Télédétection, 2006, vol. 6, n° 2, p. 177-190
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

UTILISATION DE LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE POUR L'ANALYSE DE L'OCCUPATION DE L'ESPACE EN ZONES URBAINES ET PÉRIURBAINES PRÉSAHARIENNES : CAS DE LAGHOUAT (ALGÉRIE)

Nadjia BENBLIDIA[1,2], Abdelkader ABDELLAOUI[1], Abderrezak GUESSOUM[2] et Abdelkrim BENSAID[1]

[1] *Département de géographie, UFR Lettres et Sciences Humaines,*
Université Paris 12, Val de Marne,
61,avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France
Téléphone : (33) 1 45 17 11 34

[2] *Département d'Électronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,*
Université de Blida, B.P. 270, route de Soumâa, Blida, Algérie
Téléphone : (213) 25 43 38 50
Courriel : benblidia@yahoo.com ; abdellaoui@univ-paris12.fr ; guessouma@hotmail.com; Kbensaid31@yahoo.fr

Soumis le 5 juin 2005 ; révisé le 3 novembre 2005 ; accepté le 11 août 2006

Laghouat est une ancienne oasis dont la population est passée de 42 800 habitants en 1977 à 119 043 habitants en 2003, soit une variation de 178 % (c'est-à-dire une multiplication par un facteur de 2,8) en 26 ans. Cette croissance rapide de la population a induit une transformation profonde du paysage à des vitesses et selon des formes d'évolution dépassant toutes les prévisions.
Les moyens conventionnels d'analyse ne permettent pas, seuls, de rendre compte efficacement de ce rythme d'évolution et d'avoir une vue actualisée de l'organisation de l'espace urbain. L'image satellitaire semble alors constituer un outil complémentaire incontournable à la portée des gestionnaires pour peu que certaines questions d'ordre méthodologique soient correctement posées et résolues. L'objectif du présent travail est, avant tout, de mettre en évidence l'apport de l'imagerie satellitaire pour la caractérisation de l'occupation de l'espace en zones urbaines présahariennes ainsi que les contraintes éventuelles de ce type d'applications ; nous nous appuyons ici essentiellement sur l'imagerie HRV / XS de SPOT.

La méthodologie suivie a consisté, dans une première étape, à détecter les zones urbaines par une analyse morphologique en appliquant la transformée de type « chapeau haut de forme ». Dans une deuxième étape, une classification par maximum de vraisemblance des régions est réalisée pour obtenir les types de structures urbaines. Les grands thèmes sont différenciés, mais la distinction des surfaces urbanisées en périphérie n'est pas toujours aisée à cause de la résolution spatiale (20 mètres) et de la proximité des réponses spectrales du bâti et du non bâti, notamment du sol nu et de la roche (dont la réponse spectrale est voisine de celle des matériaux utilisés pour la construction, particulièrement en périphérie). Les images à haute résolution apporteraient certes la solution, mais elles restent encore relativement onéreuses pour des projets qui ne sont pas encore dans les premières priorités.

Mots clefs : télédétection urbaine ; milieu présaharien ; morphologie mathématique.

THE USE OF MATHEMATICAL MORPHOLOGY FOR THE ANALYSIS OF LAND OCCUPATION IN URBAN AND SUBURBAN PRESAHARAN AREAS : THE CASE OF LAGHOUAT (ALGERIA)

Laghouat is an old oasis whose population passed from 42 800 inhabitants in 1977 to 119 043 in 2003, a variation of 178 % corresponding to a multiplication by a factor of 2.8 over 26 years. This rapid population growth induced a major transformation of the landscape within a timeframe and according to evolution forms exceeding all forecasts.
Conventional analysis methods cannot by themselves provide a picture of the growth rate, nor can they give a timely view of the organization of the urban space. Remote sensing imagery has become an invaluable tool for planning authorities if certain methodological questions are correctly addressed and resolved. The aim of this paper is to show the contribution of satellite imagery in the characterization and differentiation of space in urban regions in the Sub-Sahara and the eventual constraints of this type of application using multispectral SPOT imagery.

A multistep hierarchical procedure was applied; in the first step, a grey level morphological analysis was performed using a binary structural element. In this process, a « top-hat » transformation was applied to provide a representation of the built-up areas. In the second step, a land use classification of the areas based on the maximum likelihood method was used to determine urban structure types. The method presented in this study is very useful for the rapid estimation of urban structures and city development but the accuracy of structure detection is not high, specially at the periphery where discrimination is not easy due to the spatial resolution (20 meters) and the spectral response of objects (proximity of materials used for construction and rock, for example). High-resolution satellite images could certainly provide a solution but they still remain relatively expensive for projects, which are not yet in the first priorities.

Keywords : urban remote sensing; Sub-Saharan environment; mathematical morphology

1. INTRODUCTION

Bien que l'exploitation des données satellitaires pour l'étude des milieux urbains n'ait pas fait l'objet d'autant d'attention et de travaux que les autres thèmes du milieu naturel tels que la végétation, la géologie, les sols ou les paramètres de surface, les images satellitaires (MSS ou TM de Landsat, HRV de SPOT) sont utilisées par plusieurs auteurs pour l'étude des zones urbaines. À cet effet, Toll (1984) examine la possibilité d'utiliser les images MSS de Landsat pour différencier les zones urbaines dans une étude d'occupation du sol. Forster (1982) discute du problème de la gestion urbaine par l'utilisation des données des capteurs de « nouvelle génération » ; il note en particulier la grande variété des surfaces urbaines, leur grande hétérogénéité et, par opposition, la faible résolution spatiale des images MSS de Landsat pour l'étude des zones urbaines. Plusieurs travaux ont concerné l'utilisation des images TM de Landsat pour comprendre l'occupation du sol en environnement urbain. Ainsi, De Keersmaecker et Lambin (1987) utilisent les données TM pour l'étude de l'occupation du sol pour la ville de Bruxelles (Belgique). Exploitant une image centrée sur Reading (Grande-Bretagne), Atkinson *et al.* (1985) analysent le problème de classification introduit par le passage d'une résolution de 80 mètres pour les images MSS à une résolution de 30 mètres pour les images TM. Ioka et Koda (1986) utilisent les données TM de Landsat 5 au-dessus de Tokyo pour effectuer une classification multispectrale des différentes catégories d'occupation du sol. Gomarasca *et al.* (1993) présentent les possibilités d'utilisation des données TM pour la détection des changements d'utilisation du sol en zone métropolitaine de Milan (Italie). Les images SPOT (HRV-P et HRV-XS) sont également utilisées dans les études des environnements urbains ; ainsi, Abdellaoui et Rougab (1994 et 1995) utilisent les données HRV / XS de SPOT pour l'étude de l'environnement urbain en zone de transition montagne-plaine (Mitidja, Algérie) et discutent des problèmes de différentiation des surfaces bâties dans de tels environnements. Boucherit *et al.* (1995) combinent une image multispectrale HRV / XS de SPOT à des photographies aériennes et des données cartographiques pour étudier l'extension spatiale de la ville de Blida (Algérie).

