

PARTIE IV

Cartographie urbaine

24

Apport d'une simple composition colorée à l'étude de l'espace urbain : cas de Mexicali (Mexique)

ANNE COLLIN DELA VAUD et DJAMEL TOUDERT

*Institut des hautes études de l'Amérique latine de l'Université de Paris III,
28, rue Saint-Guillaume, 75007 Paris, France et CNRS (URA 111- CREDAL);
téléphone : +33 (1) 44-39-86-70; télécopieur : +33 (1) 45-48-79-58*

Résumé

L'objectif de ce travail est de montrer comment, avec très peu de moyens, il est devenu possible, grâce à l'imagerie satellitaire, d'analyser l'évolution générale d'une ville, quelle que soit sa taille. Cette connaissance, préalable à tout décideur urbain, n'était plus possible étant donné la vitesse de croissance des espaces urbains, le coût et le temps nécessaires pour établir une cartographie de base actualisée chaque année. Avec une simple composition colorée, il est possible de cartographier l'occupation du sol et avec des documents anciens classiques (cartes, photographies aériennes) de montrer les tendances de la dynamique urbaine. Cette approche géographique de la ville de Mexicali (438 000 hab. en 1990) a permis de mettre en évidence, d'une part, les zones de fortes densités, en particulier en dehors de l'espace central et, d'autre part, le rôle très structurant des réseaux à la fois routiers et d'irrigation dans le développement urbain. Les contraintes (vallée, voie ferrée et terres agricoles irriguées) sont dépassées peu à peu pour aboutir à un tissu urbain compact après remplissage des espaces ruraux situés entre les antennes urbaines (axes et villages). Cette étude rapide a permis de poser des questions qui seront approfondies ensuite sur le terrain et par des enquêtes forcément longues.

1. Introduction

L'analyse d'une ville, sans connaissance du terrain, est-elle possible à partir de données satellitaires de premier niveau d'exploitation ? Cette question n'est pas seulement pédagogique, mais aussi méthodologique pour le chercheur, et en particulier les acteurs de la planification et de l'aménagement. En effet, une première approche visuelle du fait urbain à partir d'une simple composition colorée permet de soulever des questions de base qui feront gagner du temps sur le terrain, d'autant plus que celui-ci est vaste. Le choix de l'étude porte sur la ville de Mexicali, située à la frontière nord-ouest du Mexique avec les États-Unis, dans l'État de Basse Californie, en pleine zone aride. Avec plus de 438 000 habitants en 1990, cette ville enregistre une croissance très forte liée à l'attraction des activités développées dans l'oasis et dans la ville même. Lieu de passage pour gagner l'Amérique anglo-saxonne, elle connaît de ce fait une population migrante « flottante » qui réside plus ou moins dans la ville pendant quelques semaines voire quelques mois. La ville s'étend en 1994 sur environ 8 km de ligne frontalière et sur 5 km de largeur vers le sud. Elle est la seule ville importante de l'oasis qui regroupe près de 300 localités et devra accueillir 100 000 personnes entre 1990 et 2000 (fig. 1).

Les objectifs sont d'établir, au 1 : 50 000 et à partir des données de la composition colorée de l'image HRV (XS) de SPOT de 1994 et de l'image HRV (P) de 1991 (les données de cette dernière sont partielles et ne couvrent que la partie occidentale de la ville) :

- une carte de l'occupation du sol de la ville et de sa zone périurbaine en 1994 à partir d'une composition colorée HRV (XS) de 1994;
- une carte de l'occupation du sol de la partie occidentale à partir de données partielles de HRV (P) sur papier de 1991;
- une carte de l'évolution de la ville établie à partir d'une carte topographique de 1972, de quelques photographies aériennes de 1982 et de l'image HRV (XS) de 1994.

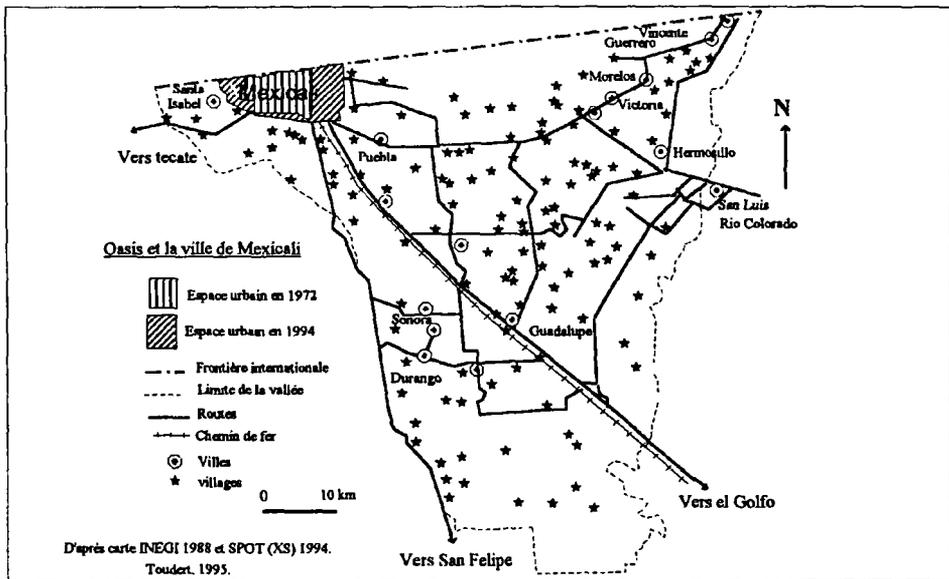


Figure 1. Carte de localisation de l'oasis et de la ville de Mexicali

2. Occupation du sol et organisation de l'espace

L'analyse de l'espace de Mexicali est facilitée par les contrastes relativement nets entre l'espace bâti et l'espace agricole, même si certaines franges urbaines de type pionnier offrent quelques doutes dans certains secteurs périurbains où le sol nu et les maisons trop petites se confondent dans un espace qualifié d'intermédiaire n'étant plus rural ni vraiment urbain (fig. 24-2, voir cahier couleur).

L'image offre trois grands ensembles aux contours très tranchés les uns des autres : le désert, l'oasis et la ville. Dans ces deux derniers dominent les formes géométriques. Grandes parcelles et îlots urbains suivent un découpage imposé par les réseaux routier, d'irrigation et de drainage. Ces réseaux sont toutefois difficiles à identifier car souvent parallèles.

L'espace urbain est au cœur de l'oasis, de forme rectangulaire assez massive avec un axe vers le nord, qui est en fait la ville américaine de Calexico, et une antenne le long d'un axe routier vers le SE. Dans la ville, de grandes avenues forment les éléments de structure d'un tissu urbain très découpé en îlots réguliers de formes rectangulaires assez répétitives et regroupées selon des ensembles de surface homogène.

Trois éléments perturbent l'agencement urbain et rural :

- la frontière Mexique/États-Unis, une ligne droite impose brutalement une division de l'oasis en deux secteurs organisés régulièrement mais différemment. La frontière bloque au nord l'extension de la ville de Mexicali;

- la rivière en provenance du NO traverse l'oasis et la ville en direction du SE; cette diagonale rompt, sur son passage, la structure organisée en introduisant des formes perturbatrices parce qu'inachevées et non structurées;

- l'interface entre la ville et l'oasis révèle des irrégularités caractéristiques des zones périurbaines où des changements d'usage sont en cours. Chaque année, la ville gagne sur les terrains agricoles qui peuvent être soit contigus, soit espacés. La croissance très rapide de la demande en terrain à bâtir trouve sa réponse dans l'achat de terrain agricole de manière individuelle ou par l'intermédiaire de promoteurs qui organisent un lotissement (*colonia*). Le parcellaire urbain suit donc de très près le parcellaire agricole lui-même lié au réseau de canaux d'irrigation (courbe de niveau) et à celui des routes ou des pistes.

3. Densités de l'espace urbain

L'espace urbain bâti offre des densités relativement fortes aussi bien dans la zone centrale que dans certains secteurs de la zone située autour du centre (fig. 3) :

- la zone de forte densité centrale présente un tracé des avenues permettant de distinguer rapidement un rectangle central et non un éventail comme on aurait pu s'attendre étant donné le point de départ que représente le passage de la frontière; cette forme géométrique ne doit pas être considérée dans sa totalité comme le cœur de la ville, car dans la vallée, quelques secteurs moins denses et même des vides imposent une analyse plus fine; l'analyse de l'évolution depuis 20 ans montre bien la grande coupure de la vallée centrale et la croissance urbaine bien séparée entre l'est et l'ouest jusqu'à la construction de ponts et de grandes avenues;

- une première couronne (sauf au nord à cause de la frontière) est actuellement en cours de consolidation avec des secteurs plus ou moins denses et, un réseau de voiries asphaltées ou non;

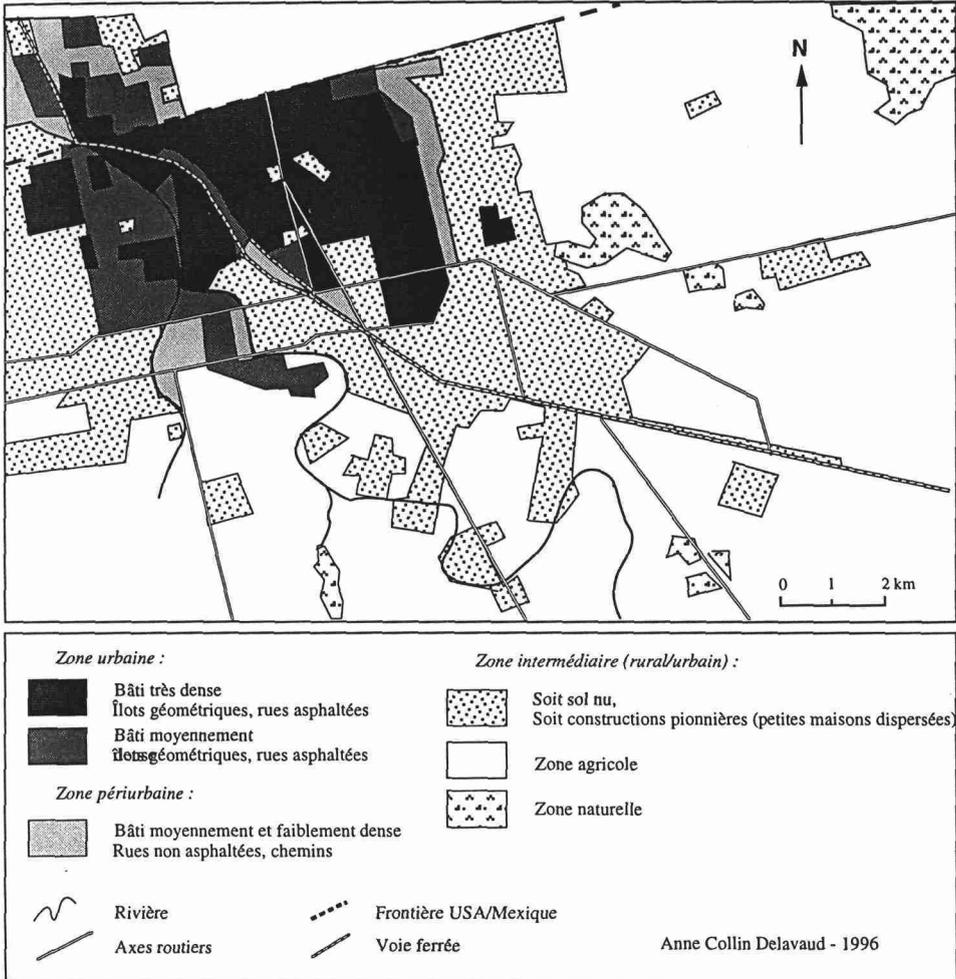


Figure 3. Occupation du sol de Mexicali en 1994, à partir de l'image HRV

- un espace périurbain est identifié au-delà des secteurs inclus dans les limites administratives, avec des secteurs proches de ceux de la zone précédente mais aussi des noyaux d'habitat isolé; ces derniers peuvent être relativement denses et consolidés; également, il faut noter des champs cultivés, jadis de grande taille mais aujourd'hui subdivisés en de nombreux lots et parfois occupés par des maisons.

La relative uniformité du tissu urbain est due à la prépondérance de l'habitat individuel, caractéristique dans les villes latino-américaines, mais renforcée ici par le caractère sismique de la zone californienne (faille de San Andreas). Les constructions en hauteur sont relativement rares. De toute façon, l'habitat collectif locatif n'est guère apprécié et demeure pratiquement inexistant. Dans le cas présent, l'objet bâti visible, la maison, est donc de taille réduite et difficilement identifiable. Le lotissement, forme prépondérante de production de l'espace urbain implique une urbanisation par plaques de taille variable, contiguës ou non.

4. Structure urbaine et maillage

La structure est ici très aisée à lire tant le quadrillage des voies est simple avec un tracé orthogonal prépondérant. De rares diagonales traversent la ville. Ce sont trois ou quatre grandes avenues et le chemin de fer, même si ce dernier n'est plus guère utilisé qu'une fois par semaine. La voirie est ici très visible grâce à de bons contrastes sur l'image, laquelle ne nécessite pas le recours aux filtres traditionnels (ex. laplacien).

Les systèmes linéaires sont bien individualisés grâce à un bon réseau routier hiérarchisé et le plus souvent asphalté donc bien visible. Les avenues plus larges servent d'ossature aux différents secteurs urbains et en particulier orientent les secteurs en cours d'urbanisation. Parfois, elles indiquent les ruptures dans le bâti ou le changement d'usage (rural). Les échangeurs sont bien individualisés.

Les rues dessinent la trame des îlots (*manzanas*) et définissent parfois des zones homogènes où les îlots sont de même densité et les parcelles de même taille. Certains *manzanas* sont entrecoupés de ruelles.

Une partie de la structure urbaine mise en place est dépendante du parcellaire rural sur lequel la ville s'est bâtie. Le tracé géométrique des champs irrigués a donné naissance à des lotissements de même taille. Le tracé des canaux et des pistes rurales a laissé place aux rues. Les grands axes urbains se prolongent tous par des chemins ruraux. L'adaptation de l'ancien réseau rural au nouveau réseau urbain est ici facile à observer.

Cette ordonnance n'est pas respectée dans le secteur de la vallée où la rivière, relativement encaissée, joue le rôle d'élément perturbateur par son mouvement diagonal par rapport à la structure générale de l'oasis, mais aussi par le fait que sa largeur, ses pentes et sa zone inondable, empêchent le prolongement des rues d'une rive à l'autre. Également, certains secteurs récents du sud de la ville offrent une apparence désordonnée où la trame viaire apparaît très faiblement.

Les formes carrées et rectangulaires dominent le tissu urbain avec une légère prépondérance des dernières en raison du recoupement des îlots par des voies secondaires. Le maillage est fait d'ensembles homogènes représentant souvent plusieurs îlots (*manzanas*). Le maillage de bandes rectangulaires étroites prend appui sur des axes routiers et correspond soit à des sols nus en voie de lotissement soit à des ensembles collectifs ou à des habitats individuels.

Lorsque le maillage devient irrégulier, le bâti est discontinu, sauf, dans les parcelles agricoles de l'oasis. La figure 4 met en évidence les regroupements de parcelles autour de la ville selon leurs formes et l'adaptation de l'espace urbain à cette variété. L'extension de l'ouest de la ville (fig. 5) est en effet très facilitée par le parcellaire rural préexistant qui est en damier. Il ne reste plus qu'à la subdiviser en îlots urbains (fig. 6).

5. Etapes de développement

Cette approche de l'évolution d'une ville sur 22 ans confirme que, dans un espace plat et sans accident topographique majeur formant une barrière à la croissance urbaine, l'espace urbain a tendance à croître du centre vers la périphérie immédiate laissant à la ville une forme massive et compacte. Le poste frontalier a donné naissance au centre-ville situé à proximité du passage entre la ligne frontalière, le chemin de fer et la vallée. Le schéma classique du développement en éventail ne s'est pas présenté ici tant la force du plan en damier, lui-même tributaire d'un quadrillage lié au réseau d'irrigation, a réussi à imposer presque partout un tracé orthogonal des rues et des avenues principales.



-  **Parcelles cellulaires**
Les parcelles polygonales sans orientation apparente, les zones de passages, ayant un côté courbe le long des limites agricoles et non agricoles
-  **Parcelles en lanières perpendiculaires**
Petites et grandes lanières regroupées
-  **Parcelles en damier**
Damiers réguliers et non réguliers, petits et grands regroupés

Figure 4. Parcelleire autour de la ville de Mexicali en 1991 à partir de l'image HRV (P)

Le franchissement de la vallée s'est effectué très vite près du centre historique mais récemment plus au SO. La tendance de la ville à glisser vers le SE est bien réelle en raison de la prépondérance de l'axe routier et de la voie de chemin de fer qui ont favorisé l'essor de véritables axes urbains. La route vers le nouvel aéroport situé dans le désert a ouvert également une zone de croissance vers le NE. Néanmoins, l'expansion vers l'ouest s'est également imposée après les aménagements routiers qui ont facilité le remplissage des zones demeurées vides entre 1972 et 1982 (fig. 7).

La progression de la ville avance donc sur les terres cultivées et irriguées de l'oasis de trois façons :

- soit progressivement selon le parcellaire agricole qui sert de base à un lotissement urbain;
- soit le long des axes avec un remplissage ultérieur; cette forme linéaire de l'habitat sert de démarrage à une urbanisation en profondeur;
- soit par transformation des hameaux ruraux ou gros noyaux villageois situés à faible distance; les plus importants sont les *ejidos*, c'est-à-dire les regroupements d'exploitations de paysans sur des terres collectives à la suite de la Réforme agraire du début du siècle; les *ex-ejidos* Gonzalez Ortega, Coahuila, Zacatecas ont été absorbés dans la décennie 1960.



Figure 5. Image HRV (P) de SPOT de 1991 de la ville de Mexicali

Tout naturellement, la ville s'est étendue en direction de l'est et du SE, tendance qui se poursuit depuis un siècle même si l'espace bâti a récemment gagné l'ouest.

Comme le montre cette première approche de l'évolution depuis 20 ans, le remplissage vers le sud va se poursuivre pour combler le mitage en place. L'extension sur les parcelles agricoles continuera modestement en raison du caractère productif de ces terrains alors qu'il est possible de passer à la phase de densification pour cette immense zone périurbaine mise en place pendant les années 1980. Mais, la loi récente de 1992 permettant la vente officielle des terres des *ejidos* pourrait faire évoluer autrement l'urbanisation actuelle en jouant contre le phénomène de remplissage. Les paysans peuvent désormais vendre leurs petits terrains ruraux qui seront d'autant meilleur marché qu'ils seront éloignés de la ville. La ville peut donc continuer son extension par la création de morceaux de ville éloignés de la zone urbaine continue. N'est-ce pas déjà le cas à l'*ejido* Santa Isabel à l'ouest ?

Pour quelles raisons certains secteurs accessibles ne sont-ils pas urbanisés aujourd'hui ? L'activité industrielle et d'entrepôt est-elle le fait de petites activités dispersées peu repérables sur le document ? Le centre commercial, par contre, est bien visible avec son extension de stationnement démesurée.

6. Conclusion

L'étude de la composition colorée a montré non seulement les fortes densités des espaces centraux mais aussi celles des secteurs périphériques. La structure est très dépendante des systèmes d'irrigation et de drainage. Si les avenues créées entre 1982 et 1994 pour desservir le sud sont bien visibles, il reste parfois difficile d'identifier les canaux d'irrigation des pistes, parfois parallèles.

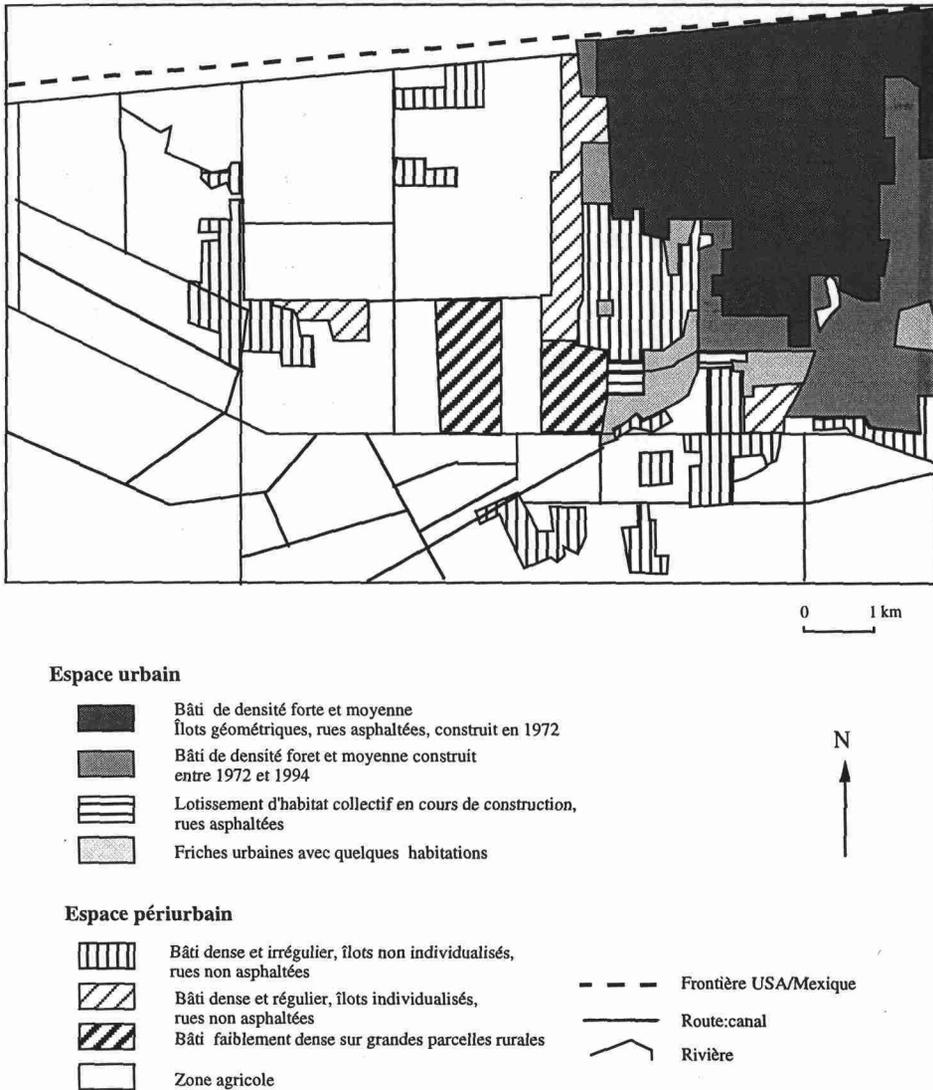


Figure 6. Occupation du sol à l'ouest de la ville de Mexicali en 1991 à partir de l'image HRV

Cette interprétation visuelle souligne parfaitement les limites de la ville dans la zone rurale où les lotissements avancent en fonction du parcellaire agricole, c'est le cas de l'ouest et dans la première périphérie du NE. La situation est moins certaine à l'est et au SE où des friches rurales semblent avoir facilité le passage à l'urbanisation. Ici, il peut y avoir confusion entre sol nu (sable) et champs abandonnés sur lesquels quelques maisons ont commencé à s'édifier.

