distance minimale (module MINDIST), la méthode des hyperboîtes ou des parallélépipèdes (module PIPED) ou la méthode du maximum de vraisemblance (MAXLIKE). Il est intéressant de comparer l'efficacité de ces trois méthodes soit en confrontant le résultat obtenu à un document thématique de

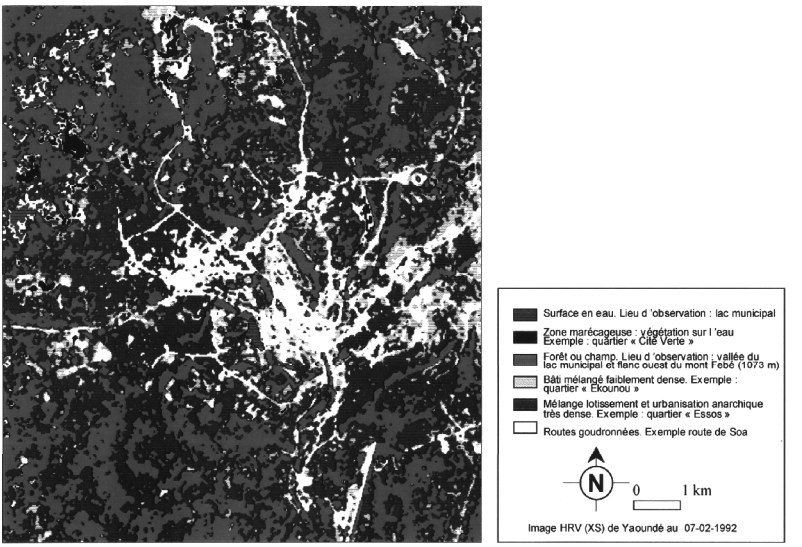


FIGURE 4 Classification dirigée : des regroupements excessifs. *Supervised classification: unwarranted partition* (voir image couleur VIII à la fin de cette revue)

type cartographique, soit en procédant par croisement des différents résultats, afin de noter les points de discordance et de ressemblance.

Pour ce qui concerne l'image de Yaoundé, le meilleur résultat a été obtenu avec la méthode du maximum de vraisemblance (figure 4). À l'exception de la classe « surface en eau », toutes les autres classes présentent des éléments de confusion, du fait d'un regroupement excessif et contradictoire des pixels. Nous voyons ici la manifestation de la complexité de l'espace urbain africain, comme nous le signalions plus haut. Les travaux de Baudot et Wilmet (1992) sur la quantification de la croissance spatiale de Lubumbashi, Marrakech et Ouagadougou font état des difficultés similaires. En effet, la résolution spatiale de 400 m^2 des images HRV-XS de SPOT demeure trop grossière pour permettre une discrimination fine de la composition urbaine. En numérisant une zone-test de vingt pixels par exemple, on isole une superficie de 20 fois 400 m^2, soit 8 000 m^2. Or, il est presque impossible de trouver une zone homogène de 8 000 m^2 en milieu urbain africain en général, à Yaoundé en particulier. C'est compte tenu de cette difficulté de discrimination que les classes relatives au bâti sont toutes mixtes. C'est le cas notamment de la classe « bâti mélangé faiblement dense » ou « mélange lotissement et urbanisation anarchique très dense ».

Il fallait trouver une situation intermédiaire entre le pointillisme et l'identification approximative de formes d'occupation du sol de la classification non dirigée et le regroupement excessif de la classification dirigée, tout en tenant compte des enquêtes et observation du terrain. C'est l'objet de la carte de synthèse.

6. CARTE DE SYNTHÈSE DE L'OCCUPATION DU SOL

Pour produire une synthèse d'information permettant une meilleure connaissance de la couverture du sol, il est souvent nécessaire de combiner des données de sources et même de nature différentes. La combinaison des images satellitales de résolutions spatiales différentes est bien connue (Collet, 1989). C'est dans cette logique que s'inscrit la carte de synthèse de l'occupation du sol (figure 5). En effet, elle est le résultat de la combinaison de l'image satellitale, de l'information cartographique et du travail de terrain. Elle résout le pointillisme de la classification non dirigée, améliore le regroupement excessif de la classification dirigée et explicite les postes de légende de l'occupation du sol. Ceux-ci peuvent être répartis en deux catégories, selon que les classes sont fixées en fonction d'une spécialisation physique de la couverture du sol ou qu'elles relèvent d'une spécialisation fonctionnelle de l'espace.