Deux méthodes de classification du territoire urbain sont présentées par Baraldi et Parmiggiani (1990) ; la première utilise la croissance de régions tandis que la deuxième fait appel à la matrice de co-occurrence, en utilisant une image multispectrale de SPOT. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que la méthode de classification par croissance de régions est la mieux adaptée pour ce besoin. Chatterjee (1993) propose un algorithme de classification dirigée qui maximise la redondance entre l'image source et l'image classifiée ; cette redondance, issue de la théorie de l'information, prend en compte le voisinage de chaque pixel. Houzelle et Giraudon (1991) fusionnent l'information obtenue à l'aide de deux capteurs (HRV de SPOT et RSO) ; les agglomérations ont la particularité d'apparaître de manière brillante sur les images radar. Par un simple seuillage, ils déterminent ensuite des masques d'apprentissage pour le calcul des paramètres des zones urbaines. Winter *et al.* (1997) ont développé une méthode d'analyse multi-échelle fondée sur l'hypothèse qu'il existe pour chaque objet une échelle optimale de détection. La méthode FAME (Focalisation d'Attention Multi-échelle Entropique) utilise des mesures entropiques sur des pyramides d'ondelettes. Elle est appliquée à l'analyse du paysage urbain au niveau du bâtiment et également à la détection du contour urbain. Eberhard (1997) propose une méthode exploitant la couleur et la texture comme critères d'étude. Les résultats des analyses factorielles, puis des classifications, sont exploités en relation avec les informations visuelles. Le croisement in fine des classes de couleur permet l'identification et la description des grandes catégories de quartiers. Viveros-Cancino *et al.* (2002) présentent une analyse intra-urbaine afin d'améliorer la détection des différentes trames urbaines à partir de deux images, panchromatique de SPOT et radar de ERS, prises sur la ville de Mexico. La méthode proposée procède en deux étapes : une étape de fission caractérisant l'analyse de la texture et une étape de fusion consistant en une classification des paramètres texturaux.

Le présent travail montre les possibilités de l'utilisation des données HRV / XS de SPOT avec des traitements numériques basés sur la morphologie mathématique pour l'étude des environnements urbains et la gestion de l'espace en zone présaharienne ; après une description de la zone d'étude, on présente à la section 3 la méthodologie adoptée pour l'extraction de la zone urbaine. Dans la section 4, on montre qu'il est possible de distinguer les différents types de bâti (ancien, nouveau, individuel et collectif).

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2. 1. Présentation géographique de Laghouat

Les villes présahariennes et sahariennes en Algérie sont construites, au départ, sur le schéma d'oasis qui implique des conditions primaires de sédentarisation : point d'eau, possibilité de défense naturelle et zone de passage. La sédentarisation forcée et précipitée des nomades à la fin des années 50 et au début des années 60, la découverte de gisements pétroliers et gaziers, une démographie galopante pendant les décennies 60 et 70 et une stratégie de développement volontariste et offensive pendant les décennies 70 et 80 ont eu pour principale conséquence une rupture des équilibres sur lesquels étaient bâties les oasis. Les entités fondamentales, excepté dans certains cas particuliers comme Ghardaïa (autre oasis à 200 km au sud est de Laghouat), ont été absorbées dans une extension anarchique des espaces urbains et une mutation profonde de la société.

La ville de Laghouat, agglomération présaharienne située aux limites entre les hauts plateaux

steppiques et les zones sahariennes, à 400 km de la côte méditerranéenne (figure 1), est construite sur le schéma traditionnel d'un oasis avec les trois atouts principaux : l'oued M'Zi arrosant des terres fertiles au milieu d'une zone aride, des collines faciles à défendre et un des passages obligés pour les caravanes qui vont de l'Afrique noire vers la Méditerranée. Laghouat, porte du désert, est ainsi un lieu de rencontre entre sédentaires vivant de l'agriculture, de l'artisanat et du commerce et nomades trouvant là une étape idéale pour les échanges et le repos.

Laghouat a connu plusieurs statuts administratifs dont le premier date de l'époque du Khalife ottoman. Durant la période coloniale, elle est d'abord un cercle militaire renforcé par deux administrations publiques conjointes : la mairie de Laghouat pour l'administration des citadins et la mairie des Larbaas destinée à la gestion des affaires des populations nomades ; à l'indépendance, Laghouat est rattachée à la Wilaya (département) des Oasis dont le chef lieu est Ouargla (oasis concurrente) ; Laghouat devient chef lieu de wilaya au découpage administratif de 1977 ; sa population est passée de 42 800 ha en 1977 à 119 043 en 2003, soit une multiplication par un facteur de près de 3, en moins de 30 ans. Ce rythme de croissance a eu pour premier effet une modification profonde du paysage.

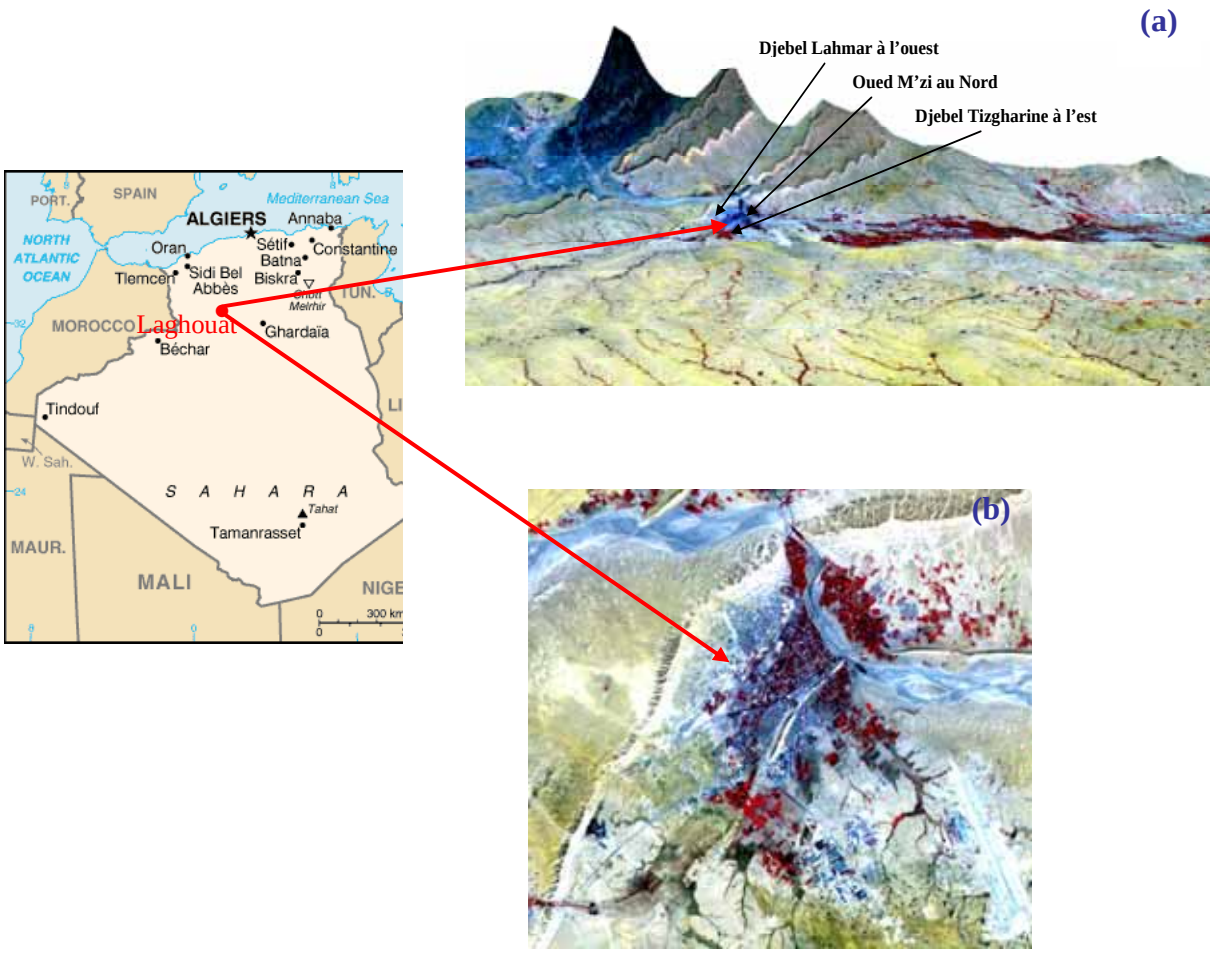


FIGURE 1 : Localisation de la région d'étude : (a) topographie de l'oasis. (b) extrait de l'image HRV de SPOT de Laghouat. *Location of the study area : (a) topography of the oasis (b) section of the HRV SPOT image of Laghouat*

2.2. Spécificité du paysage

Le territoire urbanisé de la ville de Laghouat présente en première approche quatre grands types de paysage distincts :

- l'habitat ancien ou l'habitat reconstruit dans la médina (vieux quartiers) : les constructions traditionnelles anciennes sont en brique de terre (similaire au pisé) recouverte d'un mortier bâtard de chaux, sable et de ciment (environ 5 %) ; les terrasses sont également recouvertes d'une chape de mortier de chaux et de ciment (figure 2) ; les nouvelles constructions dans la médina sont généralement en brique rouge ; l'aspect extérieur pour les deux types de bâti vire vers la couleur ocre très similaire à la roche affleurante (figure 2) ; il est possible de voir sur la figure 2 la similarité des teintes de l'environnement rocheux (au premier plan à gauche et au dernier plan) et de celle du bâti.



