

PARTIE II

Télédétection et urbanisme

12

Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse)

PIERRE TERRETTAZ et CLAUDE COLLET

*Institut de géographie, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg, Suisse;
téléphone : +41 (37) 29-90-10; télécopieur : +41 (37) 29-97-46;
CÉ : pierre.terrettaz@unifr.ch*

Résumé

En milieu urbain, les typologies utilisées par les aménagistes et les statisticiens proposent une différenciation des zones résidentielles selon la densité, le type et la continuité du bâti, soit des espaces résidentiels continus et denses, collectifs, pavillonnaires, discontinus. Dans notre étude, nous cherchons à mesurer l'intérêt de l'indice perpendiculaire de végétation PVI pour la différenciation des tissus résidentiels de la ville de Genève, ainsi que l'apport des outils de morphologie mathématique et de la prise en compte du contexte dans la classification. Le PVI moyen, calculé dans des fenêtres de taille variable selon la catégorie de bâti, permet de distinguer partiellement les types de bâti : plus la densité augmente, plus la valeur du PVI diminue. Cependant, il ne suffit pas pour les caractériser complètement car à une même valeur de PVI peuvent correspondre des types d'habitat d'aspect sensiblement différent. La morphologie mathématique offre des outils simples et efficaces qui permettent notamment de traiter en partie les effets de bordure induits par le calcul de valeurs moyennes dans des fenêtres mobiles. Des règles simples sont utilisées pour tenir compte du contexte en plus des valeurs spectrales lors de la classification de pixels situés en bordure de zones homogènes.

1. Introduction

Dans le domaine de la cartographie urbaine à but statistique et d'aménagement, les typologies établies reposent sur des critères de types morphologique et fonctionnel. À titre d'exemple, au niveau II, EUROSTAT (1993) distingue les catégories suivantes au sein des surfaces artificialisées : les zones résidentielles et services publics, les activités industrielles et commerciales, les infrastructures techniques, transports et communications, les industries extractives, chantiers, décharges et friches, les terrains aménagés à usage de loisirs. La reconnaissance des objets et leur attribution à l'une ou l'autre des catégories requièrent l'utilisation conjointe de l'analyse visuelle de compositions colorées et de sources d'information exogènes; les méthodes de classification automatique s'avèrent quant à elles insuffisantes.

Au sein des zones résidentielles, les subdivisions opérées reposent essentiellement sur des critères morphologiques et de densité : centre densément peuplé, habitat continu moyennement dense, habitat résidentiel pavillonnaire, habitat résidentiel discontinu, habitat collectif. Dans les villes européennes, la densité du bâti est fortement liée à la présence d'espaces verts. Un indicateur de biomasse comme l'indice perpendiculaire de végétation (PVI) peut s'avérer intéressant pour refléter ces différences de densité. Avec les capteurs de haute résolution comme TM de Landsat ou HRV de SPOT, la valeur PVI associée au pixel n'est pas représentative de la classe de bâti à laquelle il appartient; en effet, les distinctions opérées entre les catégories de bâti n'ont de sens qu'à l'échelle de l'îlot ou du quartier. Aussi, le pixel ne peut être considéré de façon isolée; son voisinage doit être pris en compte, comme le préconisent les approches zonales (MICHEL et LORTIC, 1992). La subdivision de l'espace urbain en zones peut être déterminée soit par un découpage préexistant, soit par l'emploi de méthodes de segmentation. Vu la complexité du milieu urbain, ces dernières s'avèrent souvent peu efficaces pour établir un découpage adéquat. En l'absence de découpages existants, l'utilisation de fenêtres mobiles constitue une solution habituelle pour la prise en compte du voisinage. Ainsi, par le calcul du PVI moyen au sein d'une fenêtre mobile, la valeur du pixel central est affectée par celles du voisinage constitué par les autres pixels de la fenêtre.

À ce stade, seules les caractéristiques spectrales du pixel et de son voisinage sont prises en compte. Dans l'analyse visuelle, la taille des objets et l'affectation du voisinage constituent deux autres éléments clés de l'interprétation. À notre échelle d'analyse, la taille joue aussi un rôle important dans la mesure où les objets trop petits, soit de l'ordre d'un pixel, ne sont pas pertinents. La prise en compte de l'affectation du voisinage s'avère surtout nécessaire pour les pixels situés en bordure de zones homogènes (mixels) et qui sont particulièrement touchés par les effets de bordure générés par l'emploi de fenêtres mobiles lors du calcul de valeurs moyennes. De façon générale, les outils à disposition au sein des logiciels de traitement d'images et de SIG sont insuffisants pour la prise en compte du contexte et de la taille des objets. La morphologie mathématique (SCHMITT et MATTIOLI, 1994) offre un ensemble d'outils intéressants, mais incomplets, pour gérer ces problèmes.

Dans cet article, nous présentons une étude qui cherche à : 1) mesurer l'intérêt de l'indice de biomasse PVI pour distinguer les catégories d'habitat résidentiel; 2) utiliser la morphologie mathématique comme outil de filtrage pour prendre en compte la taille des objets et gérer les effets de bordure; 3) considérer l'affectation des pixels voisins pour la classification des pixels situés en bordure de zones homogènes.

Elle s'inscrit dans le cadre de l'action de recherche partagée de l'AUELF-UREF « Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud ».

2. Site d'étude et données utilisées

Une zone carrée de 10 240 m de côté extraite de l'agglomération genevoise sert de cadre d'étude. Elle comprend la majeure partie des types d'occupation du sol de la région et présente une diversité de bâti intéressante. La topographie des lieux ne présente pas d'accidents majeurs.

Une image HRV (XS) de SPOT datée du 21 juillet 1990 est utilisée. La date d'acquisition s'avère adéquate pour le calcul de l'indice de végétation en raison du bon contraste entre les zones de végétation et les zones bâties. L'image a subi une correction géométrique de type image à carte avec une méthode de rééchantillonnage de type bicubique. Des photographies aériennes à l'échelle 1: 30 000 environ servent de réalité de terrain.

3. Mode de calcul de l'indice perpendiculaire de végétation (PVI)

La méthodologie mise en oeuvre nécessite le calcul de l'indice perpendiculaire de végétation (PVI). Nous rappelons brièvement son mode de calcul (ABEDNEGO, 1989), qui est aussi illustré à la figure 1.

La valeur PVI d'un pixel correspond à la distance perpendiculaire entre le couple de valeurs du pixel et la droite des sols dans un diagramme bivarié représentant les bandes rouge et infrarouge. Son calcul requiert deux étapes : 1) la détermination de la droite des sols; 2) le calcul de la distance perpendiculaire.

L'obtention de l'équation de la droite des sols passe par la sélection d'échantillons. La méthode des moindres rectangles appliquée à ces échantillons permet de déterminer l'équation de la droite qui s'écrit :

$$Y - Y_m = \operatorname{tg} \alpha \cdot (X - X_m) \tag{1}$$

$$Y - \operatorname{tg} \alpha \cdot X + \operatorname{tg} \alpha \cdot X_m - Y_m = 0 \tag{2}$$

où X_m, Y_m = valeurs moyennes des échantillons de sol dans le rouge et le proche infrarouge respectivement;
 $\operatorname{tg} \alpha$ = pente de la droite des sols; elle est égale à $\operatorname{tg} \alpha = \sigma Y / \sigma X$; σY et σX correspondant aux écarts-types des échantillons de sols dans le proche infrarouge et le rouge.

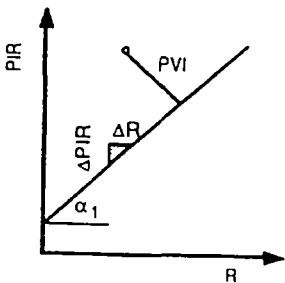


Figure 1. Technique de calcul de la droite des sols

La méthode des moindres rectangles minimise la somme des surfaces des triangles formés par la droite d'estimation et les points des échantillons. Elle est mieux adaptée que la méthode des moindres carrés car elle n'implique pas qu'une des variables soit dépendante de l'autre.

4. Analyse de la valeur discriminante du PVI à partir d'échantillons de bâti

L'image étudiée sur Genève présente trois catégories principales de bâti résidentiel : 1) l'habitat dense (centres anciens, tissus anciens en îlots); 2) l'habitat collectif (habitat en barres et grands ensembles avec des espaces verts assez importants); 3) l'habitat pavillonnaire (caractérisé par des maisons individuelles ou des bâtiments collectifs de taille restreinte). En règle générale, la densité de ces tissus est faible dans le cas de Genève. Nous cherchons à distinguer ces trois types d'habitat, auxquels nous avons ajouté la catégorie « espaces verts ».

Avant de classer l'ensemble de l'image, nous avons procédé à une analyse discriminante appliquée à des échantillons de bâti pour vérifier l'intérêt du PVI. Parmi les variables retenues figurent le PVI et les valeurs moyennes du PVI calculées dans des fenêtres 3 x 3, 5 x 5 et 7 x 7, ainsi qu'un indice de brillance et différents indices de variabilité (écart-type, différence moyenne entre les pixels de la fenêtre et le pixel central, moyenne des différences moyennes) calculés pour les images XS1, XS2, XS3 et PVI dans des fenêtres de taille variable (3 x 3 à 7 x 7). Les moyennes du PVI obtenues avec des fenêtres de taille 5 x 5 et 7 x 7 constituent très nettement les variables les plus discriminantes et assurent une bonne séparabilité entre les objets des différentes catégories; les indices de variabilité n'apportent qu'une information accessoire.

5. Méthodologie

Les étapes pour classer l'image des zones résidentielles sont les suivantes : 1) délimitation du contour de la zone bâtie par analyse visuelle d'une composition colorée P+XS; 2) calcul des valeurs du PVI et du PVI moyen; 3) classification par seuillage; 4) filtrage par morphologie mathématique et suppression des conflits entre les classes; 5) classification contextuelle pour les pixels encore non classés.

5.1. Délimitation du contour de la zone bâtie

Pour établir rapidement le masque approximatif des zones résidentielles, nous avons procédé par analyse visuelle d'une composition colorée P+XS; elle permet de délimiter grossièrement le contour de la zone bâtie et d'éliminer les grandes infrastructures de transport (aéroport, gares).

5.2. Calcul des valeurs du PVI et du PVI moyen

Pour chaque pixel de l'image, la valeur PVI est obtenue par la procédure indiquée à la section 3.

Afin de prendre en compte le voisinage, nous calculons ensuite le PVI moyen au sein d'une fenêtre mobile. La taille de la fenêtre constitue un point délicat. D'après l'analyse discriminante appliquée à partir des échantillons de bâti, plus la taille de la fenêtre est grande, meilleure est la séparabilité des classes. Ceci s'explique dans la mesure où l'utilisation d'une grande fenêtre a pour effet de diminuer la variabilité au sein des échantillons, ce qui contribue à maximiser leur séparabilité. Cependant, l'emploi d'une fenêtre de grande taille génère de nombreux effets de bordure. Aussi avons-nous opté pour une taille adaptée aux objets constitutifs des différentes catégories. Pour le bâti dense, une fenêtre 3 x 3 suffit car la variabilité est faible. Pour l'habitat collectif, la fenêtre doit avoir une taille plus importante en raison de la dimension des espaces verts situés entre les bâtiments. Dans certains quartiers, la distance entre les bâtiments est très importante; une taille de 7 x 7 pixels s'avère nécessaire. Pour l'habitat pavillonnaire et la végétation, nous avons retenu une taille de 5 x 5 et de 3 x 3 pixels respectivement.

5.3. Classification par seuillage

La classification est effectuée par seuillage des valeurs du PVI moyen. Les seuils sont déterminés de façon empirique. La limite entre l'habitat dense et l'habitat collectif correspond au creux de l'histogramme bimodal des valeurs du PVI moyen mesurées dans les zones résidentielles. Les limites entre l'habitat collectif, l'habitat pavillonnaire et les espaces verts sont établies à partir des valeurs mesurées sur des zones d'entraînement; pour l'habitat collectif et l'habitat pavillonnaire, la variabilité au sein des zones d'entraînement est sensiblement la même. Les seuils choisis correspondent approximativement aux moyennes de chaque classe plus ou moins trois écarts-types. Les limites retenues sont les suivantes :

- dense : 0 - 30;
- collectif : 30 - 70;
- pavillonnaire : 70 - 110;
- végétation : > 110.

L'espace des valeurs du PVI moyen est ainsi entièrement subdivisé.

Pour les zones homogènes de l'image du point de vue de l'occupation du sol, les valeurs moyennes mesurées sur chacune d'elles ne présentent pas de différences significatives selon la taille de la fenêtre choisie pour le calcul du PVI moyen. Aussi avons-nous retenu les mêmes seuils pour chaque image du PVI moyen.

Les seuils définis permettent d'extraire chaque catégorie de bâti de l'image du PVI moyen adéquate (3 x 3, 5 x 5 ou 7 x 7).

5.4. Filtrage par morphologie mathématique et suppression des conflits entre les classes

Les masques de chaque catégorie de bâti obtenus par seuillage présentent un certain nombre d'erreurs générées par des effets de bordure. À titre d'exemple, la valeur du PVI moyen obtenue pour des pixels situés à la frontière entre une zone d'habitat dense et une zone de végétation correspond à celle d'un pixel d'habitat collectif ou pavillonnaire. Suite

à la classification par seuillage, ces pixels sont faussement attribués à l'une de ces catégories. D'autre part, les zones d'extension trop petite ne sont pas pertinentes à notre échelle d'analyse; de surcroît, elles correspondent souvent à des zones mal classées. Ainsi, une petite zone située au milieu d'un quartier d'habitat collectif et classée comme dense doit être attribuée à la catégorie « habitat collectif ». L'application d'une ouverture morphologique par un élément structurant de taille 3 x 3 à chacun des masques permet de supprimer une bonne partie des erreurs puisqu'elle élimine toutes les zones de taille inférieure à celle de l'élément structurant. À l'inverse, la fermeture morphologique comble les trous de petite taille. Ainsi, la morphologie mathématique offre des outils simples et rapides pour filtrer certains objets d'après leur taille et leur voisinage.

Comme la taille de la fenêtre choisie pour le calcul du PVI moyen varie d'une catégorie de bâti à l'autre, certains pixels peuvent être attribués à deux catégories simultanément, malgré l'ouverture morphologique appliquée. Les solutions adoptées après analyse visuelle de la distribution des zones de conflit sont les suivantes : 1) les pixels affectés à la fois aux catégories « dense » et « collectif » sont classés comme pixels d'habitat dense; 2) ceux affectés à la fois aux catégories « collectif » et « pavillonnaire » sont considérés comme non classés; 3) ceux affectés à la fois aux catégories « pavillonnaire » et « espaces verts » sont considérés comme espaces verts.

5.5. Classification par voisinage

Les pixels qui subsistent comme non classés sont situés pour l'essentiel au contact de zones occupées par des types de bâti différents. La classification de ces pixels est améliorée par la prise en compte simultanée des caractéristiques spectrales et du résultat de la classification préalable dans le voisinage. Comme caractéristique spectrale, nous avons pris en compte la valeur PVI moyenne mesurée sur une fenêtre 3 x 3 et reclassée d'après les seuils choisis précédemment. L'emploi d'une fenêtre 3 x 3 permet de tenir compte du voisinage immédiat. Ainsi, deux images sont prises en compte pour la classification par voisinage : l'image des pixels déjà classés (par seuillage et morphologie mathématique) et l'image reclassée du PVI moyen mesuré dans une fenêtre 3 x 3. Comme voisinage, nous considérons les huit pixels qui entourent le pixel central au sein d'une fenêtre 3 x 3. Ce voisinage intervient de la manière suivante :

- si, dans l'image classée, au moins deux pixels voisins possèdent la même valeur que le pixel à classer, alors ce dernier prend cette valeur;
- si ce n'est pas le cas, alors on calcule la valeur modale parmi les voisins; si celle-ci est unique et qu'elle correspond à la valeur d'une classe immédiatement supérieure ou inférieure à la valeur du pixel à classer, alors la valeur modale est attribuée à ce dernier; dans tous les autres cas, le pixel est considéré comme non classé; par exemple, si de par la moyenne du PVI mesurée dans la fenêtre 3 x 3, le pixel appartient à la classe « habitat collectif » mais que la classe modale est l'habitat pavillonnaire, alors le pixel est attribué à la classe « pavillonnaire ».

Remarquons que cette procédure peut être appliquée de façon itérative.

6. Analyse du résultat

La figure 12-2 (voir cahier couleur) représente la carte d'occupation du sol obtenue dans le périmètre de la zone d'habitat et la figure 3 représente le contour des différents objets de la figure précédente superposés à une composition colorée P+XS. Nous procéderons à une analyse par catégorie distinguée.



Figure 3. Contours des objets de la figure 12-2 (voir cahier couleur) superposés à une composition P+XS obtenue par transformation intensité, teinte, saturation avec substitution de l'intensité par le canal panchromatique (représentée en N/B); les contours apparaissent en noir

6.1. PVI faible (habitat dense)

Les pixels classés dans la catégorie « PVI faible » constituent des zones avec très peu ou pas du tout de végétation qui englobent effectivement les quartiers d'habitat ancien dense. Cependant, elles comprennent aussi des zones industrielles ainsi que certains noyaux au sein de l'habitat collectif, noyaux composés souvent d'un bâtiment et de surfaces minéralisées (stationnement). Si l'on considère l'emprise au sol des surfaces minéralisées dans ces zones, l'habitat peut être considéré comme dense; par leur texture et leur morphologie, elles appartiennent plutôt à l'habitat collectif.

6.2. PVI moyen (habitat collectif)

Les zones d'habitat en barres et les grands ensembles apparaissent dans la catégorie « PVI moyen ». Le calcul de valeurs moyennes dans des fenêtres 7 x 7 permet d'obtenir des zones homogènes assez grandes, là où une classification par pixel génère une mosaïque alternant des pixels d'habitat différent.

Là où les espaces verts entre les bâtiments sont très grands, la classification pêche par omission en attribuant ces pixels aux catégories « pavillonnaire » ou « végétation ».

À l'inverse, cette catégorie englobe certains pixels où le mariage minéral-végétal génère une valeur PVI s'apparentant à celle du collectif, mais où la texture est tout autre : habitat pavillonnaire situé le long de routes principales, cœurs de village assez denses, sorties d'autoroute, etc. Certains effets de bordure n'ont pas été supprimés totalement, du fait que la moyenne a été calculée dans une fenêtre 7 x 7 alors que l'ouverture morphologique a été effectuée avec un élément structurant de taille 3 x 3.

6.3. PVI élevé (habitat pavillonnaire)

Si les grandes zones d'habitat pavillonnaire apparaissent bien, la catégorie « PVI élevé » pêche, et de façon assez importante, en englobant notamment certains grands espaces verts situés entre les barres dans l'habitat collectif et une partie des parcs publics.

6.4. PVI très élevé (espaces verts)

Les pixels attribués à la classe « PVI très élevé » l'ont été de façon restrictive si bien qu'ils correspondent effectivement à des zones où l'emprise végétale est forte. La catégorie « habitat pavillonnaire » englobe une partie des pixels qui devraient appartenir à cette classe, comme certains parcs publics ou des zones d'habitat pavillonnaire très lâche.

7. Conclusion

Dans le cas de Genève, l'adéquation entre la nomenclature retenue des types de bâti et la typologie obtenue par classification des valeurs du PVI moyen est vérifiée partiellement. En effet, l'augmentation des valeurs de l'indice de végétation d'un type de bâti à l'autre se concrétise dans la mesure où : 1) les zones d'habitat dense présentent peu d'espaces verts; 2) les grands ensembles et l'habitat en barres offrent un mélange minéral-végétal qui génère une valeur PVI intermédiaire; 3) la faible densité des zones d'habitat pavillonnaire dans la région genevoise génère des valeurs PVI relativement élevées.

Cependant, la densité d'espaces verts n'est qu'un des facteurs qui définissent la morphologie du bâti. D'autres éléments, comme la forme, la taille, la hauteur et la disposition des bâtiments, l'importance des stationnements, la maille viaire, entre autres, jouent un rôle important. Ainsi, si la densité des surfaces bâties est importante, une zone d'habitat pavillonnaire peut présenter un indice de végétation avec une valeur proche de celle de l'habitat collectif. À Genève, la densité est généralement faible, ce qui explique que la valeur de l'indice de végétation soit élevée pour cette catégorie. Dans l'habitat collectif, les différences peuvent être encore plus marquées, selon que les espaces entre les bâtiments sont occupés par des surfaces minéralisées ou pas. Nos premières expérimentations faites

sur la ville de Strasbourg l'attestent; selon la densité du bâti ou le type d'occupation de l'espace situé entre les bâtiments, le seuil entre les valeurs PVI de l'habitat collectif et de l'habitat pavillonnaire est difficile à établir. À lui seul, le PVI ne peut caractériser complètement un type d'habitat.

Le PVI s'avère également insuffisant pour distinguer le bâti résidentiel d'autres catégories d'occupation du sol. Par exemple, les zones industrielles ou les chantiers présentent des valeurs d'indice de végétation faibles, comme l'habitat dense; de même, les parcs publics présentent des valeurs proches de celles de l'habitat pavillonnaire lâche. Il est donc nécessaire d'établir au préalable un masque de l'habitat résidentiel complet. Pour cette étape préalable, le PVI présente un intérêt pour déterminer les zones potentielles; il peut ainsi orienter l'analyse visuelle ou toute autre méthode de délimitation.

Que ce soit pour l'analyse des types de bâti résidentiel ou la distinction entre le bâti et les autres catégories d'occupation du sol, la texture joue un rôle important lors de l'analyse visuelle. À l'heure actuelle, peu d'indices numériques satisfaisants sont proposés dans la littérature pour l'analyse du milieu urbain. Les quelques indices de variabilité mesurés sur les bandes XS1, XS2, XS3 ou PVI et introduits dans l'analyse discriminante des échantillons de bâti s'avèrent nettement moins pertinents que l'information spectrale (le PVI en l'occurrence). Cependant, la combinaison de l'information spectrale et texturale peut apporter des solutions satisfaisantes, particulièrement pour distinguer le bâti d'autres catégories d'occupation du sol.