La vérification sur le terrain, les enquêtes et le traitement des données satellitaires devraient compléter ces remarques préliminaires d'interprétation. Avant de partir sur le

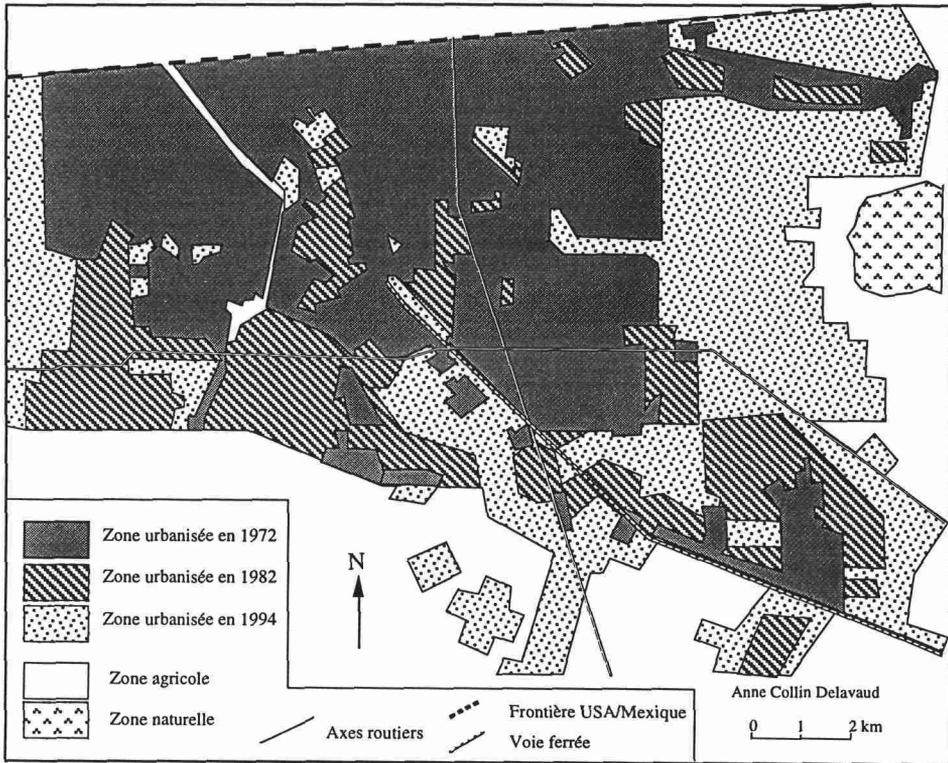


Figure 7. Évolution de l'espace urbain à partir de la carte de 1972, des photographies aériennes de 1982 et de l'image HRV de 1994

terrain, ces outils très simples ont permis de dégager une vue d'ensemble de la ville et de poser quelques questions à travailler sur place. Ils ont fait gagner beaucoup de temps et faciliter la connaissance globale de la ville. Sans recourir à des traitements, l'information géographique obtenue est souvent suffisante pour le décideur. Cette interprétation nécessite un apprentissage simple et rapide. La résolution proposée (20 m et 10 m) facilite l'analyse urbaine. Il reste que l'interprétation visuelle a des limites dans certaines zones où la confusion est possible entre les matériaux de construction et les sols nus. Les différentes densités n'apparaissent pas clairement dans un paysage urbain caractérisé par une grande majorité de maisons entourées de petits jardins.

25

Identification des acteurs de la production de l'espace en milieu urbain africain à partir de l'imagerie satellitaire : exemples de Bamako (Mali) et de Maroua (Cameroun)

MICHEL SIMEU KAMDEM

Département de recherches géographiques, Institut national de cartographie, B.P. 157, Yaoundé, Cameroun; téléphone : +237 22-29-21; télécopieur : +237 20-18-54

Résumé

Produire l'espace en milieu urbain peut se définir comme l'ensemble des activités qui concourent à la fois à construire, à équiper et à aménager une ville. À l'heure où, crise économique oblige, l'État se désengage des villes en Afrique, il paraît difficile d'aborder les problèmes de prise en charge de la production de l'espace sans tenir compte des acteurs en présence. Dans des pays comme le Mali et le Cameroun, il n'existe pas de couverture photographique aérienne à jour et les fichiers des services techniques de l'urbanisme et de l'habitat sont fragmentaires. Le thématicien n'est pas entièrement satisfait devant les difficultés d'obtenir, avec les données actuelles, une stratification fine de l'espace urbain, d'où les très nombreux espoirs que suscite le développement des performances de l'outil téledétection et des techniques connexes. À partir d'images HRV de SPOT des villes de Bamako et de Maroua, nous voulions identifier les principaux acteurs de la production de l'espace urbain. Le traitement de ces images a été réalisé sur le logiciel *Planètes* au Laboratoire de l'ORSTOM à la Maison de la téledétection du Languedoc-Roussillon. La démarche utilisée qui a consisté, après avoir déterminé des points d'appui et procédé au recalage du panchromatique sur le XS, d'une part à effectuer une classification dirigée et, d'autre part, à chercher à en améliorer la qualité en faisant intervenir des techniques qui mettent en évidence la structure et la texture du bâti. La démarche a donné des résultats appréciables pour les villes de Bamako et de Maroua. Ainsi, il a été possible de distinguer le bâti de l'environnement rural, de même que quelques strates du bâti permettant d'identifier les acteurs de la production de l'espace urbain. Les images présentent l'avantage de fournir une vision globale et à jour de ces villes.

1. Introduction

En général, la construction et l'équipement des villes incombent, où que l'on se trouve, aussi bien à l'État qu'aux capitaux privés. Si l'investissement privé est important dans les pays d'économie libérale, il est, pour des raisons financières, très faible en Afrique. Dans bien des pays de ce continent, bien que son emprise sur l'espace soit considérable, il reflète des moyens plutôt limités qualitativement. Avec la crise économique qui s'aggrave dès la fin des années 1980 et le désengagement des pouvoirs publics de la production de l'espace urbain, les regards se tournent naturellement vers les acteurs locaux. L'Afrique semble désormais obligée de compter sur ces derniers pour produire ses villes. Mais qui sont-ils ? De quels moyens disposent-ils ? Ont-ils suffisamment de ressources pour produire de manière satisfaisante la ville ? Avant de répondre à ces interrogations, objet de nos préoccupations ces dernières années, une question fondamentale, celle de l'identification des acteurs, mérite d'être clarifiée et c'est l'objet de la présente étude.

Pour identifier les acteurs de la production de l'espace en milieu urbain africain, de nombreuses méthodes existent. L'enquête directe, si elle est irréprochable lorsqu'elle est exhaustive, se heurte dans ces pays au problème de moyens financiers. L'exploitation des fichiers des municipalités, des services techniques du cadastre et de l'urbanisme et de l'habitat aurait pu renseigner utilement sur les détenteurs des titres de propriété ou les demandeurs des permis de bâtir, des bornages de terrain et des certificats d'urbanisme, mais les informations y apparaissent fragmentaires. L'interprétation des photographies aériennes enfin, ultime recours pourrait-on dire, présente, elle aussi, des handicaps. Non seulement les couvertures aériennes ne sont pas disponibles pour l'ensemble des villes mais, en plus, elles sont, pour la plupart, assez anciennes. En somme, de nombreuses contraintes pèsent sur l'utilisation des outils d'investigation usuels pour la présente thématique, d'où le recours à la télédétection qui a l'avantage d'offrir des images plus actuelles et qui, *a priori*, se présente comme un outil susceptible de pallier les insuffisances des méthodes déjà expérimentées. Quelles possibilités offre-t-elle concrètement à l'identification, à travers leurs différentes emprises, des acteurs de la production de l'espace ? Mais peut-être conviendrait-il d'abord de rappeler succinctement la démarche utilisée ? Cette étude réalisée pendant un stage effectué à la Maison de la télédétection du Languedoc-Roussillon en présente quelques résultats. Signalons cependant que la relative brièveté du séjour et l'absence de structure adéquate pour continuer les investigations au Cameroun ont quelque peu limité la portée des recherches.

2. Images et traitement

2.1. Images satellitaires

Les données HRV de SPOT K/J 40-325, en mode XS du 29-11-1986 et en mode panchromatique du 30-11-1986, et K/J 87-329, en mode XS du 11-11-1988 ont été utilisées respectivement pour Bamako et Maroua. Le mode panchromatique, de 10 m de résolution au sol, n'a pas été disponible pour cette dernière image dont une fenêtre de 636 x 904 a été extraite. Pour la capitale du Mali, des extractions de 1 600 x 1 600 et de 3 001 x 3 001 ont été réalisées sur les images XS et panchromatique respectivement. Ces images qui ont en commun l'appartenance à la même zone sahélo-soudanienne présentent l'avantage d'être

sans couverture nuageuse. Leur traitement a été réalisé grâce au logiciel *Planètes* au laboratoire de l'ORSTOM à la Maison de la télédétection du Languedoc-Roussillon.

2.2. Traitement de l'image de Bamako

Les deux scènes HRV (XS et P) de SPOT disponibles sont intéressantes à plusieurs égards et chacune de manière spécifique. Le mode multispectral (XS) a l'avantage de fournir un éventail varié d'informations alors que le mode panchromatique (P) présente plus finement les objets au sol. Il fallait donc d'abord superposer entre elles ces deux images, non seulement pour les ramener à la même échelle, mais aussi pour disposer de leurs avantages combinés.

2.2.1. Production de l'image XS-P

La première démarche a consisté à faire une homothétie d'un facteur deux pour ramener l'image XS à la même échelle que la panchromatique. Ensuite, en utilisant un double écran présentant l'un la XS et l'autre la P, des amers ont été déterminés le plus possible aux angles et aux intersections. Vingt-neuf points d'appui ont ainsi été repérés. Une fois le fichier amers créé, nous avons entrepris, grâce au programme de transformation polynomiale de degré 3, avec l'option de prendre la radiométrie du pixel le plus proche, de lancer le recalage. Plusieurs tentatives impliquant des reprises de points d'appui et des corrections statistiques ont été nécessaires pour aboutir à une superposition acceptable avec une variance par amer de 5,8 m. En fait, avant ces corrections, cette variance très élevée, avoisinait les 50 m, soit 48,8 m par amer. Ce qui témoigne de l'existence d'erreurs dans le repérage des points homologues et donc d'un recalage très approximatif.

L'image nouvelle est une image de la taille de la panchromatique de départ soit 3 001 x 3 001 et contenant quatre canaux (XS1, XS2, XS3 et P). Elle se prête mieux, avec la finesse de résolution du panchromatique et la richesse radiométrique de l'image multispectrale, aux analyses de type urbain. Cependant, elle reste à parfaire pour obtenir des informations de qualité. Des traitements complémentaires sont donc indispensables.

2.2.2. Composition colorée

Pour obtenir une composition colorée de la nouvelle image faite, comme on l'a vu, de deux images au départ bien distinctes, il a fallu harmoniser l'appellation des canaux et donc convertir le dernier canal (P) en XS4. Deux formules étaient alors applicables :

- 1) $P + XS2 + XS3$ où le P représente le bleu, XS2 le vert et XS3 le rouge;
- 2) $XS1 + P + XS3$ où XS1 représente le bleu, P le vert et XS3 le rouge.

Après avoir expérimenté les deux formules, la qualité de l'image est apparue meilleure pour la seconde. L'image XS1-P-XS3 est celle qui est la plus fine sur le plan spatial. C'est donc elle qui a été retenue (fig. 25-1, voir cahier couleur).

2.2.3. Production de néo-canaux

Un certain nombre de programmes a ensuite été exécuté notamment l'indice de brillance (IB), l'indice de végétation (IV) et l'analyse en composantes principales (ANAFAC) et a abouti à la création de néo-canaux. Ils présentent chacun des particularités. L'indice de brillance fait apparaître de nettes différences entre l'habitat moderne et l'habitat populaire. L'indice de végétation quant à lui fait ressortir clairement les rues, le fleuve et le réseau des ravines. Le premier canal de l'analyse en composantes principales dont le mode de rééchantillonnage est 1, enfin, met en évidence des différences à la fois entre le bâti et le non bâti,

entre les zones exploitées et celles non mises en valeur et entre le cours d'eau et le reste. Il fallait ensuite passer à la classification.

2.2.4. Classification

Dans un premier temps, 60 parcelles d'entraînement pour huit classes correspondant à trois thèmes, notamment le bâti, le non bâti et les éléments naturels ont été choisies (fig. 25-2, voir cahier couleur).

Après avoir créé le canal zone et obtenu des statistiques afférentes, des corrections géométriques consistant notamment soit à recentrer certaines parcelles d'entraînement, soit à en revoir la taille, ont été nécessaires pour rendre ces statistiques fiables. En fait, pour diverses raisons dont l'absence d'homogénéité de certaines de ces parcelles, les écarts-types apparaissaient parfois très élevés. La classification qui en résulte, obtenue à partir de quatre canaux (respectivement avec « sebest » et « euclid ») n'est pas assez pertinente pour notre thématique. Le bâti, objet principal de nos investigations, apparaît encore comme un bloc monolithique difficilement discriminable. Il fallait donc utiliser d'autres méthodes ou recourir à d'autres programmes. Tout d'abord, nous avons refait une classification, non seulement avec les canaux bruts, mais aussi avec IB, IV et ANAFAC qui sont des néo-canaux. Le résultat obtenu n'a guère été réellement différent. Même en appliquant un filtre médian 3 x 3 aux canaux XS1, IB et P qui apparemment discriminent mieux que les autres canaux, il n'y a pas eu d'amélioration significative dans le sens de notre thématique.

2.2.5. Amélioration de l'image

Parallèlement à ces classifications successives faisant varier les canaux utilisés, nous avons extrait grâce à un masque, le bâti du reste de l'image. Sur ce bâti, une nouvelle classification a été effectuée avec des néo-canaux spéciaux notamment, *fenetpanchro*, *fenetib* et *fenetXS1*. Ces derniers avaient au préalable, sur diagrammes bidimensionnels, été purifiés des pixels isolés. Le résultat est nettement plus intéressant. Des différenciations significatives apparaissent par rapport au bloc monolithique précédent. On peut y distinguer l'habitat moderne loti sur une trame orthogonale régulière, de l'habitat populaire qui apparaît en grappe. De même, l'habitat moderne résidentiel de type pavillonnaire, s'identifie assez bien (fig. 25-2, voir cahier couleur). Certes, les trois teintes principales censées représenter différemment ces trois classes apparaissent ensemble et auraient pu créer des confusions, mais leurs textures sont différentes et par conséquent, n'affectent pas tant la discrimination visuelle. Une légende faite d'éléments prélevés dans chacune de ces trois classes illustre effectivement la stratification. Ayant réussi à stratifier les principales classes de bâti, il fallait étendre la classification à l'image entière. Le résultat fait apparaître un certain nombre d'irrégularités. Outre le fait que les palettes désignant les trois principaux types de bâti se retrouvent très souvent regroupées au sein d'une même classe, la zone d'habitat moderne de type pavillonnaire s'étend bien au-delà de la zone bâtie, dans des secteurs où on ne rencontrerait en aucun cas ce type d'habitat. De même, la couleur affectée à la classe représentant les équipements publics se retrouve dans les zones rurales. Tout ceci peut s'expliquer d'une part, par des valeurs radiométriques assez proches, d'une classe à l'autre. D'autre part, le substrat autour duquel sont implantés l'habitat moderne et les équipements n'étant rien d'autre que du terrain aéré, débarrassé de friches, des parcelles à vocation agricole bien entretenues, peuvent tout aussi bien avoir la même réflectance. La légende essaye dans la mesure du possible de prendre en compte tous ces biais de manière à les affecter dans des classes appropriées. Mais l'essentiel, c'est-à-dire le bâti dans le périmètre urbanisé, est peu affecté.

2.3. Traitement de l'image de Maroua

Contrairement à Bamako, Maroua ne disposait que d'une image multibande (XS). Les opérations préliminaires de recalage qui ont été indispensables pour les images de la capitale du Mali n'ont donc pas été nécessaires ici. Après avoir obtenu un zoom par duplication, une composition colorée et quelques néo-canaux ont été créés (fig. 25-3, voir cahier couleur). Vingt parcelles d'entraînement correspondant à sept classes réparties ainsi qu'il suit ont ensuite été retenues :

- bâti (3 classes) :
 - . habitat moderne
 - . habitat mixte
 - . habitat populaire;
- non bâti (4 classes) :
 - . zone verte
 - . lit de mayo (cours d'eau intermittent) et banc de sable
 - . relief résiduel, affleurement rocheux
 - . friches.

La classification dirigée qui en résulte, faite à partir des canaux bruts, laisse apparaître clairement pour le bâti, une classe d'habitat populaire hors trame qui contraste nettement avec le reste de l'habitat entièrement sur trame. Des différences radiométriques qui apparaissent dans ce bloc sur trame sont la preuve qu'il est constitué de deux composantes : l'habitat mixte et l'habitat moderne. Physiquement, il n'est pas facile de distinguer ce dernier habitat du substrat qui le porte. Il apparaît ainsi étalé sur de nombreux secteurs de l'image même au-delà de la zone bâtie; ce phénomène a été également observé à Bamako. Il en est de même des lambeaux d'habitat mixte qui se retrouvent dans des secteurs non bâtis. L'interprétation visuelle arrive néanmoins à bien distinguer les différents éléments du bâti. En prélevant des parcelles dans chaque classe, la légende arrive à s'adapter à la présentation qu'offre cette classification automatique et notamment à contourner le problème de regroupement de couleurs au sein d'une même classe, qui se pose ici, comme dans le traitement de l'image de Bamako.

3. Les résultats

Les informations extraites de ces images permettent de manière générale, de bien distinguer les principaux types de bâti en milieu urbain. Connaissant les caractéristiques des emprises des principaux acteurs de la production de l'espace urbain, on a ainsi l'occasion de mieux les cerner.

À Bamako, l'emprise des lotissements est considérable. Cela matérialise manifestement la présence des pouvoirs publics et de certains promoteurs fonciers et immobiliers. Ces lotissements occupent près des deux tiers de la superficie bâtie et s'étendent pratiquement sur la plus grande partie de la moitié nord de la ville sur la rive gauche du fleuve Niger et sur quelques îlots en rive droite. Au niveau des constructions d'immeubles, l'intervention des pouvoirs publics semble moins perceptible. Elle se limite à quelques modestes réalisations, laissant ainsi le champ, à la fois dans les quartiers lotis et dans les quartiers d'habitat pavillonnaire, aux acteurs locaux de catégorie aisée et aux investisseurs étrangers. Ce dernier type d'habitat se localise essentiellement le long du fleuve sur la rive gauche. Les acteurs en sont des membres de la bourgeoisie locale à la recherche d'une plus value

locative, des entreprises privées soucieuses de limiter leurs frais locatifs par la construction des résidences pour leurs hauts cadres, et plus rarement l'État. Les acteurs locaux les plus modestes sont les principaux producteurs de l'espace dans les quartiers d'habitat populaire. Leurs constructions s'entassent dans trois poches principales : 1) sur la rive gauche, au sud de l'ancien aéroport et à l'extrémité NE de l'espace bâti, 2) sur la rive droite, au sud du premier pont et 3) plus à l'ouest, au-delà du quartier d'habitat sur trame. Cette vision globale de la production de l'espace urbain à Bamako que rend compte l'imagerie satellitaire permet de bien réaliser que si l'intervention de l'État est importante en amont, elle est, en général, assez limitée en aval où dominant largement les producteurs locaux. C'est dire que dans les développements futurs de la ville, étant donné que l'État intervient désormais très peu, du fait de la crise économique actuelle, le type d'habitat dominant portera fortement l'empreinte de l'initiative privée. Ce sera donc un habitat majoritairement populaire peu ou prou réhabilité.

À Maroua, l'emprise des pouvoirs publics apparaît également importante sur le plan des lotissements. La presque totalité de la ville est en effet quadrillée. Toutefois, au niveau des constructions d'habitat cette emprise est beaucoup plus limitée encore qu'à Bamako. Quelques bâtiments datant de la période coloniale notamment la résidence du gouverneur, la province, la préfecture, l'hôpital, etc. font office de parc immobilier de l'État. Certes, on compte aussi quelques rares bâtiments « neufs » comme le palais de justice ou l'hôtel des finances, mais dans l'ensemble, il n'y a pas eu ici, comme dans d'autres chefs-lieux de province camerounais, notamment Garoua, la multiplication de constructions de prestige destinées à abriter des services administratifs locaux ou à loger des hauts fonctionnaires. C'est ce qui explique l'importance de maisons conventionnées par l'État à des particuliers soit pour abriter certains de ses services, soit pour loger ses agents et qui sont disséminées dans les quartiers d'accès facile de la ville. Les quartiers résidentiels modernes apparaissent donc ici, probablement parce que l'État n'y a pas beaucoup contribué, très limités spatialement. Le plus important Dougoy, se localise pratiquement dans la périphérie NE de la ville, en direction de Bogo. Les producteurs ici sont des acteurs locaux de classe sociale aisée. Dans ces conditions, le cœur de la ville est occupé par l'habitat mixte - populaire-moderne. C'est d'ailleurs le type d'habitat le plus répandu. Il constitue au centre de la ville, de part et d'autre du lit du Mayo Kaliao, le type d'habitat dominant. Les promoteurs sont généralement des autochtones de toutes les classes sociales confondues. Les habitations des classes les plus aisées se localisent en bordure de rue, c'est ce que nous avons qualifié d'urbanisme de façade à Garoua. À l'arrière-plan, l'habitat est de type populaire et les acteurs se recrutent essentiellement dans les classes pauvres. La case du lamido, principal dignitaire traditionnel de la ville, illustre bien cette dualité. La façade principale a une allure normale, c'est-à-dire qu'elle s'intègre harmonieusement dans le style des constructions longeant l'avenue bitumée. Au-delà se retrouve intacte toute l'architecture traditionnelle d'une chefferie séculaire. Quatre poches d'habitat populaire constituent la zone exclusive des plus petits acteurs, généralement auto-producteurs. Elles se localisent à l'extrémité nord de la ville pour la plus importante, au SO, à l'est et au SE pour les autres. Dans le contexte de crise économique actuelle, le développement spatial de la ville revêt des caractéristiques proches de celui de Bamako, avec une extension considérable de la sphère d'influence de l'habitat hors trame.

4. Discussion

Ces deux exemples montrent qu'avec les traitements effectués, il n'est pas facile d'obtenir une stratification satisfaisante du bâti en milieu urbain. Non seulement sur le plan radiométrique, il n'y a pas de différence entre les toitures des cases dans les quartiers populaires et dans les quartiers modernes. En outre, dans ces milieux soudano-sahéliens où le rayonnement solaire est intense, les valeurs radiométriques des bancs de sable et des toitures des habitations sont très proches. C'est ce qui explique la présence d'« erreurs » dans l'image classée. De nombreuses taches d'habitat se rencontrent en effet parfois à des endroits où on ne s'attendrait pas à les retrouver. Il faut donc faire appel à d'autres techniques qui font notamment intervenir les notions de texture et de structure. Nous n'avons pas, pour certaines raisons, suffisamment creusé dans ces deux directions. Néanmoins, des différences apparaissent effectivement et l'on peut distinguer les bancs de sable des toits de bâtiment. De même, si au niveau des habitations la texture varie peu, on constate bien que l'habitat populaire apparaît très souvent en grappes, l'habitat sur trame dans un quadrillage plus ou moins régulier, et l'habitat pavillonnaire dans un espace beaucoup plus aéré. En fait, tout ceci est bien visible sur les deux images et les différents éléments qui constituent une même classe sont aisément identifiables d'un bout à l'autre des villes. Toutefois, des irrégularités et pas les moindre, subsistent. Non seulement les trois couleurs représentant les principales classes de bâti continuent à se regrouper en proportion variable dans chacune d'elles, mais en plus, des pixels ou groupes de pixels isolés se retrouvent en dehors de cette zone.