FIGURE 2 : Apparences comparées du bâti et de la roche. *Comparison between the appearance of built-up areas versus the rock*

- l'habitat intermédiaire, essentiellement construit lors de la période de sédentarisation forcée des nomades (1957-58) ; c'est le cas principalement du quartier Sadikia, pratiquement sans végétation urbaine, qui se confond avec l'environnement rocheux comme on peut le noter sur la figure 3. Il s'agit d'un ensemble de maisons basses, généralement construites en deux étapes correspondant à deux phases de sédentarisation ; les matériaux utilisés sont essentiellement le parpaing (brique de ciment gris), plus rarement la brique rouge, ce qui rend l'ensemble plus contrasté par rapport à son environnement. On notera ici en arrière plan l'accumulation de sable ocre au flanc du mont.



FIGURE 3 : Sadikia, un quartier de sédentarisation forcée, habitat quasi spontané. *Sadikia, a district of forced sedentation, nearly spontaneous habitat.*

- les constructions dans la palmeraie et les zones de jardins sont de divers matériaux (brique de terre et pisé local, brique rouge, plus rarement parpaing de ciment gris) et, en fonction du degré d'achèvement de la construction, celles-ci peuvent avoir un aspect extérieur allant du blanc au gris en passant par la couleur ocre ; la présence de végétation, vestige des jardins et de ce qui reste de la palmeraie, donne un aspect particulier (mélange de bâti et de végétation souvent très éparse), comme on le voit sur la figure (4) ;

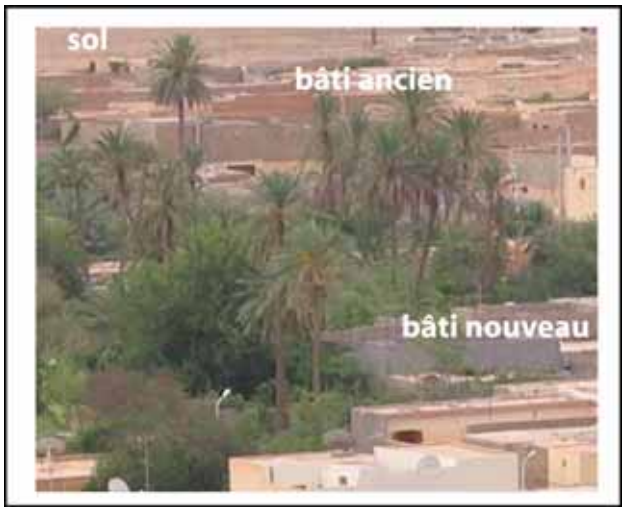


FIGURE 4 : Bâti sous palmeraie. *Built-up area under palm plantation*

- dans les nouveaux quartiers, la construction est plutôt en parpaing et possède encore un aspect extérieur tirant vers le gris, signe du stade encore peu avancé de la construction ; cette construction peut cependant être distinguée, par contraste, à proximité d'un espace de végétation ; elle ressort également de l'environnement rocheux ou sableux (arrière plan sur la figure 5).



FIGURE 5 : Nouveaux quartiers d'habitat individuel aux flancs du Djebel Lahmar. *New districts of individual homes on the slopes of Djebel Lahmar*

2.3. Le paysage et la résolution satellitaire

Avant d'aborder le traitement numérique des images satellitaires, il nous semble utile d'examiner comment peut apparaître un tel paysage sur l'image en fonction de sa résolution. Considérons pour cela les photographies suivantes représentant les quartiers de Dhalaa (figure 6a ; habitat individuel ancien), de Mamourah (figure 6b ; habitat collectif et édifices publics) et le centre et proche centre (figure 6c ; beaucoup de végétation urbaine, vestige des anciens jardins). Nous avons tenté de représenter ce que pourrait être, à cette échelle, un pixel SPOT. Il s'agit de toute évidence de pixels très hétérogènes dont la réponse spectrale $R_{\Delta\lambda}$ sur un canal pourrait être estimée par une fonction de la forme :

$$R_{\Delta\lambda} = \sum a_i . R_{i\Delta\lambda} \qquad (1)$$

où :

a_i = (surface de l'élément i) / (surface du pixel) et $R_{i\Delta\lambda}$ est la réponse de l'élément (i)

$R_{\Delta\lambda}$ est alors la réponse d'un nouvel élément qu'il y aura lieu de reconnaître, de caractériser et d'interpréter.

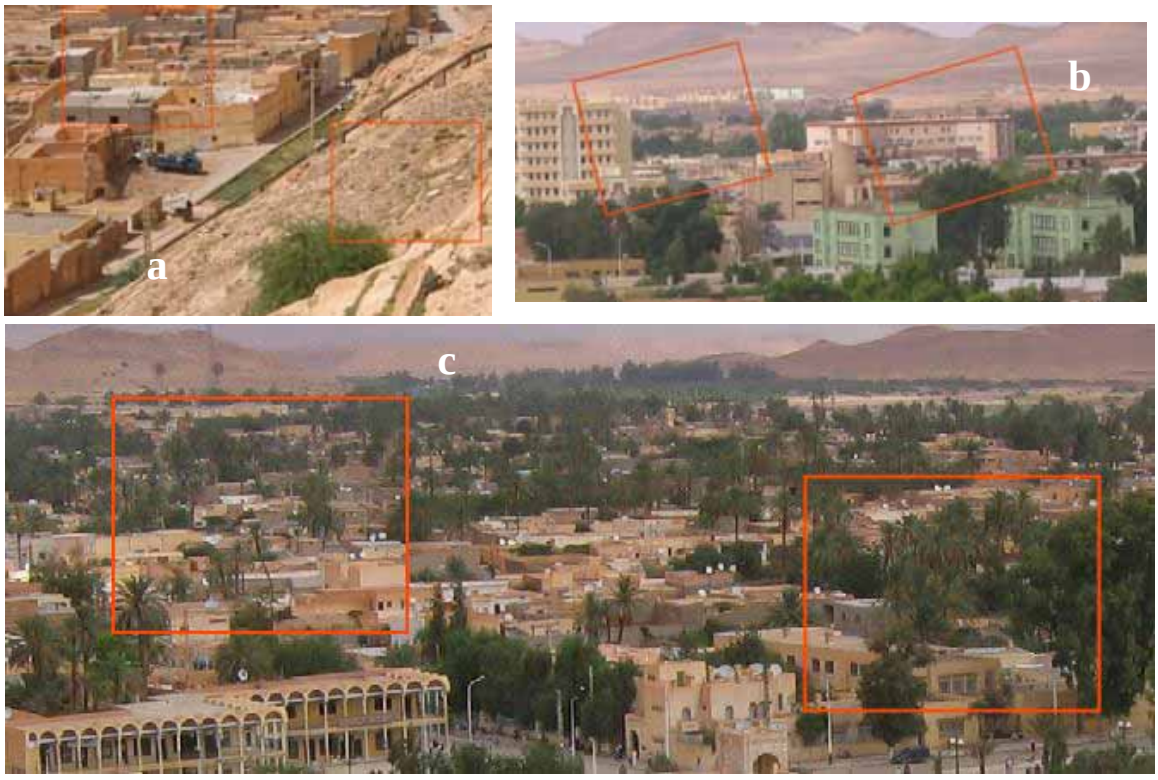


FIGURE 6 : Paysages selon les différents quartiers. (a) Dhalaa (habitat individuel ancien) ; (b) Mamourah (habitat collectif et édifices publics) ; et (c) le centre et proche centre (beaucoup de végétation urbaine, vestige des anciens jardins). *Landscapes following the different neighborhoods. (a) Dhalaa (old individual habitat) (b) Mamourah (collective habitat and public buildings) and (c) the center and near-center (important urban vegetation, remnants of old gardens).*