En plus de l'information spectrale et texturale, la forme, la taille et le contexte interviennent dans l'interprétation d'images. Les outils offerts par la morphologie mathématique sont intéressants pour le filtrage puisqu'ils tiennent compte de la taille des objets; de surcroît, leur implémentation est aisée et l'exécution des opérations rapide. La prise en compte du contexte est plus délicate à réaliser. Les règles simples utilisées dans notre étude s'appliquent bien pour la classification des mixels, par la prise en compte simultanée de l'information spectrale et des résultats de la classification préalable dans le voisinage, mais elles n'utilisent qu'une infime partie de la richesse de l'information contextuelle. Le calcul de valeurs moyennes au sein d'une fenêtre mobile constitue aussi un moyen de prendre en compte le voisinage. Cependant les effets de bordure induits génèrent des erreurs que les filtrages ultérieurs ne gomment que partiellement. Un découpage zonal préalable s'avérerait plus pertinent.

8. Références

- ABEDNEGO, B. 1989. Apport de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de génie rural, Lausanne, thèse de doctorat n° 806, 220 p.
- EUROSTAT, 1993. Délimitation des agglomérations urbaines par télédétection. Cahier des charges général, non publié.
- MICHEL, A. et LORTIC, B. 1992. Typologies urbaines et télédétection satellitaire. La notion de zones en milieu urbain. L'espace géographique, vol. 21, n° 2, p. 167-178.
- SCHMITT, M. et MATTIOLI, J. 1994. Morphologie mathématique. Masson, Paris, 211 p.

13

Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud

CHRISTIANE WEBER ¹, JEAN-PAUL DONNAY ² et CLAUDE COLLET ³

¹ *Laboratoire Image et Ville, 12 rue Goethe, 67000 Strasbourg, France;
téléphone : +33 (3) 88-45-65-21; télécopieur : +33 (3) 88-45-33-88
CÉ : chris@lorraine.u-strasbg.fr*

² *Laboratoire SURFACES, Place du XX Août, 7, B-4000 Liège, Belgique;
téléphone : +32 (4) 366-54-24; télécopieur : +32 (4) 366-56-93*

³ *Institut de géographie de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg, Suisse;
téléphone : +41 (26) 300-90-23; télécopieur : +41 (26) 300-97-46*

Résumé

Se doter de moyens performants et stables pour faciliter la connaissance du milieu urbain, nécessite l'utilisation conjointe de plusieurs types d'information : biophysique, socio-économique, démographique, etc. Cependant il convient de consolider les approches méthodologiques dans un souci de transférabilité spatiale et temporelle. L'adaptation d'un corpus méthodologique transférable requiert une évaluation des résultats obtenus sur divers sites afin de pouvoir fournir des références d'utilisation. L'intérêt de sites-témoins différents se comprend par les spécificités urbaines propres aux pays développés à faible taux d'évolution et aux pays en développement dont le dynamisme n'est plus à démontrer. Dans le cadre de cette étude, la définition du milieu urbain et sa dynamique spatiale sont abordées au travers des formes urbaines induites, c'est-à-dire des éléments individualisables de la surface qui participent à l'organisation de la structure du milieu. Un ensemble de méthodes plus ou moins élaborées est testé par les trois équipes (Strasbourg, Liège et Fribourg). Le déroulement du programme est prévu en plusieurs étapes : tout d'abord une application sur trois sites initiaux (Strasbourg, Liège et Genève), pour évaluer les méthodes proposées et les adaptations nécessaires, puis sur une ou plusieurs applications en pays méditerranéens.

1. Introduction

Le phénomène urbain est à l'heure actuelle un enjeu important à l'échelle planétaire. C'est pourquoi, il est absolument nécessaire de se doter de moyens conceptuels et méthodologiques qui peuvent en améliorer la compréhension et le suivi. Cet effort est important bien que les règles de production, les modes d'implantation et d'évolution, les caractéristiques de peuplement (solde naturel, migration, etc.) ainsi que les formes d'urbanisation ne soient pas précisément comparables.

La modélisation urbaine a facilité ces investigations en favorisant une conceptualisation du système urbain selon deux approches complémentaires : l'une analytique, utilisée pour la description et la mise en relation des composantes urbaines; l'autre synthétique répondant au besoin d'articulation de ces composantes au sein d'une même unité territoriale plus ou moins élastique.

La disponibilité des informations utiles a conduit bon nombre de chercheurs à s'intéresser aux sources nouvelles d'information sur l'objet urbain, celles qualifiant « le contenant » (localisation et disposition des lieux), complétant celles de « contenu » fournies par des organismes nationaux, ou éventuellement privés (les enquêtes de marché, d'opinion, etc.). Les dénombrements obtenus ne fournissent qu'une vision restreinte sur le système et les interactions sociales, économiques, politiques ou culturelles. L'intérêt d'une telle complémentarité s'est alors porté sur des informations sur le milieu lui-même au travers de ses caractéristiques biophysiques, des types d'occupation du sol et de la quantification de ces derniers. Ceci amène à considérer l'espace urbain en fonction de deux attendus spécifiques : l'explicitement et l'implicitement spatial. Les informations explicitement géographiques sont très souvent représentées spatialement selon des implantations ponctuelles (mesures de terrain), linéaires (flux) ou aréales (dénombrements) et correspondent à des informations de contenu la plupart du temps. Les informations implicitement spatiales qualifient les caractéristiques de contenant. Les premières sont souvent imposées, restrictives, discrètes et induisent des reports de valeurs sur un espace référencé; les secondes, continues, liées à la répartition des phénomènes naturels ou anthropiques, sont repérables plus aisément.

Les relations entre ces deux composantes de l'espace urbain imposent une perpétuelle interaction des approches et des méthodes, impliquant sans cesse une amélioration de la prise en compte de la réalité et donc de sa compréhension par un enrichissement mutuel. Modéliser l'espace urbain passe par la maîtrise de ce binôme conceptuel et ceci quels que soient le niveau d'analyse, le site étudié et le moment de l'histoire.

2. Objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques de notre recherche se fondent sur les besoins de plus en plus nets d'asseoir un ensemble de méthodes utilisant l'imagerie satellitaire, qui puisse dans la majorité des cas de figures fournir des résultats proches. Bien entendu, une telle stabilité ne se conçoit que si des adaptations au milieu environnemental et socioculturel sont prises en compte.

En fonction des données disponibles, il nous faut donc tester quelques méthodes qui apporteront une information sémantiquement stable bien que syntaxiquement tributaire du milieu urbain étudié. Ces méthodes doivent faire l'objet d'une analyse critique des trois

équipes participantes, Liège, Fribourg et Strasbourg, afin de ne retenir que les plus performantes selon des critères d'applicabilité et de résultat, déterminés progressivement par les conditions propres à ces sites. Cet aspect nous semble primordial pour assurer un minimum de crédibilité à toute transférabilité méthodologique. Une gradation de la prise en considération des espaces urbains permettra de mieux cerner les limites, les lacunes ou les impossibilités d'application des différentes méthodes retenues. Après une première étape de travail sur des images disponibles, un premier bilan a pu être présenté (WEBER, 1995a).

D'autres sites d'une zone climatique différente sont pressentis : Lisbonne, une banlieue d'Athènes (Grèce) et Alcala (Espagne). Centres méditerranéens, ces villes présentent des caractéristiques urbanistiques et environnementales spécifiques qui permettront d'établir un second constat.

La dimension Nord-Sud du projet réside dans la volonté de pouvoir appliquer les méthodes jugées pertinentes après les deux premières étapes, sur des sites maghrébins voire d'Afrique noire.

L'étude de la transférabilité des méthodes applicables en milieu urbain ne peut se concevoir sans une approche de ce type qui puisse associer au résultat potentiel, les conditions d'obtention de celui-ci.

2.1. L'imagerie satellitaire et ses conditions d'application

Les capteurs à haute résolution spatiale permettent actuellement d'accéder à une information implicitement géographique et de localiser les formes urbaines susceptibles d'être révélatrices de structures facilitant les réflexions sur les processus constitutifs du tissu. Cependant, la non-univocité existant entre le signal reçu par le capteur et la réalité visée, entraîne des variabilités de résultats, liées aux éléments de prise de vue (capteur, atmosphère, conditions climatiques, etc.) et à l'hétérogénéité du milieu. Dans un tel contexte, il faudrait pouvoir définir un ensemble de méthodes susceptibles de fournir des informations utilisables dans des approches de modélisation et ceci, quels que soient les sites, les caractéristiques urbaines ou les processus à l'œuvre.

2.2. Un corpus méthodologique transférable

Il n'est pas réaliste de croire que les méthodes puissent s'appliquer de la même manière sur différents sites urbains, entre ceux caractérisés par un dynamisme faible et des règles d'urbanisme établies et d'autres, dont la progression ne peut plus être totalement contrôlée et dont les formes de croissance sont totalement spécifiques. Une adaptation plus ou moins importante est donc à envisager dans le cadre de transferts méthodologiques. Ceci doit être finalisé avec le plus grand soin car l'intégration des données de télédétection au sein de bases d'informations spatiales homogènes correspond à un courant porteur des recherches en cours actuellement.

L'établissement d'un corpus méthodologique pour l'analyse du système urbain dans ses composantes spatio-temporelles (dynamique et processus de croissance) a nécessité une sélection parmi toutes les approches méthodologiques possibles : 1) la définition du milieu urbain, approchée de deux manières, selon une association « minéral/végétal » du milieu et les particularités internes sous-jacentes; 2) la délimitation des zones urbaines, définie en relation avec des critères retenus par les institutions responsables des statistiques de population.

Deux approches complémentaires ont été confrontées : la forme et la texture, d'une part, le potentiel d'utilisation du sol d'autre part. Ceci a conduit notamment à analyser aussi les limites urbaines et les zones de coalescence qui confèrent à l'enveloppe urbaine une plus ou moins grande perméabilité.

Si l'aspect sémantique de l'information a été pris en compte, l'aspect syntaxique, c'est-à-dire la nature et le mode de distribution spatiale requis par les modèles d'analyse de croissance urbaine, n'a pas encore été abordé. Ceci reste une nécessité dans l'optique d'une mise au point des procédures de transformation des distributions de données nécessaires en cas de transfert (du discret au continu par exemple).

3. Présentation des travaux

3.1. L'espace urbain

La reconnaissance et la compréhension de l'espace urbain peuvent être appréhendées au travers des formes urbaines et de leurs caractéristiques. Les éléments structurants permettent de repérer des trames d'organisation spatiale successives. Leur caractérisation facilite l'évaluation de leur rôle en tant que facteurs contraignants, perméables et incontournables dans le développement du système urbain. Selon les schémas apparents, les arrangements et les successions, il est possible d'identifier des types de tissus urbains, associés éventuellement à des caractéristiques urbanistiques et architecturales, à des choix politiques de développement ou à des réglementations foncières plus ou moins contraignantes. La connaissance de tels éléments peut fournir des indications intéressantes sur les éléments, les rythmes et, les spécificités du tissu urbain et de son dynamisme.

L'espace urbain concentre sur son territoire d'autant plus d'intérêt qu'il apparaît tel un emboîtement spatio-temporel d'éléments qu'il convient d'identifier, tout en conservant les effets liés au double processus d'intégration de l'information, à la fois horizontal (exhaustivité spatiale) et vertical (synthèse et nécessaire abstraction). Les approches multiples permettant d'accroître la connaissance sur le milieu urbain se situent le long d'un continuum allant de l'image-interprétation à l'automatisation des procédures. Les travaux qui suivent, s'organisent sur la base de ce passage graduel. Partant du principe que l'un des révélateurs de l'espace artificialisé par l'homme réside dans la confrontation de la végétation et du bâti au sein d'un espace urbain, un premier ensemble de méthodes a été testé.

3.1.1. Écosystèmes

Cette expérimentation, a fait l'objet d'un contrat avec la Ville de Mulhouse (France) ainsi que les ministères de l'Environnement et de l'Équipement. Cette étude a été menée en partenariat avec le SERTIT (Service régional de traitement d'image et de télédétection).

Une étude des écosystèmes urbains (COLLECTIF, 1994; LENCO, 1995) sur l'apport d'informations essentiellement biophysiques présente l'intérêt de permettre une segmentation spatiale particulière du milieu urbain. En effet, par le biais d'une image-interprétation assistée par ordinateur, la caractérisation du milieu a été possible en fonction du rapport minéral/végétal, de l'alignement au réseau viaire, de l'emprise au sol des éléments et de l'ombre portée. Le déroulement d'identification s'est appuyé sur une réflexion systémique avec rétroaction, afin d'établir une nomenclature adaptée qui puisse être rattachée à celle du programme *Corine Land-Cover*. Cette détermination du milieu a

été d'autant plus intéressante qu'elle apporte une complémentarité essentielle aux informations déjà intégrées dans le système d'information géographique de Mulhouse. Sur le tableau 1, on montre les avantages et les limites de la méthode utilisée pour l'identification des écosystèmes.

Cette méthode fondée sur l'image-interprétation présente par bien des aspects un intérêt essentiel, celui de la simplicité d'exécution, dès lors qu'un matériel adapté est à disposition. En effet, elle réside sur les capacités oculaires d'un interprète qui mieux que la machine peut discriminer les multiples variations de l'espace. Grâce aux capacités technologiques améliorant l'interactivité, le repérage et l'identification spatiale des zones sont facilités. Enfin, elle répond à des questionnements de thématiciens de l'espace urbain d'une manière compréhensible et intégrable dans leurs pratiques habituelles. Cependant, elle est très liée à la dextérité de l'interprète et à ses compétences, ainsi qu'à sa connaissance du terrain. L'obligation de rattacher les catégories d'occupation du sol détectées à une nomenclature existante bien que délicate, a permis une fois de plus de relever les contradictions existant entre occupation du sol et finalités urbaines.

3.1.2. Indices de végétation et segmentation de l'espace urbain

La deuxième expérimentation a trait à la discrimination des zones résidentielles à partir de la végétation. Deux autres images HRV de SPOT (P, 21-07-90, KJ : 50-256, 1B; XS, 21-07-90, KJ : 50-256, 1B) de l'agglomération genevoise (zone carrée de 10 km de côté) ont été utilisées. Toutes deux ont été corrigées géométriquement afin de pouvoir être exploitées conjointement.

L'utilisation des indices de végétation afin de différencier l'espace urbain et les zones d'espaces verts intra-urbaines, constitue un moyen reconnu de caractérisation. Plusieurs types d'indices sont utilisables en fonction des particularités locales (couleurs et brillance des sols, etc.), du rapport « minéral/végétal » et des altérations liées à la plus ou moins grande présence de sols nus ou faiblement couverts. Les travaux réalisés à Fribourg portent principalement sur l'établissement d'une carte d'occupation du sol en milieu urbain et périurbain, par exploitation d'images HRV. La subdivision des zones résidentielles en types de bâti constitue l'objet principal d'étude. Pour cela, deux directions ont été approfondies : 1) les méthodes de combinaison d'images panchromatique et multibande; de telles combinaisons d'informations spatiales et spectrales (XS et P) devraient permettre d'améliorer l'analyse visuelle et les possibilités de classification automatique (CARPER *et al.*, 1990; PELLEMANS *et al.*, 1993; TERRETTAZ, 1992); 2) divers indices de végétation, tels que le PVI (indice de végétation perpendiculaire), notamment pour améliorer la discrimination des types d'habitat résidentiel (TERRETTAZ et COLLET, 1995).

Tableau 1. Avantages et limites de la méthode utilisée pour l'identification des écosystèmes

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Bonne discrimination des espaces	Facilité d'apprentissage	Urbanisme Aménagement
Limites	Connaissance terrain Nomenclature délicate	Nécessité de matériel sinon pratique laborieuse	Non reproductibilité car liée à un interprète

Dans le cadre de cette deuxième approche a été retenue, parmi les diverses nomenclatures qui existent pour les cartes d'occupation du sol à but statistique ou d'aménagement, celle proposée par EUROSTAT dans le cadre du projet « Télédétection et statistiques urbaines » (EUROSTAT, 1993). La catégorie « zones résidentielles et services publics » y est représentée par les types suivants : 1) centre densément peuplé; 2) continu moyennement dense; 3) résidentiel pavillonnaire; 4) résidentiel discontinu; 5) résidentiel collectif; 6) services publics et collectivités.

Les méthodes de classification automatique s'avèrent peu efficaces et la reconnaissance des objets appartenant à ces catégories requiert l'utilisation conjointe de l'analyse visuelle des compositions colorées et de sources d'informations multiples. En effet, le PVI semble inopérant pour distinguer automatiquement le bâti résidentiel d'autres catégories d'occupation du sol, ainsi les zones industrielles ou les chantiers génèrent une valeur d'indice de végétation faible tout comme l'habitat dense, et les parcs publics peuvent se confondre avec des zones d'habitat pavillonnaire lâche. Il est donc nécessaire d'améliorer les résultats potentiels notamment par l'établissement préalable d'un masque des zones d'habitat résidentiel. Le PVI, dans ce cas, présente l'intérêt de faciliter la détermination des zones résidentielles potentielles (ABEDNEGO, 1989; ABDENEGO and COLLET, 1992) et ainsi d'orienter l'analyse visuelle ou toute autre méthode de segmentation.

Que ce soit pour l'analyse des types de bâti résidentiel ou la distinction entre le bâti et les autres catégories d'occupation du sol, la texture joue un rôle important lors de l'analyse visuelle. Or, à l'heure actuelle, peu d'indices numériques satisfaisants sont proposés dans la littérature pour l'analyse du milieu urbain. Les quelques indices de variabilité mesurés selon des combinaisons linéaires multibandes (HRV de SPOT : XS1, XS2, XS3 ou PVI) et introduits dans une classification telle l'analyse discriminante, s'avèrent nettement moins pertinents que l'usage de l'information spectrale seule (le PVI en l'occurrence). Cependant, la combinaison d'informations spectrales et texturales peut apporter des solutions satisfaisantes, particulièrement pour distinguer le bâti d'autres catégories d'occupation du sol. Dans le domaine textural, il s'agit de tirer parti de l'image panchromatique dont le potentiel est important mais des recherches complémentaires sont nécessaires. Sur le tableau 2, on montre les avantages et les limites du PVI.

Si la constitution de cet indice est aisée et ses capacités de discrimination élevées, il ne peut cependant convenir à tous les cas de figures, par exemple lorsque la zone résidentielle est fortement arborée ou que les zones d'habitat comprennent des espaces minéralisés importants (parkings, entrées de résidence, etc.). La transférabilité n'est donc pas assurée. Il s'avère néanmoins opérationnel dans une démarche d'image-interprétation. Pour améliorer les possibilités de traitements appliqués à la discrimination de l'espace urbain, d'autres méthodes, de segmentation en particulier, ont été testées.

Tableau 2. Avantages et limites du PVI

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Relation avec la densité de types d'habitat Aide visuelle	Aisé à constituer	Image-interprétation
Limites	Cette relation ne couvre pas tous les cas de figures	Problèmes de transférabilité	

3.2. Segmentation de l'espace urbain : « les érodés ultimes »

L'étape suivante dans le déroulement de l'étude consiste à délimiter des partitions intra-urbaines de manière automatique ou semi-automatique, notamment afin de pallier les problèmes induits par l'interprétation d'image. L'application de la segmentation en télédétection urbaine répond donc aux deux préoccupations suivantes : 1) recherche d'une méthodologie permettant la reproductivité de la démarche; 2) remplacement des classifications « pointillistes » par des classifications zonales correspondant mieux aux habitudes et aux besoins des urbanistes, ou plus largement aux personnes impliquées dans la mobilisation d'informations urbaines (DONNAY, 1992).

Cette expérimentation a été appliquée sur les sites de Strasbourg, Genève et Liège à partir d'images HRV (XS) de SPOT et TM de Landsat.

Le problème lors de la segmentation d'une image monocanal, réside dans le choix du canal synthétique le plus pertinent possible. Suivant les villes, les capteurs et les dates de prises de vue, une grande variabilité est observée (première composante d'une ACP, NDVI, PVI, indice de brillance, etc.). Pour éviter ce problème et utiliser l'information multibande, l'image de contraste soumise à la segmentation par la méthode de l'« érodé ultime » est remplacée par une image contenant les limites d'une classification (obtenue dans le cas de Genève ou de Strasbourg par une méthode dirigée).

La procédure de segmentation jusqu'à l'érodé ultime permet de diviser les zones initiales en zones plus petites en tenant compte de critères géométriques. La dernière étape consiste à extraire les statistiques multibandes de chacune des zones pour les soumettre à un algorithme de classification.

Dans le cas de Strasbourg, l'algorithme des « érodés ultimes » a été utilisé sur un résultat de classification dirigée, après l'application sans succès sur une image d'indice de végétation. La classification utilisée a permis d'isoler des zones homogènes par un filtrage sur principe majoritaire sur une fenêtre 7 x 7. Un filtre passe-haut (Roberts) a ensuite permis de fermer les contours et d'optimiser les érodés. Après insertion manuelle des réseaux viaires et ferrés les résultats se sont révélés assez satisfaisants. Sur le tableau 3, on montre les avantages et les limites des « érodés ultimes ».

Tableau 3. Avantages et limites des « érodés ultimes »

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Image plus généralisée que celle obtenue par une classification par pixel	Peu de décisions arbitraires de l'opérateur	Urbanisme Aménagement Statistiques urbaines
Limites	Certains éléments linéaires tels que les petites rivières doivent être numérisés	Problèmes sur des canaux bruts ou néo-canaux (en niveaux de gris) car risques de non fermeture des contours. Problèmes liés à des éléments homogènes de taille importante (comme des lacs). Temps de calcul important	

La méthode de segmentation par les « érodés ultimes », permet d'obtenir des résultats de classification plus pertinents en milieu urbain, car ils introduisent, d'une certaine manière, la structure urbaine reconnue par les thématiciens. La méthode s'applique sans intervention dans la plupart des cas, même s'il est nécessaire de guider un peu l'algorithme au cours du traitement (numérisation d'éléments). La faiblesse du traitement réside dans le choix des canaux à utiliser et dans la configuration spatiale du site, de plus une optimisation des procédures est nécessaire pour diminuer le temps de calcul.

3.3. Les limites urbaines

La délimitation urbaine tient à l'heure actuelle une importance évidente dans un contexte de mise à jour des informations de contenu de l'espace urbain. En effet, même pour les pays développés, le coût et les délais inhérents aux recensements exhaustifs de population deviennent si importants qu'une réflexion sur les possibilités de sondages, notamment spatiaux, a été engagée. Cependant, pour satisfaire une telle demande, il convient peut-être aussi de renouveler les diverses définitions qui caractérisent un espace urbain délimité. Cette nécessité est d'autant plus importante que les différences de définitions, entre plusieurs pays européens par exemple, introduisent des biais qui entravent toutes possibilités de comparaison. Ainsi, la télédétection intervient à double titre dans cette préoccupation : d'une part en fonction des capacités d'élaboration de bases de sondage (DUREAU, 1995); d'autre part, en fonction des possibilités de délimitation d'un espace urbain continu bâti qui, en fonction de critères multiples, présente une enveloppe plus ou moins élastique aux contours plus ou moins flous (TREITZ *et al.*, 1992; WEBER, 1995a, b)

Parmi les approches susceptibles de fournir l'enveloppe urbaine et la détermination de l'importance des catégories résidentielles, quelques-unes totalement automatiques, offrent une flexibilité d'usage intéressante.