5. Conclusion

Au terme de cet exercice, il apparaît clairement que, parce qu'elle présente l'avantage de fournir des images globales et à jour des villes, parce qu'elle arrive à discriminer aisément le bâti de l'environnement rural plus ou moins proche, parce qu'à l'intérieur de ce bâti, elle arrive à circonscrire les différentes strates du bâti, et par là même à permettre l'identification des acteurs de la production de l'espace urbain, la télédétection apporte certainement beaucoup à cette thématique. Cette vision globale des villes a permis, en effet, non seulement de bien cerner les emprises respectives des principaux acteurs de la production urbaine et leurs caractéristiques, mais aussi d'apprécier les développements actuels et leurs tendances dans un contexte profondément marqué par le désengagement de l'État, un acteur peu ordinaire dans les villes d'Afrique. On est certes encore loin de pouvoir chiffrer quantitativement ces emprises, tant sont parfois importantes les imbrications qui existent entre des éléments de classes différentes. Il faudrait pour cela procéder à un tri et à un décompte de ces éléments en fonction des classes auxquelles elles appartiennent, solution tout aussi réalisable dans le cadre d'une enquête complémentaire de terrain. En attendant, les quelques insuffisances de la classification automatique n'altèrent, dans l'ensemble, que très peu la qualité des informations fournies par l'imagerie satellitaire qui restent évidemment de premier ordre. Le développement des performances de l'outil télédétection ne pourra qu'en améliorer davantage la qualité.

26

Technique d'élaboration d'une spatiocarte de la région de Rosso (Mauritanie)

CHEIKH SOW

*Direction de la topographie et de la cartographie, Ministère de l'Équipement et des Transports, B.P. 237, Nouakchott, Mauritanie;
téléphone : +222 (2) 533-37 (poste 304); télécopieur : +222 (2) 535-78*

Résumé

La présente étude vise à décrire un processus d'établissement et de révision de cartes topographiques de la région de Rosso par méthode interactive à partir d'une carte topographique ancienne numérisée et d'une image HRV (XS) de SPOT de 1991. L'objectif final de l'opération est d'obtenir une carte tout en gardant l'information contenue dans l'image. La réactualisation et l'élaboration des cartes de base sont une priorité pour notre pays. Dans cette étude plusieurs aspects sont abordés, notamment: 1) les problèmes rencontrés au niveau des corrections géométriques des images HRV à partir d'anciennes cartes; 2) la méthode interactive de révision des cartes à l'aide des documents numérisés; 3) les processus d'élaboration de spatiocarte. La démarche utilisée a consisté à superposer une carte topographique numérisée à l'échelle 1: 200 000 et une image HRV (XS). Les résultats obtenus comparés avec ceux des méthodes classiques montrent que cette technique peut être un support pour la cartographie de base de notre pays en améliorant les cartes existantes. Mais, il faut signaler qu'une scène HRV (XS) du début de la saison sèche (octobre) ne suffit pas pour analyser en détail les différentes composantes du sol et de la végétation; une analyse multitemporelle est nécessaire. La précision du document final pourrait être affinée en utilisant une image panchromatique.

1. Introduction

Autrefois, objet rare et cher, la carte répondait à des besoins militaires; aujourd'hui, elle fait partie intégrante de notre vie et devient un corollaire de l'expansion économique. La révision et la réalisation des cartes topographiques sont devenues de plus en plus une nécessité, puisque le développement économique d'un pays ou d'une région n'est possible que s'il est basé sur une information à jour. Il est donc devenu urgent pour tous les pays de dresser un inventaire qualitatif exact des données naturelles et infrastructurelles existantes. Celles-ci sont utiles à l'étude des diverses possibilités d'utilisation du sol ainsi que d'aménagement. L'aménagement suppose l'existence et la mise à disposition aisée d'informations aussi complètes que possible sur le milieu concerné. Ainsi, la télédétection satellitaire fournit une source de données d'une très grande richesse.

Loin de périmiser les techniques cartographiques traditionnelles (prises de vues aériennes), l'importance de l'utilisation des données des capteurs satellitaires (HRV de SPOT, TM de Landsat) pour la révision et la réalisation des cartes topographiques dans les pays en développement n'est plus à démontrer. Parallèlement à l'essor de la télédétection, le développement de l'informatique appliquée à la cartographie et au traitement d'images permet d'accélérer et de diversifier la mise en forme des données géographiques.

La République Islamique de Mauritanie, avec une superficie de 1 032 000 km², est entièrement couverte de photographies aériennes à l'échelle du 1: 50 000 datant des années 1950. Des zones localisées le long du fleuve Sénégal sont couvertes par des photographies aériennes à différentes échelles :

- au 1: 50 000 sur l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal soit 300 000 km² en noir et blanc et en infrarouge;
- au 1: 20 000 sur 6 000 km²;
- au 1: 10 000 sur 3 000 km² dans les zones d'aménagement.

Elle est également couverte de cartes topographiques anciennes et partiellement périmées, réalisées en 1954 par l'Institut géographique national de France. Une cartographie de base à l'échelle 1: 200 000 en 104 feuilles couvre l'ensemble du territoire national à partir d'un réseau de points astronomiques et de couvertures aériennes à l'échelle du 1: 50 000. De cette cartographie de base sont issues des cartes dérivées :

- carte à l'échelle du 1: 2 500 000 en une seule feuille;
- carte à l'échelle du 1: 1 000 000 en 11 feuilles avec surcharge routière.

Des cartes à l'échelle du 1: 50 000 couvrant une partie de la vallée du fleuve Sénégal (périmées) ont été réalisées. Dans le cadre du projet conduit par l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), d'importants travaux cartographiques et géodésiques ont été réalisés dans cette région.

L'étude que nous avons menée dans la région du Trarza au sud de la Mauritanie, à partir d'une image HRV (XS) de SPOT, vise essentiellement deux objectifs. Le premier objectif vise à décrire un processus de révision de cartes topographiques à l'échelle du 1: 100 000 et à établir une spatocarte à l'échelle du 1: 50 000 en montrant l'intérêt de l'utilisation des images satellitaires. La méthodologie adoptée peut à l'avenir servir de support à la recherche de financement pour un projet de réactualisation de la cartographie de base en Mauritanie. Le second objectif consiste à élaborer une carte d'occupation du sol par classification radiométrique d'image en vue de faire ressortir les différents types de sol et de végétation.

Technique d'élaboration d'une spatiocarte de la région de Rosso (Mauritanie)

La spatiocarte est un document dont le fond est une image satellitaire améliorée radiométriquement et corrigée géométriquement, sur laquelle on superpose des informations géographiques. L'image obtenue est habillée par des informations cartographiques : thèmes zonaux (végétation, etc), réseau routier, toponymie, carroyage cartographique, titre et légende.

2. Zone d'étude

La zone d'étude est située au sud de la Mauritanie dans la région du Trarza au nord du fleuve Sénégal, soit Rosso (fig. 1). C'est une région plate et elle est caractérisée par une forte empreinte humaine avec d'importants aménagements hydro-agricoles. Elle regroupe deux ensembles écologiques particuliers :

- le « walo » au sud de la zone où se développent des cultures irriguées (riz) et de décrues (sorgho, mil);
- le « dierri » au nord de la zone où se pratiquent des cultures hivernales (saison des pluies : 3 mois).

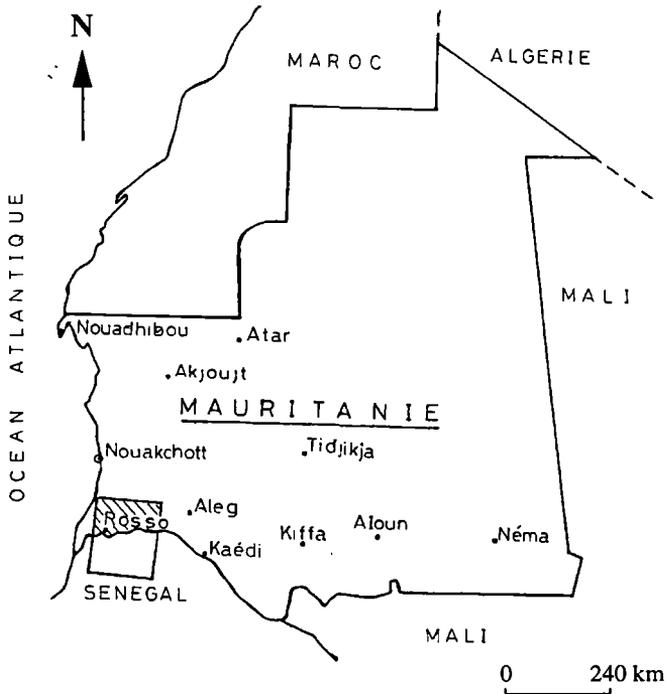


Figure 1. Localisation de la scène d'étude

3. Matériel

Les documents suivants ont été utilisés : 1) image HRV (XS) de SPOT de 1991 (tab. 1); 2) carte topographique à l'échelle du 1: 200 000 de 1954 numérisée en noir et blanc à l'Institut géographique national (IGN) à Paris au pas de 100 microns sur une zone de 5 800 x 5 500 pixels; 3) carte de Dagana (ND 28 III) à l'échelle du 1: 200 000 de 1954; 4) cartes à l'échelle du 1: 50 000 de 1964 de la zone (ND 28 III, 3a, 3b); 5) photographies aériennes à émulsion noir et blanc à l'échelle du 1: 60 000 de 1978.

Le système de traitement utilisé est le logiciel *Calyope/Trydin*.

4. Méthodologie

La méthodologie consiste à élaborer un document tout en gardant l'information contenue dans l'image. Le fond de l'image inclus dans la carte a comme objectif essentiel de transmettre une information relative à des thèmes de surface. Cette opération impliquera donc le remplacement de toutes ou d'une partie des trames traditionnelles, soit les estompages, la végétation, l'hydrographie et la nature des sols.

4.1. Mise en correspondance géométrique des données

La correction radiométrique été effectuée par SPOT Image.

La lecture des données (carte numérisée, image HRV) consiste à charger sur l'ordinateur les données numériques afin d'extraire la zone de travail. À partir des « quick-looks » de l'image et de la carte que nous avons créés, une zone d'étude approximative de 1305 x 1362 pixels a été extraite.

L'image est du niveau 1B, donc non superposable à une carte. Pour la rendre superposable à la carte, nous l'avons corrigée géométriquement par prise de points d'appui sur le système *Trydin*. Il s'agit de déterminer une loi qui permet d'associer les coordonnées de la carte (X,Y) et celles de l'image (x,y). Le principe est de saisir des points qui soient facilement identifiables sur la carte et sur l'image. La saisie des points d'appui s'effectue

Tableau 1. Caractéristiques de l'image HRV utilisée

Satellite	SPOT 2
Mode	Multibande
K/J	23-317
Date de prise de vue	04-10-1991
Heure	11 h 34 min 31 s
Nom du capteur	HRV1
Niveau de prétraitement	1B
Résolution	20 m
Angle de prise de vue	R 17,9°

directement à l'écran en pointant successivement sur la carte et sur l'image. Elle est facilitée par l'utilisation des outils du système *Trydin* (curseur avec loupe, adaptation dynamique).

Notre souci a été de choisir des points d'appui sur des éléments ayant *a priori* peu varié; les photographies aériennes (1978) ont été utilisées en renfort. Ceci pose un problème quand on dispose d'une carte ancienne (1954 dans notre cas) et d'une image récente (1991), et que le paysage présente peu d'invariants (buttes, piste d'aéroport, routes principales). Nous avons donc choisi des intersections de cours d'eau et du réseau routier en s'appuyant d'une part, sur les photographies aériennes de 1978 et, d'autre part, sur les valeurs des résidus de la modélisation. En effet, le logiciel *Calyope* permet de calculer les résidus sur des points de contrôle avant même de procéder à la correction géométrique.

L'hypothèse que nous avons faite est que, s'il y a eu des modifications des éléments du paysage du type de ceux retenus comme points d'appui, les décalages résultants présenteront un certain caractère aléatoire. Ainsi, nous avons éliminé tous les points d'appui présentant des résidus supérieurs à un pixel, ce qui réduit les risques de prise en compte pour la modélisation d'éléments qui ont changé. Auparavant, nous avions choisi 13 points d'appui, mais n'en avons retenu que 11 qui avaient des résidus inférieurs au pixel (tab. 2). Après saisie des points d'appui, une fonction polynomiale du 2^e degré est appliquée à l'ensemble de l'image. Pour cette correction géométrique, l'interpolation a été du type bicubique. L'image résultante est compatible au système de référence cartographique choisi (projection UTM).

4.2. Amélioration de la lisibilité de l'image

Pour améliorer la lisibilité de l'image, nous avons effectué, sur chaque canal, un étalement de dynamique pour augmenter le contraste.

Tableau 2. Valeurs des résidus de la correction géométrique

Référence	X	Y	Origine	x	y	Résidus	
						dx	dy
1	176	548	1	189	507	0,1	0,0
2	355	890	2	404	822	-0,1	0,0
3	248	906	3	300	853	0,1	0,0
4	163	959	4	223	919	-0,1	0,1
5	296	1106	5	226	1074	-0,1	0,2
6	296	1091	6	377	1038	0,1	-0,4
7	800	1004	7	874	881	0,0	0,0
8	1047	807	8	1093	640	0,1	-0,1
9	649	480	9	646	368	-0,1	0,1
10	721	1028	10	797	917	-0,4	0,2
11	561	1032	11	635	942	0,4	0,0

4.3. Transformation en couleurs naturelles

Pour obtenir une composition colorée en couleurs naturelles, c'est-à-dire des couleurs qui s'apparentent au paysage naturel, nous avons effectué une conversion RVB-ITS. L'opération consiste à affecter le faisceau bleu au canal vert (XS1), le rouge au canal rouge (XS2) et le vert au canal infrarouge (XS3). Ainsi, dans l'image résultante, la végétation apparaît en vert, l'eau en bleu et les sols nus sont proches de leur couleur naturelle (fig. 26-2, voir cahier couleur).

4.4. Superposition des informations cartographiques

Pour l'insertion des thèmes cartographiques, l'opération a consisté à incruster des thèmes extraits de la carte, au fond de l'image. Pour éviter de rendre illisible notre document, nous n'avons inséré que des thèmes à caractère linéaire (routes). Les photographies aériennes acquises dans le cadre du projet conduit par l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, ont été d'une grande utilité car, dans l'image HRV, il est difficile d'identifier certaines routes, pistes et sentiers.

L'habillage cartographique consiste à créer un fichier « *overlay* ». Dans le système de traitement utilisé, le module « Habille » prévoit la rédaction d'un cadre et le tracé et la numérotation automatique des méridiens, des parallèles et du carroyage cartographique de la projection choisie. Tous les fichiers créés ont été combinés en une carte mémoire pour la sortie du document final.

5. Analyse et interprétation des résultats

La zone d'étude a subi de grands changements qui apparaissent en comparant l'ancienne carte et le document final (fig. 26-3, voir cahier couleur). Nous remarquons au niveau des éléments linéaires que le tronçon de la route Rosso-Nouakchott a été modifié au PK 5 et que le marigot de garack, qui est alimenté par le fleuve Sénégal a changé de lit à côté du pont de Tounguen. Pour ce qui est des éléments zonaux, nous constatons que les cultures irriguées (riz, maraîchage) se développent au détriment de celles de décrues (mil, niébé) et, au niveau environnement, qu'une forte dégradation de la végétation naturelle (bois, gomméraie) confirme l'avancée du désert.

L'élaboration d'un tel processus demande de procéder avec prudence car dans ce genre de zone où l'information géographique n'est pas suffisante, le choix des points d'appui doit être basé sur des documents cartographiques fiables (les plus récents possibles) pour les corrections géométriques. Pour éviter toute confusion, il est souhaitable d'utiliser des images du niveau de prétraitement 2B (corrigé géométriquement). De plus, il est nécessaire de disposer d'un maximum de données images à savoir : en plus d'une image HRV de SPOT multibande, avoir une autre image en mode panchromatique de la même date pour faire des mixages. Pour assurer une meilleure précision et une bonne qualité graphique, faire un rééchantillonnage avant l'extraction des thèmes à cartographier.

Il y a lieu de prévoir dans le système de traitement utilisé, la possibilité de corriger géométriquement les images à partir de points GPS (*Global Positionning System*) sans avoir recours aux anciennes cartes dont la précision des détails sur le terrain n'est pas fiable surtout quand il s'agit de zones menacées par l'avancée du désert.

L'échelle choisie (1 : 100 000), semble être la limite, car la précision du document final est tributaire de celle des anciennes cartes sur lesquelles nous nous sommes appuyés.

6. Conclusion

La télédétection n'est pas la panacée pour tous les problèmes de développement et de gestion des ressources. Néanmoins, elle peut apporter une contribution bien réelle et immédiate à l'établissement de spatiocartes, en améliorant de façon significative la cartographie existante de notre pays, grâce à la fourniture des données de capteurs satellitaires (HRV et TM). Un tel processus est bien adapté aux régions peu transformées par l'Homme où l'information géographique est faible, mais il reste à trouver une solution pour corriger géométriquement les images. Il est souhaitable d'avoir recours aux techniques de positionnement géodésique par le système GPS.

La synthèse des résultats conduit à une réflexion qui montre un intérêt très particulier à développer un tel processus dans les pays en développement compte tenu de leur situation financière et des gains sensibles au niveau des coûts et des délais, en sachant que les méthodes traditionnelles sont coûteuses. Ainsi, pour une zone de 60 x 60 km, nous avons estimé le coût à 192 000 FF avec notre méthode alors que, par la méthode classique, nous l'évaluons à 280 000 FF. La méthode utilisée nous permet donc de faire un gain de 31 % par rapport à la méthode classique.

27

Utilisation des images HRV de SPOT pour la détection du changement périurbain à Casablanca (Maroc)

MALIKA AZERZAQ ¹, MARIEM ASSAFI ² et AHMED FAHSI ³

¹ Agence foncière, avenue My Youssef, Rabat, Maroc; téléphone : +212 (7) 70-16-67

² Service topographique de Safi, Safi, Maroc; téléphone : +212 (4) 62-49-36

³ Section de topographie, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, B.P. 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc; téléphone : +212 (7) 77-17-58; télécopieur : +212 (7) 77-58-38

Résumé

La télédétection spatiale devient de plus en plus utile pour le suivi régulier de l'évolution rapide des grandes agglomérations des pays en développement. Casablanca, grande métropole du Maroc, connaît une mutation continue et rapide de l'espace agricole en espace bâti. Elle est ainsi un site adéquat pour étudier l'apport des images HRV de SPOT dans la détection du changement. Dans cette étude, nous proposons une méthodologie visant à détecter les changements spatio-temporels, imputables à l'urbanisation, au niveau de la périphérie casablancaise entre 1986 et 1993. Pour cela, nous avons utilisé quatre images multibandes datant de 1986, 1988, 1991 et 1993. La comparaison postclassification a été effectuée sur les deux premières composantes principales et le néo-canal d'indice de végétation en utilisant la méthode de classification hybride pour chaque image. Les images résultantes ont été soustraites l'une de l'autre dans le but d'identifier les changements du non bâti au bâti. Les résultats de cette opération ont montré une extension urbaine maximale de 17 % pour la période 1986-1988 avec une précision de l'ordre de 78 %. Bien que cette valeur soit acceptable, les changements détectés n'ont pas été tous dus à l'urbanisation. Les différentes confusions peuvent être réduites en effectuant une classification hybride plus fine et en testant plusieurs valeurs seuils pour le filtre modal.

1. Introduction

Le Maroc est parmi les pays en développement qui connaissent actuellement une vague d'urbanisation très intense. La mise en œuvre de politiques urbaines pour le suivi régulier de ce phénomène d'urbanisation nécessite l'acquisition d'informations fiables et actualisées sur toutes les formes d'évolution. La comparaison visuelle des photographies aériennes, méthode traditionnelle pour l'acquisition de l'information, a toujours été lente, laborieuse et sujette à des erreurs d'omission. C'est ainsi que les techniques numériques ont connu des développements considérables.

Diverses techniques de détection du changement ont été proposées et testées par différents chercheurs. La comparaison postclassification (WEISMILLER *et al.*, 1977a et 1977b) est la méthode la plus évidente qui compare deux images classées indépendamment. La supposition fondamentale de l'utilisation de la télédétection spatiale pour la détection du changement se résume à ce que tout changement dans la couverture du sol résulte en un changement dans les valeurs spectrales. La différence d'image (GRIFFITS, 1988; JENSEN, 1986), l'analyse en composantes principales (FUNG and LeDREW, 1987a; SINGH, 1989) et la transformation *tasseled cap* (FUNG and LeDREW, 1987b) sont, généralement, les méthodes les plus utilisées dans la détection du changement.

D'autres méthodes plus récentes utilisent des images de hautes résolutions spatiales et spectrales, en l'occurrence la composition P+XS et les techniques SIG (EHLERS, 1990; WESTMORELAND *et al.*, 1992). Ces méthodes sont basées, essentiellement, sur l'interprétation visuelle de l'image, la classification et l'incorporation des données auxiliaires en vue de mieux quantifier l'évolution urbaine. Notre étude vise à mettre en évidence l'évolution de l'espace bâti au niveau des zones périphériques de Casablanca (tab. 1) et à produire ainsi une carte montrant l'expansion urbaine entre 1986 et 1993.

2. Méthodologie

La méthode proposée dans cette étude concerne les traitements préliminaires des images multidates, la comparaison postclassification pour la détection du changement sur les images multidates, l'évaluation de la précision de la méthode de détection du changement et l'interprétation du changement.

2.1. Zone d'étude

Casablanca, capitale économique et industrielle du Maroc, abrite plus du quart des ménages urbains du pays. À cause de son pouvoir d'attraction sur la population rurale, les zones de la périphérie casablancaise connaissent une mutation continue de l'espace

Tableau 1. Pourcentages du bâti et du non bâti relatant l'expansion urbaine de la ville de Casablanca durant la période 1986-1993

	1986	1988	1991	1993
Bâti (%)	30	47	57	72
Non bâti (%)	70	53	43	28

agricole en d'autres formes d'occupation du sol. Ces dernières sont la prolifération du logement, l'implantation des équipements, la dissémination des formes d'activités purement urbaines et l'émergence des lieux de loisir. Ainsi, la rapidité de l'expansion urbaine de Casablanca au détriment des zones périurbaines fait de cette ville un site adéquat pour étudier l'apport des images satellitaires pour la détection du changement au niveau de l'espace bâti.

2.2. Sources des données et prétraitement

L'une des importantes considérations temporelles pour la détection du changement est le mois d'acquisition des images. JENSEN (1983) a rapporté que les images prises pendant les périodes ensoleillées présentent un très bon contraste entre les différents détails, en particulier entre ceux de l'urbain et du non urbain. Il a aussi suggéré d'utiliser des images acquises dans la même période de l'année pour la détection du changement et ce, afin de réduire les problèmes dus aux différences des angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et aux différences dans l'humidité des sols. Dans cette étude, quatre images multidates HRV de SPOT, datant du 6 juillet 1986, du 8 août 1988, du 2 juillet 1991 et du 15 février 1993, ont été analysées pour la détection du changement du non bâti au bâti. Des photographies aériennes (noir et blanc) à l'échelle du 1: 20 000, datant du 7 janvier 1987 et une image composée P+XS datant de 1993 ont servi comme réalité de terrain pour évaluer la précision de la détection du changement. Enfin, les cartes topographiques au 1: 50 000 de 1973 ont été utilisées pour la rectification géométrique des images.