3. DÉLIMITATION DE LA ZONE URBAINE PAR MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE

3.1. Préparation des données

L'étude de la région (figure 1) a été réalisée en utilisant des images de SPOT et Landsat ainsi qu'une carte topographique à l'échelle 1 : 50 000 de 1961. L'image HRV de SPOT utilisée, d'une résolution de 20 m, date du 13 septembre 2001 ; la deuxième image satellitaire utilisée est une image géoréférencée TM de Landsat du 20 avril 1987. L'interprétation s'appuie sur la carte et les observations relevées lors des sorties sur le terrain.

Les différentes bandes spectrales de l'image SPOT ont été géométriquement corrigées en utilisant l'image Landsat géoréférencée. La rectification est effectuée par l'acquisition de points d'amers figurant à la fois sur les deux images, en s'appuyant sur la composition colorée pour une meilleure reconnaissance. Pour corriger géométriquement l'image initiale, nous avons adopté un modèle polynomial de déformation de degré (2) en utilisant 17 points d'appui. L'écart type moyen obtenu à la fin du traitement est inférieur au pixel (RMS = 1,5). La fonction d'interpolation polynomiale adopte la méthode du plus proche voisin comme méthode de réechantillonnage. Les images sont renseignées en UTM fuseau Nord 31 Ellipsoïde international WGS84

3.2. Introduction méthodologique

Les méthodes courantes en reconnaissance d'objets à partir des images multispectrales sont basées sur la classification des signatures spectrales, mais ces méthodes ne différencient pas les objets ayant des signatures spectrales voisines et des formes différentes (confusion du bâti (quartier Sadikia) et de l'environnement rocheux, par exemple). C'est pourquoi nous avons préféré, compte tenu de notre objectif, utiliser des méthodes d'analyse de texture et les transformations de base de la morphologie mathématique : à travers le traitement des arrangements de valeurs des pixels dans un voisinage donné, ces transformations permettent de contrôler l'extraction des objets sur une image en teintes de gris en fonction de leur forme et non plus seulement de leur radiométrie.

Comme il n'est pas question de décrire ici les bases théoriques des concepts de la morphologie mathématique (Serra and Chermant, 1997 ; Soille, 1999), nous nous contenterons de donner des définitions moins générales, mais appliquées à l'image numérique en teintes de gris. Toutes les transformations morphologiques sont définies à l'aide d'un élément structurant choisi par l'opérateur : hexagone, triangle, dodécagone, segment, etc. La taille de cet élément est définie par son rayon (l'unité correspondant à la distance entre deux points voisins de la trame). Lors des transformations, l'élément structu-

rant parcourt la totalité de l'image en jouant le rôle de filtre spatial (Schmitt et Mattioli, 1994 ; Voiron, 1995). Il la modifie au moyen d'opérations ensemblistes comme l'intersection (∩), l'union (∪), l'inclusion (⊂), la complémentation (C) et la différence ensembliste (Δ). Les transformations que ces opérations morphologiques peuvent faire subir à l'image (illustrées sur la figure 7) sont décrites ci-après :

- l'***érosion*** (2) diminue les formes, ce qui permet de séparer les objets au niveau de leurs étranglements ; elle fait disparaître les formes de taille inférieure à l'élément structurant ;

$$E^B(X) = (X \ominus \overline{B}) \qquad (2)$$

où $\overline{B}$ est le transposé de l'élément structurant B et X ensemble correspondant à l'image ;

- la ***dilatation*** (3) grossit les formes, comble les trous et entraîne la connexion entre les formes proches ;

$$D^B(X) = (X \oplus \hat{B}) \qquad (3)$$

- l'***ouverture*** (érosion suivie d'une dilatation) a pour effets de filtrer les contours, d'éliminer les petites convexités (tout en conservant les concavités), d'éliminer les particules trop étroites et de séparer en plusieurs composantes connexes des particules présentant un étranglement assez long et étroit ;

$$O^B(X) = D^B(E^B(X)) = (X \ominus \hat{B}) \oplus B \qquad (4)$$

- la ***fermeture*** (dilatation suivie d'une érosion) a un effet semblable à celui de la dilatation en ce sens qu'elle renforce la connexité entre des éléments distincts mais proches ; l'érosion appliquée à la deuxième étape du processus entraîne la réduction des formes ;

$$F^B(X) = E^B(D^B(X)) = (X \oplus \hat{B}) \ominus B \qquad (5)$$

La combinaison ouverture-fermeture équivaut à un lissage ; si on veut faire ressortir la partie dynamique, on applique alors la transformée de type « chapeau haut de forme », qui consiste à effectuer la différence entre l'image initiale et le résultat du filtre morphologique. Le chapeau haut de forme (ou *top-hat*) permet d'extraire les structures contrastées et de faible étendue, indépendamment des valeurs des pixels voisins.

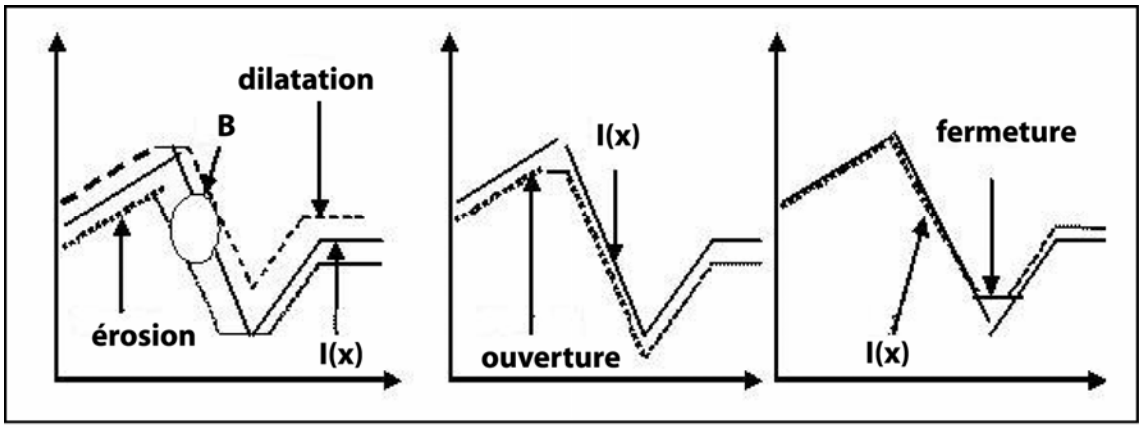


FIGURE 7 : Opérations de dilatation, érosion, ouverture et fermeture en teintes de gris d'une image I(x). *The operations of dilation, erosion, opening and closing on a grey level I(x) image*

3.3 Extraction de l'enveloppe urbaine

Les bandes spectrales HRV / XS de SPOT étant corrélées, nous commençons par appliquer une analyse en composantes principales ; la première composante nous fournit 88 % de l'information comme on le voit dans le tableau 1. L'application de l'algorithme présenté sur la figure 8 à la première composante principale sur l'image HRV / XS de SPOT de 2001 nous a permis d'extraire l'emprise urbaine en trois étapes principales : détection des petites structures, colmatage des zones denses et élimination du bruit, et remplissage des trous afin de générer la zone urbaine.