La délimitation de l'enveloppe urbaine peut être obtenue selon deux approches : d'une part, à partir d'une image panchromatique révélant la tache urbaine par opposition avec ses alentours et, d'autre part, à partir d'une image classée dont les catégories sont pondérées en fonction du modèle gravitaire du potentiel.

3.3.1. Délimitation urbaine à partir d'une image brute

Cette expérimentation a été appliquée sur Strasbourg à partir de trois images HRV (P, 15-09-1986, KJ : 50-252, 2B; XS, 28-06-1986, KJ : 50-252, 2B; XS, 08-05-1989, KJ : 51-252, 2B). Plusieurs possibilités sont envisageables dans le cadre de la délimitation et l'une des principales différences réside dans l'image initiale traitée. Il est possible de démarrer l'application sur un résultat de classification dont les catégories se calquent autant que possible sur des nomenclatures utilisées dans le cadre de dénombrements statistiques ou sur une image panchromatique (fig. 1).

Dans les deux cas les objectifs sont doubles et correspondent à des étapes différentes de l'expérimentation : 1) définition de l'enveloppe urbaine; 2) comparaison spatiale et statistique, entre le résultat obtenu et l'espace retenu par les organismes de recensement tel l'Institut national de statistique et des études économiques (INSEE).

L'utilisation du canal panchromatique du capteur HRV fournit la possibilité d'identifier l'espace urbain selon les ruptures entre le bâti continu et son hinterland, ainsi qu'à partir des éléments qui structurent cet espace bâti (zones homogènes, ruptures anthropiques ou naturelles, etc.). L'opérateur « context » utilisé correspond à un algorithme de détermination de texture sur niveaux de gris, selon une fenêtre 7 x 7. Sur cette image binarisée, des

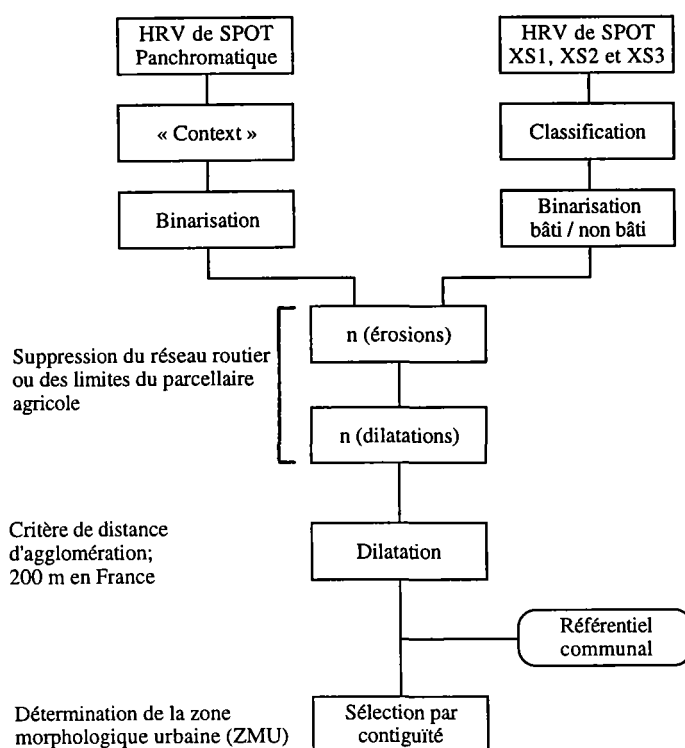


Figure 1. Schéma des procédures méthodologiques. Ce schéma reproduit la totalité des traitements appliqués pour la définition de la zone morphologique urbaine : d'une part à partir d'une image HRV (P) de SPOT et d'autre part à partir d'une image classée

opérateurs de morphologie mathématique de type érosion-dilatation, sont appliqués selon une fenêtre circulaire (afin d'optimiser la cohérence des contiguïtés).

Deux étapes sont ensuite différenciées : 1) une série d'érosions est appliquée afin d'éliminer ou de diminuer l'impact introduit par les réseaux de communication (routes, autoroutes) ou le parcellaire rural, suivi d'un nombre égal de dilatations afin d'obtenir un retour à la structure initiale; 2) suit une dilatation faite pour déterminer l'enveloppe urbaine. Cette extension correspond à la distance légale (en France de 200 m) qui doit séparer les éléments bâtis entre eux. Elle détermine leur appartenance à une agglomération urbaine de population caractérisée par la zone morphologique urbaine (ZMU) (WEBER *et al.*, 1995). Sur le tableau 4, on montre les avantages et les limites de la délimitation urbaine à partir du canal panchromatique du HRV.

La méthode fournit de bons résultats qui peuvent être intégrés comme des plans d'information dans un système d'information géographique (SIG). Les résultats sont pertinents dans une approche de statistique urbaine où la tâche urbaine est nécessaire. Cependant, comme tous traitements fondés sur une binarisation, il est nécessaire d'appliquer les opérateurs de morphologie mathématique sur une image initiale cohérente, ces opérateurs étant sensibles à une forte hétérogénéité. La trop grande taille des fichiers peut être un handicap.

Tableau 4. Avantages et limites de la délimitation urbaine à partir du canal panchromatique (HRV de SPOT)

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Délimitation souvent pertinente, le résultat peut être inclus dans un SIG	Assez simple au niveau morphologie mathématique	Statistiques urbaines
Limites	Nécessité de « nettoyer » l'image des résidus pouvant être liés au paysage agricole ou aux réseaux	Sensible à une très forte hétérogénéité Taille des fichiers	Critères multiples à tester

3.3.2. Délimitation urbaine à partir d'une image classée : la méthode du potentiel

Deux approches sont proposées, la première ne nécessite pas l'utilisation de données exogènes tandis que la deuxième utilise en plus de l'image, des données statistiques extérieures ainsi que les limites administratives s'y rapportant.

Le modèle gravitaire du potentiel est appliqué uniquement à l'emprise des différentes classes d'habitat. Il est calculé pour chaque pixel de l'image au moyen d'une fenêtre de convolution circulaire de grande dimension. Idéalement, la fenêtre ne doit jamais être totalement incluse au sein du masque de l'habitat. Les poids intervenant au numérateur du potentiel et affectant les différentes catégories d'habitat sont traduits par les valeurs moyennes des coefficients d'occupation du sol de ces classes.

Au terme du calcul, le potentiel de chaque pixel peut être transformé en pourcentage de potentiel et le champ de potentiel résultant de cette opération se présente sous forme d'une image de même taille et de même résolution que l'image classée initiale. La surface de potentiel est une surface thématique dont les sommets traduisent, dans ce cas, les concentrations d'habitat dense. Le potentiel maximum est atteint au centre de l'agglomération et le seuillage de cette surface permet de définir des courbes équipotentielles qui rendent l'allure digitée ou compacte de l'agglomération. D'autres traitements en aval du potentiel permettraient de délimiter les hinterlands de plusieurs agglomérations. Cette expérimentation est en cours sur l'image de Strasbourg (LAMBINON et DONNAY, 1995). Sur le tableau 5, on montre les avantages et les limites de la méthode du potentiel.

L'intérêt de la méthode réside dans les potentialités associées à la modélisation de la surface obtenue. Continue, celle-ci fournit un support de réflexion de traitements ultérieurs utilisable en aménagement de l'espace. De plus, elle offre une grande stabilité des résultats au prix cependant d'un temps de calcul qui reste à optimiser. Fondée sur une classification, elle reste tributaire de la variabilité éventuelle de cette dernière.

Tableau 5. Avantages et limites de la méthode du potentiel

	Thématique	Méthodologique	Application
Avantages	Passage d'une image discrète en une surface continue	Grande stabilité du modèle en fonction des poids utilisés	Urbanisme Aménagement
Limites	Disponibilité d'une classification	Temps de calcul important	

4. Conclusion

Cette première année de collaboration peut être considérée comme très positive pour chacun des laboratoires participants. Échanger, confronter, affiner ses hypothèses et défendre ses arguments, tout ceci résume assez bien une démarche scientifique normale qu'il est toujours avantageux de partager. La possibilité de pouvoir tester sur des sites multiples les procédures de traitement d'images habituellement en usage dans l'un ou l'autre laboratoire, facilite les remises en question, les nécessités de retour aux hypothèses qui ont induit ces choix. C'est dans une telle approche, que nous avons voulu essentiellement comparative, que les choix de procédures ont été faits. C'est dans cette optique que les possibilités de transfert sont envisagées. Il n'y a pas lieu de croire qu'un corpus méthodologique ne puisse être établi, cependant les règles d'applicabilité de certaines procédures de traitement nécessitent d'être clairement exposées.

Ces règles d'utilisation sont d'autant plus nécessaires que les sites présentent des différences importantes en terme d'environnement naturel (climatique, orographique, etc.) et en termes socio-économique et culturel. La transférabilité des procédures de traitement se veut donc graduelle en tenant compte des particularités générales induites par le milieu naturel, mais aussi social et culturel. En effet, si les finalités de gestion, de planification et d'analyse urbaine sont approximativement les mêmes sous toutes les latitudes, les conditions dans lesquelles se déroulent les recherches ou les applications ne sont pas du tout comparables. Il convient donc de bien s'assurer des modalités de transfert avant de pouvoir préconiser tel ou tel traitement. Des applications diversifiées sont nécessaires à l'obtention d'un corpus méthodologique opérationnel, applications offrant si possible une gamme suffisante de sites nécessitant ou non l'adaptation ou la transformation des traitements.

5. Références

- ABEDNEGO, B. 1989. Apport de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de génie rural, Lausanne, thèse de doctorat n° 806, 220 p.
- ABEDNEGO, B. and COLLET, C. 1992. A theoretical approach for vegetation change index based on non-corrected radiometric data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 4, p. 699-714.
- CARPER, J., LILLESAND, T. et KIEFER, R. 1990. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, n° 4, p. 459-467.
- COLLECTIF (SERTIT et URA 902). 1994. Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivée de l'imagerie SPOT dans le SIG de la ville de Mulhouse. Rapport d'étude MIRE de Mulhouse, Ministères de l'Environnement et de l'Équipement, 90 p.
- DONNAY, J.-P. 1992. Remotely sensed data contributes to GIS socioeconomic analysis. *GIS Europe*, vol. 1, n° 10, p. 38-41.
- DONNAY, J.-P. et LAMBINON, M. 1997. Détermination des limites d'agglomération par télédétection : discussion méthodologique et application au cas de Huy (Belgique). in J.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (éd.), *Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 239-246.

- DUREAU, F. 1995, Images satellite. présentation d'une nouvelle méthode de production d'informations sur les populations citadines. *in* F. Dureau et C. Weber (éd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 271-285.
- EUROSTAT. 1993. Délimitation des agglomérations urbaines par télédétection. Cahier général des charges, Luxembourg (non publié).
- LENCO, M. 1995. Étude des écosystèmes urbains des grandes agglomérations. *in* F. Dureau et C. Weber (éd.) Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Paris, p. 241-253.
- PELLEMANS, A., JORDANS, R. and ALLEWIJN, R. 1993. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, n° 1, p. 81-87.
- TERRETTAZ, P. 1992. Étude de l'occupation du sol et de son évolution à l'aide d'images numériques Landsat TM. Application à la région de Sion en Valais. Institut de géographie, Université de Fribourg, Fribourg, 118 p.
- TERRETTAZ, P. et COLLET, C. 1997. Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse). *in* J.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.), Télédétection des milieux urbains et périurbains, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 123-131.
- TREITZ, P. M., HOWARTH, P. J. and GONG, P. 1992. Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural fringes : a case study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, n° 4, p. 439-448.
- WEBER, C. 1995a. Télédétection des milieux urbains et périurbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. Rapport d'activité de l'action de recherche partagée X/1.20.04/01/94.18.0, 55 p. + 16 figures.
- WEBER, C. 1995b. Limites urbaines et processus d'urbanisation. Rapport PNTS 94N50/0358, 30 p.
- WEBER, C., HIRSCH, J. et SERRADJ, A. 1997. Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France). *in* J.M. Dubois, J.P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (réd.), Télédétection des milieux urbains et périurbains, Collection Actualité Scientifique, Éditions AUPELF-UREF, p. 225-237.

14

Essai de différenciation des quartiers de Yaoundé à l'aide d'une image HRV de SPOT

RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO

*Laboratoire de recherche sur les images géographiques (IMAGÉO-CNRS),
191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France;
téléphone : +33 (1) 44-32-14-85; télécopieur : +33 (1) 43-29-63-83;
CÉ : assako.a@minitel.refer.org*

Résumé

L'analyse de la typologie des quartiers implique non seulement les caractéristiques urbanistiques (matériaux de construction, composition architecturale, structuration du bâti), mais aussi l'identité socio-fonctionnelle (caractéristiques démographiques des quartiers, niveau de vie des habitants, appartenance professionnelle). Le support d'analyse est une image HRV (XS) de SPOT de la ville de Yaoundé. Après la mise en forme des données (identification, extraction et concaténation des quartiers-témoins) garantissant l'uniformité des traitements pour tous les quartiers, l'analyse a été faite en deux phases. La première a consisté à rechercher la différenciation des quartiers à travers quelques paramètres structuraux de l'organisation de l'espace urbain (extraction du réseau routier, calcul de l'indice de brillance en vue d'apprécier la densité du bâti par quartier, classification non dirigée améliorée par un filtrage dans une fenêtre 3 x 3 pour apprécier la composition interne des quartiers). La deuxième a porté sur la réalisation d'une composition colorée de canaux brutes dont les résultats ont été directement comparés avec des photographies aériennes obliques prises à basse altitude. Cette étude aboutit à deux conclusions intéressantes : 1) l'intérêt de l'imagerie HRV (XS) dans l'analyse des villes africaines, malgré une résolution géométrique de 20 m et une résolution spectrale limitée à deux bandes fortement corrélées dans le visible (vert-jaune et rouge) et une bande dans le proche infrarouge; 2) les limites techniques et thématiques de la télédétection urbaine.

1. Introduction

Deux ordres d'aspects complémentaires définissent la typologie des quartiers. D'abord, les aspects physiques définissent la composition urbanistique : texture et structure du bâti, densité du couvert végétal, formes et coefficient d'occupation de l'espace. Ensuite, la composition socio-fonctionnelle détermine la composition sociale, l'identité fonctionnelle, le niveau de vie des habitants et le degré de confort de l'habitat. Pour saisir cette dualité, la télédétection urbaine se doit de prendre en compte à la fois des caractéristiques spatiales et spectrales des données satellitaires (COLLET, 1989). À ce titre, l'utilisation d'une seule image HRV (XS) risquait de poser des problèmes, du fait de sa résolution spatiale de 20 m et de l'insuffisance de l'information spectrale. Mais, ces lacunes ont été compensées par une bonne connaissance du site d'étude.

2. Site d'étude

L'étude porte sur la ville de Yaoundé, capitale du Cameroun, située dans la province dite du Centre, à environ 200 km de la côte atlantique (au sud-ouest) et des frontières avec le Gabon et la Guinée Équatoriale (au sud). Avec un taux de croissance annuelle d'environ 7,5 %, sa population est aujourd'hui estimée à plus d'un million d'habitants (ASSAKO ASSAKO, 1996).

Le statut municipal a beaucoup évolué depuis la période coloniale. La ville a successivement été « commune mixte urbaine », « commune urbaine de plein exercice » et « commune urbaine ». Le statut municipal actuel est celui d'une « communauté urbaine » divisée en six communes d'arrondissements et ayant à sa tête un délégué du Gouvernement nommé par décret présidentiel.

De la période coloniale au début des années 70, Yaoundé a connu un dualisme urbanistique opposant le centre administratif aux quartiers populaires environnants, anciens villages périurbains aujourd'hui absorbés par la rapide croissance spatiale de la capitale.

Depuis les années 1970 se développent deux autres types de quartiers : les quartiers résidentiels haut de gamme ou riches et les quartiers lotis. Les premiers, d'un habitat généralement pavillonnaire, résultent de la volonté de l'État ou de grands groupes industriels de loger leurs cadres dans des conditions décentes. C'est le cas du quartier dit du lac, lieu de résidence des hauts cadres de l'État, ou de Bastos, logeant les cadres de la manufacture des tabacs qui a donné son nom au quartier. Les deuxièmes, où se mélangent immeubles et maisons individuelles, résultent de la volonté des pouvoirs publics de lutter contre l'urbanisation anarchique. Dans cette optique, des lotissements ont été construits ou sont en cours de réalisation sur des terrains vacants (Biyemassi et son prolongement vers Nsimenyong et Mendong) ou en restructuration d'anciens quartiers populaires (Essos).

3. Matériel et méthode

3.1. Image et outils de traitement

Le support d'analyse est une image numérique HRV (XS) du 7 février 1992 dont les caractéristiques sont décrites sur le tableau 1.

Tableau 1. Les caractéristiques de l'image HRV (XS) de SPOT de Yaoundé du 07-02-1992

Satellite	SPOT
Capteur	HRV1
Date d'enregistrement	07-02-1992
Heure d'enregistrement	9 h 33 mn 23 s
Coordonnées de l'image sur la grille SPOT	K=85; J=342
Coordonnées géographiques de l'image	Latitude : 03°04' N - 04°19' N Longitude : 11°29' E - 12°08' E
Surface totale couverte	60 km x 60 km
Niveau de correction	1B
Mode d'enregistrement	Multibande (XS)
Nombre de canaux	3
Identification des canaux	XS1, XS2, XS3

Les traitements dont les résultats sont présentés plus loin ont été effectués sur station SUN, grâce à une série d'algorithmes proposés par le logiciel *Planètes* développé à l'ORSTOM.

3.2. La méthode : une navette entre l'image et le terrain

Lors de l'élaboration de la méthode, deux problèmes se posaient : la résolution de 20 m n'était pas assez précise pour le suivi de formes d'affectation du sol de petite taille, dominantes à Yaoundé; d'autre part, avec une seule image, il n'était pas possible d'engager une approche dynamique des paysages urbains. Il fallait donc concevoir une méthode qui, en maximisant l'exploitation de l'information satellitaire, s'appuie sur une solide connaissance de la ville. C'est l'enjeu de la méthode navette où les traitements informatiques de l'image, le travail sur le terrain et l'image-interprétation visuelle se complètent de manière synergique (fig. 1).

Les traitements *a priori* ont permis d'obtenir un certain nombre de documents analogiques (composition colorée, classifications non dirigées, analyses factorielles) dont le zonage a été amélioré, validé ou invalidé par des observations sur le terrain. Les traitements *a posteriori* ont permis d'intégrer la réalité de terrain, ce qui a permis de mener des traitements dirigés, de rendre les nomenclatures plus expressives et d'améliorer la différenciation des tissus urbains.

4. Traitements, résultats et discussion des résultats

La figure 14-2 (voir cahier couleur) représente les quartiers-témoins affectés chacun d'un numéro de reconnaissance, tels qu'ils ont été identifiés sur l'image et systématiquement reconnus sur le terrain. Ces quartiers ont été choisis parce que manifestement différents les uns des autres.

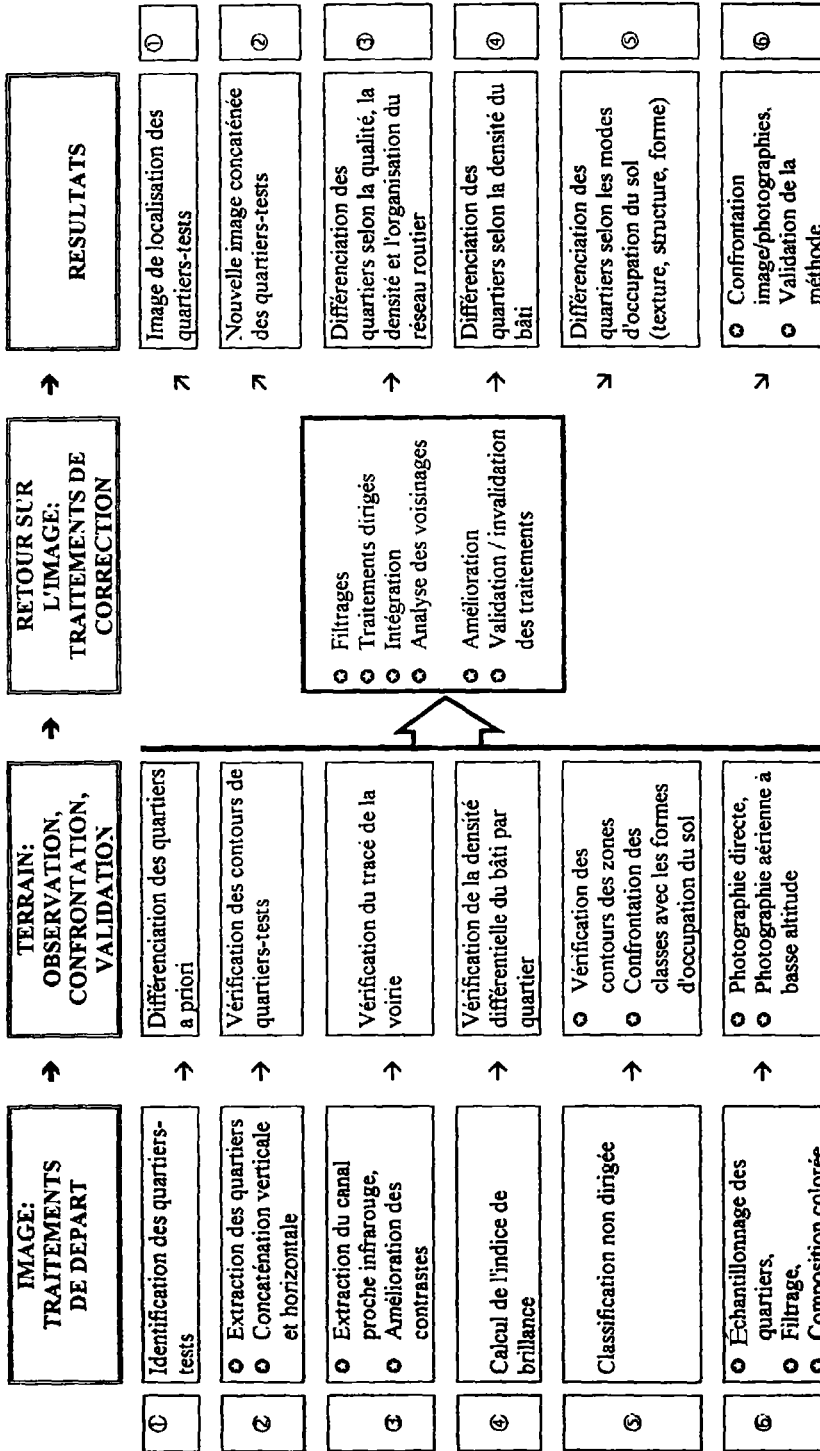


Figure 1. Méthode « Navette image-terrain » pour la différenciation des quartiers de Yaoundé

La plupart des analyses de la composition urbaine utilisant l'imagerie satellitaire se font en deux phases successives. La première consiste à isoler les espaces véritablement bâtis ou l'enveloppe urbaine, alors que la deuxième essaie de partitionner cette enveloppe pour en distinguer les différentes composantes (ZHAO, 1986).