2.3. Corrections radiométriques et géométriques des images

Concernant la rectification radiométrique, nous avons utilisé la technique développée par HALL *et al.* (1991). L'image de 1986 a été prise comme référence car ses valeurs minimales étaient les plus faibles. Cette méthode vise à standardiser toutes les images par rapport à l'image de référence et à compenser les erreurs de calibration du capteur ainsi que les effets des différences atmosphériques et d'illumination entre les images. Pour cela, nous avons sélectionné douze pixels dans chacune des zones les plus sombres (voisines de zéro) et les plus brillantes (voisines de 255) dans l'image de référence et celle à corriger. La transformation linéaire reliant les deux valeurs radiométriques dans les deux images est de la forme :

$$Y_i = a_i + b_i X_i$$

où Y_i est la valeur radiométrique d'un pixel dans l'image de référence et X_i la valeur radiométrique du même pixel dans l'image à rectifier. Les constantes a_i et b_i sont, respectivement, la translation et la pente de la droite joignant l'ensemble radiométrique le plus sombre à celui le plus brillant dans chaque bande i . Les relations entre les moyennes radiométriques des ensembles de contrôle dans les deux images (HALL *et al.*, 1991) peuvent donc être exprimées par :

$$a_i + b_i D_{si} = D_{ri}$$

$$a_i + b_i B_{si} = B_{ri}$$

où D_n , D_{si} , B_n et B_{si} sont les moyennes des valeurs radiométriques les plus sombres (D) et les plus brillantes (B) pour l'image de référence (r) et l'image rectifiée (s) dans la ième bande.

Suite à cette correction radiométrique, nous avons procédé à la rectification géométrique des images. La précision de cette rectification influe sur la précision de la détection du changement. Ainsi, l'image de 1993 a été rectifiée par rapport à la carte avec une erreur moyenne quadratique de l'ordre de 0,25 pixel en utilisant 16 points de contrôle. Les autres images ont été rectifiées par rapport à celle de 1993 avec des erreurs résiduelles qui n'ont pas dépassé 0,17 pixel. Le rééchantillonnage des images a été réalisé à l'aide de la méthode du plus proche voisin car celle-ci n'altère pas la valeur radiométrique des pixels (JENSEN, 1986).

2.4. Création des images composées

Comme la détection du changement n'a concerné que les zones périphériques de Casablanca, nous avons extrait, à partir des quatre images, des sous-images représentant les zones d'expansion urbaine et la zone côtière. L'analyse en composantes principales de chaque sous-image nous a permis de retenir la première composante principale représentant en moyenne 78 % de la variance des données initiales et la deuxième composante représentant 21 % de la variance.

À ces deux composantes, pour chaque sous-image, nous avons ajouté l'indice de végétation normalisé $((XS3 - XS2) / (XS3 + XS2) + 1) \cdot 128$. Ce dernier a permis de rehausser préférentiellement les zones à couvert végétal par rapport à celles bâties. De ce fait, ce néo-canal a été avantageux dans la séparation entre les structures urbaines très fines et minimales, localisées au niveau des zones d'extension urbaine, et la végétation abondante caractérisant ces zones. Les images composées ont été utilisées dans le processus de la comparaison postclassification.

2.5. Comparaison postclassification et détection du changement

L'utilisation de la méthode de comparaison postclassification convenait à cette étude, puisque les données des différentes dates ont été classées séparément. Cette méthode permet de minimiser les effets des conditions atmosphériques différentes et de l'utilisation de capteurs différents lors de l'acquisition des images multitudes (SINGH, 1989). Par ailleurs, des études récentes ont montré que la combinaison du filtrage de type modal avec les procédés de classification permet d'améliorer la précision de la détection du changement (JENSEN *et al.*, 1993). Le filtre modal, appliqué dans un voisinage 3 x 3, avec une certaine valeur seuil, généralement égale à trois, permet de supprimer les pixels isolés ou mal classés, ou les pixels du bruit (STOW *et al.*, 1980; JENSEN *et al.*, 1993). Il remplace la valeur du pixel central par une valeur majoritaire. Le seuil de majorité correspond au seuil à partir duquel la valeur majoritaire remplace la valeur du pixel central.

Dans notre étude, nous avons adopté le processus de la classification hybride qui combine la classification non dirigée et celle dirigée et, de ce fait, est généralement plus précise. L'approche de cette classification utilise la notion de groupement (*cluster*) pour améliorer la définition des classes d'échantillonnage qui seront utilisées dans le processus de la classification dirigée. CHUVEICO et CONGALTON (1988) ont rapporté une précision de 60,5 % pour une classification hybride contre 48,1 % seulement pour une classification dirigée. Ainsi, dans une première étape, nous avons utilisé une méthode de

groupement (*Isodata*) pour avoir le fichier des signatures. Ensuite, nous avons utilisé ce fichier pour la classification dirigée. Cette dernière a été réalisée par la combinaison de deux méthodes de classification : parallélépipède et maximum de vraisemblance afin de parer au problème de la distribution non normalisée des images utilisées.

La classification des images de 1986, 1988, 1991 et 1993 a été réalisée en fonction de deux classes : bâti et non bâti. La technique de filtrage de type modal a été appliquée aux quatre images classées, et ce, dans un voisinage de 3 x 3. Dans le but d'identifier les changements du non bâti au bâti, nous avons comparé les images classées et filtrées en les soustrayant l'une de l'autre. Les images des différences résultant de cette opération ont été ensuite transformées en images binaires en codifiant leurs pixels par des valeurs un et zéro correspondant respectivement au changement et non-changement.

2.6. Évaluation de la précision de la méthode de détection du changement

Pour évaluer la précision de notre méthode de détection du changement, nous avons élaboré un schéma d'échantillonnage pour la sélection d'un nombre d'échantillons idéal pour cette évaluation. Ainsi, pour ne pas fixer une valeur arbitraire pour le seuil de précision attendue, nous avons procédé au moyen d'un échantillonnage pilote orientatif. Pour cela, en utilisant une grille régulière superposable à l'image binaire 1986-1993, nous avons localisé 100 échantillons à l'aide d'une table de nombres aléatoires. Ces échantillons nous ont permis d'estimer la précision attendue à 84 %. Par la suite, en utilisant la formule de la théorie de probabilité binomiale, le nombre idéal N d'échantillons à tester pour évaluer les différents types de précision de détection du changement peut être déterminé, d'après SNEDECOR et COCHRAN (1967) comme suit :

$$N = \frac{4 \cdot p \cdot q}{E^2}$$

où p est le pourcentage de précision attendue, q est égal à 100-p et E est l'erreur permise (5 %). Les 215 échantillons résultants ont été localisés à l'aide d'une grille superposable à l'image des différences en utilisant le mode d'échantillonnage systématique stratifié à un élément par strate (SNEDECOR and COCHRAN, 1967). La réalité de terrain pour ces échantillons a été extraite à partir des photographies aériennes au 1: 20 000 et l'image composée P+XS filtrée de 1993.

Une matrice de confusion a été établie entre chaque image binaire et les données de référence (échantillons). À partir de cette matrice, nous avons évalué la précision totale, la précision du producteur et la précision de l'utilisateur concernant le changement du non bâti au bâti. Une dernière méthode d'évaluation de la précision concerne l'utilisation du coefficient Kappa. Ce coefficient incorpore tous les éléments de la matrice de confusion, et pas seulement les termes diagonaux, pour sa détermination. Ainsi, il est largement utilisé dans l'évaluation de la précision de la classification et dans les méthodes de détection du changement (FOODY, 1992).

3. Résultats et discussions

Les images de différences (binaires), obtenues à l'issue des classifications individuelles des quatre images multidates composées ont montré des expansions urbaines, respectivement, de 17 %, 10 % et 15 % pour les périodes de 1986-1988, de 1988-1991 et de 1991-1993. Ces données ont été combinées pour créer une carte montrant l'expansion du changement en bâti entre 1986 et 1993 (fig. 27-1, voir cahier couleur). La fiabilité des informations contenues sur cette carte se reflète par les différents indices de précision dérivés à partir des matrices de confusion formées pour les images de différences de 1986-1993 et de 1988-1991 (tab. 2). Sur ce tableau, on montre des précisions totales de l'ordre de 76 % et de 78 % avec des pourcentages d'agrément Kappa, respectivement, de l'ordre de 53 % et 54 % pour les images de différences de 1986-1993 et de 1988-1991.

Bien que ces valeurs reflètent une précision acceptable, les changements détectés ne sont pas tous dus à l'urbanisation. L'analyse visuelle des classifications relatives aux différentes dates a détecté certaines indications du changement du bâti au non bâti qui ne correspondaient pas à la réalité de la ville de Casablanca. De même, nous avons noté des confusions entre le bâti et les sols nus dues au rapprochement des valeurs radiométriques entre ces deux classes. Certains changements apparents ont été produits par le recouvrement spectral entre les classes ou les pixels frontières. Dans ce sens, le réseau routier, en particulier les voies routières ayant des dimensions assez importantes et qui séparent les îlots d'extension urbaine, a créé un grand nombre de confusions. Par exemple, dans la classification de l'image de 1991, ces voies routières ont été affectées à la classe du bâti alors que, dans l'image de 1988, elles ont été omises de cette même classe. D'autres changements ont été produits par les modifications significatives du couvert végétal, en l'occurrence les différences de stades phénologiques entre les dates. Tenant compte de ces confusions, toutes les indications du changement de l'espace bâti devraient être bien interprétées afin de s'assurer de leur validité.

Tableau 2. Matrice de contingence et indices de précision pour les images binaires de 1986-1993 et 1988-1991; classe 1 = aucun changement et classe 2 = changement

		Données de référence (réalité de terrain)		Total 1986-1993 / 1988-1991
		classe 1	classe 2	
		(1986-1993 / 1988-1991)		
Données classées	Classe 1	110 / 95	12 / 28	122 / 123
	Classe 2	39 / 12	54 / 44	93 / 56
	Total	149 / 107	66 / 72	215 / 179
Précision du producteur		73,82 / 88,8	81,81 / 61	
Précision de l'utilisateur		90,16 / 77,2	58,06 / 78,6	
Précision totale				76,3 / 77,6
Coefficient Kappa				52,6 / 53,7

4. Conclusions et recommandations

Au terme de cette étude, il apparaît clairement qu'il est possible de localiser les modifications de l'espace périurbain et d'en estimer l'ampleur à partir des images satellitaires à haute résolution spatiale (HRV). La fiabilité des résultats est étroitement liée à la méthode adoptée. La comparaison postclassification, bien que coûteuse, est largement utilisée pour remédier au problème de non coïncidence des périodes d'acquisition des images multidates. Elle conduit à de bons résultats quand les classifications individuelles des images multidates sont précises et comparables pour les différentes dates. C'est pourquoi l'utilisation de la technique de filtrage de type modal pour améliorer la précision de ces classifications individuelles s'est avérée profitable.

La méthodologie utilisée dans cette étude a permis de cerner les transformations spatio-temporelles de l'espace bâti au niveau des zones d'expansion urbaine à un niveau de précision acceptable de 78 %. Toutefois, une amélioration de cette méthodologie aurait permis de produire des documents cartographiques montrant l'évolution du bâti non seulement au niveau des zones périphériques mais aussi à l'intérieur de l'espace urbain. En conséquence, nous recommandons l'utilisation d'un processus de classification hybride guidée qui tiendrait compte des données auxiliaires (cartes d'évolution ou d'occupation et d'utilisation du sol, statistiques disponibles, photographies aériennes et données de terrain) pour que les classifications indépendantes soient aussi précises que possible. Nous suggérons aussi que la valeur seuil pour le filtre modal soit choisie de façon à supprimer le maximum de pixels de bruit ou mal classés. Ce type de classification serait d'autant plus utile pour les zones urbaines présentant une forte hétérogénéité et pourrait améliorer la précision de la détection du changement.

5. Références

- CHUVEICO, E. and CONGALTON, R.G. 1988. Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, n° 9, p. 1275-1281.
- EHLERS, M. 1990. Application of Spot data for regional growth analysis and local planning. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 56, n° 2, p. 175-180.
- FOODY, G.-M. 1992. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 58, n° 10, p. 1459-1460.
- FUNG, T. and LeDREW, E. 1987a. Application of principal components analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 53, n° 12, p. 1649-1658.
- FUNG, T. and LEDREW, E. 1987b. Land cover change detection with Landsat MSS and TM data in the Kitchener - Waterloo area, Canada. *Technical Papers of the ASPRS-ACSM Annual Convention. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping, Falls Church, Virginia*, vol. 6, p. 81-89.
- GRIFFITS, G.-H. 1988. Monitoring urban change from Landsat TM and Spot satellite imagery by image differencing. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, European Space Agency, Paris*, vol. 1, p. 493-497.
- HALL, F.-G., STREBEL, D.-E., NICKSON, J.-E. and GETZ, S.-J. 1991. Radiometric rectification: towards a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, n° 1, p. 11-27.

- JENSEN, J. R. 1983. Chapter 30 - Urban/suburban land use analysis. *in* Colwell, R.N. (ed.), *Manual of Remote Sensing 2ed.*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Virginia, vol. 2, p. 1571-1666.
- JENSEN, J. R. 1986. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 379 p.
- JENSEN, J. R., COWEN, D. J., ALTHAUSEN, J. D., NARUMALANI, S. AND WEATHERBEE, O. 1993. An evaluation of coastwatch change detection protocol in South Carolina. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 59, n° 6, p. 1039-1046.
- SINGH, A. 1989. Review article: Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, n° 6, p. 989-1003.
- SNEDECOR, G.-W. and COCHRAN, W.-F. 1967. *Statistical methods*. Iowa State University Press, Ames, p. 202-211 et p. 516-517.
- STOW, D.A., TINNEY, L.R. and ESTES, J.E. 1980. Deriving land use/land cover change statistics from Landsat : a study of prime agricultural land. *Proceedings of the 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, vol. 2, p. 1227-1237.
- WEISMILLER, R.-A., KRISTOF, S.-J., SCHOLZ, D.-K., ANUTA, P.-E. and MOMIN, S.-A. 1977a. An evaluation of change detection techniques for monitoring coastal zone environments. *Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environmental Research Institute of Michigan*, Ann Arbor, Michigan, vol. 2, p. 1229-1238.
- WEISMILLER, R.-A., KRISTOF, S.-J., SCHOLZ, D.-K., ANUTA, P.-E. and MOMIN, S.-A. 1977b. Change detection in coastal technique zone environments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 43, n° 12, p. 1533-1539.
- WESTMORELAND, S. DOUGLAS, R. and STOW, M. 1992. Category identification of changed land use polygons in integrated image processing/geographic information system. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 58, n° 11, p. 1593-1599.

28

Fusion d'images HRV (P et XS) de SPOT à l'aide de la méthode ARSIS : apports à la cartographie urbaine

THIERRY RANCHIN et LUCIEN WALD

Groupe téledétection et modélisation, Centre d'énergétique, École des mines de Paris, B.P. 207, F-06904 Sophia Antipolis cedex, France; téléphone : +33 (4) 93-95-75-75; télécopieur : +33 (4) 93-95-75-35; CÉ : ranchin@cenerg.cma.fr; wald@cenerg.cma.fr

Résumé

L'objectif de cette communication est de présenter une nouvelle méthode permettant la production d'images à haute résolution spatiale, réunissant les qualités de la haute résolution spatiale et spectrale des satellites d'observation de la Terre et plus particulièrement du capteur HRV de SPOT pour la cartographie urbaine. Les techniques de cartographie urbaine s'appuient sur des algorithmes de classification, dirigée ou non. La haute résolution spatiale ayant, pour cette application, un intérêt prépondérant, des méthodes permettant d'améliorer la résolution spatiale des images multibandes XS ont été développées. Une analyse de ces méthodes a montré qu'elles ne respectaient pas le contenu spectral original des images. La méthode ARSIS (amélioration de la résolution spectrale par injection de structures) a été développée pour fournir des images multibandes à haute résolution spatiale. Elle permet la préservation de l'information originale de ces images et, par conséquent, d'améliorer l'efficacité des classificateurs. Elle s'appuie sur la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution, qui sont brièvement présentées. Une démonstration de cette méthode est présentée. Une évaluation quantitative a montré que la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que les autres méthodes en termes de préservation de la qualité spectrale des images. Des classifications réalisées sur les données originales et sur les images résultant de la fusion sont comparées.

1. Introduction

Avec l'apparition des satellites d'observation de la Terre à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre), la cartographie urbaine est l'une des applications les plus prometteuses de la télédétection. La plupart des satellites d'observation de la Terre fournissent ou fourniront une image à haute résolution spatiale et plusieurs images à moins bonne résolution spatiale, mais à haute résolution spectrale. Les techniques de cartographie urbaine s'appuient sur la photo-interprétation et sur des classifications dirigées ou non, permettant de faciliter la tâche du photo-interprète. Les techniques actuelles d'amélioration de la résolution spatiale des images ont été analysées par MANGOLINI *et al.* (1995). La plupart ont en commun le non-respect du contenu spectral des images originales. Seule la duplication de pixels respecte l'information originale de ces images, mais ne tire aucun avantage de la présence de l'image panchromatique.

La méthode ARSIS développée conjointement par l'Aérospatiale et l'École des mines de Paris (RANCHIN, 1993; RANCHIN *et al.*, 1994; MANGOLINI, 1994) permet, dans un ensemble d'images de résolutions spatiale et spectrale différentes, d'amener les images ayant une moins bonne résolution spatiale à la meilleure résolution spatiale disponible dans l'ensemble de données. Cependant, la qualité spectrale des images dont on améliore la résolution spatiale est préservée. Les images obtenues peuvent être utilisées à d'autres fins que la simple visualisation et ainsi améliorer, par exemple, la précision des classifications réalisées sur les images multibandes originales. Cette méthode s'appuie sur la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution décrites brièvement à la section 2. La méthode ARSIS est présentée à la section 3. Un exemple d'application de cette méthode sur un extrait d'une scène HRV de SPOT de la ville de Barcelone (Espagne) est présenté et évalué à la section 4. Des classifications binaires réalisées sur les images originales et sur les images résultant du processus de fusion sont comparées. En conclusion, les autres cas déjà étudiés sont présentés et les perspectives d'utilisation de cette méthode évoquées.

2. Transformée en ondelettes et analyse multirésolution

L'analyse multirésolution a été introduite par MALLAT (1989). Cet outil mathématique permet de calculer des approximations successives d'une même image à des résolutions spatiales de plus en plus grossières. Elle peut être représentée par une pyramide (fig. 1) dont la base est l'image originale et dont les différentes approximations sont les différents étages de la pyramide. La limite théorique de cette analyse est une image d'un pixel qui représenterait la moyenne de l'image de départ.

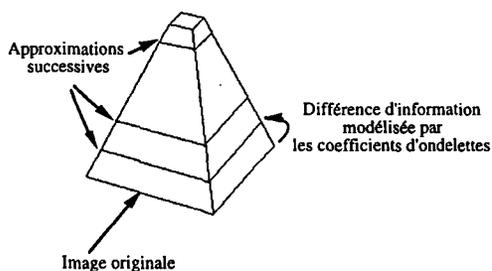


Figure 1. Pyramide représentant une analyse multirésolution

La différence d'information existant entre deux approximations successives est modélisée par des coefficients d'ondelettes calculés à partir de la transformée en ondelettes. Les bases d'ondelettes sont construites par dilatations et translations d'une fonction unique, appelée ondelette-mère. Le signal, ou l'image, est décomposé dans cette base et une représentation temps-fréquence (pour un signal) ou espace-échelle (pour une image) est obtenue.

Cette opération d'analyse faisant appel à la transformée en ondelettes est inversible et à reconstruction exacte. Ainsi, à partir d'une approximation de l'image d'origine (un étage de la pyramide) et des images de coefficients d'ondelettes (représentant la différence d'information entre deux approximations successives), il est possible de reconstruire exactement l'image d'origine. RANCHIN et WALD (1993) ont présenté quelques possibilités d'utilisation de ces outils dans le cadre de la télédétection; pour une introduction plus mathématique, on peut consulter par exemple MALLAT (1989), RIOUL et VETTERLI (1991), DAUBÉCHIES (1992) et MEYER (1992).

3. Méthode ARSIS

Dans cette section, la méthode ARSIS est présentée pour le cas du capteur HRV de SPOT. Ce capteur fournit une image panchromatique P (résolution spatiale : 10 m) et trois images XS_i (résolution spatiale : 20 m). La méthode ARSIS permet de synthétiser des images XS_i -HR ($i = 1 \text{ à } 3$; HR = haute résolution) à la résolution spatiale de 10 m tout en préservant la qualité spectrale des images XS_i originales. Le schéma de cette méthode est présenté à la figure 2.

Une analyse multirésolution utilisant la transformée en ondelettes est appliquée à l'image P. Des approximations de cette image à 20 m, 40 m, 80 m, etc, sont calculées (opération 1). Les différences d'information entre les approximations successives de l'image originale sont modélisées par les coefficients d'ondelettes. De manière similaire, l'image XS_i est décomposée et des approximations à 40 m, 80 m, etc, sont calculées

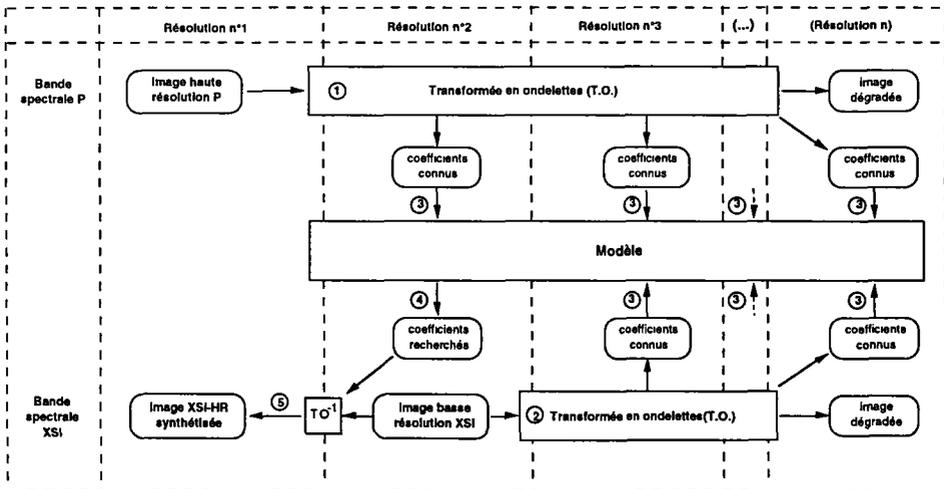


Figure 2. Méthode ARSIS

(opération 2). Un modèle de transformation des coefficients d'ondelettes de l'image P vers les coefficients d'ondelettes de l'image XS_i pour une résolution spatiale donnée est calculé (opération 3). Ce modèle est alors inféré et appliqué à l'image de coefficients d'ondelettes P représentant la différence d'information entre l'image P à la résolution spatiale de 10 m et son approximation à la résolution spatiale de 20 m (opération 4). Cette opération permet de calculer les coefficients d'ondelettes nécessaires à la synthèse de l'image XS_i -HR. Cette synthèse s'effectue par reconstruction (opération 5, inverse de l'analyse) à partir des coefficients d'ondelettes synthétisés et de l'image originale XS_i .