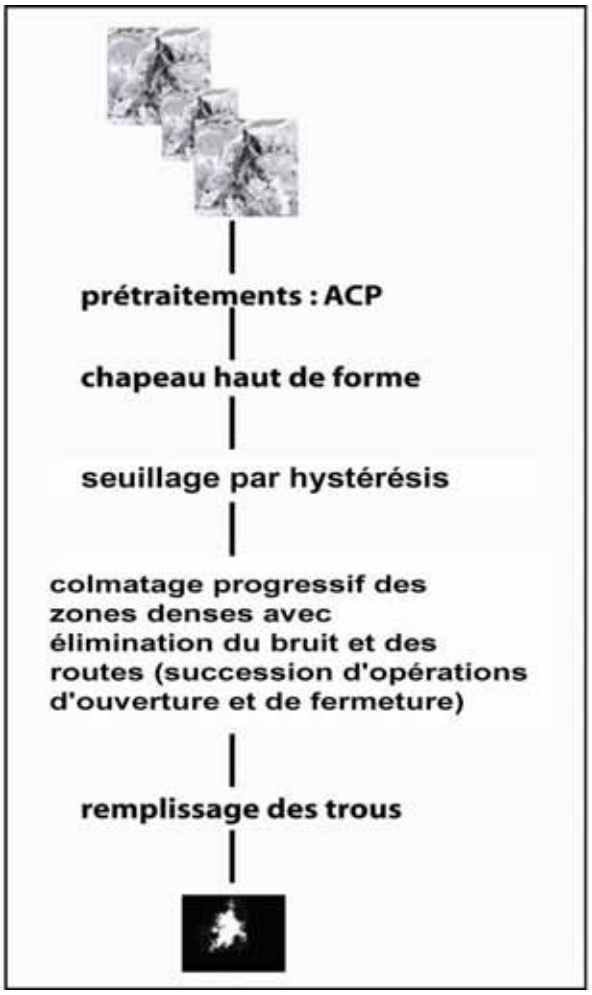


FIGURE 8 : Algorithme d'extraction de l'emprise urbaine. *Extraction algorithm of the urban morphology*

• Détection des structures

Nous appliquons tout d'abord un « chapeau haut de forme » obtenu par soustraction arithmétique entre la fermeture et son image d'origine. Une fermeture de taille 1 élimine les structures sombres. Les structures urbaines, dont la taille est supérieure, et les frontières des parcelles, qui sont de simples transitions de niveaux de gris, sont rarement affectées. Par soustraction à l'image de départ, nous récupérons les petites structures de l'image : taches de taille très réduite formant les agglomérations et alignements fins de pixels. L'élimination des structures « non importantes » est réalisée par seuillage par hystérésis ; Bres *et al*. (2003) et Canny (1983) l'utilisent dans la détection des contours. Le seuillage par hystérésis, qui permet de limiter le nombre de fausses alertes ou de lacunes, est une façon de diminuer l'importance du seuil à utiliser. Plutôt que de fixer un seuil (et de générer des lacunes), nous choisissons deux seuils : un seuil haut (S_{haut}) et un seuil bas (S_{bas}), avec $S_{haut} > S_{bas}$.

- Nous construisons une image binaire Ibas où les points de norme supérieure à Sbas sont mis à 1 ; les autres points sont mis à 0.
- Nous construisons ensuite une autre image binaire Ihaut, où les points de norme supérieure à Shaut sont mis à 1 et les autres à 0.
- Nous cherchons enfin toutes les composantes connexes de Ibas comportant au moins un point de I_{haut}. Cette étape revient à déterminer le graphe d'adjacence des points de l'image tel que, pour tout point M, $I_{bas}(M) = 1$, puis à sélectionner les composantes connexes des nœuds tel que $I_{haut}(M) = 1$.

• Colmatage des zones denses et élimination du bruit

Pour colmater les zones denses et éliminer le bruit et les routes, nous avons appliqué une variante du filtre alterné séquentiel (Serendero, 1989 ; Serra and Charmant, 1997 ; Soille, 1999) ; cet opérateur est formé d'une succession de fermetures et d'ouvertures de taille croissante. Ce filtre qui substitue à la linéarité le critère de croissance, mieux adapté à la structure de la perception visuelle, permet de simplifier une image sans la lisser et ainsi, de préserver les contrastes.

Les filtres alternés de la fonction f définissant l'image correspondent à des combinaisons de fermetures (•) et d'ouvertures (o) définies par :

$$\varphi_k(f) = (f \circ kB) \bullet kB \quad (6)$$

$$\varphi'_k(f) = (f \bullet kB) \circ kB \quad (7)$$

où f est définie sur $\Re^2 \rightarrow \Re$, B est un élément structurant tel que $B \subseteq \Re^2$, kB représente (k-1) dilations et k est la taille du filtre.

On peut combiner ces filtres pour former des filtres séquentiels alternés (FSA). Cette combinaison de fermetures et d'ouvertures répétées avec un nombre décroissant de dilatations est donnée par :

$$FAS_k(f) = \varphi_k \varphi_{k-1} \ldots \varphi_1(f) \quad (8)$$

$$FAS'_k(f) = \varphi'_k \varphi'_{k-1} \ldots \varphi'_1(f) \quad (9)$$

• Remplissage des trous

La procédure de remplissage de trous est réalisée en quatre phases illustrées dans la figure 9 :

- **Complémentation** de l'image binaire initiale ; les objets auront la valeur zéro et le fond la valeur un.
- **Étiquetage** des composantes connexes, en attribuant à tous les pixels d'une composante connexe une valeur entière. Chaque composante connexe est alors identifiée par son étiquette. En trouvant « n » composantes connexes, la première correspond au fond de l'image et les autres correspondent aux « n-1 » trous inclus dans les objets.
- **Suppression** des « n-1 » composantes connexes correspondant aux trous en attribuant la valeur zéro aux pixels de ces composantes.
- **Complémentation** de l'image une deuxième fois.

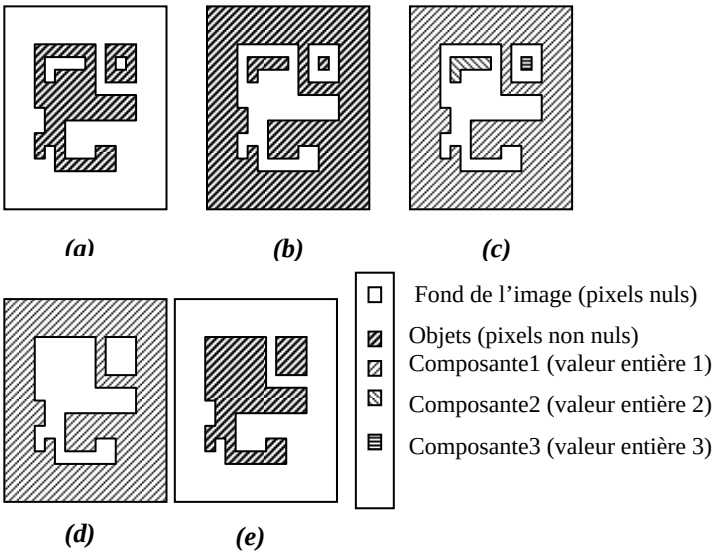


FIGURE 9 : Algorithme pour combler les « trous » : a) image initiale ; (b) après complémentation ; (c) image étiquette en 3 composantes connexes ; (d) image après remise à zéro des 2 composantes correspondant aux trous ; (e) image résultat après complémentation. *Algorithm for filling « holes » : a) initial image ; (b) after complementation ; (c) label image following 3 related components ; (d) image after resetting the 2 components corresponding to the holes to zero ; (e) result image after complementation*

3.4 Applications et discussion

Les opérations morphologiques ont été appliquées au premier facteur de l'analyse en composantes principales qui fournit une information pertinente sur le minéral (et notamment le bâti).