Ici, travaillant sur des quartiers-témoins, l'importance est plutôt donnée à certains paramètres structuraux dont l'étude permet d'esquisser certains regroupements. Il s'agit notamment de la desserte routière, de la densité du bâti et de l'organisation de l'occupation de l'espace à l'intérieur des quartiers. Une confrontation directe entre l'image composition colorée et des photographiques aériennes obliques prises à basse altitude a apporté plus de précision dans cette différenciation. Cette étape a également permis de mener une analyse individuelle des quartiers.

4.1. Recherche de la différenciation des quartiers à travers quelques paramètres de la composition urbaine

4.1.1. L'extraction du réseau routier

Certaines longueurs d'onde sont plus aptes que d'autres pour mettre en évidence certains phénomènes. Il en est ainsi du canal proche infrarouge XS3 (0,71 - 0,79 μm) qui, à la suite d'une amélioration des contrastes, a permis de ressortir le réseau minéral routier : organisation du réseau et qualité des voies.

Le résultat de ce traitement permet de définir trois types de quartiers : le centre-ville (1), les quartiers moyennement desservis (2, 3 et 4) et les quartiers « enclavés » (5 et 6) (fig.3).

Le centre-ville (1) est aussi le centre du réseau digité des voies routières de Yaoundé. Il connaît la densité du réseau la plus élevée de tout le tissu urbain. Sur le plan qualitatif, il est desservi par les voies les plus larges et comporte le nombre le plus élevé de voies asphaltées.

Les quartiers moyennement desservis : Bastos (2), Essos (3) et Briqueterie (4), sont traversés par quelques voies principales.

Les quartiers « enclavés » se trouvent également à être les quartiers périphériques, que ce soit Ekounou (5) ou Biyemassi (6). En réalité, cet enclavement est relatif, surtout en ce qui concerne Biyemassi, quartier bien desservi, y compris par des voies asphaltées. Mais comme la plupart des voies ont une largeur inférieure à la résolution géométrique du capteur HRV (XS), elles n'ont pu être identifiées. Lors des observations de terrain, nous avons vérifié que des routes goudronnées ayant une largeur de 7,5 m étaient absentes de l'image.

4.1.2. La densité du bâti et la différenciation des quartiers

La densité du bâti détermine le degré d'artificialisation de l'espace et donc la densité de l'occupation du sol. Elle renseigne sur l'âge des quartiers. Elle permet donc, avec d'autres critères, de retracer l'histoire urbaine, en opérant une distinction entre les quartiers anciens (souvent plus denses), les nouveaux quartiers en voie de densification et les fronts d'urbanisation. Cette densité est donnée par l'indice de brillance (IB) suivant la formule :

$$IB = \sqrt{(XS3)^2 + (XS2)^2}$$

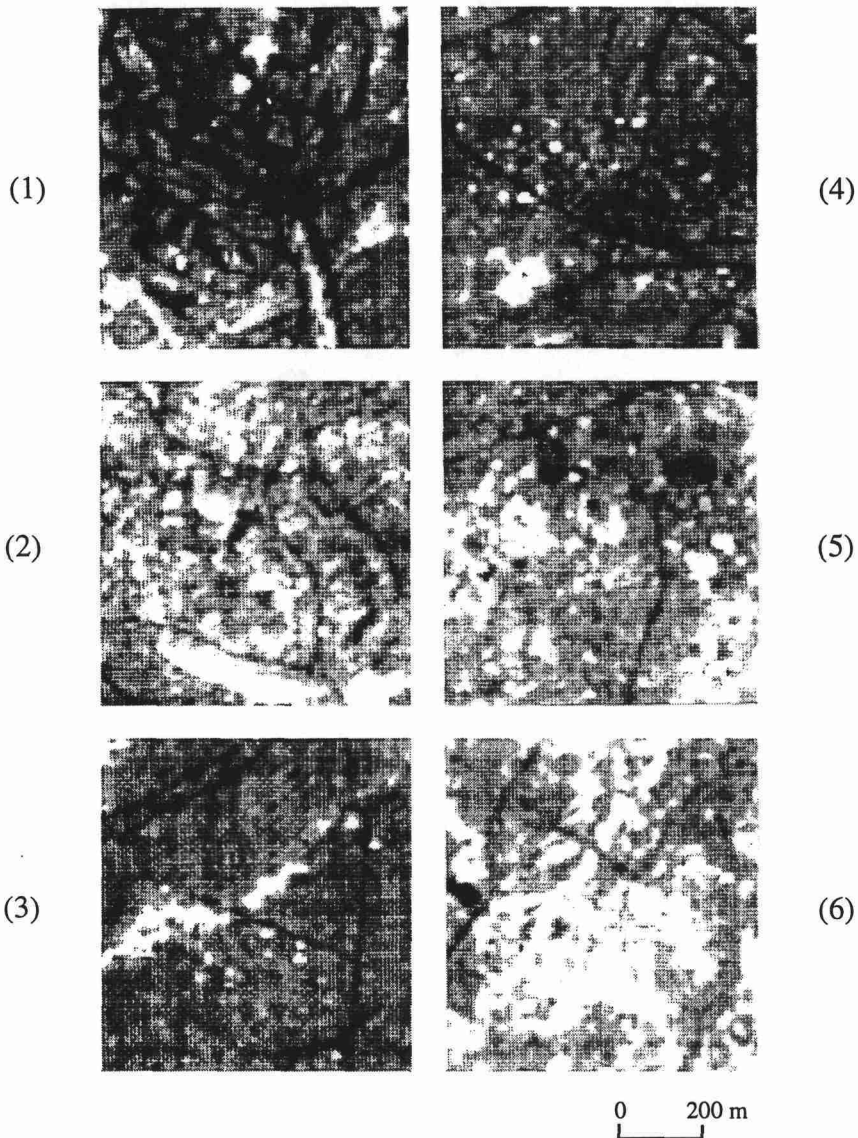


Figure 3. Le canal proche infrarouge et la différenciation des quartiers : 1) le centre-ville; 2) Bastos; 3) Essos; 4) Briqueterie; 5) Ekounou; 6) Biyemassi

Le résultat de ce traitement (fig. 14-4, voir cahier couleur) permet de hiérarchiser les quartiers en fonction de la densité du bâti. En effet, grâce à la méthode de segmentation de l'histogramme présentée en légende de la figure 14-4 (voir cahier couleur), il a été possible de distinguer entre les quartiers de forte, moyenne ou faible densité de bâti.

Ainsi, Briqueterie (4) et Biyemassi (6) apparaissent comme les quartiers les plus densément bâtis. Pour le premier, la densité est réelle. C'est l'un des plus grands foyers d'urbanisation populaire anarchique. Les maisons poussent partout où le terrain est

disponible et ne sont séparées que par d'étroites venelles, ce qui donne un pût de maisons très compact. Pour le deuxième, la densité révélée par l'image est plus relative. Les observations sur le terrain et les photographies aériennes ont montré que la forte réflectance qu'on observe dans cette zone tient plus de l'âge des bâtiments que de la densité de leur implantation. En effet, Biyemassi (6) et son prolongement vers Nsimeyong et Mendong constituent un vaste chantier immobilier où la plupart des bâtiments ont des tôles neuves sur leur toit. Or, la tôle, lorsqu'elle n'est pas recouverte de pouss  re (comme c'est le cas des constructions anciennes en fin de saison sèche), est un matériau particulièrement r  flectant. Dans ces conditions, l'indice de brillance risque donc d'exagérer la réalité.

Le centre-ville (1) et le quartier loti d'Essos (3) comptent parmi les quartiers de densité moyenne. Cette situation est liée à la présence de larges coupures vertes, à la faveur des vallées agricoles et des jardins de case, même au centre-ville. On y remarque alors une présence significative de la teinte jaune, traduction des espaces mixtes, à la jonction du végétal et du minéral, pour ce traitement.

Bastos (2) et Ekounou (5) comptent parmi les quartiers de plus faible densité du bâti. Pour le premier, il s'agit d'un habitat de type pavillonnaire, avec des maisons entourées de vastes jardins. Le deuxième est plutôt un front d'urbanisation encore timide dans son avancée. L'artificialisation de l'espace est certes amorcée mais elle demeure contrebalancée par un couvert végétal encore largement verdoyant.

4.1.3. L'organisation de l'occupation de l'espace et la différenciation des quartiers : classification non dirigée

Pour apprécier l'organisation de l'occupation du sol, nous avons procédé à une classification non dirigée en 4 classes. Elle permet d'apprécier la composition interne des quartiers de manière globale, grâce à une approche zonale et    un nombre de classes expressément réduit. Le résultat de cette classification a ensuite été amélioré par un traitement de voisinage en utilisant une fenêtre de taille 3 x 3.

Le résultat de cette classification (fig. 14-5, voir cahier couleur) donne deux informations principales : la présence des espaces verts dans les quartiers et l'état de l'urbanisation.

Dans le premier cas, on note un net recul de la végétation dans les quartiers populaires d'habitat précaire [cas de la Briqueterie (4)] ou même des quartiers lotis, ceux-ci servant souvent de support à une urbanisation anarchique, notamment au voisinage immédiat des lotissements ou dans les interstices séparant les espaces légalement construits [cas d'Essos (3)]. Par contre, les espaces verts se conservent mieux dans le centre-ville (1) et dans les quartiers pavillonnaires [Bastos (2)]. Dans les quartiers périphériques, lotis ou populaires, la présence d'une importante couverture végétale est surtout liée à la timidité de l'avance du front d'urbanisation.

La classe « bâti nouveau ou très r  flectant » désigne des zones nouvellement construites ou réhabilitées.    cet effet, elle montre bien le dynamisme urbanistique des fronts d'urbanisation [Biyemassi (6) et Ekounou (5)] et des quartiers populaires d'habitat précaires [Briqueterie (4)]. Cet aspect touche aussi les quartiers pavillonnaires haut de gamme [Bastos (2)], mais    une moindre mesure. Les quartiers anciens et lotis ne sont que faiblement concernés par ces mouvements. Ainsi, cette classe est insignifiante dans le centre-ville (1) ou à Essos (3), soit parce que la législation foncière est plus stricte, soit parce que les terrains constructibles sont moins disponibles.

4.2. Comparaison directe : composition colorée - photographies aériennes obliques

La composition colorée obéit à une logique élémentaire. Plutôt que de travailler par zones, l'image est analysée pixel par pixel. Ceci implique donc une intervention décisive de l'image-interprétation.

La composition colorée a permis de valider la plupart de nos résultats, grâce à une confrontation directe de l'image aux photographies aériennes obliques prises à basse altitude (fig. 14-6 à 14-9, voir cahier couleur). Une appréciation individuelle des quartiers était ainsi rendue possible.

4.2.1 Centre-ville

Le centre-ville (fig. 14-6, voir cahier couleur) est en même temps la façade symbolique du Cameroun tout entier. C'est le pôle administratif, le lieu de concentration de la plus grande activité commerciale de toute l'agglomération. C'est aussi le lieu de fréquentation touristique le plus prisé. Tout cela se traduit, par de vastes ensembles immobiliers cossus : immeubles ministériels, grands services de l'État, grands bâtiments hôteliers entrecoupés par des larges espaces verts tantôt naturels (parcs) tantôt anthropiques (cas des vallées agricoles).

4.2.2. Quartier Bastos

Bastos (fig. 14-7, voir cahier couleur), quartier résidentiel très chic, se développe autour de l'usine de manufacture des tabacs. L'habitat est de type pavillonnaire de haut de gamme et réservé aux couches urbaines aisées. D'abord lieu de résidence des hauts cadres de l'entreprise, Bastos voit de plus en plus arriver des couches urbaines riches de tous les secteurs professionnels, capables de payer des loyers élevés.

4.2.3. Quartier Essos

Essos (fig. 14-8, voir cahier couleur) est un quartier de lotissements anciens qui connaît une densité d'occupation du sol élevée. En effet, à l'intérieur et surtout au voisinage des lotissements se développe une urbanisation populaire et précaire. C'est ainsi que les quartiers de ce type, sur le plan social, sont le lieu de résidence des couches urbaines moyennes et pauvres. La végétation se confine dans quelques vallées dont l'irrégularité témoigne d'une avancée des constructions dans des zones inondables.

4.2.4. Quartier Briqueterie

La Briqueterie (fig. 14-9, voir cahier couleur) est un quartier populaire d'habitat précaire. Les constructions sont disposées dans le plus grand désordre. Le taux d'occupation de l'espace est le plus élevé de toute la ville. Les rares espaces verts qu'on trouve ici ne témoignent en rien du confort de l'habitat. Il s'agit simplement des jardins de case sur des lopins de terre en attente d'une conjoncture financière favorable pour recevoir une maison. Ici s'entassent, en priorité, des citadins pauvres. Mais, de plus en plus s'y installent des citadins assez fortunés non seulement pour réaliser des économies en payant des loyers plus bas mais aussi pour bénéficier de l'ambiance et de l'animation qu'on ne trouve pas dans les quartiers riches.

5. Conclusion

On constate l'intérêt de l'imagerie HRV pour mettre en évidence la différenciation spatiale et sociale des quartiers. Dans les villes africaines notamment, elle peut servir à combler l'absence de documents sur l'occupation du sol. Ce serait d'un apport inestimable pour la conduite des politiques de gestion urbaine et d'aménagement. Cette différenciation urbaine serait plus précise et plus fiable en utilisant une image panchromatique, dont la résolution spatiale est de 10 m.

Il aurait aussi été intéressant de mener une analyse dynamique du paysage urbain. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de plusieurs images de la ville à des dates différentes. Ici, on est confronté à deux problèmes majeurs. Il s'agit d'une part de la rareté des images de bonne qualité sous les latitudes équatoriales, compte tenu de fortes et quasi permanentes perturbations atmosphériques. D'autre part, quand bien même ces images seraient disponibles, il se posera ensuite le problème du coût de leur acquisition.

Malgré cet intérêt, l'imagerie HRV (XS) présente des limites certaines en matière d'analyse urbaine. Les images n'ont pas encore la précision des photographies aériennes auxquelles les professionnels de l'urbanisme sont habitués. Le travail de terrain et l'intégration des informations de sources exogènes demeurent donc indispensables.

6. Références

- ASSAKO ASSAKO, R.-J. 1996. Contribution à la création d'un observatoire urbain utilisant la télédétection et les données géo-référencées à Yaoundé (Cameroun). Thèse de doctorat, Université de Paris X – Nanterre, 327 p.
- COLLET, C. 1989. L'utilisation des images satellitaires dans l'analyse urbaine (Lausanne, Suisse). Photo-Interprétation, n° 89-5 et 6, p. 73-77.
- ZHAO, R. 1986. Types de quartiers urbains à Nanjing (Chine) d'après Landsat. Photo-Interprétation, n° 86-5, p. 29-35.

15

Apport de la télédétection et des SIG à la gestion urbaine : cas de Ouagadougou (Burkina Faso)

NOUROU MOUCHARAF PADONOU ¹, MAMADOU SINÉ CAMARA ¹ et MAMADOU SÉKOU KEITA ²

¹ *Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO), B.P. 1762, Ouagadougou, 01 Burkina Faso; téléphone : +226 36-75-01; télécopieur : +226 30-09-71*

² *Direction de la cartographie et de la topographie (DCT), B.P. 240, Bamako, Mali*

Résumé

Les possibilités offertes par la télédétection et les SIG permettent de nos jours de mieux appréhender les problèmes urbains complexes. La présente étude vise à montrer la performance de ces outils et leur complémentarité pour l'analyse de l'espace urbain. L'interprétation visuelle de l'image HRV (P + XS) de SPOT de Ouagadougou a donné les résultats suivants : 1) la carte des structures linéaires sur laquelle apparaissent les cours d'eau, les voiries, les réseaux routiers et ferroviaires; 2) la carte de l'occupation des sols sur laquelle apparaissent les retenues d'eau et barrages, la végétation, les habitats, les zones industrielles et les équipements. Le croisement de ces résultats avec des données exogènes (démographiques, culturelles, etc.) au moyen du logiciel ARC-INFO nous a permis de réaliser la carte d'occupation du sol urbain à partir de laquelle on pouvait mieux saisir les mécanismes de développement des habitats spontanés dans la zone périurbaine. L'apport de cette cartographie a été surtout de pouvoir mesurer la croissance spatiale de Ouagadougou et de fournir une base rigoureuse et actualisée de sondage pour les enquêtes statistiques diverses. De nombreuses utilisations peuvent être faites de ces documents notamment le diagnostic des zones d'habitats spontanés et la mise à jour des cartes de base souvent anciennes. Par cette étude, nous mettons en évidence une nécessaire association d'outils pour mener à bien un travail thématique basé sur la connaissance des phénomènes urbains.

1. Introduction

Le Centre régional de télédétection de Ouagadougou (CRTO), dont la principale mission est de promouvoir la télédétection et les SIG à travers la formation et l'assistance aux utilisateurs, est également engagé dans la recherche de méthodologies appropriées dans la mise en œuvre des projets axés sur ces techniques. Ce travail est mené en étroite collaboration avec la Direction de l'urbanisme et de l'habitat et l'Institut géographique du Burkina Faso. C'est dans ce cadre que nous avons conduit la présente étude.

Dans les pays en développement, les données fiables en matière d'urbanisme et indispensables pour des réflexions relatives à l'amélioration des conditions de vie, sont rarement disponibles et souvent obsolètes, car les moyens traditionnels de collecte de l'information sont hors de portée des principaux responsables de la planification. Par rapport aux qualités prouvées des photographies aériennes, l'avènement des données HRV du satellite SPOT, dont la résolution au sol atteint 10 m en mode panchromatique (P), permet d'élaborer rapidement des documents utiles à la planification et aux études urbaines. D'autre part, le développement récent des SIG avec l'essor de l'informatique a fortement contribué à améliorer la connaissance des scénarios de développement urbain.

L'étude consiste à tester les possibilités opérationnelles de l'imagerie HRV et des SIG pour la gestion et le suivi des dynamiques urbaines. Elle a pour objectifs d'évaluer la capacité des données HRV à se substituer aux photographies aériennes pour une cartographie de l'espace urbain et de rechercher une méthodologie souple d'appréhension de la gestion urbaine par la télédétection et les SIG.

2. Cadre de l'étude

Pour cette recherche méthodologique nous avons retenu la ville de Ouagadougou (12° 25' N; 1° 30' O), capitale du Burkina Faso. La ville de Ouagadougou qui s'est édifiée au cœur du plateau central « mossi » est caractérisée par sa monotonie et son faible relief (250 à 300 m d'altitude moyenne). Elle s'est développée autour du palais du roi des « mossi » à partir du regroupement de quelques villages. Ce noyau, qui fut agrandi de bâtiments administratifs pendant la colonisation, a connu une évolution prodigieuse passant de 2 000 ha en 1957 à 20 000 ha en 1992. Quant à la population, elle passa de 60 000 habitants en 1960 à 890 000 habitants en 1990. Cette croissance galopante de la ville se conjugue avec un développement anarchique des habitats spontanés. Elle s'est surtout accompagnée d'une dégradation du couvert végétal et de la progression des zones rurales périphériques en direction de la ville. La zone urbanisée de Ouagadougou, limitée dans les années 1980 au nord par les trois barrages, et à l'est par l'aéroport international, a largement dépassé ces limites.

3. Approche méthodologique

La méthodologie d'analyse retenue pour cette étude comprend six étapes : 1) l'image-interprétation de l'image HRV (P+XS) à l'échelle du 1: 40 000 du 17 septembre 1992; 2) la photo-interprétation des photographies aériennes de la mission 89095 IGB de novembre 1988 à l'échelle moyenne du 1: 10 000 pour l'obtention des détails et les enquêtes de terrain; 3) la classification de l'image HRV (P + XS) pour obtenir la carte zonale de

l'occupation du sol urbain; 4) le transfert des données de télédétection et des données auxiliaires dans un SIG au moyen du logiciel Arc-Info par digitalisation des cartes zonales et des structures linéaires; 5) le codage des différents fichiers sous forme de référentiel cartographique permettant le repérage des uns par rapport aux autres; 6) le croisement des données vectorielles permettant l'analyse et la réalisation de la carte de synthèse nommée carte d'occupation du sol urbain.

Un plan guide de la ville de Ouagadougou édité en 1987 par la Direction de l'habitat de 1994 (fig. 1) et des cartes topographiques de la ville à l'échelle du 1: 25 000 ont été également exploités pour cette étude.

Les photographies aériennes ont permis d'identifier les détails qui ne sont pas perceptibles sur l'image satellitaire et de limiter les sorties de terrain.

4. Résultats de l'image-interprétation

L'image-interprétation est fondée sur l'exploitation visuelle de l'image HRV (P + XS) en composition colorée et a été réalisée suivant l'approche analogique. L'échelle de l'image restituée par croisement des données multibandes (XS) et panchromatiques (P) est de 1: 40 000 avec une résolution géométrique de 10 m. Les éléments qui ont été cartographiés sont regroupés à l'intérieur des sections suivantes : les structures linéaires et les éléments d'occupation du sol.

4.1. Les structures linéaires

En s'appuyant sur les critères d'identification fondés sur les notions de texture (forme, couleur, taille) et de structure, on a pu distinguer quatre types de structure linéaire : 1) le réseau hydrographique; il apparaît dans le prolongement des retenues d'eau et est difficilement cernable avec un aspect discontinu; 2) les voiries primaires (routes principales et canaux d'assainissement); elles apparaissent plus clairement avec une tonalité plus foncée; 3) les voiries secondaires (routes en terre et pistes); elles apparaissent moins nettement que les précédentes avec une tonalité moins foncée; 4) les voies ferrées; elles s'identifient sur l'image par un tracé fin et continu. Les critères d'identification des structures linéaires sont présentés sur le tableau 1.