6.1. Classes fixées suivant la spécialisation physique de la couverture du sol

Les classes ont été fixées suivant la spécialisation physique de la couverture du sol. Il s'agit notamment des espaces qui, sur le plan de la morphologie et de l'organisation, dégagent une identité propre, permettant de les distinguer. On en distingue deux sous-catégories : les milieux naturels et les espaces bâtis. Pour les milieux naturels, on trouve les espaces en eau qui, sur l'image satellitale, se limitent au seul lac central. Le reste du réseau a été reconstitué grâce à l'information cartographique. Les espaces végétalisés (forêts et vallées agricoles) se distinguent nettement sur l'image. Ils permettent de mieux comprendre la croissance spatiale de la ville. Ainsi, la zone des hautes terres de l'ouest et du nord-ouest, entièrement couverte de forêts, constitue une barrière naturelle au front d'urbanisation qui se déploie alors en direction du nord, du sud et de l'est. Par

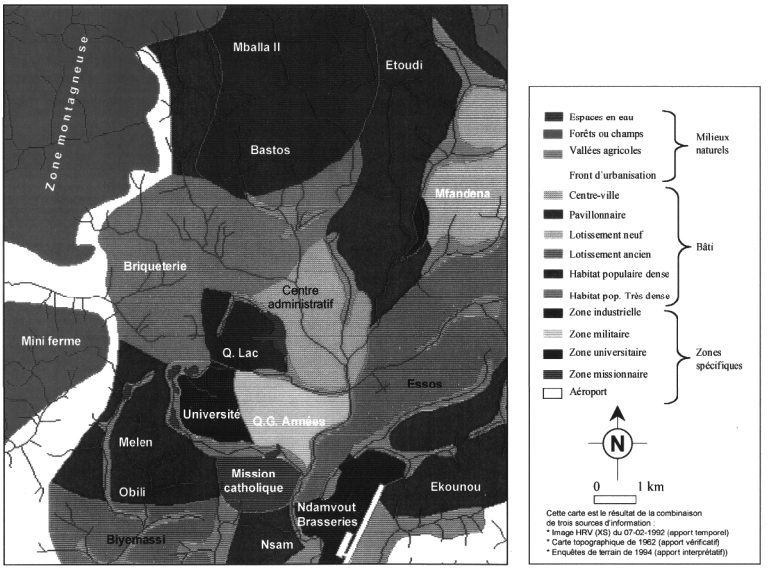


FIGURE 5 Carte finale d'occupation, résultat de la combinaison de l'image, de la carte et du travail de terrain. *Final land cover map showing the thematic contributions of the satellite image, the topographic map and the field work* (voir image couleur IX à la fin de cette revue)

ailleurs, les vallées agricoles, suivant le réseau hydrographique, auraient dû constituer des linéaments régulièrement centripètes, pour épouser la géomorphologie de Yaoundé. Mais elles sont intermittentes, entrecoupées par des espaces bâtis. Cela suppose que des zones marécageuses ont été densément urbanisées.

Les classes désignant des espaces bâtis présentent, sur l'image, une structuration qui permet de les distinguer les uns par rapport aux autres. Cette distinction purement physique a été complétée par la représentation et la délimitation mentale que les populations font de leurs quartiers respectifs. Ainsi, par exemple, le centre-ville se distingue par ses grands ensembles immobiliers, son réseau routier dense sous lequel des cours d'eau ont été enterrés; le quartier « Briqueterie » par contre se distingue par un bâti excessivement anarchique et dense; les lotissements se distinguent par l'alignement des unités immobilières et la trame des voies, etc.

À la jonction des espaces bâtis et des milieux naturels se déploie le front d'urbanisation. Il s'agit d'une zone mixte dite d'extension urbaine où le bâti s'impose progressivement dans une ceinture encore largement végétale.

6.2. Spécialisation fonctionnelle des espaces

La spécialisation fonctionnelle concerne les espaces qui, sur le seul plan de la couverture physique du sol, ne se distinguent en rien des autres. Cependant, leur identité fonctionnelle en fait des espaces spécifiques regroupant plusieurs réalités. C'est le cas, par exemple, de la zone industrielle où l'on trouve certes des bâtiments industriels et notamment les citernes des Brasseries du Cameroun. Mais, tout autour se développent des quartiers populaires, des champs et bien d'autres formes d'occupation du sol impossibles à discerner sur l'image.

Les zones militaire, missionnaire et universitaire obéissent à la même logique. Les installations militaires proprement dites se confondent avec les résidences des hauts cadres de l'armée et de l'État qui les environnent. Il s'y greffe de plus en plus des quartiers populaires. La zone universitaire, sur l'image, s'apparente à un quartier pavillonnaire, avec des bâtiments séparés par de vastes espaces verts. Il n'y a donc que la fonction (universitaire) qui permet de la distinguer des espaces physiquement semblables. La zone missionnaire se trouve sur une colline. Elle regroupe les installations religieuses entourées de vastes terrains vides voués soit à l'agriculture, soit à la méditation. Ce faisant, cette zone constitue un obstacle à l'urbanisation qui a dû le contourner. En ce sens, cette zone s'individualise bien sur l'image et peut s'apparenter à la classe « front d'urbanisation : bâti et végétation ».

7. DISCUSSION

La carte d'occupation du sol (figure 5) est le résultat de la combinaison des informations satellitale, cartographique et visuelle. L'image HRV apporte une contribution thématique et temporelle fondamentale. Enregistrée en 1992, elle donne sur la ville l'information la plus récente en matière d'occupation du sol, le schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme (SDAU), dernier document en la matière, date de 1982 (Assako Assako, 1996). La carte topographique de 1962 offre une contribution temporelle, thématique et toponymique permettant d'apprécier le sens et la dynamique de la croissance spatiale urbaine. Les observations et les enquêtes de terrain offrent un apport interprétatif : la fonctionnalité de la nomenclature en

témoigne. La connaissance préalable de la zone d'étude a été d'un grand intérêt.