L'étape de détection de la zone bâtie est réalisée en effectuant une transformation de type « chapeau haut de forme », suivie d'un seuillage (figure 10). L'image seuillée subit ensuite deux actions : le colmatage des zones d'agglomérations, pour les rendre connexes, puis l'élimination du bruit. Ces deux actions peuvent être réalisées l'une après l'autre ou conjointement par affinements successifs. En effet, le filtre alterné séquentiel (FAS), qui est constitué d'une succession de fermetures et d'ouvertures de taille croissante, permet un colmatage progressif des zones denses avec élimination du bruit et des routes. La taille du filtre utilisé sur cette image va jusqu'à une ouverture de taille 2. Après remplissage des trous, la limite de la zone agglomérée est très distinctement définie comme on le voit sur la figure 10.

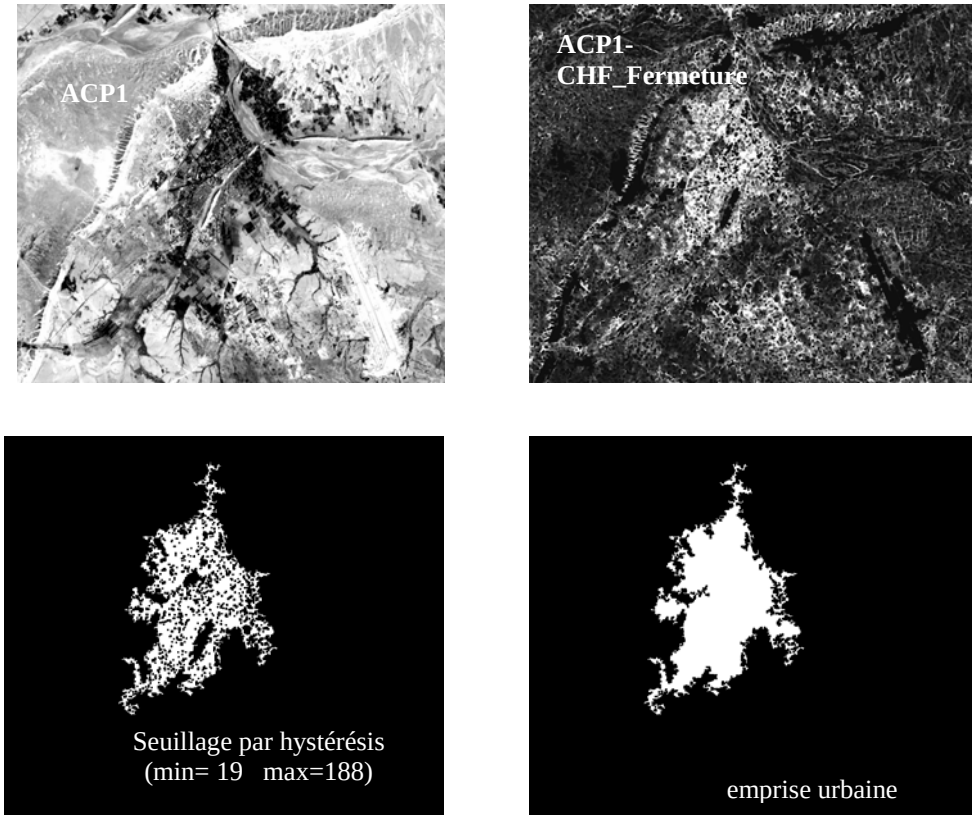


FIGURE 10 : Schéma de détection de la surface urbaine. *Detection diagram of the urban area*

4. DIFFÉRENCIATION DU THÈME BÂTI EN ZONE PRÉSAHARIENNE

Pour permettre le suivi de l'occupation urbaine par télédetection, il est nécessaire d'identifier les différents types de bâti. Il s'agit ainsi d'extraire les informations spectrales permettant d'aboutir à un partitionnement de l'image en régions représentant les types particuliers d'occupation du sol. Ceci revient à faire correspondre à un ensemble de caractéristiques radiométriques, observées sur les images, une réalité thématique.

La démarche adoptée ici pour la différenciation du tissu urbain exploite l'algorithme du maximum de vraisemblance qui découle de la théorie de la probabilité et du théorème de Bayes. Le principe de la classification bayésienne étant de segmenter une image par le calcul de probabilités d'appartenance à une région donnée pour chaque pixel de l'image, il s'agit alors de calculer l'appartenance d'un pixel à une classe définie par des zones d'apprentissage, par estimation du maximum de vraisemblance (noté MV par la suite) (Robin, 1995). Le calcul des deux paramètres (moyenne et variance) pour chaque classe permet d'estimer la probabilité d'appartenance de chaque pixel pour chacune des classes ; nous choisissons celle qui a la probabilité la plus forte en supposant l'hypothèse d'une distribution gaussienne.

Soit s le niveau de gris, $s \in [0; \ldots; N_s]$, N_s étant le nombre total de niveaux de gris, x_s est le pixel à analyser et la classe $i \in [1; \ldots; N_c]$, N_c étant le nombre total de classes. La probabilité de l'appartenance du pixel x_s à la classe C_i est donnée par :

$$P(x_s \in C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(x_s - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \qquad (10)$$

Nous cherchons à maximiser cette probabilité pour trouver la classe j, retenue au sens de MV :

$$J = \arg \max_i \left(P x_s \in C_i\right) \qquad (11)$$

L'étude menée sur les images SPOT pour classifier les différents types d'occupation du sol se ramène à deux phases :

- une phase d'**apprentissage** qui vise à définir les propriétés des signatures de chacune des classes d'objets au moyen d'un échantillon d'éléments de l'image de classes connues ;
- une phase de **classification** en considérant l'information radiométrique dans le processus d'étiquetage.

La mise en oeuvre de la classification dirigée a été faite sur les 3 canaux (vert et rouge du visible, proche infrarouge).