4.2. Les éléments d'occupation du sol

Les critères d'identification des types d'occupation du sol sont présentés sur le tableau 2.

4.2.1. Les plans d'eau

Les plans d'eau constituent un élément caractéristique du paysage urbain de la ville de Ouagadougou et s'identifient par un bleu sombre sur l'image pour les deux premiers barrages et un bleu clair pour le troisième barrage. Cet aspect du troisième barrage permet d'affirmer que l'eau était turbide au moment de la prise de vue. Cette turbidité pourrait provenir de la présence des particules en suspension.

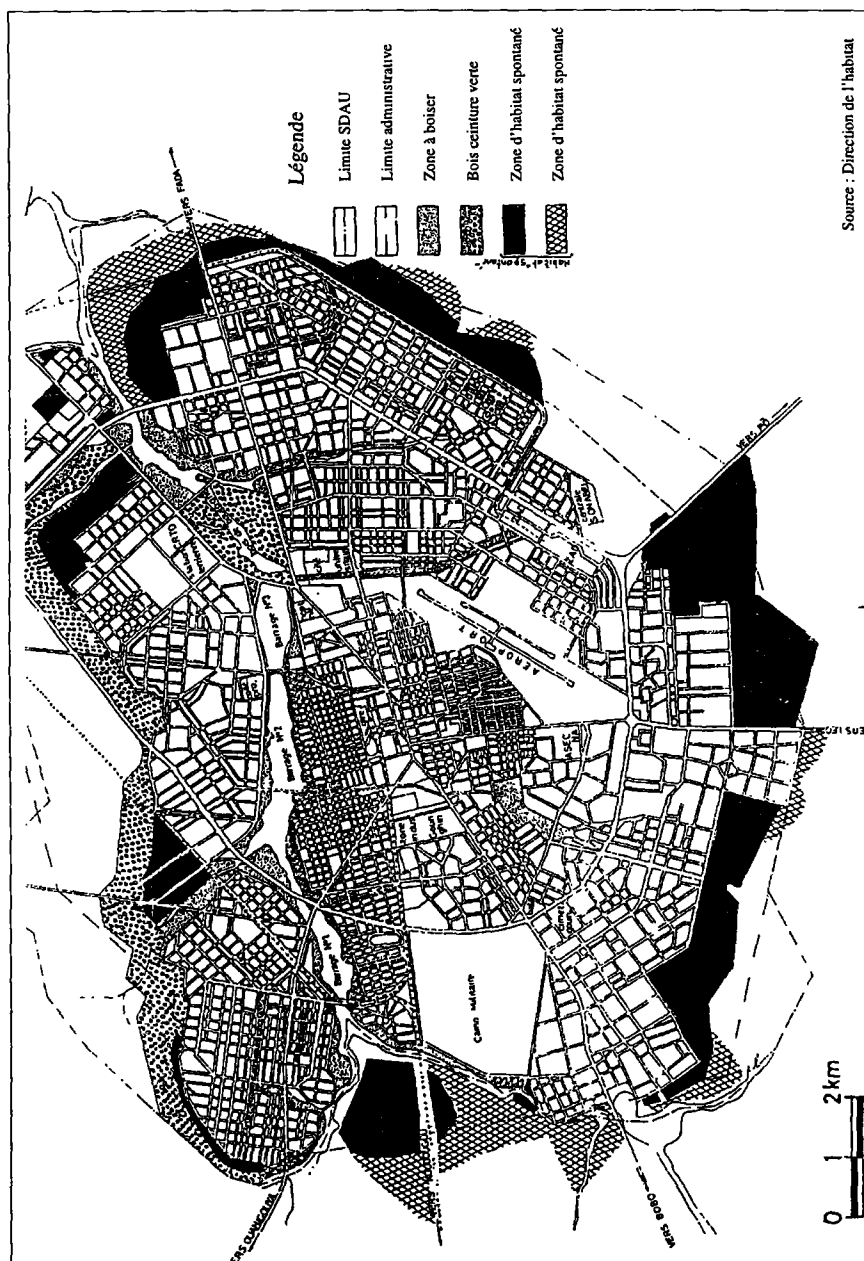


Figure 1. Plan de la ville de Ouagadougou

Tableau 1. Critères d'identification des structures linéaires

Classe	Description	Couleur
Voirie primaire (route principale revêtue)	Tracé continu avec une visibilité claire	Bleu-vert sombre
Voirie secondaire (route en terre, piste)	Tracé discontinu à emprise peu cernable	Bleu-vert clair
Chemin de fer	Tracé fin avec une bonne visibilité	Vert-bleu et rouge clair
Cours d'eau	Tracé à forme irrégulière difficilement cernable	Bleu-vert clair et peu sombre

4.2.2. La végétation

La végétation apparaît sur l'image en une texture très variable suivant sa densité et sa position; sur cette base nous avons procédé à une classification hiérarchisée à savoir : 1) les zones à végétation très dense qui apparaissent en rouge sombre et vif; 2) les zones à végétation basse qui sont en rouge clair avec des points blancs; 3) la végétation périurbaine, qui entoure la ville et qui constitue la réserve foncière, apparaît avec une couleur hétérogène (rouge, bleu-vert et taches blanches) sur l'image.

4.2.3. Les zones résidentielles et habitats

Les zones résidentielles et habitats sont caractérisés par trois types de tissus à savoir : 1) le centre urbain où les structures de bâtiments apparaissent en grandes dimensions sous une couleur dominante bleu-vert avec des taches blanches par endroits; 2) les anciens quartiers apparaissent en couleur bleu-vert sombre, ce qui caractérise la densité des habitats; 3) les habitats spontanés qui se situent à la limite de la zone urbaine, s'identifient par leurs aspects non structurés avec une couleur bleu-vert clair et magenta.

4.2.4. Les zones industrielles et les équipements

Les zones industrielles s'identifient aisément par les grands bâtiments (usines) qui apparaissent en bleu sur un fond rouge symbolisant la présence de végétation dans les parcelles.

Les équipements (terrains de sport, hippodrome, etc.) apparaissent sous forme de rectangle à fond rouge vif (terrains de sport), circulaire à fond blanc (hippodrome) et sombre (aéroport).

5. Résultats de l'intégration des données dans un SIG

L'exploitation analogique de l'image HRV ne suffit pas pour tirer des conclusions qualitatives souhaitées concernant la couverture et l'utilisation des sols urbains. Aussi les résultats obtenus à partir de cette interprétation, à savoir la carte des structures linéaires et celle de l'occupation du sol ainsi que les données relatives à la population, à l'historique de la ville et à la statistique, ont été intégrés dans un SIG au moyen du logiciel Arc-Info.

Tableau 2. Critères d'identification et évaluation de la superficie des différents types d'occupation du sol

Classe	Forme	Couleur	Surface (ha)	Pourcentage (%)
Habitat dense	Texture très dense	Bleu-vert et bleu sombre	1 752,17	9,83
Habitat de moyenne et basse densités	Petit carré peu dense et pointillé	Bleu-vert et rouge claire	5 741,57	32,22
Habitat boisé	Texture hétérogène et petit carré peu dense	Dominante rouge, teinte bleu-vert	728,21	4,09
Centre urbain	Large rectangle texture moyennement dense	Dominante bleu-vert, sombre et blanc	151,34	0,85
Habitat spontané	Pointillé très dispersé	Bleu-vert et rouge claire	884,62	4,96
Zone industrielle	Grand rectangle et structure hétérogène	Bleu sombre et rouge	231,68	1,30
Équipement	Rectangle et large structure	Bleu sombre et rouge	367,94	2,06
Zone à végétation très dense	Texture dense et homogène	Rouge sombre et rouge vif	1 536,67	8,62
Zone à végétation dense	Texture moyennement dense et peu homogène	Rouge vif dégradé	2 413,91	13,55
Zone à végétation basse	Texture très clairsemée	Pointillés rouges très dégradés	498,08	2,80
Végétation périurbaine	Texture hétérogène et dégradée	Bleu-vert clair et rouge peu sombre	3 025,57	16,99
Plan d'eau	Texture homogène et dense	Bleu sombre, bleu clair et rouge	426,21	2,39
Sol nu	Structure homogène	Tache blanche	60,60	0,34
			17 818,57	100,00

Ce logiciel fonctionne en modes « raster et vecteur » et manipule les unités fondamentales de la représentation cartographique en mode « vecteur » en assurant la numérisation, le dessin, et le traitement cartographique. Il permet aussi par un module « Info » d'emmagasiner, de croiser et d'analyser les informations. À partir donc de la manipulation des différents modules (saisie, traitement et restitution) de ce logiciel, nous avons établi une carte d'occupation du sol (fig. 15-2, voir cahier couleur). L'évaluation de la superficie des différents types d'occupation du sol est présentée au tableau 2.

6. Discussion et analyse

L'utilisation de la chaîne opérationnelle télédétection-SIG a eu pour intérêt de fournir une base de sondage rigoureuse et à jour pour des enquêtes statistiques diverses (démographiques, socio-économiques, etc.) et de mesurer la croissance spatiale de la ville en vue de la définition d'une politique de gestion rationnelle. Correctement mise en œuvre, elle donne un outil efficace de gestion et d'aide à la décision. Cependant, l'image HRV en composition colorée (P+XS) à l'échelle du 1: 40 000 utilisée n'a pas permis d'identifier avec précision les principaux équipements et les réseaux routiers secondaires. Cela détermine une des limites de l'image HRV à l'étude de l'urbanisme. L'utilisation des photographies aériennes et les sorties de terrain sont donc indispensables pour les détails. Les coûts élevés d'acquisition des images HRV et du matériel SIG constituent de sérieuses difficultés pour l'utilisation systématique de ces outils. Cette méthodologie d'interprétation, bien qu'elle permette une vision globale et répétitive de l'ensemble de l'aire d'intervention, reste un prolongement des techniques classiques telles que l'utilisation des photographies aériennes et les enquêtes. On pourrait envisager que des réflexions soient ouvertes pour réduire la nécessité d'utiliser les photographies aériennes en améliorant la résolution géométrique au sol des futurs satellites pour des études appropriées d'urbanisme.

7. Conclusion

Cette étude illustre de façon concrète les atouts opérationnels qu'offre la télédétection dans la recherche des informations pour une gestion efficiente de l'espace urbain. L'interprétation visuelle de l'image HRV (P+XS) en composition colorée a surtout permis de mettre en évidence un contexte géographique lié au caractère informel des implantations urbaines, à sa croissance et à son environnement. Les résultats obtenus permettent non seulement d'examiner les différents modes d'affectation du sol en milieu urbain, mais aussi de réaliser une mise à jour des cartes souvent obsolètes. Le coût relativement élevé de l'image HRV est compensé par les économies de personnel requis lors de la collecte des informations de terrain, et du produit dérivé obtenu qui peut être mis à la disposition des opérateurs impliqués dans les programmes d'aménagement des villes africaines. Une étude diachronique est prévue pour le suivi de la dynamique de la gestion de la ville de Ouagadougou dans le cadre du projet de développement urbain, afin de mettre en place un système d'information urbain. Notre souhait est que le CRTO soit associé à sa mise en œuvre.

16

Processus d'urbanisation et imagerie satellitaire : deux exemples indiens

ODETTE VAGUET, ALAIN VAGUET et ALBAN BOURCIER

*Laboratoire Modélisation et traitements graphiques (MTG), UR 1351 du CNRS,
Département de géographie, Université de Rouen, 76821 Mont Saint-Aignan cedex,
France; téléphone : +33 (2) 35-89-82-48; télécopieur : +33 (2) 35-14-62-00*

Résumé

L'apport de la télédétection se révèle particulièrement précieux en Inde puisque les photographies aériennes sont inaccessibles. Nous avons retenu ici deux exemples de villes dont la spectaculaire croissance a attiré l'attention : Hyderabad (Inde centrale), et Coimbatore (Inde du Sud), respectivement 4,2 millions et 1 million d'habitants en 1991. Ces deux métropoles, bien qu'appartenant au même modèle urbain indien, présentent des configurations spatiales originales. L'imagerie satellitaire a permis d'affiner nos études de morphologie urbaine pour chacune des deux villes mais aussi d'élaborer des comparaisons. Ainsi, la pertinence de certains traitements a permis de dégager des spécificités morphologiques. De même, si la périurbanisation constitue un processus commun aux deux agglomérations, la télédétection spatiale, en offrant une perception globale de l'espace urbain, a mis en évidence des modèles de diffusion urbaine différents. En effet, l'expansion de type auréolaire de Hyderabad s'oppose à la configuration linéaire ou axiale de la périurbanisation à Coimbatore. Au total, la complémentarité de deux méthodes et échelles d'analyse urbaine (terrain/télédétection spatiale) apporte une nouvelle image de la ville qui permet de décrypter les facteurs d'organisation spatiale et les processus d'évolution.

1. Introduction

Avec 218 millions de citoyens, l'Union Indienne occupe le second rang des populations urbaines dans le monde en dépit d'un taux d'urbanisation modéré (25,7 % en 1991). Néanmoins, ce sont les villes millionnaires qui se développent le plus rapidement même si les taux d'accroissement varient considérablement d'une agglomération à l'autre. De plus comme la plupart des villes du Tiers monde, celles de l'Inde s'étalent, grignotant peu à peu villages et terres agricoles environnants. Les zones périurbaines s'accroissent sous des formes diverses, l'imagerie satellitaire offrant une échelle d'analyse fort intéressante de ces phénomènes (WEBER, 1995). En effet, la ville apparaît dans sa globalité et l'on songe au nombre de clichés aériens nécessaires à la prise en compte de l'espace urbanisé de Hyderabad. Mais l'apport de la télédétection satellitaire est d'autant plus précieux que les photographies aériennes sont inaccessibles en Inde, « *secret defense* » oblige.

Nous retiendrons ici deux exemples de villes dont la croissance a attiré l'attention : Hyderabad, cinquième ville du pays, capitale de l'état d'Andhra Pradesh et Coimbatore, seconde ville du Tamil Nadu après Madras. Hyderabad, 4,2 millions d'habitants en 1991, a connu le rythme d'accroissement le plus important parmi les six premières villes indiennes entre 1981 et 1991 (+ 67 %). Coimbatore a officiellement atteint le million d'habitants en 1991 mais l'aire d'influence directe est depuis longtemps déjà millionnaire. Son taux de croissance très fort dans les années 60 (+ 65 % entre 1961 et 1971) est retombé depuis aux environs de 24 % mais la périurbanisation est largement occultée du fait des limites administratives étroites de l'agglomération.

Bien qu'appartenant au même modèle urbain indien, nous verrons que ces deux métropoles, connaissent des configurations spatiales originales tant dans le domaine intra-urbain que périurbain du fait d'un passé et d'une vocation économique différents.

Notre démarche a donc été prospective quant à la nature de l'information que pouvait livrer l'imagerie HRV de SPOT en contexte urbanisé, puis explicative, par souci de commenter un phénomène et une organisation à caractère spatial très marqué. Chaque situation présentant une transcription physique dans l'espace géographique est ainsi repérée, identifiée et caractérisée.

2. Méthodologie

L'architecture de travail se compose d'un poste PC 486/66 de 16 Mo de RAM et comporte un disque dur de 2 Go couplé avec un moniteur de visualisation de haute résolution de 22 pouces. Sur ce site, est implantée une version complète du logiciel Multiscope (système de traitement d'image développé par la société Matra Cap System), offrant des ouvertures certaines avec l'environnement des systèmes d'information géographique.

Pour mener à bien la phase d'étude portant sur la ville de Hyderabad, nous avons exploité deux images : une scène HRV (XS) de SPOT KJ 215-315 du 14 mai 1989 et une scène HRV (P) de SPOT KJ 215-315 du 7 novembre 1991.

La superposition des images multibande et panchromatique a permis de détecter, outre des habitations récentes, des équipements routiers qui témoignent de la véritable progression de l'espace urbanisé dans cette direction.

De manière générale, la création de pseudo-canaux à 10 m a permis de dresser des bilans interprétatifs détaillés en matière d'analyse intra-urbaine. Nous avons ainsi pu identifier un grand nombre d'éléments constitutifs des sites bâtis.

D'autres traitements prennent en compte des néo-canaux générés à partir d'opérations de filtrage accentuant les discontinuités spatiales (passe-haut) (LEJEUNE *et al.*, 1987). Ils permettent de mieux identifier les zones d'habitat diffus sous la forme d'amalgames aérés composés de pixels très réfléchissants, s'individualisant avec clarté par le biais de compositions colorées intégrant des canaux sources.

Une dernière série d'opérations a été exécutée sur les bandes spectrales de Hyderabad par l'intermédiaire de la transformée de Hotelling (adaptation de la transformée de Karmumen-Loève pour des valeurs discrètes). Une analyse en composantes principales a donc été commandée afin de rassembler la quasi-totalité des bandes spectrales originales dans un seul canal présentant la particularité de ne plus poser de problème d'identification des objets dans les limites de 15 à 20 postes de légende. De plus, combinée à d'autres canaux, la composante principale n° 1 issue de cette transformée donne lieu à des compositions colorées d'une excellente qualité visuelle.

Le travail présenté ici sur le site de Coimbatore a été réalisé à partir de l'image HRV (XS) de SPOT KJ 215-328 du 4 février 1994.

Outre l'utilisation de compositions colorées classiques résultant de la combinaison des bandes spectrales sources, nous avons donné la préférence à d'autres variantes de la transformée de Hotelling basées sur la création d'indices. Il s'agit de transformations multivariées favorisant la mise à disposition d'une information synthétique à l'aide de fonctions mathématiques. Ici, l'emploi d'un indice de cuirasse $[(3 \cdot XS1) - XS2 - 100]$ se justifie par notre volonté de mettre en valeur les espaces bâtis et d'isoler des zones homogènes du point de vue physique et indirectement fonctionnel (BOURCIER, 1994).

3. L'extension de type auréolaire de Hyderabad

3.1. La dissymétrie nord-sud

Hyderabad est très étendue puisqu'elle occupe une superficie deux fois supérieure à celle des vingt arrondissements parisiens. Son site urbain est considéré comme l'un des plus beaux de l'Inde : installée sur le plateau sec du Tèlangana à environ 500 m d'altitude, dans un décor minéral, parfois austère et contraignant, Hyderabad est embellie par la présence du lac artificiel de Husain Sagar, au nord duquel s'est développée Secunderabad, ancien cantonnement britannique. La proximité des deux villes a inspiré leur désignation sous le terme de villes-jumelles.

Succédant à la cité fortifiée de Golconde sise à une dizaine de kilomètres à l'ouest, Hyderabad s'est d'abord développée sur la rive droite de la Musi à partir de la fin du XVI^e siècle puis elle a « traversé » la rivière.

L'organisation spatiale de cette capitale ancienne porte encore l'empreinte du passé : sa morphologie polycentrique traduit les transferts de centralité (VAGUET et VAGUET, 1993). Une densité particulièrement forte du bâti souligne les trois centres de l'agglomération (n° 1-3, fig. 16-1, voir cahier couleur).

Au sud, le cœur historique (n° 1, fig. 16-1), édifié par les régnants musulmans dès le XVI^e siècle, se compose d'édifices religieux islamiques et du bazar musulman. Les habitations et les commerces y sont si tassés et les ruelles si étroites que celles-ci ne sont guère visibles sur l'image. En particulier, la trame orthogonale N-S/E-O désignant le Charminar (monument symbole de la ville) comme le centre originel de la cité en 1591 n'apparaît pas sur l'image.

Cette zone centrale s'est trouvée en perte de vitesse dès le début du XX^e siècle au profit de la rive gauche.

L'actuel centre des affaires (n° 2, fig. 16-1) se situe à l'emplacement choisi par le Résident britannique en 1798, sur la rive gauche. Ce quartier « européen » aéré et sûr attira bientôt la population autochtone et même le pouvoir politique local puisque le Nizam s'installa au nord de la rivière dès 1905. Aujourd'hui, on y trouve l'artère moderne de la ville, Abids, qui comprend les commerces modernes et les banques et qui connaît une verticalisation croissante (composantes géométriques très réfléchantes sur l'image) surtout depuis la fin des années 80. À proximité, le long d'axes plus modestes, s'organise le bazar hindou traditionnel (amalgame de pixels hétérogènes).

Le troisième centre bien visible sur l'image est celui de Secunderabad (n° 3, fig. 16-1), au nord-est du lac Husain Sagar (n° 4, fig. 16-1). Stimulé par l'implantation de la gare ferroviaire en 1874, ce centre s'est développé entre Hyderabad et le cantonnement britannique créé en 1806 pour la protection de la Résidence coloniale. Artère moderne et bazar traditionnel hindou composent un cœur très vivant.

L'agglomération tire son originalité de la traduction spatiale de la pluralité religieuse des populations. Dans la capitale d'un pouvoir originellement musulman, installée au cœur d'une région essentiellement hindouiste, s'est mise en place une véritable frontière culturelle nord-sud entre Islam et hindouisme : la rivière Musi. Le secteur situé au sud de cette rivière abrite une grande partie de la minorité musulmane tandis que dans la partie nord, les hindous sont largement prédominants. À ce clivage religieux s'est superposé, et ce n'est pas par hasard, un second d'ordre économique, voire politique : la figure 16-1 illustre bien le déclin du sud et le dynamisme du nord. En effet, la dissymétrie du réseau des voies de communication souligne, par des tracés larges et bien visibles, la croissance démographique et économique du nord. À l'inverse au sud, le réseau moins dense, moins hiérarchisé et l'absence d'équipements métropolitains dans ce domaine traduisent la stagnation voire la perte de vitesse de la « vieille ville », celle-ci demeurant tout de même congestionnée.

Les dynamiques spatiales récentes confirment ce diagnostic : les espaces interstitiels se sont peu à peu comblés entre Hyderabad et Secunderabad, et l'axe d'urbanisation majeur depuis les années 60 se situe au nord de la Musi. La composition colorée traitée à cet effet fait bien apparaître ces extensions (n° 5, fig. 16-1).