Cette méthode est applicable à d'autres résolutions spatiales et à d'autres bandes spectrales d'après le même principe.

4. Exemple : extrait d'une scène HRV sur Barcelone (Espagne)

La scène HRV traitée a été acquise sur la ville de Barcelone (Espagne) le 11 septembre 1990. Barcelone est une cité située au nord-est de l'Espagne sur la côte méditerranéenne. Cette scène a un contenu thématique très riche. Elle comprend un port, un aéroport, des zones urbaines avec des infrastructures routières et autoroutières ainsi qu'un réseau hydrologique, des champs cultivés, des zones montagneuses et une végétation de type méditerranéen. Elle est composée de l'image P et des images multibandes XS_i , géométriquement superposables.

La méthode ARSIS a été appliquée à cet ensemble d'images. La figure 3a présente un extrait de l'image XS_1 originale. Elle comprend des champs cultivés de petite taille (de l'ordre de quelques centaines de mètres carrés) situés dans sa partie inférieure gauche, une zone urbaine dans sa partie supérieure gauche, ainsi que des routes et autoroutes visibles de manière distincte. Cependant, les échangeurs sont difficilement discernables sur cette image. La figure 3b présente l'image XS_1 -HR résultant du processus de fusion. La qualité visuelle de cette image est due à l'introduction de l'information extraite dans l'image P et modélisée afin de préserver la qualité spectrale de cette image. Ainsi, on distingue nettement sur cet extrait les différents échangeurs, le réseau routier dans la partie supérieure gauche ainsi que les grands bâtiments.

L'apport quantitatif de la méthode ARSIS ne peut s'évaluer qu'en confrontant le résultat du processus de fusion à une référence. Cependant, il n'est pas possible de disposer actuellement d'images XS_i à la résolution spatiale de 10 m. Afin de contourner ce problème, on simule un ensemble d'images en décalant les résolutions spatiales d'un facteur 2. Ainsi, l'ensemble d'images est composé d'une image P à 20 m et d'images XS_i à 40 m. En appliquant la méthode ARSIS, on obtient des images XS_i^* à la résolution spatiale de 20 m que l'on peut comparer aux images XS_i originales. Bien qu'on ne puisse déduire de cette comparaison que la qualité des images XS_i -HR soit similaire à celle des images XS_i^* (MANGOLINI, 1994), cette opération permet de se faire une idée de la qualité des résultats obtenus. Cette méthodologie a été appliquée par MANGOLINI *et al.* (1995) et a permis de montrer que la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que les autres méthodes en termes de préservation de la qualité spectrale des images.

Étant donné le respect de la qualité spectrale amené par cette méthode, il est pertinent de comparer des classifications réalisées sur les images XS_i et XS_i -HR. La figure 4a présente une classification non dirigée, réalisée à partir d'une trichromie des images XS_i , dont l'objet est la mise en évidence d'une classe « réseau routier ». L'algorithme utilisé est une classification ascendante hiérarchique (ALBUISSON, 1993). La classe « réseau routier » est présentée en blanc.

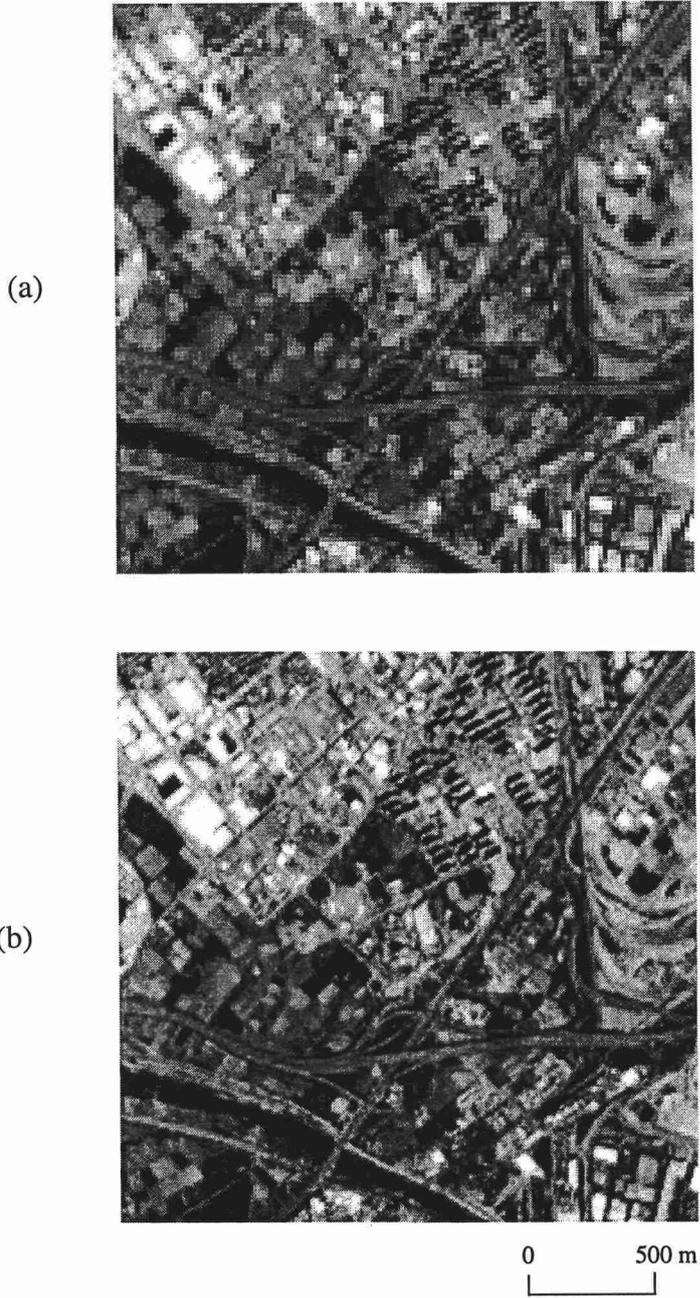


Figure 3. Section de la ville de Barcelone (Espagne) : a) bande XS1 du capteur HRV de SPOT; b) image XS1-HR synthétisée à l'aide de la méthode ARSIS sur la même zone

La figure 4b présente la même démarche appliquée aux images synthétisées XS_i-HR. La précision apportée dans cette classification par la haute résolution spatiale, permet de montrer de manière significative son apport à la cartographie urbaine. La partie supérieure gauche de cette figure permet de distinguer nettement le réseau routier dans cette zone urbanisée. Il ne nous est cependant pas possible d'attester que les pixels de cette classe dans les deux images sont effectivement des pixels « réseau routier » par manque de réalité de terrain.

5. Conclusions et perspectives

Nous avons présenté dans cet article une méthode permettant de synthétiser à partir d'un ensemble d'images de différentes résolutions spatiales et spectrales, des images multibandes à la plus haute résolution spatiale disponible. La qualité spectrale des images synthétisées est préservée de par l'utilisation d'outils mathématiques puissants : la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution. Cette qualité spectrale nous a permis d'améliorer la qualité de classifications en zone urbaine et d'obtenir une meilleure définition des classes.

Bien que présentée dans le cas du capteur HRV, la méthode ARSIS est applicable à d'autres cas. Elle fait actuellement l'objet d'autres études et a été appliquée notamment à la fusion d'images P du capteur HRV (10 m) et TM de Landsat (30 m et 120 m pour la bande 6) et à la fusion d'images TM (bande 6 : 120 m, autres bandes : 30 m) pour l'étude des pollutions de l'air en ville. Le cas du futur satellite SPOT 4 a aussi été exploré (RANCHIN and WALD, 1995). Une étude est actuellement en cours sur des simulations des futurs satellites SPOT 5 et 6. Elle permettra de valider la démarche appliquée pour l'évaluation quantitative de la méthode ARSIS et d'attester son apport à la cartographie urbaine. La méthode ARSIS a aussi été appliquée à la fusion d'images multibandes XS du capteur HRV de SPOT (20 m) et du satellite d'origine russe KVR-1000 (résolution spatiale 2 m, bande spectrale 0,51 - 0,76 μm) pour la cartographie urbaine fine (discrimination des différents types de routes, de bâtiments, des zones de végétation) et fera l'objet d'une publication future.

6. Références

- ALBUISSON, M. 1993. Codage trichrome et classification. *in* J.-M. Dubois et F. Blasco (éd.). Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Troisièmes journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990, Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy (Québec), p. 167-173.
- DAUBECHIES, I. 1992. Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics 61, Society for industrial and applied mathematics (SIAM), Philadelphia, USA, 357 p.
- MALLAT, S.G. 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, p. 674-693.
- MANGOLINI, M. 1994. Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 174 p.

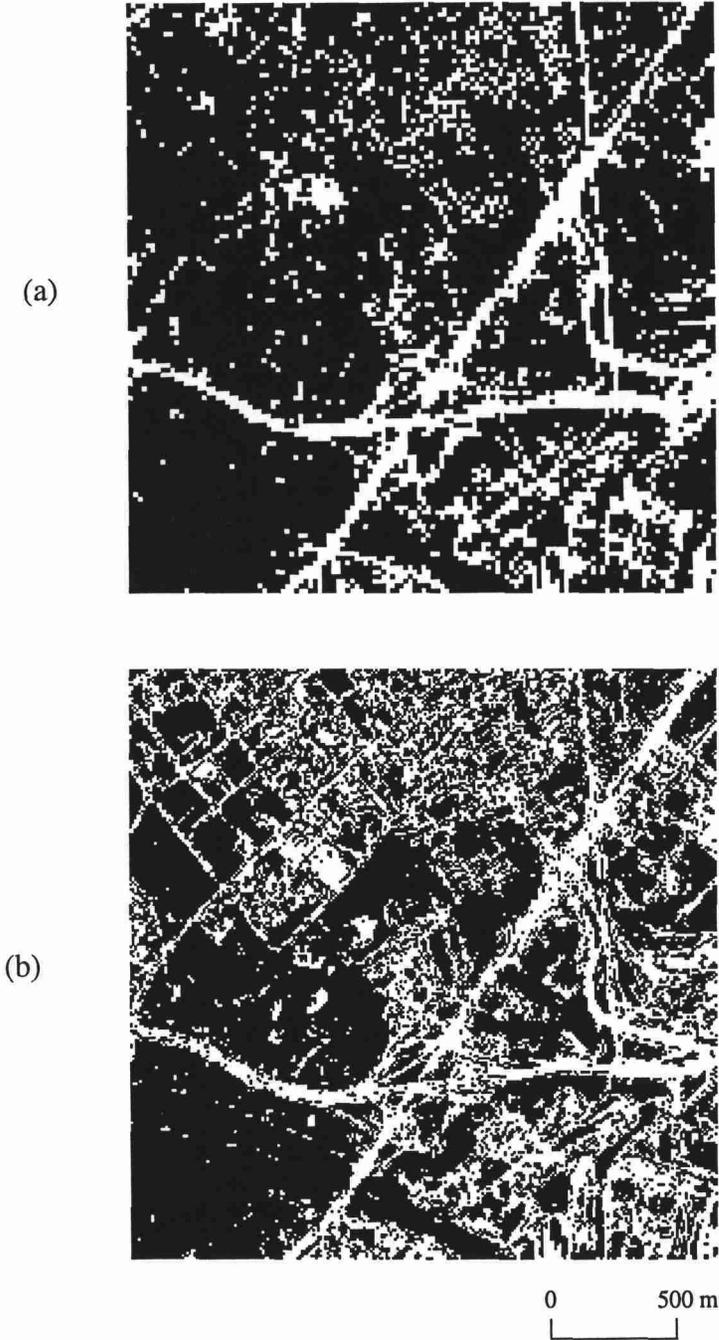


Figure 4. Classification : a) à partir d'une combinaison colorée des images XS_i originales; b) à partir d'une combinaison colorée des images XS_i-HR; la classe blanche représente dans les deux cas le réseau routier

- MANGOLINI, M., RANCHIN, T. et WALD, L. 1995. Évaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *in Comptes rendus du colloque « Qualité de l'interprétation des images de télédétection pour la cartographie », Grignon, 1-3 septembre 1994, Société française de photogrammétrie et télédétection (SFPT), Bulletin n° 137, p. 24-29.*
- MEYER, Y. 1992. Les ondelettes: algorithmes et applications. Armand Colin éditeurs, Paris, 172 p.
- RANCHIN, T. 1993. Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 146 p.
- RANCHIN, T. and WALD, L. 1993. The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, n° 3, p. 615-619.
- RANCHIN, T. and WALD, L. 1995. Preparation of SPOT 4 mission: production of high resolution (10 m) multispectral images using the ARSIS method. *in Proceedings of 15th symposium of EARSeL, Progress in Environmental Research and Applications, Basel, Switzerland, 4-6 septembre 1995 (sous presse).*
- RANCHIN, T., WALD, L. and MANGOLINI, M. 1994. Efficient data fusion using wavelet transform: the case of SPOT satellite images. *Proceedings of the SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation*, vol. 2034, p 171-178.
- RIOUL, O. and VETTERLI, M. 1991. Wavelets and signal processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 8, p. 14-38.

29

Restitution de photographies satellitaires pour la création d'une banque de données topographiques

FABRICE MULLER ¹ et PASCAL BRACKMAN ²

¹ *Laboratoire SURFACES, Université de Liège, 7 place du 20 Août, B4000 Liège, Belgique; téléphone : +32 (4) 366-57-45; télécopieur : +32 (4) 366-56-93; CÉ : surfaces@geo.ulg.ac.be*

² *TELE ATLAS, 92 Moutstraat, B9000 Gent, Belgique; téléphone : +32 (9) 222-56-58; télécopieur : +32 (9) 222-74-12; CÉ : pbr@teleatlas.be*

Résumé

Avec le développement des systèmes d'information géographique (SIG), l'intérêt suscité par les banques de données vectorielles est de plus en plus grand. Il est donc important de s'intéresser à la création et à la mise à jour de ces banques de données. Les photographies satellitaires russes de type KVR-1000 semblent adéquates pour réaliser ce travail au vu de leur haute résolution spatiale de l'ordre de 2 m. Après numérisation à l'aide d'un scanner, les photographies sont exploitables par des méthodes numériques. Étant donné le caractère panchromatique et la pauvre résolution spectrale de KVR-1000, l'usage conjoint d'une image HRV (XS) de SPOT de la même zone s'avère très utile. À la demande de TELE ATLAS, un test de création d'une banque de données vectorielles du réseau routier, a été effectué par le Laboratoire SURFACES, à partir de quatre zones choisies dans la région de Bruxelles. Après correction géométrique et mise en concordance spatiale des deux images, les quatre zones de 2 x 2 km ont été extraites. Ensuite, sur base de KVR-1000 seule ou d'une image colorée intégrant KVR-1000 et HRV (XS) de SPOT, la saisie manuelle du réseau routier a pu être menée à bien. La haute résolution offerte rend cette opération aisée ainsi que la détermination et la délimitation des objets au sol. Les résultats obtenus présentent une erreur planimétrique moyenne de 11,84 m et ils peuvent donc être introduits dans la base de données.

1. Introduction

Depuis quelques années, le développement des systèmes d'information géographique (SIG) suscite un intérêt sans cesse croissant pour les banques de données géographiques vectorielles. La création et la mise à jour de ces banques de données doivent être réalisées à partir de cartes existantes ou de relevés de terrain. Parallèlement, l'ouverture récente des pays de l'Europe de l'Est a engendré l'apparition, sur le marché international, de photographies satellitaires russes à haute résolution. Ces photographies, à usage strictement militaire du temps de l'U.R.S.S., sont maintenant commercialisées par diverses firmes, aussi bien à l'est qu'à l'ouest. Il semblait, par conséquent, très intéressant d'étudier les potentialités de ces photographies dans le cadre de la création et de la mise à jour des banques de données vectorielles. Ceci explique pourquoi, suite à la demande de la firme TELE ATLAS qui réalise des banques de données du réseau routier de plusieurs pays européens, des tests de substitution des cartes topographiques habituelles par des photographies satellitaires à haute résolution, ont été réalisés par le Laboratoire SURFACES de l'Université de Liège. Ces tests consistent à saisir l'information planimétrique souhaitée, directement à partir des photographies préalablement numérisées, en lieu et place des cartes topographiques parfois vieilles de quelques décennies.

2. Matériel et produits utilisés

Les diverses opérations de traitement d'images ont été réalisées sur un PC équipé d'un processeur 80486 cadencé à 33 MHz avec le logiciel *PhotoStyler*, ainsi que sur une station INTERGRAPH avec les logiciels *MicroStation* et *ISI-2*. En ce qui concerne les produits satellitaires, le choix s'est porté sur une photographie numérisée de type KVR-1000 de mai 1992 et sur une image HRV (XS) de juin 1992. La région choisie pour l'étude est la banlieue sud-est de Bruxelles. L'image HRV (XS) a été choisie pour son caractère multibande, alors que le choix de KVR-1000 panchromatique a été dicté par la nécessité d'une très haute résolution spatiale, environ 2 m après numérisation. Le film KVR-1000 a une taille de 18 x 18 cm et couvre une surface au sol de 40 x 40 km. La photographie est prise à une altitude d'environ 220 km, ce qui représente une échelle de 1: 220 000 sur le film. Les photographies sont commercialisées sous forme de copies des films originaux, ou bien sous forme digitale après numérisation à l'aide d'un scanner. Dans le cadre de cette étude, on a opté pour le format numérique afin de pouvoir traiter l'image de manière digitale et l'intégrer à HRV (XS). Le film a été numérisé avec une ouverture de 8 mm, ce qui a engendré des pixels couvrant chacun une surface au sol de 2,2 x 2,2 m. L'image résultante est ainsi formée de 22 500 lignes sur 22 500 colonnes et constitue un fichier d'environ 500 mégaoctets.

3. Corrections géométriques

Quatre zones de 2 x 2 km ont été choisies pour représenter divers types d'occupation urbaine : 1) échangeur autoroutier : région de Zaventem; 2) urbaine à forte densité : région d'Etterbeek; 3) urbaine à densité moyenne : région d'Overijse; 4) rurale : région de Neerijse.

Une correction géométrique a été réalisée sur un extrait de l'image KVR-1000, englobant les quatre zones-témoins. Pour cela, une cinquantaine de points de contrôle ont été collectés entre, d'une part, l'image brute, et, d'autre part, des cartes topographiques au 1: 25 000. Le système de coordonnées utilisé est le *Lambert belge*.

La résolution originale de KVR-1000 a été conservée et l'image rectifiée a ainsi des pixels de 2,2 x 2,2 m. Ensuite, l'image HRV (XS) a été rectifiée sur base de la nouvelle image KVR-1000 obtenue à l'étape précédente. Cette rectification s'est accompagnée d'un changement de la taille des pixels qui est passée de 20 à 2,2 m, c'est-à-dire que le nombre total de pixels a été multiplié par un facteur approximatif de 80. Les valeurs obtenues pour les nouveaux pixels ont été engendrées par interpolation bilinéaire.

Si on considère, par exemple, une erreur planimétrique de 10 m, l'amplitude du relief acceptée peut être calculée par la formule suivante (CARRÉ, 1972) :

$$Z = \frac{E \cdot f}{d}$$

où Z : amplitude du relief maximum acceptable;

E : erreur planimétrique tolérée;

f : focale de la chambre de prise de vue;

d : distance du centre au bord du film photographique.

Ainsi, pour une photographie KVR-1000 de format 18 x 18 cm, avec $f = 1000$ mm et $d = 90$ mm, on reste au-dessous des 10 m d'erreur planimétrique pour un relief dont l'amplitude ne dépasse pas 111 m. Si tel n'est pas le cas, on peut toujours augmenter la valeur de Z en réduisant d , ce qui consiste à ne faire usage que d'une partie plus restreinte du film photographique.

4. Intégration de HRV (XS) et KVR-1000

La combinaison des images HRV (XS) et KVR-1000 permet la création d'images hybrides en couleurs à haute résolution spatiale. Cette intégration est réalisée par la transformation RVB (rouge, vert, bleu) vers LTS (luminance, teinte, saturation) et son inverse. Un choix judicieux de l'ordre des canaux en entrée lors de ces deux transformations donne également la possibilité d'obtenir une image en couleurs naturelles. Considérons une composition colorée dans laquelle on attribue respectivement XS3, XS2 et XS1 aux couleurs R, V et B. La conversion de cette image RVB vers le système LTS fournit trois nouveaux canaux pour lesquels on remplace L par l'unique bande de l'image KVR-1000, avant de procéder à la transformation inverse qui permet de recouvrer une image dans le système RVB. Une simple permutation des canaux R et V permet alors, dans la plupart des cas, d'obtenir une image colorée à haute résolution qui présente des couleurs dites naturelles.

5. Éléments planimétriques recherchés

Le but de cette étude est d'extraire des éléments planimétriques, avec éventuellement certains attributs, pour les inclure dans la base de données vectorielles du réseau routier. L'extraction automatique repose actuellement sur des méthodes qui donnent des résultats non suffisamment fiables pour une application de ce type. C'est pourquoi, les tests ont été

basés sur une extraction manuelle par interprétation visuelle de KVR-1000 seule ou faisant appel à une image hybride en couleurs naturelles.

Avec cette technique, il s'est avéré possible d'extraire les éléments constitutifs de la banque de données de TELE ATLAS (tab. 1).

6. Résultats

Les éléments précédemment cités sont reconnaissables avec des degrés de facilité divers. Ainsi, il est beaucoup plus facile de suivre le tracé d'une autoroute que celui d'une simple route en zone rurale. Pour les rues, le cas le plus simple est celui des zones à forte densité d'urbanisation car les rues sont bien délimitées par les quartiers, alors qu'en zone rurale, les habitations en bordure de route engendrent parfois des problèmes pour la délimitation. Le recours à l'usage de filtres (principalement des filtres passe-haut qui font ressortir les hautes fréquences) peut très souvent augmenter le contraste des éléments linéaires dans les images. Une image en couleurs naturelles aide aussi à la délimitation de certaines zones. Il est donc souvent préférable, dans la mesure du possible, de travailler simultanément à partir de KVR-1000, KVR-1000 filtrée et KVR-1000 + HRV (XS).