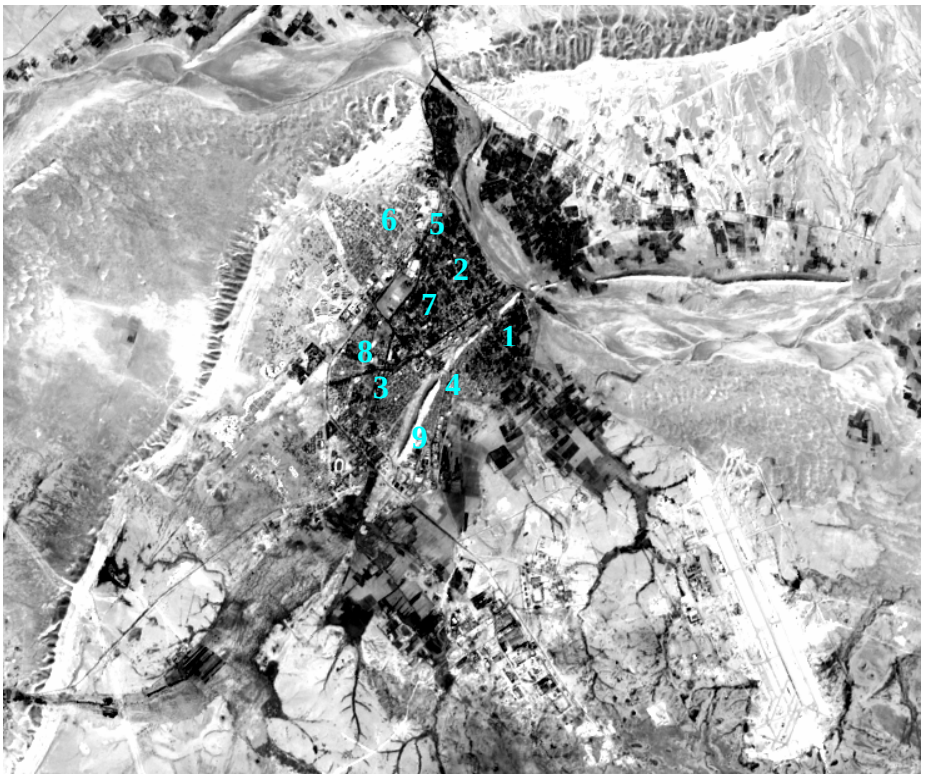


FIGURE 11 : Zones d'apprentissage (consulter en parallèle le tableau 1) : (1) bâti sous palmeraie (2) bâti et jardins (3) Mamourah (4) Es Sadikia (5) Laghouatine (6) Oasis nord (7) îlots de verdure urbaine (8) El Maquam (9) Djebel de Tizigharine. *Training areas (to be consulted simultaneously with table 1) : (1) built-up area under palm plantation (2) built-up area and gardens (3) Mamourah (4) Es Sadikia (5) Laghouatine (6) Oasis nord (7) urban vegetation areas (8) El Maquam (9) Djebel de Tizigharine*

Après le choix des parcelles d'entraînement (figure 11), nous effectuons une classification par maximum de vraisemblance pour distinguer les différents types de bâti dans le périmètre urbain (la médina, les quartiers denses et les nouveaux quartiers périphériques). La matrice de confusion (tableau 2), définie comme la répartition des pixels classés dans les différentes classes pour chacune des régions de référence, nous permet d'évaluer la qualité de la classification. La précision globale des pixels correctement classifiés est de l'ordre de 82,85 %. Par ailleurs, le coefficient Kappa (k), autre mesure de la précision de la classification, est donné par la formule :

$$k = \frac{N\sum_{k} x_{kk} - \sum_{k} x_{k\Sigma} x_{\Sigma k}}{N^2 - \sum_{k} x_{k\Sigma} x_{\Sigma k}} \qquad (12)$$

où (x_{kk}) est le nombre d'observations dans la ligne k et la colonne k ; ($x_{\Sigma k}$) et ($x_{k\Sigma}$) sont les totaux marginaux de la ligne i et de la colonne j respectivement et N correspond au nombre d'échantillons. La valeur de k dans notre cas est de 0,81 signifiant que 81 % de la classification n'est pas dû au hasard. Pontius (2000) note que la classification adoptée est valable (les résultats peuvent être judicieusement utilisés dans une étude de l'occupation du sol) lorsque l'indice Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75 %.

Par ailleurs, l'erreur de commission correspondant au pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification qui appartiennent en fait à d'autres classes dans les données de référence, est de l'ordre de 37,04 % pour la zone urbaine de Mamourah et de 11,67 % pour la zone de l'Oasis Nord (tableau 3). L'erreur d'omission (pixels appartenant aux échantillons mais qui ne sont pas correctement classifiés) est de l'ordre de 19,15 % par exemple pour la zone de Laghouatine ; 11,67 % des pixels de la zone de l'Oasis Nord ne sont pas correctement classifiés.

5. L'ORGANISATION SPATIALE DE L'AGGLOMÉRATION

Le traitement de l'image satellitaire a permis de mettre en évidence la mutation de l'oasis en pôle urbain (figure 12) avec un réseau de communication principal relativement dense. Les différents types de bâtis sont bien différenciés et, plus particulièrement, les trois grandes classes présentes à savoir : (1) le bâti sous palmeraie ou en zone de jardins avec une forte densité de végétation, (2) les constructions individuelles relativement sans végétation urbaine (médina et nouveaux lotissements), (3) les zones d'habitats collectifs et infrastructures publiques (zone d'activité médicale, université, infrastructures sportives, zone d'activité industrielle).

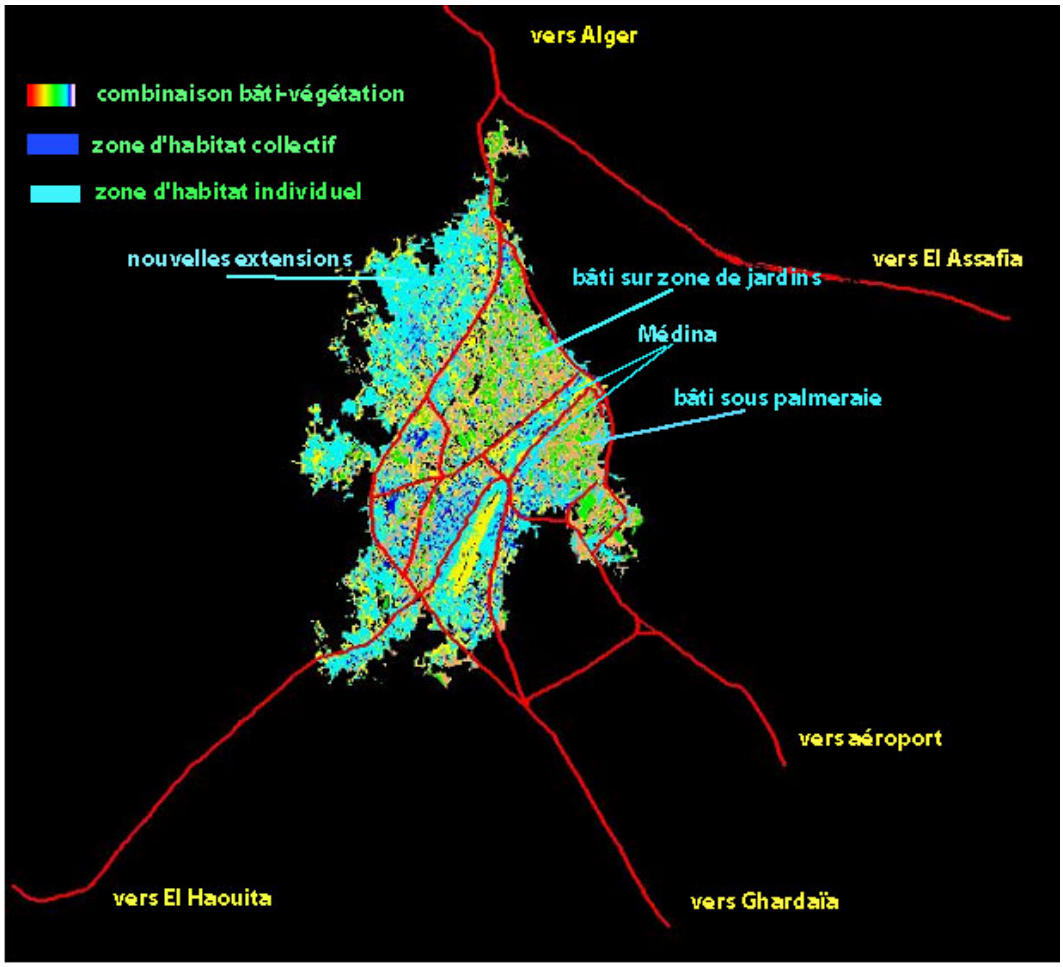


FIGURE 12 : Organisation de l'espace urbain de Laghouat ; résultat de la classification de l'image XS de SPOT de 2001. *Organization of the Laghouat urban area ; result of the SPOT/XS image of 2001 classification*

Les phases d'extension urbaine peuvent également être reconstituées :

- au départ, l'oasis avec la palmeraie, la zone de jardins et les deux zones principales d'habitat de la médina (le quartier El Hadjadj et El Gharbia sur le versant nord du mont Tizigharine et le quartier Chettet sur le versant sud) ;
- les édifices publics qui s'apparentent à l'habitat collectif et qui font leur apparition à proximité de l'oasis (caserne, puis édifices publics civils : mairie, poste, police, etc.) ;
- les constructions sous palmeraie et jardins en habitat individuel ;
- les habitats collectifs et l'apparition des premières cités (ensembles de bâtiments) ;
- la mise en place de lotissements pour habitat individuel après cession des terrains sous administration militaire à la municipalité.