3.2. Périurbanisation et industrialisation : sur la route de Bombay au nord

L'implantation de la zone industrielle de Sanathnagar (n° 6, fig. 16-1) sur la route de Bombay constitue l'une des meilleures illustrations du dynamisme évoqué précédemment. Hyderabad, qui avait une vocation essentiellement tertiaire, a bénéficié de la politique nationale de localisation industrielle visant à corriger les tendances d'une époque coloniale dont l'économie extravertie avait favorisé les villes littorales. À partir des années 60, diverses mesures incitent les industriels à préférer les agglomérations de l'intérieur. Le document satellitaire exploité montre bien que zonage et grande taille des unités de production sont caractéristiques de ces implantations récentes : les usines modernes se trouvent plutôt en périphérie du fait de la présence de terrains vacants (BOURCIER *et al.*, 1996a). Parallèlement, l'emprise des équipements liés aux transports tels l'aéroport (n° 6, fig. 16-1) et les réseaux viaire et ferroviaire, est forte. Lié à cette géographie industrielle volontaire, le dynamisme démographique est important en direction du nord. Les quartiers modestes se sont multipliés et les *slums* (habitat sous-intégré) y ont proliféré. Cependant, si les bâtiments industriels, nettement regroupés à Sanathnagar, se distinguent de l'habitat

par leur taille voire une réflectance souvent élevée, les quartiers résidentiels se différencient en fonction de leur densité mais pas en fonction du type de matériau utilisé : ainsi dans l'état actuel de nos travaux, les bidonvilles repérés sur le terrain ne sont pas identifiables en tant que tels sur l'image.

3.3. Concilier contraintes topographiques et cadre de vie : l'extension résidentielle à l'ouest

À l'ouest (fig. 16-2, voir cahier couleur), c'est la fonction résidentielle qui a dirigé la progression de la ville. Si l'on exclut le fort de Golconde (n° 1, fig. 16-2), abandonné au XVI^e, le développement urbain s'est produit surtout depuis les années 70. Les contraintes topographiques (colline granitique de type *inselberg*) (n° 2, fig. 16-2) sont importantes et l'approvisionnement en eau malaisé : deux obstacles d'ailleurs à la survie de Golconde dont le site défensif interdisait une importante extension et dont la surdensification avait abouti à des désastres sanitaires en partie à cause d'un approvisionnement difficile puis insuffisant en eau.

Néanmoins, c'est vers l'ouest que le quartier chic de « Banjara Hills » (n° 3, fig. 16-2) s'est développé. Il doit son nom aux tribus éponymes qui vivaient dans cette zone rocheuse peu propice à l'agriculture. Les nantis ont été séduits par ces terrains disponibles à bas prix ; ils réclamaient cependant des moyens pour leur aménagement et une autonomie pour les déplacements vers les zones centrales. Ainsi le quartier s'est développé sur les hauteurs (environ 600 m) dans un paysage minéral d'une grande beauté auparavant peu peuplé. Le semis de points larges de l'image (n° 4, fig. 16-2) correspond à un habitat individuel sur de grandes parcelles. C'est l'adresse de prédilection des classes supérieures (hauts fonctionnaires, industriels, gros commerçants, vedettes de cinéma, etc.).

En contrebas (vers 500 m), apparaît un semis de points plus dense (n° 5, fig. 16-2) qui traduit un bâti juxtaposé. Espace vacant et éloignement du centre-ville ont attiré les promoteurs, les agences gouvernementales et les grandes entreprises pour y construire des lotissements plus modestes. La présence de bidonvilles s'explique par une pression foncière longtemps faible qui a conduit, par exemple, les populations à occuper des terres proches de chantiers de construction qui les employaient. L'État a même voué certaines parcelles considérées au départ comme excentrées et peu valorisées à des programmes de relogement des bidonvillois auparavant installés dans les zones centrales ou péri-centrales.

Mais l'étalement urbain continue et apparaissent ainsi des terrains prêts à être lotis comme en témoigne l'implantation du réseau de desserte (n° 6, fig. 16-2). La progression s'opère néanmoins en nappes discontinues en raison des contraintes de la topographie (collines, chaos rocheux, etc.) ou du jeu des réserves foncières privées (n° 7, fig. 16-2) dans cet ancien état princier.

3.4. Limites de ville : la progression vers l'est

Succédant au comblement des espaces interstitiels séparant encore Hyderabad et Secunderabad à l'aube des années 60, une progression auréolaire s'opère vers l'est, en direction et au-delà de l'université (BOURCIER *et al.*, 1996a).

On distingue une limite de première génération : la voie ferroviaire (n° 7, fig. 16-1) qui souligne la fin du tissu urbain dense continu (n° 8, fig. 16-1) des années 60. Aujourd'hui un périphérique en cours d'aménagement, plus à l'est, dessine un nouveau front d'urbanisation (n° 9, fig. 16-1).

Cette extension orientale se caractérise par la présence de l'Université d'Osmania (n° 10, fig. 16-1) créée au début du XX^e siècle et qui apparaît comme un flot de verdure réservé aux marges duquel l'urbanisation reprend (n° 11, fig. 16-1). En direction de la zone industrielle de Uppal dont l'implantation a répondu à l'existence de terrains disponibles et à une politique de localisation excentrée des usines, l'habitat se développe, plus particulièrement le long de la route.

La localisation des zones industrielles reflète les étapes de la progression métropolitaine. Azamabad (n° 12, fig. 16-1), située en périphérie dans les années 60 alors que Hyderabad et Secunderabad étaient séparées par des espaces non urbanisés, se retrouve aujourd'hui au cœur du continuum existant entre les deux villes. De même, Uppal et Moula Ali (respectivement au sud-est et au nord-est du campus) sont peu à peu rattrapés par la progression du bâti, matérialisant ainsi le nouveau front d'urbanisation.

4. Diffusion urbaine linéaire à Coimbatore

4.1. Coimbatore, une métropole en émergence

Coimbatore est une ville de piémont, au revers des Ghats occidentaux (n° 1, fig. 16-3, voir cahier couleur), élément orographique majeur du Deccan. Du fait de la présence de ces moyennes montagnes qui confèrent une position d'abri au plateau sur lequel se situe la ville, l'environnement ne diffère guère de celui de Hyderabad : une zone sèche que la population néanmoins, s'est efforcée de rendre cultivable grâce à une tradition hydraulique ancienne. La valorisation des terres irriguées apparaît d'ailleurs bien sur l'image : au sud la bande de cultures irriguées (n° 2, fig. 16-3) résiste mieux à la pression foncière urbaine que les terroirs secs situés au nord et à l'est. Ce contraste entre surfaces irriguées et zones sèches est beaucoup plus net pour Coimbatore que pour Hyderabad dont l'arrière-pays a toujours manqué de dynamisme agricole. Dans un contexte agroclimatique équivalent, ces deux régions du Deccan ont connu un développement inégal.

La vocation économique des deux agglomérations est elle-même très différente. Si Hyderabad possède une longue histoire de pôle politique, Coimbatore, après avoir joué un rôle de carrefour entre Kerala et pays Tamoul, est devenu sous l'impulsion des Britanniques, un centre industriel textile important de l'Inde du Sud dans les années 1890. L'intérêt des castes de gros propriétaires pour ce secteur lié au départ à la production cotonnière a renforcé la dynamique du secteur secondaire qui aujourd'hui s'est diversifié et fait preuve d'une ingéniosité rare dans les villes indiennes de cette importance. L'originalité de Coimbatore tient aussi aux liens étroits qui unissent les membres des castes économiquement dominantes de la ville à ceux de la campagne environnante et la diffusion urbaine est aussi en partie l'expression de ce continuum social et économique (SCHAR, 1992).

L'identification des différents quartiers conduit là aussi à constater des dissemblances entre les deux métropoles. À Coimbatore, le degré de végétalisation (mis en évidence par l'indice de végétation NDVI) est un indicateur particulièrement pertinent contrairement à Hyderabad, capitale politique ancienne, dont le tissu urbain est globalement plus dense et plus étendu (BOURCIER *et al.*, 1996a). Les nuances du bâti sont d'ailleurs plus délicates à repérer pour Hyderabad que pour Coimbatore.

D'une certaine façon la seconde ville du Tamil Nadu illustre à perfection le modèle urbain indien simplifié. La structure duale liée à l'apport urbanistique colonial apparaît clairement à travers la corrélation de la densité du bâti et de la végétalisation (BOURCIER *et al.*, 1996b). Les deux villes (indigène/coloniale) sont même séparées ici par une barrière

physique : la voie ferrée, implantée en 1872 (n° 1, fig. 16-4, voir cahier couleur). Celle-ci déchire inopinément aujourd'hui le tissu urbain et complique les transports internes (VAGUET et VAGUET, 1992).

Au sud-ouest se trouve le cœur historique qui abritait à l'origine le fort et le marché. À l'inverse de Hyderabad, c'est encore l'actuel centre des affaires (C.B.D.) dont le tissu urbain serré et le lacs de ruelles très étroites laissent peu de place à la végétation (n° 2, fig. 16-4).

Ce noyau ancien s'est étendu vers le nord et cette extension de première génération se compose d'un tissu urbain moins dense permettant même la présence de cocotiers (n° 3, fig. 16-4). On assiste depuis quelques années à un renforcement des fonctions commerciales et de services de cette partie récente de la ville qui s'organise désormais comme un second centre. Là aussi donc, s'opère un glissement progressif des fonctions centrales vers les quartiers neufs moins engorgés, plus facilement aménageables.

Quant à l'ancien secteur britannique (n° 4, fig. 16-4), à l'est de la voie ferrée, il présente les caractéristiques de l'urbanisme colonial et connaît une densité modeste avec ses nombreux espaces végétalisés. Le quartier du champ de course (n° 5, fig. 16-4), dont le tracé ovoïde apparaît nettement, est un modèle du genre. Il s'agit de l'un des quartiers les plus huppés de la ville, investi après l'indépendance par l'élite économique locale.

Au nord-est du champ de course, la présence d'espaces disponibles a conduit la municipalité à y implanter des équipements publics : stade, prison, gare routière, etc.

Un troisième type de quartier a été identifié, intermédiaire entre les deux unités précitées. Il s'agit des zones récentes, essentiellement situées au nord de l'extension de première génération. Ces quartiers résidentiels revêtent des formes diverses mais présentent tous une organisation géométrique et aérée du bâti qui s'accompagne d'une végétation abondante (n° 6, fig. 16-4).

Comme pour Hyderabad, la reconnaissance des réseaux et l'identification hiérarchique des linéaments précisent les grands traits de l'organisation spatiale métropolitaine. La hiérarchisation de la voirie est nette et souligne surtout l'âge des quartiers. Plus le secteur est récent et plus la trame viaire est nette. À l'opposé, dans le noyau ancien à très forte densité, le réseau est peu visible.

4.2. Diffusion périurbaine et mitage de l'espace agricole

La télédétection satellitaire s'avère particulièrement utile pour mettre en évidence les différents aspects de la dynamique urbaine. Or, Coimbatore connaît une périurbanisation active. Globalement, à l'instar de Hyderabad, la ville s'étend et l'auréole urbanisée s'élargit, ainsi qu'en témoigne la modification des limites de la ville en 1978. Le réajustement des limites n'était que la formalisation d'une situation objective : la prise en compte de la périurbanisation liée en grande partie à la remarquable vitalité économique de la région de Coimbatore.

Cette périurbanisation apparaît nettement sur l'image sous la forme de nébuleuses aérées constituées de points blancs isolés qui sont autant de zones d'habitat diffus. Mais la forme de périurbanisation la plus caractéristique ici est linéaire. Les extensions s'organisent en effet le long d'axes routiers et ferroviaires (n° 3, fig. 16-3). Ce phénomène est lié à la congestion et à l'accroissement des prix des terrains des zones centrales, conduisant des citadins de plus en plus nombreux à s'en éloigner. Les spéculateurs, en anticipant le phénomène, ont tendance à l'accentuer et acquièrent des terres agricoles sèches à bas prix. Entreprises industrielles et institutions renforcent ce phénomène en adoptant une politique d'implantation ou de délocalisation en zone périurbaine : terrains

moins chers et plus étendus. Quant aux particuliers, ils appartiennent essentiellement aux classes moyennes et supérieures surreprésentées à Coimbatore. Ces acquéreurs désirent acheter grand et disposent d'une autonomie en matière de transports, ce qui leur permet de s'éloigner des équipements encore concentrés dans le centre-ville. D'autres participent tout simplement à la spéculation. À la colonisation des espaces péricentraux et périphériques succède celle des espaces périurbains. La composition colorée générée à cette occasion souligne d'ailleurs le contraste entre l'agglomération constituée d'un amalgame de points blancs resserrés et les extensions récentes. Deux caractéristiques méritent alors d'être soulignées : le rôle primordial des voies de communication et la discontinuité de la diffusion périurbaine. En effet, lotissements et terrains nus ou encore périmètres cultivés sont intercalés suggérant une image de puzzle incomplet dont les pièces manquantes sont de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que l'on s'éloigne de Coimbatore. On peut y voir les conséquences de la spéculation foncière et paradoxalement l'effet pervers d'une loi conçue pour l'éviter : ainsi, les acquisitions de terrain sont (au moins en théorie) soumises à un plafonnement depuis la loi nationale de 1976. Cependant, la législation s'applique seulement à un rayon de 5 km autour des villes et les transactions s'opèrent plus facilement lorsque la parcelle dépend encore d'une juridiction rurale.

4.3. Route et voie ferrée « tirent » la métropole vers le nord

L'extension périurbaine s'organise au nord suivant l'axe routier et la voie ferrée en direction de Mettupalayam (n° 4, fig. 16-3). Un semis de points blancs révèle la présence de constructions identifiées comme étant essentiellement des quartiers résidentiels plutôt plus nombreux le long de la route. L'espace agricole est progressivement mité et si l'on en discerne encore le parcellaire, les noyaux d'habitations (colonies ou lotissements) se multiplient. Le transfert de la propriété foncière des ruraux vers les urbains s'accompagne bien sûr d'une augmentation des prix et les terres sèches, dont l'exploitation est de plus en plus coûteuse du fait de l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, se transforment peu à peu en terrains à bâtir. À plus grande échelle, l'image permet de détecter les réserves foncières, c'est-à-dire des zones non mises en culture mais en attente de lotissement.

4.4. Les deux axes est et ouest

Bien que dans des directions diamétralement opposées, Coimbatore s'étend le long des axes est et ouest de façon assez analogue.

Vers l'ouest, la progression métropolitaine se trouve toutefois rapidement bloquée par la présence des Ghats bien que l'une des routes menant vers le massif montagneux ait toujours revêtu une grande importance. En effet, Coimbatore est située au débouché du seul passage traversant les Ghats, permettant le lien entre les côtes est et ouest. L'Université de Bharathiar (n° 5, fig. 16-3), créée très récemment en 1978, est située dans cette direction mais dans une voie sans autre issue que le temple de Maruthamalai (n° 6, fig. 16-3), au pied de la montagne. Son environnement physique y est difficile, très sec et on est très loin du campus verdoyant de Hyderabad. Néanmoins, ces terrains disponibles constituaient l'opportunité pour la métropole de s'affranchir dans ce domaine de la tutelle de Madras distante de 500 km. L'implantation de l'Université et l'approvisionnement en eau du secteur ont favorisé le développement urbain. Des lotissements et des maisons sont apparus, essentiellement le fait des classes moyennes et supérieures. Un quartier résidentiel s'est constitué notamment, regroupant des enseignants.

Vers l'est, deux axes presque parallèles ont été des facteurs de diffusion périurbaine : la route d'Avanashi et celle de Trichy (delta de la Kavéry). La première passe par l'aéroport de Peelamadu (n° 7, fig. 16-3). Le long de ces voies, se répète le même scénario : construction de lotissements, absorption de villages mais aussi implantation d'entreprises nouvelles ou délocalisées et de services. Ces derniers montrent néanmoins une prédilection pour la route de l'aéroport, ainsi en est-il des universités privées ou des hôpitaux haut de gamme. Le secteur de Peelamadu est devenu synonyme de quartier aisé.

La périurbanisation, on le voit, est par conséquent sélective et divers facteurs interviennent pour expliquer les dynamiques spatiales. Certes l'image fournit une strate d'information dont l'interprétation doit se nourrir d'une connaissance précise des acteurs présents sur le territoire analysé mais en termes d'échelle et d'objectivité, l'apport de la télédétection spatiale est pour l'instant unique.

Le rôle primordial joué par l'implantation industrielle dans la diffusion urbaine apparaît tant pour Hyderabad que pour Coimbatore : les sites d'industrialisation récente sont excentrés mais répondent à des logiques économiques et politiques différentes. À Hyderabad, les zones industrielles ont été planifiées, répondant à une géographie volontaire et à une impulsion de l'État. Situées en périphérie lors de leur création, elles ont été rattrapées par l'urbanisation attirée par la possibilité de desserte. À Coimbatore, le déplacement ou l'implantation des usines résulte d'initiatives privées, ce qui aboutit à une dispersion des unités de production contrastant avec les zones organisées rencontrées à Hyderabad. Ceci contribue à expliquer tant la tendance auréolaire de l'expansion de Hyderabad que celle linéaire de Coimbatore.

5. Conclusion

Pourtant situées dans un contexte très proche en termes de morphologie et de dynamique urbaines, Hyderabad et Coimbatore présentent une image pourtant très différente lorsque l'on utilise la télédétection spatiale.

L'analyse des processus d'urbanisation de la cinquième ville indienne tire grand profit de l'imagerie satellitaire. La taille de cette métropole et la complexité de sa morphologie sont très favorablement servies par l'échelle à laquelle cette source d'information permet de travailler. À un niveau plus fin, dans l'état actuel d'avancement de nos méthodes, l'imagerie HRV de SPOT ne permet cependant pas d'approfondir ou de réactualiser des recherches effectuées précédemment sur le terrain. Ainsi l'habitat sous-intégré, qui constitue un fait majeur de la dynamique des métropoles du Tiers monde, n'est pas identifié même par le biais de la superposition des modes multibande et panchromatique. Dans cette perspective, quelques pistes de recherche visant à combiner analyse texturale par opération de filtrage et morphologie mathématique (LAKE, 1991) sont en cours d'exploration.

À Coimbatore, le binôme espaces végétalisés/espaces artificialisés, constitue un facteur de différenciation spatiale essentiel. Cependant, l'une de nos étapes de travail mérite d'être rapportée ici. En effet, nous disposons pour Coimbatore d'une autre scène HRV (XS) du 21 avril 1993 non traitée ici. Or, cette image a montré un rendu très différent de notre acquisition plus récente [image HRV (XS) du 4 février 1994] présentée ici. Bien que toutes deux enregistrées pendant la saison d'hiver (temps clair dominant), l'image du 21 avril 1993 comprend de nombreux nuages (masquant certaines portions de l'espace urbanisé) mais affiche de plus nets contrastes entre zones végétalisées et zones bâties que l'image du 4 février 1994, sans nuage. Sans doute des averses préalables ont-elles opportunément accentué le contraste sur la première scène!

De façon plus générale, l'on se doit de souligner le grand intérêt de la superposition des images multibande et panchromatique pour l'analyse spatiale urbaine et la perspective, seulement ébauchée ici, en matière d'analyse comparative. La télédétection satellitaire, présente ainsi que le déclare F. Verger « l'avantage d'offrir une universalité d'acquisition qui permet des études comparées avec un même filtre dimensionnel », cette « universalité d'acquisition dans des conditions homogènes est un atout considérable » (POUYLLAU, 1991).

Conscients du potentiel offert par l'outil, nous nous orientons désormais vers l'élaboration d'une méthode d'analyse comparative des formes et dynamiques urbaines.

6. Références

- BOURCIER, A. 1994. Télédétection et combinaison d'informations géographiques en mode image. Application à l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université de Rouen, 421 p.
- BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1996a. Caractérisation et suivi de l'environnement urbain par imagerie SPOT; l'étude d'une métropole indienne : Hyderabad (Andhra Pradesh). Actes Marisy 95, Ifrane, Maroc, p. 383-387.
- BOURCIER, A., VAGUET, O. et VAGUET, A. 1996b. Morphologie et dynamique urbaines à Coimbatore, Inde du Sud. Photo-Interprétation, vol. 34, n° 1, p. 23-28.
- LAKE, L. A. 1991. Analyse des méthodes texturales appliquées au traitement des images. Essai, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 38 p.
- LEJEUNE, J. C., BONN, F., ROUX, C. et ODOUX, B. 1987. Apport de l'information de texture à la segmentation des images du satellite SPOT en milieu urbain. I.E.E.E Compint 87, p. 173-177.
- POUYLLAU, M. 1991. Télédétection et Tiers monde. CNRS-CEGET, Bordeaux, 395 p.
- SCHAR, P. 1992. Capitalisme agraire et industrialisation rurale en Inde méridionale (étude de la région de Coimbatore, Tamil Nadu). Les cahiers d'Outre-Mer, Revue de géographie de Bordeaux, n° 178, p. 125-158.
- VAGUET, O. et VAGUET, A. 1992. Une métropolisation sans drame : l'exemple de Coimbatore (Inde du Sud). Les cahiers d'Outre-Mer, Revue de géographie de Bordeaux, n° 178, p.107-124.
- VAGUET, O. et VAGUET, A. 1993. Du bidonville à l'épidémie : la crise urbaine indienne à Hyderabad. Collection Espaces Tropicaux, n° 9, Éditions du CEGET/CNRS, Bordeaux, 240 p.
- WEBER, C. 1995. Images satellitaires et milieu urbain. Hermès, Paris, 185 p.

17

Étude de l'occupation du sol et de l'environnement à Cartagena (Colombie) à partir d'une image HRV (XS) de SPOT

JUAN FRANCISCO ABADIA, ANNE COLLIN DELA VAUD et
JEAN-MICHEL EBERHARD

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

Résumé

Cartagena, ville portuaire de Colombie, offre l'exemple d'une étude préliminaire à une enquête de terrain sur l'occupation du sol et sur l'environnement, étude rendue possible grâce à l'imagerie satellitaire HRV (XS) de SPOT. Cette approche, combinant des traitements destinés à l'amélioration de l'image avec une interprétation visuelle, facilite le repérage des limites urbaines en fonction des divers milieux naturels et l'identification des quartiers dans la ville. Située entre mer et lagunes, sur d'étroites bandes de terres séparées par des chenaux, Cartagena connaît une croissance rapide dans des milieux naturels variés et fragilisés par les effets du développement urbain et industriel de ces dernières décennies.