Des mesures ont été effectuées entre les résultats de la numérisation et les données existantes dans la banque de données de TELE ATLAS pour les quatre zones-témoins. Pour chaque zone, dix points ont été choisis dont les coordonnées ont été collectées. Sur le tableau 2, on synthétise ces mesures et présente les différences obtenues : S_x et S_y sont les coordonnées en X et en Y des points obtenus par numérisation, TA_x et TA_y sont les

Tableau 1. Éléments constituant la banque de données TELE ATLAS

1.	Routes	<ul style="list-style-type: none"> - autoroutes - routes à plusieurs voies - bretelles d'autoroutes - ronds-points - routes parallèles - routes d'accès aux aires de repos, stations d'essence, restaurants, hôtels, etc. - autres routes
2.	Ponts et tunnels	
3.	Croisements à niveaux	<ul style="list-style-type: none"> - supérieur - inférieur
4.	Occupation des sols	<ul style="list-style-type: none"> - zones urbaines (contours) - parcs (superficie > 50 000 m²) - forêts - zones industrielles
5.	Chemins de fer	
6.	Cours d'eau	
7.	Services	<ul style="list-style-type: none"> - aéroport - stationnement - aire de repos

Tableau 2. Comparaison des résultats obtenus avec les résultats existants dans la banque de données; S_x et S_y sont les coordonnées des points obtenus par numérisation; TA_x et TA_y sont les coordonnées des mêmes points dans la banque de données; D_x et D_y expriment les différences entre ces coordonnées

	S_x (m)	S_y (m)	TA_x (m)	TA_y (m)	D_x (m)	D_y (m)	Δ (m)	Direction du déplacement par rapport au nord (degré)
Neerijse	168485	167885	168491	167900	-6	-15	16,16	21,80140
	168562	167539	168558	167559	4	-20	20,40	-11,30993
	168537	167423	168533	167447	4	-24	24,33	-9,46232
	168219	167545	168225	167570	-6	-25	25,71	13,49573
	168218	166759	168225	166766	-7	-7	9,90	45,00000
	167800	167297	167795	167314	5	-17	17,72	-16,38954
	167837	167438	167849	167449	-12	-11	16,28	47,48955
	167949	167466	167945	167477	4	-11	11,70	-19,98310
	168080	167479	168079	167486	1	-7	7,07	-8,13010
	167941	166852	167941	166879	0	-27	27,00	0
Overrijse	161758	163322	161766	163320	-8	2	8,25	-75,96375
	161902	163399	161914	163397	-12	2	12,17	-80,53767
	161725	163440	161737	163443	-12	-3	12,37	75,96375
	162021	163690	162034	163694	-13	-4	13,60	72,89727
	162488	162923	162496	162926	-8	-3	8,54	69,44395
	162349	162541	162348	162546	1	-5	5,10	-11,30993
	162688	161868	162705	161865	-17	3	17,26	-79,99202
	162439	161748	162451	161755	-12	-7	13,89	59,74356
	161880	161738	161882	161740	-2	-2	2,83	45,00000
	160955	163018	160976	163016	-21	2	21,10	-84,55966
Zaventem	156076	175558	156068	175562	8	-4	8,94	-63,43494
	156094	175563	156088	175573	6	-10	11,66	-30,96375
	156275	175944	156275	175944	0	0	0,00	0
	156155	175921	156157	175925	-2	-4	4,47	26,56505
	156309	176051	156319	176058	-10	-7	12,21	55,00797
	156416	175825	156412	175822	4	3	5,00	53,13010
	155876	176124	155881	176118	-5	6	7,81	-39,80557
	156056	176167	156057	176157	-1	10	10,05	-5,71059
	156128	176235	156132	176225	-4	10	10,77	-21,80140
	155959	176002	155949	176007	10	-5	11,18	-63,43494
Etterbeek	151796	168919	151806	168913	-10	6	11,66	-59,03624
	151809	168763	151819	168759	-10	4	10,77	-68,19859
	151864	168584	151877	168582	-13	2	13,15	-81,25383
	152015	168708	152028	168704	-13	4	13,60	-72,89727
	151214	168384	151226	168376	-12	8	14,42	-56,30993
	151175	168638	151185	168632	-10	6	11,66	-59,03624
	150978	168931	150985	168932	-7	-1	7,07	81,86989
	151075	168970	151081	168973	-6	-3	6,71	63,43494
	151160	169069	151166	169067	-6	2	6,32	-71,56505
	151176	169014	151181	169015	-5	-1	5,10	78,69006
Moyenne					-5,075	-3,825	11,848	
Écart-type							6,06	

coordonnées des mêmes points dans la banque de données, D_x et D_y sont respectivement les différences ($S_x - TA_x$) et ($S_y - TA_y$), et Δ est donné par :

$$\Delta = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}$$

Les directions du déplacement existant entre les éléments vectoriels saisis et ceux de la banque de données sont présentées sous la forme d'un angle par rapport au nord. Souvent, ce déplacement existe suivant un axe de direction majoritaire, et est donc assez facile à corriger. Il s'explique par la présence d'ombres en zones urbaines sur l'image KVR-1000. Ainsi, les ombres des bâtiments projetées sur les rues rendent difficile la localisation exacte du centre des rues, et cela induit parfois un déplacement des éléments vectoriels par rapport à la réalité du terrain. Une analyse détaillée du tableau 1 montre que $\Delta_{\min} = 0$ m, $\Delta_{\max} = 27$ m, et que $\Delta_{\text{moy}} = 11,84$ m avec $\sigma = 6,06$ m. Cette erreur moyenne est jugée entièrement satisfaisante si on sait que les éléments de la banque de données, considérée ici comme support de référence, ont été saisis sur base de cartes au 1: 10 000.

La figure 1a montre la situation visible sur l'image KVR-1000 pour une zone périurbaine. Le résultat obtenu par numérisation est présenté à la figure 1b. Les figures 2a et 2b illustrent le cas d'une zone à forte densité urbaine.

7. Conclusions

Il ressort de cette étude que l'exploitation des photographies satellitaires KVR-1000 à haute résolution spatiale, permet la création et la mise à jour de banques de données géographiques vectorielles, et ce avec une très bonne fiabilité. Le recours à ce type de photographies se justifie pour toutes les zones pour lesquelles la cartographie n'est pas récente. Par rapport à la photographie aérienne, elle présente l'avantage de couvrir une surface au sol de 40 x 40 km par scène, et réduit ainsi fortement les assemblages de scènes pour la réalisation de mosaïques qui font la lourdeur de l'utilisation des photographies aériennes.

À cela s'ajoute l'apparition, dans un avenir annoncé comme proche, d'images numériques captées depuis des satellites de la nouvelle génération, et offrant des résolutions allant jusqu'à 1 m (*Space Imaging, Eyeglass, Earth Watch, etc.*).

Au vu des résultats obtenus au terme de la présente étude, TELE ATLAS demande au Laboratoire SURFACES de poursuivre la collaboration afin d'assister TELE ATLAS dans la modification de son logiciel pour permettre la numérisation à partir de ce type d'images directement sur écran.

8. Référence

CARRÉ, J., 1972. Lecture et exploitation des photographies aériennes (Tome 2). Collection technique de l'Institut géographique national. Eyrolles, Paris, 212 p.

a)

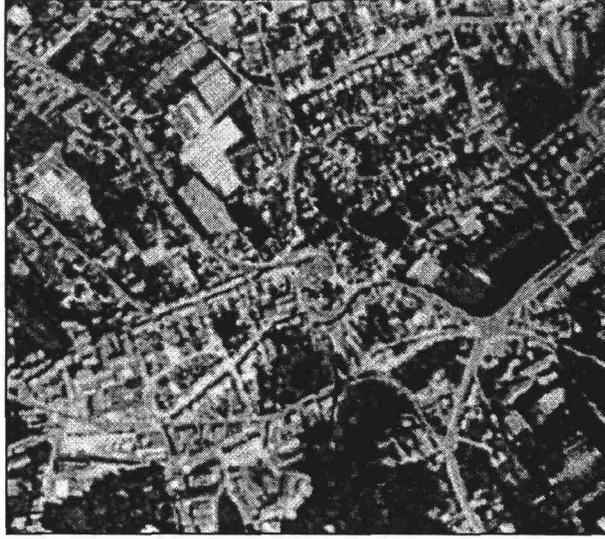


Fig. 1a. Image KVR-1000 pour une zone périurbaine.

b)

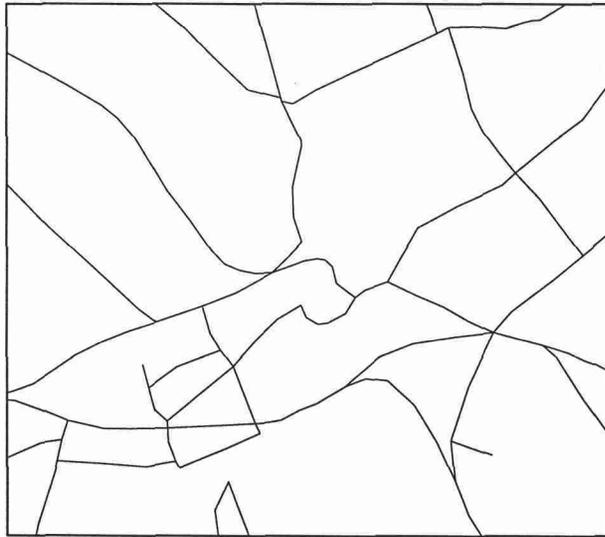


Figure 1. Image KVR-1000 pour une zone périurbaine (a) et résultat de la numérisation à partir de cette image (b)

a)



b)

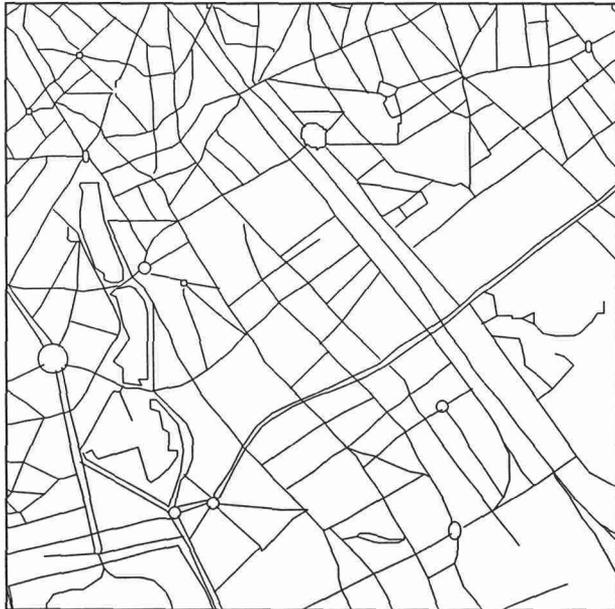


Figure 2. Image KVR-1000 pour une zone à forte densité urbaine (a) et résultat de la numérisation à partir de cette image (b)

30

Application de la télédétection à l'étude des changements urbains et des transformations du littoral à Cotonou (Bénin)

CLAUDE LUCIEN CODJIA

Unité de recherches associées (URA), Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM), Université nationale du Bénin, 03 B.P. 2984, Cotonou, Bénin;
téléphone : +229 35-05-47; télécopieur : +229 30-09-38
CE : ccodjia@syfed.bj.refer.org

Résumé

Saisir la dynamique de l'habitat et comprendre la cinématique du littoral par un examen diachronique entre 1963 et 1987, tel est le but de cette étude basée sur la télédétection satellitaire. Capitale économique du Bénin et ville portuaire de l'Afrique occidentale, Cotonou a pris un essor économique à partir de 1963, année de la construction de son port. L'unique source de données cartographiques disponibles sur la ville était une carte topographique au 1: 50 000 datant de 1963. Celle-ci a été couplée à l'image multibande HRV de SPOT-1 du 22 décembre 1987. Après classification dirigée et superposition de l'image satellitaire à la carte de 1963, plusieurs constatations ont été faites. La cité a connu une croissance spatiale qui a multiplié sa taille initiale par 2,3; de même la densité de l'habitat décroît globalement du noyau central vers les périphéries. Enfin la construction du port a entraîné une mutation de la côte. Celle-ci présente deux sections opposées : l'est du port qui est rongé par une érosion côtière dont le front a régressé de 400 m avec une vitesse maximale de 16 m par an pour un total de 1 12,5 ha de terre perdus. Par contre l'ouest connaît un engraissement non moins significatif. La prise en compte de l'état de la marée au passage du satellite réduit la marge d'erreur. Les premiers résultats des travaux topographiques en cours, menés par une équipe de suivi du trait de côte, vus avec le recul du temps confirment ceux obtenus ici.

1. Introduction

Connue sous le nom de golfe du Bénin, cette partie de la côte ouest africaine, en raison de ses activités économiques, a été à l'origine de nombreuses villes. La plupart de ces villes sont aujourd'hui des capitales économiques ou politiques de leur État et elles ont subi des développements démographiques et des extensions spatiales très rapides (fig. 1). En effet, des installations portuaires ont favorisé l'essor de ces villes et créé une nouvelle dynamique au niveau du transit littoral et dès lors un remodelage de la ligne de côte.

Cotonou, la grande ville portuaire du Bénin, n'échappe pas à cette réalité. Cette cité, d'une population de 536 827 habitants d'après le recensement de 1992, en comptait 109 000 en 1963. Malgré le nombre important de travaux réalisés sur cette ville, très peu d'études ont sérieusement porté sur sa structure spatiale. À partir de l'image satellitaire HRV (XS) de SPOT-1 de 1987, une cartographie relativement détaillée de l'occupation a été mise au point et les statistiques correspondantes ont été analysées. L'évolution de la ville et les mutations de la côte ont été étudiées à partir du croisement des résultats du traitement de cette image et de la carte topographique de 1963.

2. Matériel et méthode

L'essentiel du matériel et les grandes lignes de la méthodologie sont exposés dans un schéma méthodologique qui suit. Les études ont été menées de manière diachronique.

2.1. Les données de base

Nous avons disposé de l'image HRV (XS) du 22 décembre 1987 (fig. 30-2, voir cahier couleur). De celle-ci a été tirée l'imagette de Cotonou, laquelle comporte 492 lignes et 950 colonnes. Une carte topographique au 1: 50 000 datant de 1963 et un plan de la ville de Cotonou au 1: 20 000 ont été utilisés.

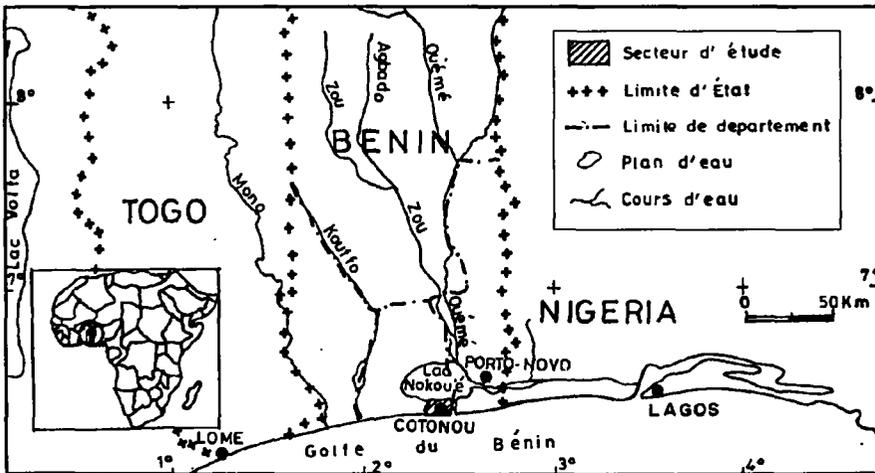


Figure 1. Carte de localisation de Cotonou

2.2. La démarche méthodologique

La démarche méthodologique a consisté, au traitement de l'image, à la numérisation des cartes et à l'analyse des résultats (fig. 3).

2.2.1. Traitement de l'image

Après étalement linéaire de la dynamique de l'image et calcul des composantes principales, nous avons procédé à la correction géométrique. Différents points de contrôle identifiables sans ambiguïté sur la carte ont servi à cette dernière opération. Cotonou étant dans un site de plaine, nous nous sommes limités à la fonction polynômiale de premier degré qui dans le cas d'espèce donne un bon résultat.

La délimitation administrative s'est faite par la représentation des limites administratives sur l'image, et le masquage des zones situées à l'extérieur des contours du périmètre. C'est sur cette dernière image que la classification dirigée a été faite avec un algorithme de maximum de vraisemblance.

Une interprétation visuelle de la composition colorée a permis la définition de la typologie. Les zones d'entraînement prenant en compte toutes les classes ont été tracées sur cette composition colorée. Lors des séances de terrain, chaque zone d'entraînement a été décrite du point de vue thématique.

L'hétérogénéité de l'occupation du sol de Cotonou, la présence du lac Nokoué, de la lagune et de l'océan Atlantique nous ont obligés à utiliser un plan masque. La précision totale de cette classification est de 88 %. Neuf classes ont été distinguées, dont six consacrées à l'habitat. Le taux d'occupation du sol des bâtiments au niveau de ces dernières classes se présente comme suit :

habitat de très forte densité	> 75 %
habitat dense	60 à 75 %
habitat de densité moyenne	40 à 60 %
habitat sur terrain hydromorphe	25 à 40 %
habitat lâche	15 à 25 %
habitat dispersé	< 15 %

2.2.2. Numérisation des cartes

Les contours du littoral, les limites administratives ainsi que l'espace occupé par l'habitat ont été numérisés à partir de la carte de référence au 1: 50 000. Cette opération a facilité les calculs de superficies, les changements d'échelle ainsi que les comparaisons entre la situation initiale, celle de 1963, avec l'état de la ville en 1987.

2.2.3. Analyse des résultats

L'analyse des résultats a été faite de manière diachronique. Les résultats obtenus par traitement de cette image satellitaire ont été comparés aux informations contenues sur la carte de 1963, sous forme numérique. Cette comparaison a été faite par des procédés de superposition automatique et de calcul de superficies.

Pour calculer la superficie, nous avons utilisé l'environnement statistique de *Multiscope*. Le programme attribue à chaque couleur utilisée pour la classification, une valeur radiométrique propre et unique. Aussi, à chaque valeur radiométrique, l'histogramme de la classification donne le nombre de pixels.

En multipliant ce nombre par la valeur 400 m² (surface d'un pixel), on trouve la superficie occupée par classe. La valeur radiométrique 255 correspond au domaine situé

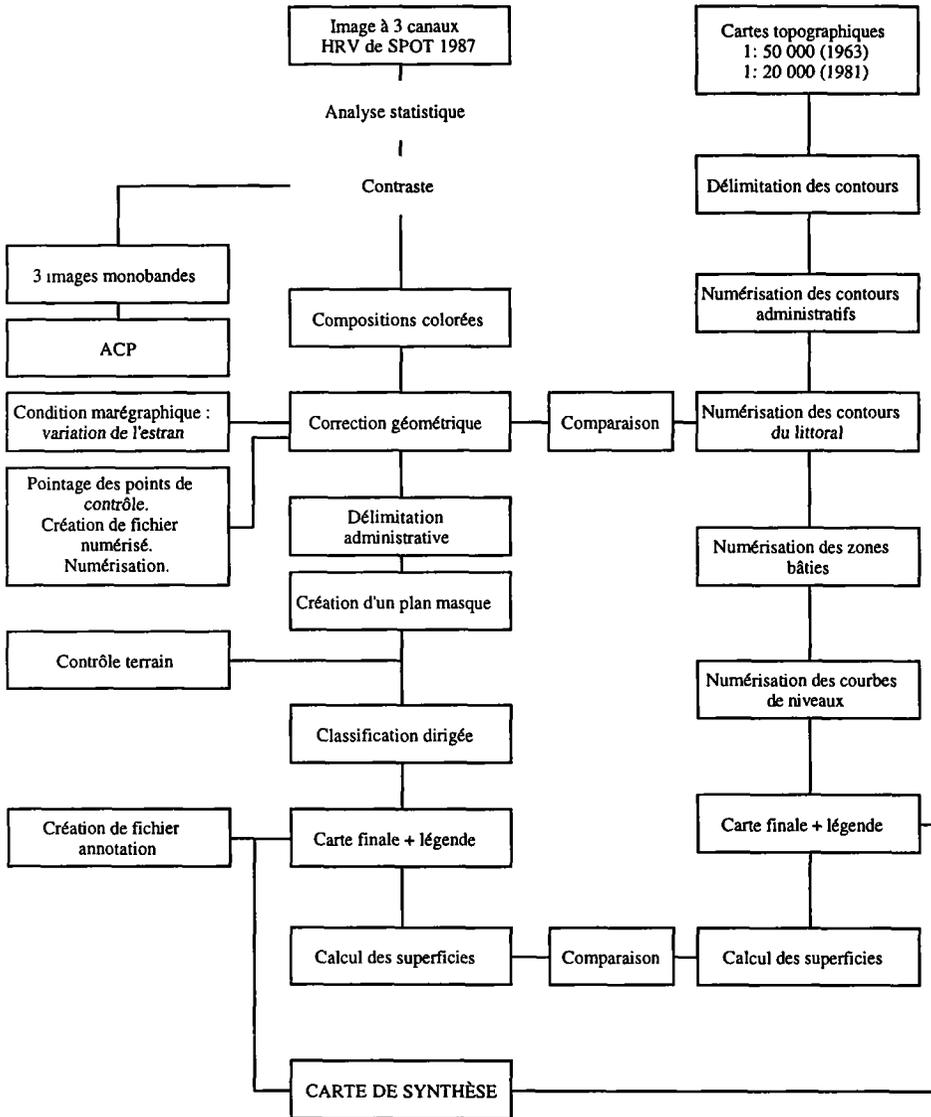


Figure 3. Démarche méthodologique

à l'extérieur du masque, elle n'est donc pas prise en compte. Les superficies occupées par chacune des classes sont contenues dans le tableau 1.

Tableau 1. Superficies relatives à l'occupation du sol à Cotonou

Classe	Superficie (ha)
Habitat de très forte densité	55,08
Habitat dense	498,40
Habitat de densité moyenne	929,70
Habitat sur terrain hydromorphe	248,10
Habitat lâche	754,40
Habitat dispersé	1414,00
Couverture végétale	1338,38
Sol nu ou presque	517,20
Bas-fond	442,66

3. Résultats

Il ressort de cette étude que, de 1963 à 1987, Cotonou a connu bien des changements dans son espace territorial et dans sa dynamique.

3.1. Extension de l'habitat

En général, Cotonou répond aux structures des grandes villes avec un noyau central très dense et une diminution de la concentration des bâtiments au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre-ville. Le développement de la ville est cependant plus accentué du côté ouest que du côté est (fig. 30-4, voir cahier couleur).

La superficie occupée par la zone bâtie, en 1987, selon la classification, est de 3 992,76 ha, alors qu'en 1963, la ville et les villages environnants faisaient 1 762 ha (fig. 5; tab. 1). Aujourd'hui les bas-fonds n'occupent qu'une faible portion de la superficie de la ville (CODJIA, 1995). Cette extension s'est faite dans de nombreux cas sans tenir compte de l'inadéquation des sites à l'habitat. Aussi ces bas-fonds, réceptacles naturels des eaux de pluie, ont-ils été comblés et occupés par des bâtiments.