La forme d'extension de la zone urbaine a subi l'influence de trois paramètres essentiels :

- l'organisation administrative du territoire en tout premier lieu : Laghouat a été sous administration militaire dès 1859 ; les seules extensions possibles étaient soit en intra muros ou dans une frange relativement étroite au nord ouest ;
- les contraintes naturelles : l'oued avec son large lit et ses crues fréquentes à l'est et au nord ; les accumulations de sable au nord - nord ouest ;
- la direction des voies de communication et d'échange essentiellement nord-sud et est-ouest.

Cela explique l'apparition de l'habitat en palmeraie et en zone de jardins en tout premier lieu, l'habitat collectif et les infrastructures publiques sur l'axe nord-sud aux abords de la route nationale 1 (Alger-Ghardaïa), l'habitat individuel sur l'axe nord-sud puis sur l'axe est-ouest (notamment sur la route d'El Haouita) puis, de façon plus modeste, en direction de l'aéroport (Ksar el Bézaim).

6. CONCLUSION

Les différents traitements effectués sur l'image SPOT de Laghouat ont montré que ce type d'image, malgré sa faible résolution spatiale relativement au thème urbain, apporte des informations intéressantes pour le type de milieu concerné par cette étude.

Les limites de la zone urbaine sont assez bien déterminées, notamment la zone principale de l'agglomération. Les zones périphériques sont moins bien délimitées, en particulier, l'armature urbaine est peu discernable à cause notamment de l'absence de végétation urbaine qui permettrait de délimiter les rues, d'une part, et le plan urbanistique particulier, d'autre part ; l'absence de végétation, la proximité relative des réponses spectrales de certains thèmes (bâti, zones de mise en valeur notamment) sont autant d'handicaps qui diminuent la possibilité de bien séparer la bâti des autres thèmes par des algorithmes classiques de traitement. Une réflexion sur la mise au point d'un indice particulier de différenciation du bâti pourrait apporter des parties de solution à ce problème.

L'avènement d'images de très haute résolution (images Ikonos) ne devrait pas remettre en question l'exploitation des images à moyenne ou basse résolution pour deux raisons au moins : i) l'absence d'images haute résolution pour des périodes anciennes pour des études multitemporelles visant à suivre et à comprendre l'évolution et l'utilisation de l'espace et ii) le prix relativement élevé des images haute résolution pour les budgets de pays en développement.

Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche partagée financé par l'Agence Universitaire de la Francophonie.

Références

Abdellaoui, A. et Rougab, A. (1994) Intégration de données multisources pour l'étude d'un paysage urbain : cas de l'agglomération blidéenne (Algérie); Actes de la 6e Conférence canadienne sur les SIG, 4-10 juin 1994, Ottawa (Ontario), Ressources Naturelles Canada, Volume n° 1, p. 1479-1487.

Abdellaoui, A. et Rougab, A. (1995) Caractérisation de la réponse du bâti : application au complexe urbain de Blida (Algérie). In Télédétection des milieux urbains et périurbains, Actes des VIe Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF / UREF, 2-5 octobre 1995, Liège (Belgique), p. 75-83.

Atkinson, P., Cushnie, J.L., Townshend, J.R.G. and Wilson, A. (1985) Improving Thematic Mapper land cover classification using filtered data. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, n° 6 ; p. 955-961.

Baraldi, A. and Parmiggiani, F. (1990) Urban area classification by multispectral SPOT images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, no 4, p. 674-680.

Boucherit, A., Hemis, M., Daoudi, M. et Abdellaoui, A. (1995) Apport de l'imagerie multibande HRV de SPOT à l'étude de l'utilisation du sol de l'environnement urbain : cas de la ville de Blida (Algérie). In Télédétection des milieux urbains et périurbains, Actes des VIe Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF / UREF, 2-5 octobre 1995, Liège (Belgique), p. 207-212.

Bres, S., Jolion, J.M. et Lebourgeois, F. (2003) Traitement et analyse des images numériques. Lavoisier, Hermès, 410 p.

Canny, J., (1983) Finding Edges and Lines in Images. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Report AI-TR-729, Cambridge, MA.

Chatterjee, S., (1993) Classification of Natural Textures Using Gaussian Markov Random Fields Models. In R. Chellappa and A. Jain eds., Markov Random Fields : Theory and Applications, Academic Press, Boston, Sydney, p. 159-177.

De Keersmaecker, M.L. et Lambin, É. (1987) Réflexion sur l'utilisation à des fins thématiques de l'imagerie satellitaire. International Journal of Remote Sensing, vol. 8, n° 9, p. 1277-1287.

Eberhard., J.-M. (1997) Étude des structures urbaines de l'agglomération de Mexico à l'aide d'une image HRV de SPOT. In Télédétection des milieux urbains et périurbains, Actes des VIe Journées scientifiques du Réseau Télédétecton de l'AUPELF / UREF, 2-5 octobre 1995, Liège (Belgique), p. 25-34.

Forster, B.L. (1982) Overcoming urban monitoring problems with the new generation sensors. Actes du Symposium International de la Commission VII de la Société Internationale de Photogrammétrie et Télédétection, Toulouse (France), p. 889-896.

Gomarasca, M.A., Brivio, P.A. and Pagnoni, F. (1993) One century of land use changes in the metropolitan area of Milan (Italy). International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 2, p. 211-223.

Houzelle, S. and Giraudon, G. (1991) Data fusion using SPOT and SAR images for bridge and urban area extraction. IGARSS '91, 3-6 June 1991, Helsinki, p. 1455-1458.

Ioka, M. and Koda, M. (1986) Performance of Landsat 5 – TM data in land cover classification. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, n° 12, p. 1715-1728.

Pontius Jr., R.G. (2000) Quantification error versus location in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n° 8, p. 1011-1016.

Robin, M. (1995) La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographique. Éditions Nathan Université, 320 p.

Serra, J. and Chermant, J. L. (1997) Mathematical morphology : A historical overview. Acta stereological, vol. 16, n° 3, p. 1-9

Serendero, M.A. (1989) Extraction d'informations symboliques en imagerie SPOT : Réseaux de Communication et Agglomérations. Thèse de Doctorat, Université de Nice.

Schmitt, M. et Mattioli, J. (1994) Morphologie mathématique. Éditions Masson, Paris, 211 p.

Soille P. (1999) Morphological Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 316 p.

Toll, D.L. (1984) Landsat 4 TM scene characteristics for a suburban and regional test site. NASA Conference Publication no 2326, p. 153-159.

Viveros-Cancino, O., Descombes, X. et Zerubia, J., (2002) Analyse intra-urbaine à partir d'images satellitaires par une approche de fusion de données sur la ville de Mexico. Rapport de recherche n° 4578, Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA).

Voiron, C. (1995) Analyse spatiale et analyse d'images par la morphologie mathématique. Éditions Espaces Modes d'Emploi, GIP Reclus, Montpellier, 192 p.

Winter, A., Maître, H., Cambou, N. and Legrand, E. (1997) An original multi-sensor approach to scale-based image analysis for aerial and satellite images. International Conference on Image Processing – ICIP '97, 26-29 October 1997, Santa Barbara (California), p. 234-237.