Cette expérimentation méthodologique a permis de combiner, au-delà des données, les approches élémentaire et zonale, fondamentales dans la recherche en géographie. Par contre, sur le plan de la compréhension des faits urbains et de l'évaluation de la méthode, il nous aurait fallu disposer d'une image panchromatique. Avec sa résolution de 10 m et malgré ses limites spectrales (0,4 µm – 0,7 µm), elle aurait permis d'obtenir une information plus riche et plus détaillée sur l'organisation de l'occupation du sol.

8. CONCLUSION

L'imagerie HRV-XS s'affirme de plus en plus comme un support informatif fiable dans l'analyse des milieux urbains en général (Weber, 1995) et africains en particulier. Avec l'amélioration de la résolution spatiale, elle devient un puissant outil de planification des villes des pays en développement, en complément des méthodes classiques d'acquisition des données géographiques (Armand, 1986; Bariou, 1988). Cependant, lorsqu'elle est utilisée sans apport des données exogènes (cartographiques, photographiques et visuelles), elle présente encore beaucoup d'insuffisances. À titre d'exemple, la résolution spatiale de 20 m des images HRV-XS est trop grossière pour une analyse fine des milieux urbains africains, excessivement hétérogènes et essentiellement composés d'éléments de taille inférieure à 400 m^2 (Assako Assako, 1996). Aussi, l'extraction des éléments linéaires est très délicate, surtout lorsque ceux-ci sont étroits. Ainsi, nous n'avons pu reconstituer le réseau hydrographique, qui se limite sur l'image au lac central, qu'en nous servant de la carte topographique.

La présente expérimentation s'ouvre sur deux perspectives. La première consisterait à intégrer l'analyse diachronique, de manière à suivre l'évolution de l'occupation du sol sur des intervalles de temps réguliers et relativement courts. Dans la mesure où la ville-test connaît un taux de croissance annuel de plus de 7 %, une telle approche serait d'un grand intérêt pour la recherche et pour les décideurs. La deuxième perspective consisterait à développer des méthodes de discrimination des formes d'occupation du sol qui soient complémentaires à la classification et à l'image interprétation. Il pourrait notamment s'agir de la méthode de segmentation dont l'efficacité a déjà été prouvée (Bonn et Rochon, 1992).

Remerciements

Je n'ai pas assez de mots pour remercier Monsieur Claude Collet, professeur titulaire de géomatique à l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg

Références

Armand, M. (1986) Images spatiales et planification des villes du Tiers-Monde. *Mondes en développement*, n° 56, Paris-Bruxelles, 25 p.

Armand, M. et Hernandez, M. (1987) Vers une identification automatique des tissus urbains. *Bulletin de la société française de photogrammétrie et de télédétection*, vol. 2, n° 106, p. 5–22.

Assako Assako, R. J. (1996) Contribution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géo-référencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat, Université de Paris X, Nanterre, 327 p.

Assako Assako, R. J. (1997a) Yaoundé : éléments pour un SIG urbain. Rapport de stage, AUPELF-UREF, Institut de géographie, Université de Fribourg, Fribourg, 67 p.

Assako Assako, R. J. (1997b) Essai de différenciation des quartiers de Yaoundé à l'aide d'une image HRV de SPOT. in Dubois J-M.M., Donnay, J.-P., Ozer, A., Boivin, F. et Lavoie, A. (dir.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF-UREF, Coll. Universités Francophones, Montréal, p. 145–153.

Assako Assako, R-J. (1998). Apport de la télédétection et du SIG dans la recherche des zones constructibles d'un site urbain de collines : le cas de Yaoundé (Cameroun). *L'Espace Géographique*, vol. 27, n° 2, p. 122–128.

Bariou, R. (1988) Apport des satellites de deuxième génération LANDSAT TM et SPOT HRV à l'analyse urbaine (Rennes, France), *Photo-interprétation*, n° 1, p. 47–62.

Baudot, Y. et Wilmet, J. (1992) Quantification de la croissance urbaine au moyen de satellites à haute résolution. Application à Lubumbashi, Marrakech et Ouagadougou. In Actes du colloque MARISY '92, Rabat (Maroc), 7–9 octobre 1992, p. 279–291.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992). Précis de télédétection. Vol. 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec – AUPELF-UREF, Sainte-Foy, 485 p.

Callot, Y., Mering, C. et Simonin, A. (1993) Quantification et cartographie par télédétection des aires dunaires sur les images SPOT panchromatiques à partir des méthodes de la morphologie mathématique. Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, n° 53, p. 221–232.

Collet, C. (1989) L'utilisation des images satellitaires dans l'analyse urbaine. *Photo-interprétation*, no 89–5 et 6, p. 73–77.

Weber, C. (1995) Images satellitaires et milieu urbain. Hermès, Paris, 185 p.