1. Introduction

Pour favoriser l'approche globale d'une ville de plusieurs centaines de milliers d'habitants, le traitement d'une image satellitaire offre de puissants moyens de connaissance de l'occupation du sol, dans des délais rapides et à une échelle intéressante pour les urbanistes, les planificateurs et les décideurs. Cette source d'informations très riche pour l'observation de l'espace et de l'environnement est d'autant plus intéressante que la cartographie

régionale ou urbaine, dans les pays en voie de développement, est loin d'être complète ou actualisée régulièrement. En effet, les méthodes classiques (photo-interprétation et restitution) sont trop coûteuses en temps et en moyens financiers et ne permettent que des missions partielles étant donné l'étendue des agglomérations.

La ville de Cartagena, en Colombie, servira d'exemple à l'application de cette méthode, préliminaire aux études de terrain et qui facilitera le contact avec la réalité. Elle suggère les premières hypothèses de recherche. Avec plus de 610 000 habitants au recensement de 1991, la population de la ville a été multipliée, dans les quatre dernières décennies, par six, soit un gain de plus de 500 000 habitants. En conséquence, l'espace bâti s'est développé dans des proportions comparables, dans plusieurs directions de l'arrière-pays, composé de milieux littoraux et terrestres très divers. Cette forte dynamique a provoqué une dégradation accélérée de l'environnement encore mal connue aujourd'hui en l'absence d'informations traditionnelles. Dans ce contexte, l'image satellitaire (image multibande HRV de SPOT du 20-12-1990; mise à disposition par Yves Thomas du Laboratoire de géographie physique, URA 141 du CNRS) peut-elle aider à connaître et à comprendre l'espace urbain contemporain ? À Cartagena, le milieu naturel d'interface entre la mer des Caraïbes et la côte colombienne est exceptionnel par la variété de ses composantes : milieu marin, lagunes, longs cordons de plage reliant récifs coralliens, îles et presqu'îles.

Depuis plusieurs siècles, les hommes ont façonné ce décor pour implanter une ville à vocation défensive, tête de pont entre la métropole espagnole et les vastes territoires andins. Point d'arrivée et de départ des hommes et des marchandises, Cartagena a dû, dès ses origines, se protéger pour maintenir une prospérité convoitée par des corsaires agissant au profit d'autres puissances européennes (GUTIERREZ, 1992). De ce fait, ce premier port espagnol à vocation militaire sur le continent sud-américain, s'inscrit au cœur de tout un système défensif composé non seulement de remparts et de fossés, mais aussi d'une protection qui s'appuie sur le milieu maritime et lagunaire. Une muraille enserrant la ville a été achevée en 1778. Une citadelle, San Felipe de Bajararas, implantée au sommet d'une vaste colline, domine l'ensemble actuel et défend le seul accès terrestre (POMBO PAREJA, 1992). Unique dans l'art militaire, une muraille sous-marine, destinée à faire échouer les navires ennemis, relie la presqu'île de Bocagrande à l'île de Tierrabomba.

Ainsi, Cartagena s'est peu à peu bâtie sur une presqu'île séparant, d'une part, une vaste lagune, la Cienaga de Tesca et, d'autre part, la baie de Cartagena, plus vaste et plus ouverte sur la mer. Le développement urbain gagne depuis trente ans tous les espaces vides le long des chenaux et des lagunes ainsi que les zones marécageuses et les rares collines. La ville connaît aussi deux vocations contradictoires : le développement industriel avec une raffinerie et une entreprise de pétrochimie implantées sur les rives méridionales de la baie et un essor touristique sur les arcs sableux de bordure de mer. En malmenant rudement paysages et ressources naturelles, ces deux activités remettent aussi en question l'avenir de l'ensemble urbain de Cartagena.

2. Méthodologie

L'objectif proposé est d'analyser un espace urbain à partir d'une image satellitaire HRV (XS) de SPOT du 20-12-1990 de façon à faciliter et à rendre plus efficace l'enquête de terrain en l'absence de données cartographiques et d'études contemporaines. En effet, seule l'évolution ancienne peut être étudiée, grâce à des documents sur l'histoire de la ville du XVI^e au XVIII^e siècle. Repérer l'extension de la ville, délimiter les secteurs bâtis et le non-bâti, observer la concentration urbaine, le mitage périphérique et les espaces végétalisés

amènent à se poser de nombreuses questions sur les relations entre l'homme et le milieu. Cette approche s'avère indispensable pour aborder la ville dans sa totalité grâce à une seule image.

Nous avons cherché à montrer que l'utilisation de méthodes simples peut apporter une grande quantité d'informations intéressantes, même pour le non-spécialiste en traitement d'image. Nous nous appuyerons essentiellement sur trois néo-canaux : 1) une composition colorée (fig. 17-1, voir cahier couleur) produite à partir des canaux bruts; pour assurer une bonne dynamique et un bon équilibre entre les trois canaux pour la composition des couleurs, nous avons déterminé les bornes min-max en tenant compte de la distribution statistique des pixels selon leur niveau de gris; la borne minimum correspond à la fréquence cumulée égale à 1 % des effectifs et la borne maximum à 99 % des effectifs (EBERHARD, 1994); 2) une image classée en 10 classes radiométriques (fig. 17-2, voir cahier couleur) produite par la méthode non dirigée des nuées dynamiques; ce document correspond à une seconde étape de traitement; il est issu d'une image présentant 21 classes dont on a regroupé certains thèmes (en particulier les classes de végétation) au cours d'une première analyse visuelle (la formule $n = 5 \log N$, donnant le nombre optimal n de classes en fonction de la taille N de l'échantillon); 3) une deuxième composition colorée, intégrant les canaux bruts 2 et 3 de HRV et l'image résultant du calcul d'un laplacien appliqué sur le canal 2 (fig. 17-3, voir cahier couleur); on a attribué les trois couleurs dans l'ordre : bleu au XS2, vert au laplacien de XS2 et rouge au XS3.

Ces trois documents apportent chacun une information particulière essentielle à l'interprétation visuelle d'une image urbaine : 1) la composition colorée des canaux bruts présente une information sur la texture de l'image tout en conservant une information radiométrique, ces deux types d'information pouvant être associés; 2) l'image classée résume l'information radiométrique et propose une information sur la nature des surfaces; 3) la composition colorée intégrant le filtre laplacien souligne les contours et facilite l'étude des structures urbaines, en particulier le maillage de la voirie.

La superposition d'un plan de ville recalé à l'image classée a également contribué à faciliter, au pixel près, l'identification des espaces bâtis, des équipements, du réseau de voirie, etc.

L'amélioration de l'image permet une interprétation visuelle plus rapide et plus efficace (DUREAU et WEBER, 1995) qui aboutit à la réalisation d'un croquis de lecture aisée pour des décideurs et des responsables peu habitués à « lire une image ». Le croquis sur l'occupation du sol obtenu ici synthétise en quelque sorte l'ensemble des travaux de télédétection. Il rend possible une comparaison entre des villes notamment celles étudiées à l'Institut des hautes études d'Amérique latine : Rio de Janeiro, Mexico, Bogota, Neuquen, Buenos Aires, etc. (IHEAL - IAURIF - CNES, 1994).

3. Analyse et interprétation des données

Le croquis d'interprétation (fig. 17-4, voir cahier couleur) présente une synthèse de l'interprétation des documents satellitaires. Il s'agit d'une carte de l'occupation du sol à la date du 20 décembre 1990, établie pour l'enquête de terrain mais à partir de laquelle on peut d'ores et déjà extraire quelques grands caractères urbains.

3.1. Analyse de la composition colorée et de l'image classée

Trois grands milieux se dessinent nettement : 1) le milieu marin apparaît en surfaces homogènes de couleur bleu foncé; la classification mettra en évidence une très grande diversité d'états de la surface marine et lacustre en fonction de la profondeur, de la salinité, de la turbidité, des courants et de la pollution; la dégradation du milieu lagunaire (fig. 17-1, voir cahier couleur) est due au déversement du canal del Dique, situé dans le sud de la baie de Cartagena, au-delà de Mamonal; ce canal, long de près de 150 km, a été construit au XVI^e siècle, à partir de cours d'eau secondaires, pour assurer la jonction entre le fleuve Magdalena, qui draine toute la Colombie centrale et septentrionale, et le port de Cartagena; 2) les milieux naturels ou ruraux présentent deux grands secteurs mis en évidence par deux types de couleur rouge : au nord, le secteur de contact de la Cienaga de Tesca avec l'arrière-pays partiellement inondé, développant des contours irréguliers et au sud et au sud-ouest, de vastes zones planes mais d'altitude plus élevée, où se développent quelques secteurs agricoles parmi les pâturages et les zones boisées; 3) le milieu urbain apparaît en couleurs brune, beige et bleu-clair; épousant les contours littoraux et les îles, il se localise essentiellement sur la presqu'île centrale qui forme une zone de contact entre les milieux marin, lagunaire et terrestre; le bâti se prolonge sur la rive orientale de la baie.

3.2. Des quartiers très marqués par la géomorphologie littorale

Sur les néo-canaux, le secteur urbanisé ne se distingue pas seulement par les couleurs ou les types de classes radiométriques, mais également par l'agencement spatial de celles-ci et les formes qu'elles présentent. L'analyse visuelle de ce document, jointe à celle de la composition colorée (fig. 17-1, voir cahier couleur) et de l'image classée (fig. 17-2, voir cahier couleur), rend possible la délimitation de plusieurs grands types de quartiers. Elle permet de retrouver certains éléments des paysages urbains et les facteurs qui interviennent dans leur configuration : conditions naturelles, évolution historique, morphologie urbaine, occupation du sol, etc. Du centre historique aux quartiers périphériques plus récents, on observe plusieurs grands ensembles d'espaces urbains bien individualisés, en partie par la géomorphologie littorale.

Le centre historique (San Diego-Getsemani) apparaît clairement sur l'ensemble des néo-canaux, en vert foncé sur la composition colorée, et dans la classe 2 de la classification. La forme générale de cette zone sur l'image correspond bien à celle délimitée par les remparts de l'ancienne citadelle. La structure du réseau de voirie en damier irrégulier n'apparaît pas sur les images du fait de l'étroitesse des rues. Les bâtiments anciens, de deux ou trois étages, aux toits de vieilles tuiles, aux *patios* intérieurs, offrent un paysage de forte densité urbaine, unique à Cartagena. Cette densité est classique dans le centre des villes anciennes de l'Amérique latine.

L'absence de couleur rouge sur la composition colorée et l'absence de classe radiométrique représentative indiquent l'absence quasi totale de végétation, dans ce centre historique au bâti serré. De petites surfaces et des linéaments bleus clairs correspondent aux installations portuaires et défensives (murailles) qui ceinturent le centre historique.

Cette même densité se retrouve dans l'extension du XIX^e siècle, dans l'île de Manga et dans le sud de la presqu'île, séparées l'une de l'autre par un chenal. L'aspect général de ce secteur ressemble au précédent mais avec une plus forte présence de rouge. Nous sommes donc en présence d'une morphologie urbaine proche du centre historique, également sans aucune structure de voirie visible sur les images, mais avec davantage de végétation, notamment le gazon de jardins de petite taille. Au nord de ce secteur, une vaste tache rouge,

homogène mais aux contours irréguliers, frappe la surface tramée brune; il s'agit du Cerro de la Popa, petit relief boisé conservé en espace vert, dont la base est localement envahie de constructions.

Au contraire, vers le sud, la presqu'île de Bocagrande est totalement occupée par des quartiers à vocation touristique. Sur les images, ce secteur revêt une apparence très semblable à celle des quartiers anciens, bien qu'il soit de création récente. Le contraste des paysages explique l'aspect hétérogène du secteur correspondant sur l'image : immeubles à étages dispersés dans des zones de résidences individuelles d'un certain standing. La végétation arborée, relativement abondante, masque en partie les rues étroites, efface sur l'image l'essentiel du réseau viaire, renforce les contrastes locaux et, donc, la ressemblance avec les quartiers anciens sur les documents satellitaires.

L'urbanisation s'est prolongée sur la côte est de la baie, avec un type d'urbanisation fort semblable à celui des extensions du XIX^e siècle. Celle-ci correspond à des quartiers de bâti consolidé, entre les secteurs d'El Bosque et de Ceballos. Face au front de mer, on distingue nettement la presqu'île de Manzanillo qui abrite certaines institutions militaires (École navale). Elles sont repérables sur l'image par les caractéristiques de leur aménagement : vastes espaces verts constitués de plantations arborées déjà anciennes dont l'ombre ample cache en partie les bâtiments utilitaires de grand volume.

Les extensions récentes de la deuxième moitié du XX^e siècle, vers le nord et vers l'est, se caractérisent sur la composition colorée par des couleurs marron et, sur l'image classée, par la forte représentation des classes 3 et 5. Ces vastes quartiers se détachent par leur structuration très marquée constituant des trames réticulaires qui correspondent au dessin en damier des rues. Cette structure est fréquente dans les périphéries modernes d'Amérique latine où l'espace est découpé en lots standards occupés par un habitat qui se consolide progressivement au fil des années. Les secteurs les plus récents (extrémités est et sud-est de l'agglomération : Educador, Simon Bolivar, Medellin, Granada, Fredonia) se caractérisent donc par une forte proportion de constructions totalement ou partiellement précaires (voir plus loin). La disparition locale de la végétation et sa survie sous forme de lambeaux éparpillés, laissent place à un sol dégradé du fait des passages fréquents de la population et des véhicules, et des activités diverses (couleurs brunes sur la composition colorée).

La rive de contact de la Ciénaga de Tesca avec la zone urbaine de la presqu'île, se signale, sur la composition colorée, par un cordon plus clair à l'ouest, strié nord-sud, qui cède la place à l'est à un secteur plus rouge (Republica Ricaurte). Sur l'image classée, la plus forte présence des classes 1 et 2 rappelle les structures d'image correspondant aux quartiers anciens décrits ci-dessus. Il s'agit des extensions les plus récentes où la ville et les hommes disputent l'espace à la lagune, à l'eau et à la végétation. Ces quartiers se constituent à partir d'avancées de terre, pratiquées dans la lagune en prolongement des rues existantes (linéaments nord-sud sur l'image). Sur ces supports, des maisons de bois se dressent, serrées les unes contre les autres, habitat précaire occupé par une population très démunie. La limite de l'expansion urbaine est ici déterminée par la stabilité de ces secteurs vaseux de bordure de lagune en cours de colmatage. À l'est de cette bande, le secteur reste inoccupé du fait de la trop grande abondance en eau et donc de l'instabilité du sol.

3.3. Bordures est et sud de l'agglomération

Si la limite nord-sud de l'agglomération montre une rupture nette entre les milieux urbains et lagunaires, la périphérie est et sud ne présente pas de frontière précise. Les deux compositions colorées, davantage que l'image classée, montrent en effet : 1) dans le sud, des faisceaux de linéaments orientés nord-sud, de couleur marron, contrastant bien avec le

fond rouge vif; 2) à l'est, une mosaïque de formes géométriques rectangulaires marron alternant avec des formes rouges.

Ces deux configurations correspondent à deux démarches d'urbanisation différentes. Dans le premier cas, il s'agit d'une « urbanisation fourmi », dans les secteurs de Fredonia et de Granada, caractérisée par des alignements plus ou moins parallèles de constructions qui se placent empiriquement les unes à côté des autres. Dans le deuxième cas, l'espace rural cède à la pression urbaine par parcelle, de manière non contiguë, de telle sorte que des surfaces agricoles subsistent quelques temps entre les pâtés de maisons. La densité de parcelles non bâties diminue vers l'intérieur de l'agglomération comme le montre la rareté des rectangles rouges dans la partie correspondante de la composition colorée.

Dans le centre sud de l'agglomération, une vaste étendue en forme de U, de couleurs bleues et blanches sur la composition colorée, montre le secteur de Poligone Ceballos, villa Caracoles, à la végétation décimée et au sol dégradé. L'irrégularité de la texture d'image (pointillés, pixels isolés, etc.) traduit un paysage au sol constitué de petits éléments éparpillés, caractéristiques de la forme d'urbanisation extensive de création de quartier.

Tout au long de la baie de Cartagena s'étalent vers le sud des zones d'occupation très diverses. À côté des hameaux de pêcheurs et des collecteurs de coquillages dans la mangrove, alternent des petits lotissements et des espaces à vocation industrielle et portuaire. Depuis Albornoz, qui jouxte la ville à son extrémité sud, l'espace bâti est discontinu et limité à une étroite frange littorale de tracé irrégulier; cet espace est constitué d'établissements spontanés qui envahissent les pentes du cerro Albornoz. Plus au sud encore, du secteur Mamonal à Pasacaballos, on observe une série de vastes formes géométriques sur l'image qui montrent les nombreux établissements industriels, en particulier une raffinerie de pétrole avec sa zone de réservoirs, les installations d'une entreprise de pétrochimie et un vaste bassin rectangulaire de décantation. Pasacaballos apparaît comme l'ultime noyau urbain de cet ensemble dispersé sur près de 20 km.

4. Conclusion

Grâce à l'imagerie satellitaire, il nous a été possible d'obtenir une approche globale de la ville de Cartagena permettant de comprendre le développement de l'agglomération sur une zone de contact où se chevauchent milieu marin et milieu terrestre. Les espaces bâtis ont gagné progressivement les espaces naturels à la fois les plus faciles à urbaniser mais aussi les plus proches. Peu à peu, les zones intermédiaires ont été conquises même lorsque les conditions n'étaient pas favorables car la proximité avec la ville devenait déterminante. Ainsi s'explique l'occupation depuis dix ans de la bordure de la Ciénaga de Tesca et de la zone marécageuse de Ceballos. L'image satellitaire facilite la connaissance de ces nouvelles zones en cours de construction qui offrent un paysage confus par opposition aux secteurs consolidés.

L'image permet en outre de constater que les surfaces en cours de construction présentent une extension nettement plus importante dans le sud, sur les rives de la baie, que sur les franges de l'agglomération. La pression urbaine s'exerce donc de manière plus forte sur les sites d'Albornoz et de Mamonal, qui peuvent utiliser les voies maritimes pour développer d'importantes activités industrielles.

En l'absence de documentation sur les usages du sol et leur évolution, le recours à l'analyse d'autres images est indispensable pour mettre en évidence avec plus de précision cette constatation non seulement sur les lieux de la dynamique urbaine mais aussi sur le laps de temps nécessaire pour qu'un espace naturel lagunaire mal consolidé devienne partie

intégrante d'une grande ville. La disparition des vides de l'espace interne et l'augmentation des densités du bâti seraient également des éléments de dynamique urbaine à étudier pour comprendre les bouleversements de Cartagena en cette fin de XX^e siècle.

L'analyse de l'image a préparé l'enquête de terrain en permettant de poser quelques grandes questions sur les relations entre la ville et son milieu, sur les types d'occupation du sol et sur les zones de croissance. Elle fait gagner ainsi beaucoup de temps lors de la validation sur le terrain. L'intégration à l'étude d'autres données exogènes aboutira à délimiter avec plus de précision des unités paysagères, voire « des écosystèmes urbains » (LENCO, 1996) rapidement décrits ici à Cartagena.

Ces observations obtenues par l'étude satellitaire entrent dans un programme de recherche sur les dynamiques spatiales des villes d'Amérique latine. Une nomenclature adaptée, déjà utilisée dans une étude portant sur 10 villes d'Amérique latine (IHEAL - IAURIF - CNES, 1994), est en cours d'élaboration pour faciliter la comparaison des villes entre elles et mettre en évidence les modes d'occupation du sol dans le contexte particulier de cette fin du XX^e siècle où l'urbanisation a été exceptionnellement rapide.

5. Références

- DUREAU, F. et WEBER, C. 1995. Télédétection et systèmes d'information urbains. Anthropos, Economica, Paris, 375 p.
- EBERHARD, J.-M. 1994. Urbanisation et développement urbain du sud-est de l'agglomération de Mexico entre 1986 et 1989.- Étude à l'aide de l'imagerie SPOT. Thèse de doctorat de géographie. École des hautes études en sciences sociales, Paris, 615 p.
- GUTIERREZ, R. 1992. La ciudad de Cartagena de Indias. La ciudad iberoamericana, Generalitat Valenciana, Artes Graficas Soler S.A. Valencia, p. 119-131.
- IHEAL - IAURIF - CNES (Institut des hautes études d'Amérique latine – Institut d'aménagement urbain de la région Ile-de-France – Centre national des études spatiales). 1994. Images des villes d'Amérique latine. Paris, 45 p.
- LENCO, M. 1996. Étude par télédétection des écosystèmes des agglomérations françaises.- La cartographie urbaine aujourd'hui. Cahiers du CREPIF, n° 54, p. 99-114.
- POMBO PAREJA, A. 1992. La cuadrícula en la ciudad hispanoamericana - Cartagena de Indias, Colombia. Universidad Jorge Tadeo Lozano, seccional del Caribe. Cartagena, 33 p.

18

Utilisation des données de télédétection satellitaires multisources et multibandes ainsi que des photographies aériennes pour l'étude des milieux urbain et périurbain à Bucarest (Roumanie)

FLOREA ZAVOIANU ¹, CALIN NITU ² et CATALIN NEDELCU ¹

¹ *Universitatea tehnica de constructii Bucuresti, Laboratorul de fotogrammetrie si teledetectie, B-dul Lacul Tei Nr.124, sectorul 2, 72302 Bucuresti 38, Roumanie; téléphone : +40 (1) 240-73-80 (poste 292); télécopieur : +40 (1) 312-77-80*

² *Directia topografica militara, B-dul 1 Mai Nr.124-126, sectorul 1, 78219 Bucuresti, Roumanie; téléphone : +40 (1) 666-46-85*

Résumé

Dans ce travail, on résume les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'une étude visant à analyser l'espace urbain par l'utilisation des données satellitaires et des photographies aériennes pour la détection des changements dans l'évolution de la zone urbaine et périurbaine de la ville de Bucarest. Pour cette étude des cartes historiques et des cartes actuelles ont été consultées; nous avons aussi utilisé des images satellitaires MSS et TM de Landsat et les clichés HRV de SPOT de différentes dates, de même que des photographies aériennes. Les changements ont été détectés par comparaison classifiée des données de MSS et de TM de Landsat. Le cliché HRV a été transformé par redressement au 1: 100 000 et les agrandissements obtenus ont été photo-interprétés. La dynamique urbaine a été représentée sur la carte au 1: 100 000. Les photographies aériennes numérisées ont été normalisées. Après l'amélioration par filtrage, les limites ont été extraites par la transformée de Hough. Les lignes polygonales ont été vectorisées en utilisant la transformation Ψ - S et utilisées pour l'actualisation de la base géométrique du système d'information du

territoire (SIT). Pour optimiser la classification, l'utilisation de la réalité de terrain permet de visualiser les changements pour les intervalles de temps donnés de façon efficace et rapide.