3.2. Mutations de la côte

Le résultat de la superposition de la carte de 1963 à l'image satellitaire de 1987 montre deux sections littorales opposées : l'est et l'ouest du port (fig. 5). Un recul très perceptible de la côte se dégage à l'est du port. Cette avancée de la mer, varie de 0 à 400 m avec une vitesse maximale de 16 m par an; 112,5 ha de terre ont été engloutis sur cette portion de la côte. Par contre, un engraissement de la côte se manifeste à l'ouest. Du fait de nombreux travaux

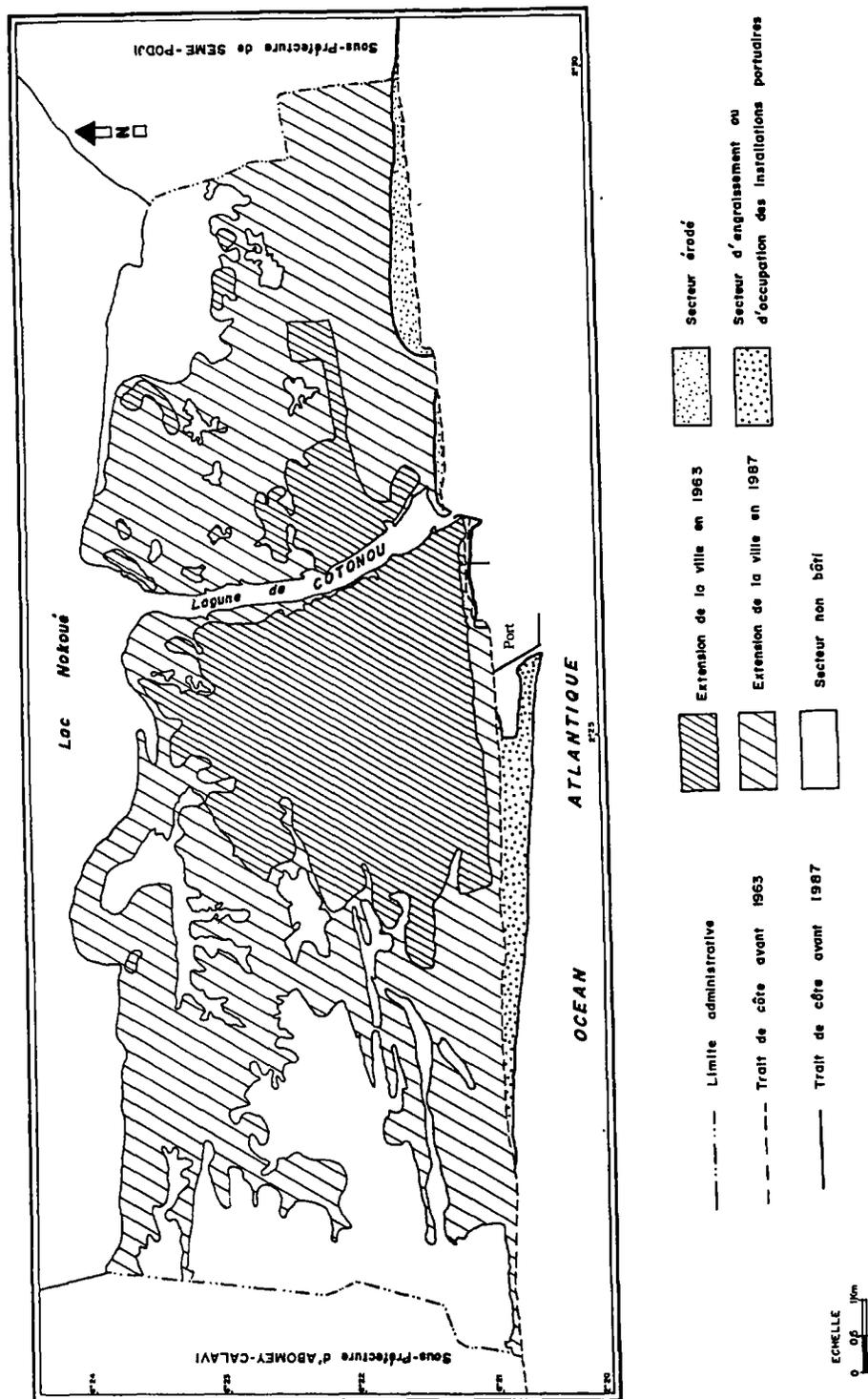


Figure 5. Carte de synthèse de l'évolution de la région de Cotonou de 1963 à 1987

d'aménagement et d'extension du port effectués sur cette partie de la côte et des ponctions de sable que l'on y fait, il est difficile d'évaluer le gain de territoire dû à cet engraissement. Plusieurs facteurs expliquent les changements rapides qui affectent ce littoral. Sa composition sableuse, la permanence de la houle et sa direction par rapport au littoral, sont à l'origine de la précarité de son équilibre. Avant la construction des ouvrages portuaires, il existait un déplacement libre des sédiments. Les digues et les jetées ont bloqué le transport du sable créant ainsi une accumulation à l'ouest. À l'est, sous l'effet de la houle, les dépôts de sédiments s'opèrent sans que la compensation qui devrait provenir de l'ouest, n'ait lieu. On assiste alors à l'érosion du littoral.

Le tableau 2 fait une comparaison entre les résultats de la présente étude et les conclusions auxquelles sont parvenues diverses équipes de suivi du trait de côte (GNONLONFIN, 1994; NEDECO et PAC, 1983).

Tableau 2. Comparaison entre les résultats obtenus par télédétection et ceux des relevés topographiques

Techniques d'étude	Avancée maximale de la mer (m)	Vitesse maximale d'avancement (m / an)	Superficie érodée (ha)	Trait de côte
Étude par télédétection (1987)	400	16	112,5	Semblables avec la projection dans le temps
Travaux topographiques (1994)	500	>15	non déclarée	

4. Discussion

Certaines difficultés liées à l'établissement de la cartographie urbaine sont dues à l'hétérogénéité qui résulte de l'occupation de l'espace urbain. Cette hétérogénéité est d'autant plus contraignante que la ville contient des enclaves rurales. À Cotonou, les aires de production maraîchère (pour ne citer que ce cas) se mêlent à l'habitat. À cette hétérogénéité de l'occupation de l'espace s'ajoute la complexité du site de la ville où, lac, lagune, terrain hydromorphe et mer se côtoient. L'objectif premier de cette étude étant de saisir la dynamique spatiale de l'habitat, nous avons procédé à un masquage des étendues d'eau, dont l'un des avantages est la réduction du nombre de classes. Le zinc, matériau de couverture des toits à Cotonou, est d'une réflectance qui varie selon l'âge du toit. Ainsi, la brillance est très forte (proche de celle d'un miroir) lorsque les feuilles métalliques sont neuves. On pourrait craindre qu'une diversité de réponses spectrales, *a priori* liée à l'âge du matériau, affecte autrement la classification et dès lors entache la précision des travaux. Heureusement cette variation liée à l'âge n'est sensiblement perçue que les deux premières années de l'installation des bâtiments. On peut noter que les constructions se réalisent par îlots de maisons, ce qui permet une homogénéité spectrale pour ces types d'habitation.

À propos du trait de côte, il est évident que les variations des marées entraînent des changements temporaires de la ligne de rivage. En tenant compte de l'heure exacte de la prise de l'image satellitaire qui est 10 h 21 min 55 s (temps universel), on retrouve le niveau de la marée correspondante (0,01 m). En faisant intervenir la pente moyenne de la côte, on détermine ainsi la longueur de l'estran qui est de 5 m. Cette marge a été prise en compte dans l'interprétation des résultats. Il n'a cependant pas été possible d'obtenir des données relatives à l'état de la marée au moment de la prise des photographies aériennes ayant servi à la confection de la carte de 1963 parce que les services s'occupant de l'étude des marées ont été créés en 1980.

5. Conclusion

Sans être une étude de plus, le présent travail sur les problèmes d'aménagement urbain et d'érosion côtière à Cotonou, reste la vision de ces mêmes phénomènes au travers de la télédétection satellitaire. Les travaux ont permis d'obtenir une structure complète et une cinématique de la ville. Malgré la simplicité des travaux et leur durée relativement courte, des résultats concrets, identiques à ceux des travaux de topographie, ont été obtenus. Le coût relativement bas et la durée des travaux dans ce domaine augurent d'un usage plus poussé de la télédétection satellitaire. Aussi, son intégration est-elle envisagée pour le suivi de l'ensemble du littoral de la république du Bénin.

6. Remerciements

Ce projet a été entièrement réalisé au Centre régional de formation aux techniques des levés aérospatiaux (RECTAS), à l'Unité des applications de la télédétection. Je remercie mon maître Georges Kozminski et Monsieur Amamoo Octchere les responsables de cette unité, pour leur contribution.

7. Références

- CODJIA, C. 1995. Mutations urbaines et littorales à Cotonou : étude à partir de la télédétection. Thèse de DESS, Centre régional de formation aux techniques des levés aérospatiaux, Ile Ife, Nigeria, 30 p.
- GNONLONFIN, L. 1994. Port et environnement côtier à Cotonou. Port info. n° 2, p. 18-22
- NEDECO (ingénieurs conseils néerlandais) et PORT AUTONOME DE COTONOU (PAC). 1983. Étude du littoral – Tome I : synthèse de l'étude. Laboratoire d'hydrologique de Delft, 20 p.

31

Apport de deux images MSS et TM de Landsat au suivi cartographique des dynamiques spatiales récentes des milieux périurbains dans le bassin du lac de Valencia (Venezuela)

FRANCISCO GUERRA ^{1,2}, WUILIAN TORRES ², JESÙS ARNALDO PÉREZ ³ et ANA MARIA MARTINEZ ²

¹ *Institut de la carte internationale de la végétation (ICIV), 13, avenue du Colonel Roche, BP 4403-31045, Toulouse cedex, France; téléphone : +33 (5) 61-55-85-46; télécopieur : +33 (5) 61-55-84-44*

² *Centro de procesamiento digital de imágenes (CPDI), Instituto de Ingeniería, carretera nacional, apartado 40200, Caracas 1040-A, Venezuela; téléphone : +58 (2) 942-00-25; télécopieur : +58 962-10-25*

³ *Station internationale de recherche contre la faim (SIRCOFAM), 39, allées Jules Guesde, 31000 Toulouse, France; télécopieur : +33 (5) 61-55-32-02*

Résumé

Des données satellitaires multitudes sont utilisées pour le suivi cartographique des dynamiques spatiales urbaines dans le bassin du lac de Valencia au Venezuela. La méthode consiste à effectuer une classification préalable des images qui sont ensuite comparées pixel à pixel à l'aide de critères d'acceptation des changements. On constate une forte expansion des zones urbaines préexistantes au détriment des surfaces occupées par des formations végétales arbustives. Cependant, la validité des résultats est limitée par la qualité des classifications qui, dans cette étude, a été d'environ 75 %. L'objectif général de ce travail était la mise au point d'une méthode efficace pour l'évaluation de l'utilisation

du sol dans le bassin du lac entre 1975 et 1988 à l'aide d'images satellitaires. L'utilisation de ces images fortement appuyées par un travail d'enquête sur le terrain et des techniques de traitement numérique des données, s'avère efficace et rentable. Une assez bonne cartographie à l'échelle du 1: 100 000 a été obtenue pour le suivi des dynamiques spatiales dans une zone soumise à d'importantes pressions des activités urbano-industrielles au Venezuela. Les résultats de ce travail constitue un inventaire préliminaire pouvant servir à la prise de décisions dans le cadre de l'aménagement du territoire.

1. Introduction

Le bassin du lac de Valencia est une dépression tectonique située au nord du Venezuela (fig. 1). Sa superficie est d'environ 3 000 km², dont 375 km² correspondent à la surface du lac. Cette zone est nettement influencée par deux métropoles industrielles importantes au niveau national. La croissance accélérée des activités urbano-industrielles depuis les années soixante provoque des changements significatifs en ce qui concerne l'utilisation du sol dans ce bassin qui possède 38 % des meilleures terres du pays. Entre 1961 et 1981, sa population a été multipliée par trois (AMAYA, 1972; OCEI, 1985) si bien que l'État cherche à contrôler l'impact de ce phénomène sur l'espace par des mesures administratives. Cette zone a fait l'objet d'inventaires cartographiques consacrés à l'étude des systèmes agricoles (EDER and AVILAN, 1975) et de la végétation (MINISTERIO DEL AMBIENTE, 1983) réalisés à partir de photographies aériennes. Plus récemment, en 1988, les résultats d'une interprétation visuelle d'une image TM de Landsat ont été utilisés pour la mise en place d'une base de données environnementales (MINISTERIO DEL AMBIENTE *et al.*, 1991). Dans ces travaux, le thème « urbain » n'est abordé que partiellement et il n'y a pas d'analyse multitemporelle. L'objectif de ce travail est la mise au point d'une méthode efficace pour le suivi cartographique des dynamiques spatiales urbaines du bassin du lac de Valencia à partir des données satellitaires MSS et TM de Landsat entre 1975 et 1988 (fig. 31-2, voir cahier couleur). L'application d'une méthode consistant à classer préalablement les images, permet de s'affranchir des perturbations introduites par la réponse des capteurs et les conditions atmosphériques (SINGH, 1989).

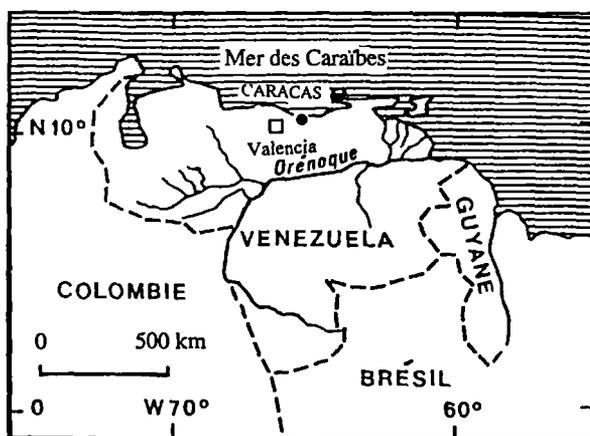


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2. Matériel et méthode

2.1. Données

Les données ayant servi à la réalisation de ce travail (tab. 1) ont été traitées et mises en forme avec les logiciels *Erdas* (version 7.4), *Arc-Info* (version 5.01) et les programmes *Val-classifet* et *Multi-temp* développés par le Centre de traitement d'images de Caracas (CPDI).

Tableau 1. Données aériennes, satellitaires et cartographiques utilisées

Type de données	Capteur/WRS	Date	Échelle
Image Landsat 2	MSS / 004-043	19-02-1975	
Image Landsat 5	TM / 004-053	26-03-1988	
Photographies aériennes	Panchromatique N/B	1975	1: 75 000
Photographies aériennes	Panchromatique N/B	1987	1: 25 000
Cartes topographiques			1: 100 000 1: 25 000
Carte de la végétation		1983	1: 100 000
Carte de l'utilisation du sol		1991	1: 100 000
Carte géomorphologique		1991	1: 100 000

2.2. Analyse des données

2.2.1. Mise en forme

La forte corrélation linéaire existante entre les canaux vert, rouge et infrarouge des capteurs MSS et TM de Landsat (ROYER *et al.*, 1987) a permis leur sélection car ils assurent une cohérence spectrale nécessaire à l'analyse multidate des données satellitaires. Par la suite, des corrections géométriques du premier degré ont été réalisées et les nouvelles valeurs radiométriques ont été obtenues après l'application d'une convolution bicubique sur les images MSS et TM de Landsat. Les erreurs moyennes quadratiques de 1,4 et de 1,2 pixels pour les images MSS et TM de Landsat respectivement n'ont pas pu être améliorées compte tenu de la qualité médiocre des documents cartographiques disponibles.

2.2.2. Classifications

La réalisation des classifications sur les images permet l'obtention des supports cartographiques sur lesquels les dynamiques spatiales entre les deux dates sont analysées. Les classes thématiques ont été définies dans le but d'évaluer les types d'utilisation du sol affectés par la croissance urbaine. Aussi, les parcelles d'entraînement ont été choisies à partir des documents cartographiques fortement appuyées par un travail sur le terrain et à l'aide d'une base de données géographiques. Ces parcelles d'entraînement servent à obtenir les signatures spectrales des classes dans chaque bande du capteur. La séparabilité spectrale des classes a été évaluée par la méthode *Transformed divergence* (SWAIN and DAVIS, 1978) qui tient compte de la distance statistique entre deux classes pour

l'ensemble des canaux utilisés dans la classification. Ainsi, 11 classes thématiques représentatives des milieux étudiés ont été retenues (tab. 2). Après le rejet des parcelles d'entraînement n'atteignant pas 80 % de pixels affectés, les matrices de confusion entre les classes dans chaque image présentent des pourcentages d'affectation acceptables, en particulier, pour le thème urbain où les valeurs supérieures à 95 % permettent d'envisager une bonne identification de cette classe. L'algorithme de classification utilisé est celui du maximum de vraisemblance qui a été appliqué séparément à chaque image (fig. 31-3, voir cahier couleur).

Tableau 2. Classes thématiques représentatives de l'utilisation du milieu

Classe	Observations sur le terrain
Urbain	Zone résidentielle, commerciale, de service et industrielle dans le périmètre urbain et périurbain
Forêt	Écosystème naturel
Fourré	Formation végétale arbustive d'origine anthropique
Pâturage naturel	Surface pastorale extensive
Pâturage cultivé	Surface pastorale semi-extensive
Culture annuelle	Cannes à sucre, maïs, haricots, coton, etc.
Culture permanente	Bananiers, arbres fruitiers
Sol nu	Carrières
Brûlis	Zone soumise aux feux saisonniers
Eau	Lacs et barrages
Nuages	

2.2.3. Validation des classifications

L'intérêt de cette étape est de mesurer la qualité des classifications compte tenu des erreurs de diverses natures qui altèrent les résultats (CAMPBELL, 1987). La méthode utilisée consiste à comparer l'information tirée des photographies aériennes avec les classifications suivant un échantillonnage aléatoire stratifié sur un dixième de la surface du bassin, opération réalisée grâce au programme *Val-classif*. Les matrices de validation montrent une fiabilité globale d'environ 70 % avec une marge d'erreur de ± 4 % pour l'image MSS de 1975 et de 75 % avec une marge d'erreur de ± 4 % pour l'image TM de 1988 en utilisant un niveau de signification de 0,05.

2.2.4. Analyse multitemporelle

Les classifications préalablement obtenues ont été comparées afin de quantifier et de repérer les dynamiques spatiales qui ont eu lieu entre 1975 et 1988. Cette démarche a été possible à l'aide du programme *Multi-temp* suivant trois phases : 1) d'abord la création d'une matrice de changement qui permet de ne conserver que les types d'évolution plausibles selon les critères du thématique (tab. 3); 2) l'obtention d'une nouvelle image de synthèse dans laquelle chaque pixel a une valeur qui correspond à un type de changement; 3) à partir de cette nouvelle image, il est possible d'avoir une estimation des changements spatiaux (fig. 4).

Tableau 3. Matrice d'acceptation de changements d'utilisation du sol de 1975 à 1988

Année 1988 ⇒ Année 1975 ↓	Urbain	Forêt et fourré	Pâturage naturel et cultivé	Culture annuelle et permanente	Sol nu et brûlis	Eau	Nuages et non classifié
Urbain	POS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS	NPOS
Forêt et fourré	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Pâturage naturel et cultivé	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Culture annuelle et permanente	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Sol nu et brûlis	POS	POS	POS	POS	POS	POS (*)	NPOS
Eau	POS	POS	POS	POS	POS	POS	NPOS
Nuages et non classifié	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN	SIN

POS: changement possible

NPOS: changement non possible

SIN: changement sans intérêt

(*) : on peut admettre la construction de retenues d'eau entre les deux dates

3. Résultats et discussion

Parmi les changements spatiaux les plus significatifs, nous avons constaté l'augmentation des zones urbaines au détriment des surfaces occupées par les formations arbustives (fourrés) sur l'ensemble du bassin (fig. 5). Ces espaces pourraient être assimilés à la notion de « friches sociales ». En effet, ils auraient été multipliés par trois entre 1975 et 1988, soit un taux d'accroissement annuel d'environ 15 % qui correspondrait bien à l'évolution de la population constatée pour la période 1961-1981 (AMAYA, 1972; OCEI, 1985). Cette dynamique urbaine se fait à partir des centres urbains préexistants et l'expansion est limitée par la présence du lac et des forts reliefs au nord et au sud du bassin. Les nouvelles zones urbaines s'installent sur la plaine lacustre au fond des vallées suivant l'infrastructure routière, notamment l'autoroute orientée E-O. Il faut cependant nuancer ces résultats car même si les matrices de confusion entre les classes laissent espérer une bonne affectation des pixels urbains, l'évaluation des classifications indique que des pourcentages non négligeables (10 % et 20 %) de pixels, appartenant à la classe « culture annuelle », se trouvent dans la classe « urbain ». Ceci peut être expliqué par le fait, qu'à la date de prise de vue, les champs de cultures annuelles sont en labour si bien que leurs signatures spectrales sont très proches.

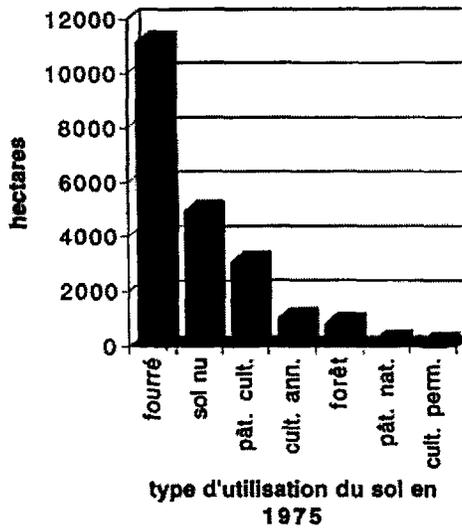


Figure 4. Évolution de la superficie d'utilisation du sol entre 1975 et 1988 dans le bassin du lac de Valencia

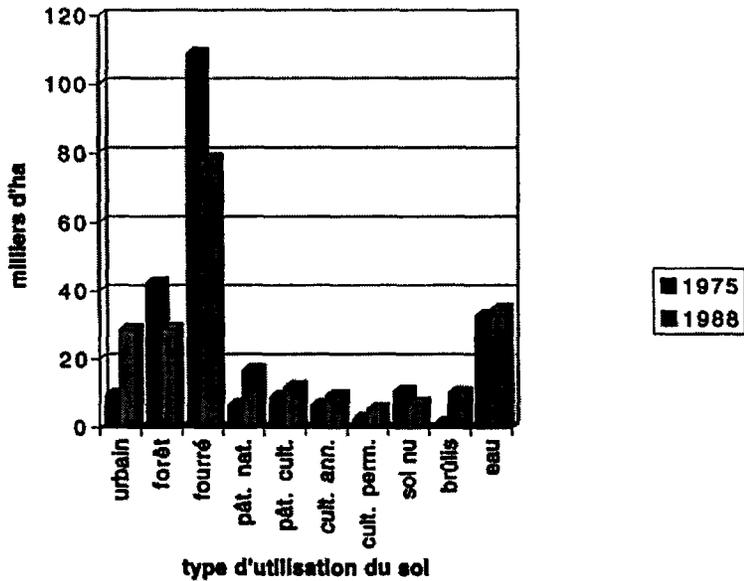


Figure 5. Contribution des types d'utilisation du sol en terme de superficie, à l'expansion urbaine de 1975 à 1988 dans le bassin du lac de Valencia

4. Conclusion

La méthode utilisée s'adapte bien au suivi des dynamiques spatiales dans des régions soumises à d'importantes pressions des activités urbaines. L'analyse des changements spatiaux faite à partir des images classées permet de s'affranchir des problèmes liés au calage radiométrique. Cependant, une attention particulière doit être accordée à la qualité des classifications car les erreurs ont un effet multiplicatif sur l'image des changements (STOW *et al.*, 1980). Les classifications faites uniquement sur la base de critères spectraux présentent des limites car les confusions entre les classes thématiques demeurent importantes. Néanmoins, les résultats obtenus en ce qui concerne le thème urbain semblent satisfaisants. Dans ce sens, l'intégration de critères morphologiques à l'aide d'un système expert lors de l'analyse multitemporelle peut améliorer la cartographie et l'interprétation des dynamiques spatiales. L'application de cette méthode peut déboucher sur un essai de modélisation de la croissance urbaine en intégrant des données socio-économiques.

5. Remerciements

Nous tenons à remercier le Conseil national de la recherche scientifique et technologique du Venezuela (CONICIT) pour son appui financier assuré à la réalisation de cette étude. Plus près de nous, nous remercions Mlle Nawel Anahí Perez de nous avoir aidé à préparer les figures.

6. Références

- AMAYA, C. 1972. Características del proceso de urbanización en la cuenca del lago de Valencia (1932-1972). *Revista geográfica del Instituto de geografía y conservación de recursos naturales de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes*, n° 12(26-27), Mérida, p. 18-26.
- CAMPBELL, J. 1987. *Introduction to remote sensing*. Guilford Press inc, New York, 551 p.
- EDER, H. and AVILAN, J. 1975. A preliminary study of the agriculture systems of the lake Valencia basin. *Instituto de geografía y desarrollo rural, Universidad central de Venezuela, Caracas*, 162 p.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE 1983. *Uso actual y cobertura vegetal de las tierras en la región centro-norte-costera. Informes técnicos, zona 2, Caracas*, 167 p.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE, INSTITUTO DE INGENIERIA et FUNDACION POLAR 1991. *Sistemas de información ambiental de la cuenca del lago de Valencia, Caracas* 179 p.
- OFICINA CENTRA DE ESTADISTICA E INFORMATICA (OCEI) 1985. *Nomenclador de centros poblados. Región capital, Caracas*, 486 p.
- ROYER, A., CHARBONNEAU, L., BROCHU, R., MURPHY, J. M. and TEILLET, P.M. 1987. Radiometric comparison of the Landsat-5 TM and MSS sensors. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 4, p. 579-591.
- SINGH, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, n° 6, p. 989-1003.

- STOW, D., TINNEY, L.R. and ESTES, J.E. 1980. Deriving land use land cover change statistic from Landsat. A study of prime agricultural land. Proceeding of the 14 th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 1980, Environmental Research Institute of Michigan, p. 1227-1237.
- SWAIN, P.H. and DAVIS, S.M. 1978. Remote sensing: the quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 p.

32

Apport de la télédétection à la cartographie de l'espace urbain au 1: 20 000 en terme d'emprise au sol du bâti : cas de la ville d'Oran (Algérie)

YOUCEF MESSAR et NADIA MESSAR

*Laboratoire de télédétection, Centre national des techniques spatiales (CNTS),
B.P. 13, 31200 Arzew, Algérie;
téléphone : +213 (6) 37-22-17; télécopieur : +213 (6) 37-84-54*

Résumé

Il est des utilisateurs pour qui l'image satellitaire semble ne pas convenir aux études urbaines; en effet, que peut-elle apporter que les couvertures photographiques ne montrent déjà plus finement ? Notre étude se propose d'examiner l'apport d'une classification par analyse discriminante des données HRV de SPOT prises sur la ville d'Oran en mai 1994, à l'aide des techniques intégrant l'information à la fois spectrale et spatiale apportée par les échantillons-terrain. Le but est d'aboutir à une stratification du site urbain en terme d'emprise au sol du bâti. Une classification par pixel a été appliquée sur l'image et ceci, après une sélection statistique des variables les mieux corrélées aux descripteurs du bâti. Le coefficient d'emprise au sol du bâti n'a un sens que si l'unité élémentaire est l'îlot. De ce fait, le passage de la classification par pixel à la classification par îlot est une étape incontournable. L'opération a été réalisée après numérisation des contours des îlots à partir de la carte à l'échelle du 1: 7 500. La précision de la classification est vérifiée après sélection de 83 échantillons représentant les typologies les plus diverses, sur le plan régional de la ville d'Oran à l'échelle du 1: 5 000. Les résultats de la classification par îlot montrent le comportement des classes, dont la stabilité se situe entre 40 % et 83,33 % et un pourcentage global bien classé de 66,32 %.

1. Introduction

L'élaboration et la mise en œuvre de politiques urbaines requièrent une connaissance précise des différents usages du sol urbain. La nécessité d'une mise à jour régulière de ces inventaires conduit à envisager de recourir à des images satellitaires à haute résolution, en l'occurrence HRV (XS) de SPOT. Dans le cadre d'une caractérisation de la ville d'Oran en terme de densité du bâti, nous avons mené l'étude suivante en utilisant les données HRV de SPOT de mai 1994, selon deux volets principaux : 1) collecte d'informations « morphologiques » à partir d'un sondage aréolaire; 2) proposition, après utilisation et traitement des données, d'une image classée en niveaux de densités du bâti. De même, nous avons proposé de nouvelles approches permettant le passage de l'analyse par pixel à l'analyse par zone.

2. Enquête sur le terrain

La ville d'Oran couvre une superficie de 6 237 ha et se caractérise par des zones homogènes au point de vue de l'organisation spatiale (fig. 1). En effet, la ville a subi de nombreuses transformations depuis la colonisation espagnole jusqu'à nos jours. À partir de son ancien centre Sid El Houari, la ville a rayonné jusqu'à atteindre les villages d'Es-Senia, au sud, et de Bir El Djir, à l'est. Chaque étape de développement a laissé ses empreintes en donnant aux tissus urbains des formes de texture et des îlots de tailles différentes. À cet effet, chaque tissu urbain est représenté par une zone homogène du point de vue de l'organisation spatiale, du rapport surface bâti / espace non bâti, de la nature de matériaux et de l'âge des constructions.

L'enquête sur la « morphologie urbaine » (EBERHARD, 1987; MICHEL, 1988) est un outil indispensable pour appréhender les structures de ces tissus urbains, du fait des renseignements qu'elle apporte : mesure de la largeur de la voirie, surface relative du bâti, existence ou non de végétation, etc. Cette enquête menée en 1990 permet, d'une part, d'étudier la relation bâti / emprise au sol et, d'autre part, de caler l'interprétation de l'image satellitaire. Le taux de sondage a été fixé à 5 % de la surface totale de la ville pour une bonne représentativité de l'échantillon urbain.

2.1. Mise en œuvre du tirage TER-UTI

À partir d'un sondage aréolaire de type TER-UTI (FOURNIER *et al.*, 1985; ANONYME, 1992) exploitant les données cartographiques et photographiques, des segments de 9 ha regroupant les morphologies et les typologies les plus diverses sont sélectionnés sur photographies aériennes. Les données utilisées sont celles de la carte topographique au 1: 25 000 (1960), d'une carte au 1: 7 500 (INC, 1988) et de la couverture aérienne de la ville au 1: 10 000. Les différentes unités morphologiques sont repérées et numérotées sur chaque segment de la photographie aérienne pour permettre l'identification et la description des entités sur le terrain.

Les multiples enquêtes sur le terrain ont permis la caractérisation de l'occupation du sol des segments en deux grandes classes : bâti et non bâti. Dans la première, nous avons recensé toutes les constructions d'un ou de plusieurs niveaux ainsi que leurs descriptifs, soit état du bâti, nombre de niveaux et nature des toits. Dans la deuxième catégorie, toutes les surfaces non construites sont répertoriées, soit végétation, voirie et terrains nus.



Figure 1. Plan de la ville d'Oran au 1: 7 500

2.2. Classement des îlots échantillons en densité croissante

Malgré certaines difficultés, liées notamment à la résolution des documents utilisés (photographies au 1: 10 000), le relevé individuel des îlots a pu être réalisé ainsi que le calcul des coefficients d'emprise au sol du bâti.

Tout au long de cette étude, le mot « densité » a pour unique signification le rapport entre la surface construite d'un îlot (S_c) et sa surface totale (S_i). L'îlot est délimité par la voirie. Le terme adéquat est le coefficient d'emprise au sol, car la densité au sens de nombre de niveaux de chaque bâtiment n'est pas prise en compte, bien que ce renseignement figure dans nos fichiers d'informations-terrain.

Pour le calcul des densités, nous avons d'abord délimité les îlots constituant chaque segment de 9 ha sur les photographies aériennes. Lorsque ce dernier n'englobe pas l'îlot entier, nous faisons l'extension à l'ensemble de l'îlot pour respecter le taux de sondage à 5%. Un planimètre digital a été utilisé pour le calcul des surfaces bâties et non bâties. Cette tâche s'est avérée difficile à cause de quelques problèmes rencontrés :

- à l'échelle du 1: 10 000, le relevé individuel de chaque îlot a été impossible dans certains cas; il s'agit plus particulièrement du quartier Haï Es Snouber, caractérisé par un réseau routier très étroit, enchevêtré, irrégulier, permettant à peine le passage d'un motocycliste (fig. 1);
- le centre-ville présente le même handicap, malgré une texture mieux structurée, régulière et orthogonale;
- le quartier commercial M'dina El D'jadida présente des caractéristiques similaires avec des ruelles étroites, n'atteignant pas parfois 4 m de largeur, ses îlots contigus témoins d'une structure destinée à jouer un rôle économique;
- l'ombre projetée de certaines parties de constructions complique le discernement entre la partie construite et la surface non bâtie.

Par conséquent, nous avons procédé à l'agrandissement au 1: 2 500 des photographies aériennes et, cette fois-ci, les difficultés se sont estompées avec cependant la persistance du problème d'ombre qui a pu être résolu par une connaissance approfondie des sites-échantillons. Nous avons ainsi identifié 5 classes d'emprise au sol du bâti, chacune faisant référence à un type particulier de tissu urbain (tab. 1).

Tableau 1. Les modalités de densité du bâti retenues après le calcul du coefficient d'emprise au sol du bâti sur les segments échantillons

Classe de l'échantillon	Coefficient d'emprise au sol	Taille des îlots	Élévation moyenne	Tissu	Organisation du réseau
Très forte	0,840-0,950	< 10 x 10 m	R+1	Spontané	Étroit sinueux < 5 m
Forte	0,700-0,820	20 x 20 m	R+4	Résidentiel collectif	5 à 10 m géométrie rectiligne
Moyenne	0,399-0,625	15 x 15 m	R+1	Résidentiel individuel	5 à 15 m orthogonal
Faible	0,117-0,231	30 x 30 m	R+8	Résidentiel collectif	10 à 20 m orthogonal

3. Les étapes de l'exploitation de l'image HRV de SPOT

Les éléments linéaires (routes et réseau ferroviaire), les éléments de surface (zones bâties, surfaces interstitielles en végétation et terrains nus) ainsi que les objets ponctuels qui constituent le milieu urbain contribuent à sa complexité et à son hétérogénéité. De ce fait, l'exploitation de l'information spectrale seule est insuffisante et nécessite l'association d'informations de type spatial qui renseignent sur la forme d'association de pixels, les structures et les organisations du bâti (HIRSCH et WEBER, 1988).

3.1. Choix de l'information

Étudier les possibilités d'aboutir à une image classée à partir des échantillons de l'enquête suppose : 1) une analyse comparée des informations recueillies par photo-interprétation (les clichés de 1981, la carte au 1: 25 000 de 1960 et la carte au 1: 7 500 de 1988) et des données accessibles à partir de l'image de référence, soit une scène HRV (XS et P) de SPOT de mai 1994 ayant pour référence K043-J278; 2) un repérage des changements intervenus entre la date de l'enquête (1990), celle des données numériques utilisées (1994) et celle des photographies aériennes (1981), sachant que de grands changements se sont opérés dans la ville.

Pour la première opération, étant donné la résolution des images utilisées (10 x 10 m et 20 x 20 m) et l'existence de tissus urbains à maille étroite (Haï Es Snouber au nord-ouest du centre-ville), le repérage des îlots est délicat et nécessite une attention accrue lors du déroulement de cette opération.

Pour bénéficier du pouvoir de discrimination spatial du canal panchromatique et de la qualité radiométrique des bandes multispectrales, nous avons procédé à la superposition des canaux XS sur le panchromatique au moyen d'une correction géométrique suivie d'un rééchantillonnage à 10 m. L'algorithme calculant à l'aide du plus proche voisin a été utilisé pour ne pas altérer la qualité radiométrique des bandes multispectrales.

4. Classification par pixel de l'image

Pour aboutir à une image classée en autant de catégories que de types de tissus urbains recensés dans l'enquête, nous avons procédé à une classification par analyse discriminante à but décisionnel. Chaque classe est représentée par un échantillon homogène choisi sur l'image. L'homogénéité est définie par rapport à des caractéristiques de couleur, de structure et de forme.

4.1. Statistiques descriptives sur les variables radiométriques

Afin de quantifier le pouvoir de discrimination des différents canaux élaborés (indices de brillance et végétation, axes des ACP), nous avons calculé dans chaque segment, des statistiques de chaque emprise au sol dans chacun des canaux et néo-canaux. Par ailleurs, la complexité du milieu étudié rend nécessaire l'ajout d'informations relatives aux éléments structuraux et texturaux de l'image (MCHELLER-JENSEN, 1990; COULOMBE *et al.*, 1991). Dans notre cas, nous avons considéré l'écart-type calculé sur un voisinage

5 x 5. L'analyse des courbes obtenues nous a permis de choisir les variables les plus liées au descripteur « densité du bâti » (fig. 2).

4.2. Interprétation de l'image classée

De manière générale, les résultats obtenus à partir de la classification par pixel (fig. 32-3, voir cahier couleur) montrent une diminution de la densité du bâti, partant du noyau urbain (forte densité) à la périphérie sud et est de la ville (densité faible) :

- la classe très fortement bâtie (couleur blanche) se retrouve également dans les zones hautement réfléchissantes (ex. : les chantiers à l'est de l'image);
- la classe de forte densité (couleur rouge) semble la plus compacte et couvre de façon continue le noyau urbain et partiellement le quartier Ibn Sinna; ce dernier est effectivement occupé par quelques HLM de la période coloniale; de même, quelques espaces industriels (sud de la ville) contribuent à cette classe, caractérisée par une forte absorption d'énergie due principalement à l'âge des constructions;
- la distribution géographique de la classe de moyenne densité (teinte bleue) recoupe les quartiers de bâti pavillonnaire lâche; cette classe comprend un taux de végétation plus élevé; elle s'étend notamment sur Haï Abdelmoumen, Haï El Makarri, Haï Sidi Mahieddine et Haï Seddikia; la qualité de l'environnement et l'aération sont nettement supérieures dans ce cas;
- la catégorie faiblement bâtie (couleur verte) s'intègre dans la large couronne aérée de l'expansion urbaine; les facteurs discriminants restent l'urbanisation dense et un couvert végétal important; elle couvre entièrement la périphérie de la ville;
- la classe non bâtie est de loin la plus homogène (couleur jaune).

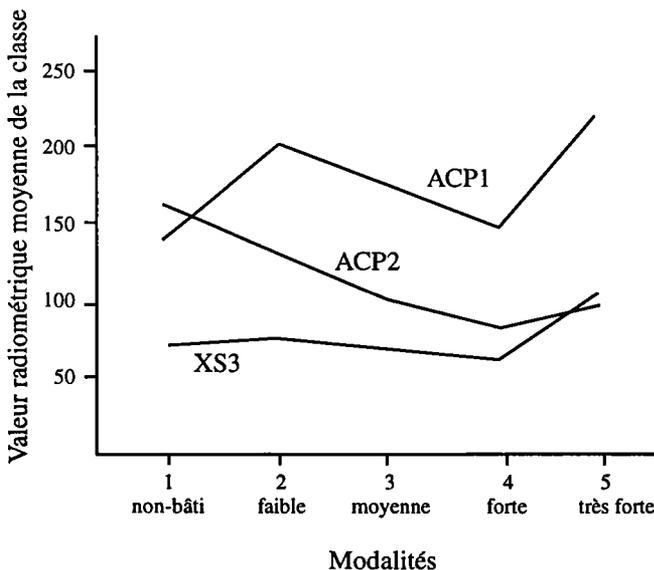


Figure 2. Variations des axes de l'analyse en composantes principales (ACP) et du canal original infrarouge proche (XS3); les axes de l'ACP sont calculés sur les canaux originaux (XS) rééchantillonnés à 10 m et ce, après l'opération de superposition de ces derniers sur le canal panchromatique

5. Classification par îlot

Le coefficient d'emprise au sol du bâti n'a de sens que si l'unité élémentaire est l'îlot. Un processus d'aménagement des pixels dans chaque îlot a été conçu afin d'aboutir à une statistique représentative. Cette méthode consiste à combiner l'image classée par pixel avec le fichier « îlots » obtenu par la numérisation des îlots. Les données des contours des îlots sont extraites de la carte au 1: 7 500 (INC, 1988). Les îlots de petites tailles ayant les mêmes caractéristiques ont été fusionnés dans certains endroits.

L'interpolation par la méthode du plus proche voisin altère les structures linéaires. En effet, lors de la superposition du fichier « îlots » sur l'image, des distorsions ont été constatées, notamment dans les îlots à mailles étroites caractérisés par des réseaux enchevêtrés.

5.1. Processus de regroupement

Chaque pixel de l'image déjà classée (par pixel), représente le taux de recouvrement de la surface bâtie, soit de la classe « faible densité » avec un taux compris entre 0,117 et 0,231 à la classe « très forte densité » dont le taux varie entre 0,840 et 0,950. L'approche utilisée pour la classification par îlot (PEDLEY, 1987; WEBER *et al.*, 1990; PEDLEY and CURRAN, 1991) consiste à parcourir, dans chaque îlot, tous les pixels et à calculer le taux de recouvrement moyen en utilisant la formule suivante :

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^5 N_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^5 N_i}$$

où N_i = nombre de pixels appartenant à la classe i dans l'îlot j considéré;
 C_i = coefficient moyen d'emprise au sol de la classe i ($c_1 = 0,172$ pour la classe faible densité, $c_2 = 0,512$ pour la classe moyenne densité, etc.);
 j = numéro de l'îlot.

La classe qui correspond au taux T_j est ensuite attribuée à tous les pixels de l'îlot. Le même processus est répété pour tous les îlots.

5.2. Validation de la classification

La précision de la classification par îlot en terme d'emprise au sol (fig. 32-4, voir cahier couleur), est vérifiée sur le plan régional de la ville d'Oran à l'échelle du 1: 5 000 (ANC, 1976). La procédure de validation consiste à :

- choisir des échantillons d'îlots d'une manière aléatoire sur la totalité de la zone d'étude;
- calculer les coefficients d'emprise au sol correspondants, suite aux mesures de surface (totale et construite) effectuées au niveau de l'îlot;
- identifier la classe d'appartenance de l'îlot à partir de son coefficient, en se référant aux classes déjà mentionnées;
- vérifier cette appartenance sur l'image classée par îlot.

Dans notre cas, nous avons sélectionné 83 échantillons couvrant une surface de 112,7 ha dont 37,8 ha construite; les échantillons présentent une surface environ de 1,8 % de la surface totale. Les mesures de superficie sont faites avec le planimètre digital *x-PLAN 360IR*, dont la précision maximale est de 0,1 %. Le tableau 2 représente un échantillon de ces mesures et la comparaison des résultats génère le tableau 3.

5.2.1. Interprétation

Les résultats trouvés reflètent le comportement des classes dont la stabilité se situe entre 40 % et 83,33 % et un pourcentage global bien classé de 66,32 %.

La classe de très forte densité est relativement la moins bien classée car le degré de confusion de celle-ci avec la classe forte est important. Ce phénomène s’explique facilement du fait de l’existence d’îlots très réfléchissants au sein de la classe de forte densité. Un mouvement d’échantillons entre les classes de faible et moyenne densité a été constaté. Ce phénomène est dû principalement à l’existence d’un recouvrement d’autres thèmes avec ces deux classes. Enfin, 64,29 % des îlots classés « non bâtis » appartiennent bien à cette classe. Cette dernière montre également un mouvement d’échantillons vers toutes les classes, même s’il est relativement faible. Ce phénomène s’explique aisément du fait que cette classe renferme toutes les variétés d’occupation du sol : sols nus réfléchissants identiques radiométriquement aux échantillons de la classe de très forte densité, espaces en végétation identiques aux petits espaces verts des villas.

Tableau 2. Échantillon de résultats de validation de la classification par îlot sur le plan au 1: 5 000

N° îlot	Surface totale (m ²)	Surface construite	Coefficient d’emprise au sol	Classe de densité (carte)	Classe de densité (image HRV)
20	5550,38	2914,48	0,525	Moyenne	Moyenne
24	1594,90	1405,84	0,881	Très forte	Forte
26	495,39	0	0	Non bâti	Non bâti
28	3513,25	2124,53	0,605	Moyenne	Moyenne
31	4465,03	4178,01	0,936	Très forte	Moyenne
32	5065,08	4104,97	0,810	Forte	Forte

Tableau 3. Pourcentage d’affectation des classes calculées sur l’image par rapport à celles calculées sur le plan du cadastre au 1: 5 000

Classe	Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Non bâti
Très forte	40,00	56,00	4,00	0	0
Forte	0	83,33	16,67	0	0
Moyenne	0	0	81,25	0	0
Faible	0	6,35	12,50	62,40	18,75
Non bâti	3,57	14,29	7,14	10,75	64,29

6. Conclusion

Une nomenclature de l'occupation du sol urbain a été proposée à partir d'un sondage intégrant les données cartographiques et photographiques. Cette étude a mis en évidence les possibilités limitées de l'image HRV de SPOT, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale. De ce fait, la complémentarité des images avec les photographies aériennes et d'autres documents n'est plus à démontrer.

Le taux de 66,32 % des îlots bien classés ne répond pas parfaitement à la demande formulée par les agences d'urbanisme pour le suivi des espaces urbains. Face à la complexité des images urbaines (fréquence de détails), les méthodes de traitement se basant principalement sur l'information spectrale s'avèrent insuffisantes. Par conséquent, il est nécessaire de s'attacher plus à l'organisation des pixels et aux relations entre objets. Nous croyons qu'une étude plus approfondie de l'analyse de texture pourrait améliorer la caractérisation de la zone urbaine.

7. Références

- ANONYME, 1992. Les enquêtes aréolaires liées à la télédétection. Ministère de l'Agriculture et du Développement rural, Direction des affaires financières et économiques, Service central des enquêtes et études statistiques, Bureau méthodes et applications scientifiques, France, 37 p.
- AGENCE NATIONALE DU CADASTRE (ANC). 1976. Plan régional de la ville d'Oran au 1: 5 000, Oran, Algérie.
- COULOMBE, A., CHARBONNEAU, L. et BROCHU, R. 1991. L'apport de l'analyse texturale dans la définition de l'utilisation du sol en milieu urbain. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n° 1, p. 46-55.
- EBERHARD, J. M. 1987. Télédétection urbaine : éléments de caractérisation géographique des quartiers de Quito à l'aide d'une image SPOT. DEA en géographie et pratique du développement, École des hautes études en sciences sociales (EHESS), Paris, 98 p.
- FOURNIER, P., GILG, J.P. et MEYER-ROUX J. 1985. Intégration de la télédétection dans les méthodes classiques de connaissance de l'occupation du sol. Ministère de l'Agriculture, Service central des enquêtes et études statistiques, *Courrier des statistiques*, n° 36, France.
- HIRSH, J. et WEBER, C. 1988. Combinaison des données multisources : la télédétection et le système urbain. Actes du 113^e Congrès des sociétés savantes, Strasbourg, p. 139-144.
- INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE (INC). 1988. Carte de la ville d'Oran, 1: 7 500. Boulevard Tripolie, Alger, Algérie.
- MICHEL, A. 1988. Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellites pour réaliser un sondage à objectif démographique. Thèse de doctorat, Centre d'analyse et de mathématiques sociales (CAMS), Paris, 2 volumes, 237 p. et 162 p.
- MCCELLER-JENSEN, L. 1990. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56 n° 6, p. 899-904.
- PEDLEY, M.I. 1987. Digital image classification of SPOT HRV data using a field based approach advances in digital image processing. *Remote Sensing Society*, Nottingham, p. 168-173.
- PEDLEY, M.I. and CURRAN, P.J. 1991. Per-field classification : an exemple using SPOT HRV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol 12, n° 11, p. 2181-2192.
- WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1990. Classification pixels et classification par zones : tests sur image SPOT en milieu urbain. 2^{es} Journées de télédétection de Bondy, 4-6 décembre 1990, p. 57-62.