1. Introduction

Une analyse globale de l'espace urbain en ce qui concerne la dynamique, les directions de développement, la surveillance de la pollution, etc. peut être faite efficacement à partir de données satellitaires. Les possibilités offertes par ces données pour l'établissement et l'actualisation des cartes topographiques et thématiques sont bien confirmées. Les études expérimentales déjà effectuées dans ce domaine, de même que la présente étude essaient d'adapter aux conditions locales et au logiciel disponible, la méthodologie de traitement de ce type de données pour répondre aux besoins locaux de façon efficace et rapide.

2. Objectif

Pour l'élaboration du plan général (PGU) ou du plan zonal d'urbanisation (PZU), il faut tenir compte de la situation actuelle, des directions et des possibilités de développement de la ville. Dans ce but, on a créé un SIT pour la zone urbaine et périurbaine. L'objectif de cette étude est d'analyser les possibilités d'enregistrement de la télédétection satellitaire pour distinguer la dynamique urbaine dans le cadre d'un SIT.

3. Documents de base

Nous avons décidé d'utiliser les sources d'informations suivantes : 1) des cartes topographiques au 1: 25 000, au 1: 50 000 et au 1: 100 000 de 1963 et des plans cadastraux établis directement sur le terrain par les géomètres; 2) les enregistrements MSS du 5 juin 1978 et TM de 1988 à partir desquels nous avons extrait des fenêtres de la zone d'intérêt; 3) l'enregistrement HRV (P) de SPOT du 1^{er} juillet 1990; les données numériques n'étaient pas disponibles et nous avons utilisé le cliché de cette image; 4) les photographies aériennes de 1994 à l'échelle d'environ 1: 6 000; 5) les données d'urbanisme en ce qui concerne l'aménagement urbain et périurbain relatif à l'emplacement des industries, des zones vertes, etc; 6) les travaux de terrain ont été effectués pour la photo-interprétation du cliché HRV agrandi.

4. Traitement des données

Les possibilités d'utilisation des données de télédétection pour l'urbanisme sont montrées par RIDD et DUDLEY-MURPHY (1992). De nombreuses études ont été faites sur l'analyse de la teneur en information du pixel dans ce domaine.

Cette étude essaie d'apporter une information utile dans les projets PGU et PZU par la mise en évidence de la dynamique urbaine, des directions d'extension de la zone construite, en utilisant les données MSS et TM de Landsat et HRV de SPOT.

4.1. Traitement des données MSS

De l'image MSS de 1978, on a sélectionné une fenêtre de 627 x 507 pixels. Le traitement a été fait en utilisant les logiciels ERDAS et EASI/PACE. On a effectué un prétraitement concernant les corrections de « lignage », le renforcement radiométrique de l'image et un rééchantillonnage par interpolation linéaire à 30 m pour la comparaison avec TM. Pour la superposition avec la carte au 1: 100 000, 26 points ont été identifiés sur la carte au 1: 25 000 et utilisés pour la transformation définitive. Avec les transformations polynomiales de premier, deuxième et troisième ordre, les erreurs moyennes quadratiques de 0,69, 0,68 et 0,48 pixels ont été obtenues. La dernière transformation a été retenue pour le calcul de l'image transformée faite par interpolation linéaire. Les principaux éléments de la carte au 1: 100 000 ont été numérisés et superposés sur l'image transformée pour la vérification. Pour la réduction des données, on a calculé la transformation en composantes principales à partir des bandes 1 et 2 et on a retenu la première composante de celles-ci avec les bandes 3 et 4 (CZERANKA, 1992) pour la classification dirigée par maximum de vraisemblance qui a été faite.

4.2. Traitement des données TM

De l'image TM de 1988, une fenêtre de 700 x 700 pixels a été retenue. Dans la partie SE de l'image, il y a un recouvrement des nuages situés à la limite de la zone d'intérêt. Pour le recalage de l'image TM avec la carte au 1: 100 000, ont été utilisés les mêmes points d'appui que pour l'image MSS. Après la transformation polynomiale, on a obtenu une erreur moyenne quadratique de 0,43 pixels. La réduction du volume des données TM a été faite par la transformation en composantes principales. Pour les trois premiers plans d'image et pour les bandes 5 et 7, on a calculé les composantes principales dont le premier plan a été retenu qui avec la bande 4 ont été utilisés pour la classification. Pour détecter les changements entre les deux groupes de données, on a choisi la comparaison des images classifiées. Les données MSS et TM ont été classifiées distinctement, pour chaque groupe en utilisant les mêmes classes par la combinaison dirigée des classes. Les classes suivantes ont été retenues : zone dense construite, zone construite, plans d'eau, forêt et espace vert (fig.1). Les changements de classes entre les deux groupes de données ont été reclassifiés dans les bandes MSS en tenant compte des résultats obtenus avec TM. Pour les données TM et les classes retenues le pourcentage de pixels bien classés est compris entre 90 % et 93 %. La vérification finale a été faite sur la base de la réalité de terrain obtenue par photo-interprétation. Les résultats sont donnés sur le tableau 1. Il faut signaler qu'entre les deux classes représentant la zone construite (la première d'habitat collectif, de blocs et la deuxième de logements individuels) il y a des confusions. En général, il y a une surestimation de la zone construite au détriment du terrain à d'autres affectations.

4.3. Traitement des données HRV

Le reproduction sur film de HRV (P) de SPOT couvre la région du Nord de Bucarest. Le film en noir et blanc en mode panchromatique a un pixel de 10 x 10 m. Pour la photo-interprétation, le film a été transformé par redressement à l'échelle du 1: 100 000. Pour cette opération, on a utilisé un redresseur de type Rectimat. Les points d'appui ont été identifiés sur le cliché et sur la carte au 1: 100 000. Les cinq éléments indépendants du redresseur (les angles de basculement autour des axes x et y de la table de projection, les

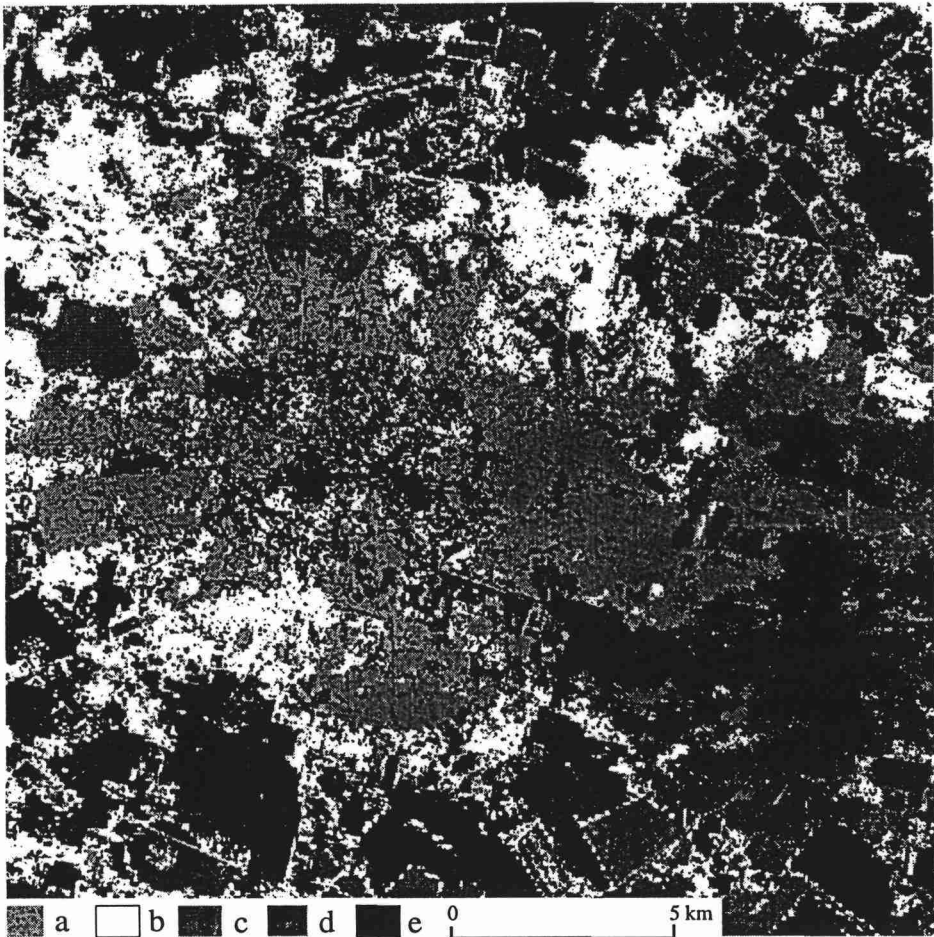


Figure 1. Image TM classifiée : a) la zone dense construite; b) la zone construite; c) les surfaces d'eau; d) forêts et espace vert; e) chantiers existants

translations du négatif en x et y et l'échelle) ont été calculés à l'aide d'un programme. Cette opération n'aurait pas été nécessaire si on avait disposé d'une carte à jour. Du cliché agrandi, on a retenu la zone d'intérêt dans un but de photo-interprétation (CARBONNELL, 1990). Sur le terrain ont été identifiés les différents types de constructions, les zones industrielles, les zones vertes et les forêts, etc. Les résultats de la photo-interprétation concernant les limites des différentes classes ont été retenus pour la classification des données TM.

4.4. Travaux sur le terrain

Les travaux sur le terrain ont été exécutés pour l'identification des différentes classes et des limites des zones urbaines afin de compléter la photo-interprétation des photographies aériennes faite à l'interprétoscope. Les résultats ont été reportés sur la carte au 1: 50 000 pour la numérisation et le calcul de surfaces, en vue d'établir la dynamique urbaine.

Tableau 1. Évolution de la zone urbaine

Classes d'occupation du sol			Surfaces totales (ha)			
1978	1988	1990	Classe	1 978	1 988	1 990
A	A	A	A	1 327	1 542	1 542
F	F	F	F	1 991	1 960	1 910
ZC	A	A	ZC	4 698	3 944	3 114
ZDC	ZDC	ZDC	ZDC	5 352	6 732	5 527
O	O	O	ZI	-	-	2 295
O	O	ZDC	Extension de la zone urbaine			
O	ZDC	ZDC	1978-1988		1988-1990	
O	ZC	ZC	Extension urbaine			
O	O	ZC	840 ha – 6,3 %		210 ha – 3,8 %	
			Reconstruction urbaine			
			1 978 ha – 4,2 %		1 240 ha – 22,4 %	
			Rythme annuel			
			3,7 % / année		13,1 % / année	

A : surfaces d'eau;
 F : forêts et zones vertes;
 ZDC : zone dense construite;
 ZI : zone industrielle;
 ZC : zone construite;
 O : autres affectations

5. Analyse des résultats

La comparaison des images classées et la représentation de celles-ci sur la carte ont permis la mise en évidence de la dynamique urbaine. Les données MSS ont été utilisées pour représenter la situation de départ, existante en 1978 (COULOMBE et SEUTHÉ, 1993). Les données TM classées sur lesquelles a été superposée cette situation permettent l'identification de changements effectifs entre 1978 et 1988 (fig. 2). Les zones d'incertitude sont situées dans les quartiers d'habitation résidentiels où les arbres couvrent les maisons dispersées. Une partie des changements de classes est due aux démolitions et aux reconstructions sur de grandes superficies, dans le but de l'extension de la zone industrielle ou pour la construction d'habitations collectives. Le développement de la ville a été fait selon un mode radial. Les zones industrielles qui, à un moment donné, étaient à la limite de la zone construite, sont aujourd'hui englobées dans les nouveaux ensembles d'habitation. Les nouveaux ensembles d'habitation conçus et exécutés dans la période analysée, comme Aviatiei au nord de la ville et Berceni Sud, ont été élevés sur l'emplacement d'anciennes constructions démolies. Les espaces verts n'ont pas subi de grandes transformations pour la période analysée. Les plans d'eau ont été agrandis par la réalisation, en amont de Bucarest, sur la rivière Dâmbovită, d'un barrage et d'un lac au détriment de la zone

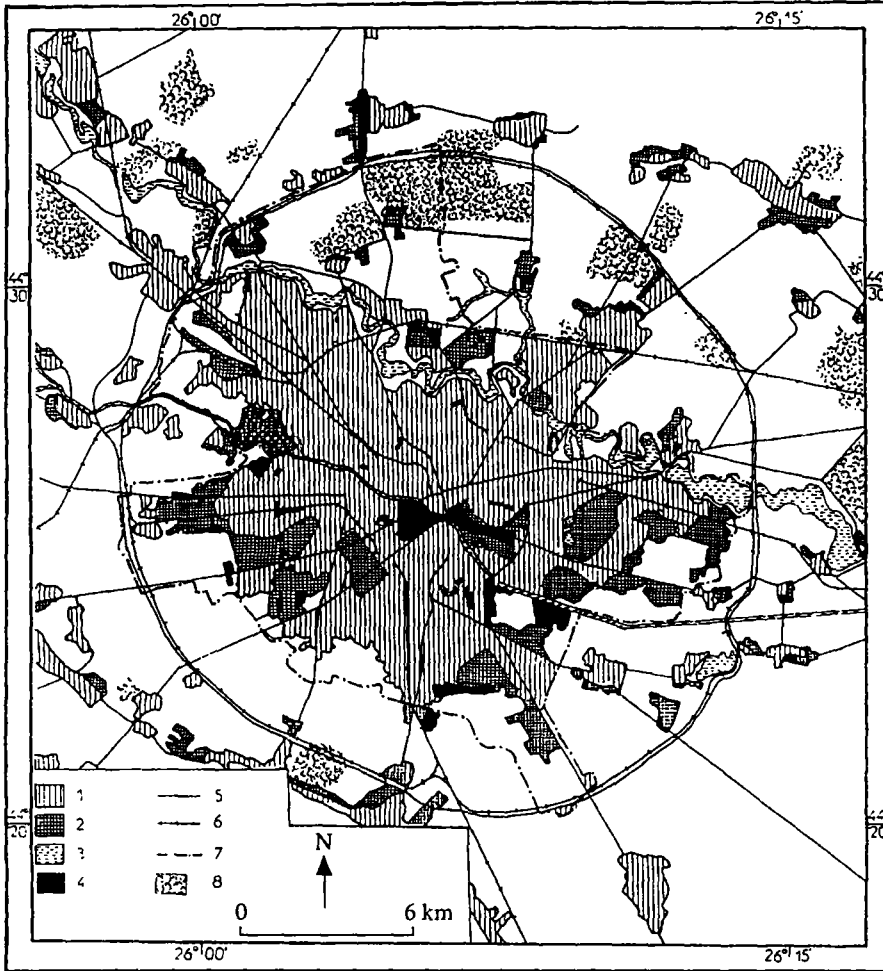


Figure 2. Développement urbain de la ville de Bucarest de 1978 à 1990 (d'après MSS 1978, TM 1988 et HRV 1990) : 1) zone urbaine en 1978; 2) zone de développement de 1978 à 1988; 3) plans d'eau; 4) zone de développement de 1988 à 1990; 5) routes principales; 6) chemins de fer; 7) limites administratives; 8) forêts

construite qui a été démolie. La surface couverte par la zone urbaine étudiée pour la période de 1978 à 1988 est d'environ 840 ha et, pour la période de 1988 à 1990 est d'environ 210 ha.

Le développement s'est fait radialement avec des proportions identiques dans les six secteurs administratifs. Des transformations profondes ont eu lieu dans le domaine du patrimoine architectural et des monuments historiques avec la politique de systématisation pratiquée en ce temps-là. Ces types de changements n'ont pas été mis en évidence. Le développement des localités périurbaines s'est fait en mode planifié dans des zones destinées aux nouveaux quartiers. Pour les périodes de 1978 à 1988 et de 1988 à 1990, 359 ha et respectivement 65 ha sont occupés par de nouvelles constructions dans la zone d'étude. Les villages démolis avant 1989 sont en voie de reconstruction sur les anciens sites.

6. Utilisation des photographies aériennes

Les photographies aériennes numérisées sont utilisées pour la création et l'actualisation de la base géométrique d'un SIT urbain. Les images numérisées sont exploitées automatiquement.

6.1. Prétraitement des images numérisées

Il s'agit des corrections géométriques, de la création de l'image normalisée dans le cas d'un cliché isolé ou de deux images dans le cas de l'exploitation stéréoscopique. Dans cette étape, on effectue un filtrage radiométrique et des opérations de renforcement des lignes et des limites ou binarisation des images.

6.1.1. Corrections géométriques

Il faut appliquer les corrections suivantes aux photographies numérisées : la déformation du support d'émulsion, la distorsion de l'objectif de la chambre de prise de vue, la réfraction atmosphérique, la courbure de la Terre (KRAUS, 1993) et la correction de la distorsion du système de numérisation.

6.1.2. Création de l'image normalisée

Les images normalisées sont les images qui ont été obtenues par orientation absolue. Dans le cas de deux images, elles ont seulement une parallaxe longitudinale dans les images normalisées (KRAUS, 1993). Pour la création d'une telle image, il faut connaître les éléments d'orientation X_0 , Y_0 , Z_0 (les coordonnées du centre de projection dans le système de référence) et les angles K (déversement), Φ (convergence) et Ω (site). Ces éléments peuvent être déterminés à l'aide de points d'appui dont les coordonnées sont connues dans l'espace de l'image et dans l'espace de l'objet. Les formes linéaires correspondantes, connues aussi dans les deux espaces (STRUNZ, 1992), peuvent être utilisées pour la détermination de ces éléments. Après l'application des corrections énumérées ci-dessus et après le calcul des éléments d'orientation en utilisant une transformation par colinéarité, on passe à la formation de l'image normalisée par rééchantillonnage linéaire ou cubique. Dans le cas d'un couple d'images pour la création des images normalisées, il faut tenir compte des composantes de la base de prélèvement (WOOSUG and SCHENK, 1992) en considérant connus les éléments d'orientation absolue des deux images. Pour l'interprétation automatique et l'exploitation des couples d'images numérisées et normalisées par des méthodes stéréoscopiques, on utilise la corrélation sur les lignes épipolaires.

6.1.3. Renforcement, identification et extraction des formes linéaires de l'image numérisée

L'amélioration des images est effectuée par filtrage avec des filtres mettant en relief les formes linéaires. On utilise les filtres laplaciens, où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées sur des bases statistiques (BONN et ROCHON, 1992). L'identification des limites dans l'image numérisée peut être faite directement à l'aide des algorithmes unidimensionnels ou bidimensionnels de manière séquentielle avec des éléments de contrôle, par exemple le nombre de pas recherché, la longueur de la ligne, etc. (PAVLIDIS, 1984). L'extraction des formes linéaires de l'image normalisée en utilisant un SIT de

référence peut être faite à l'aide d'une base de connaissances sur l'espace-objet. Les limites correspondantes de la base de données géométriques du SIT seront extraites et reportées sur l'image à partir des éléments connus : le point final, le point initial, la longueur de la ligne, etc. Cette projection va créer une région de recherche dans laquelle la limite sera identifiée et extraite. Pour l'extraction, la transformée de Hough (DUDA and HART, 1973) est utilisée. En considérant une valeur d'un seuil T , les éléments connexes de la ligne seront éliminés. Les lignes du contour polygonal ont été vectorisées en utilisant la transformation $\Psi - S$ décrite par GREENFELD et SHENK (1989). La vérification des formes linéaires extraites de l'image (fig. 3d) peut être faite par comparaison avec sa correspondante extraite de la base de connaissances sur l'espace-objet (fig. 3c), dans le cas d'une image isolée, ou en rapport avec sa correspondante extraite de la deuxième image du couple, sur un test de similarité, en cas d'exploitation stéréoscopique.

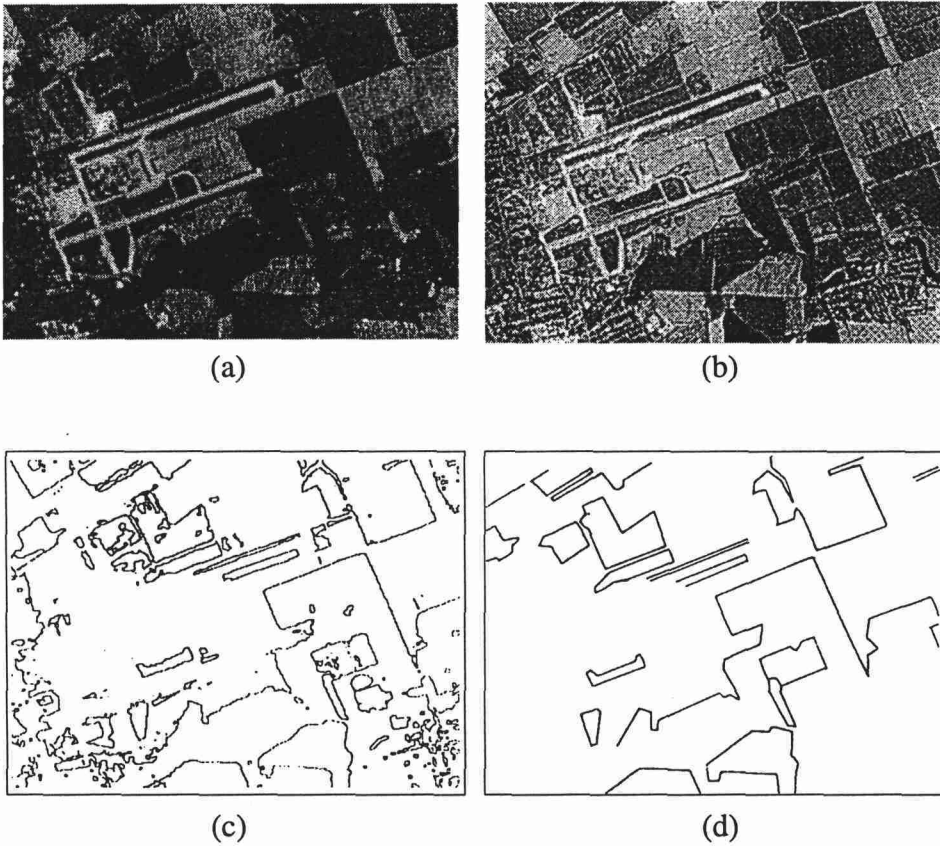


Figure 3. Extractions des formes linéaires de l'image numérisée : a) image originale; b) image améliorée par filtrage; c) formes linéaires; d) formes linéaires extraites

7. Conclusion

Pour la ville de Bucarest, un SIT urbain est en train d'être créé. Les principales sources d'informations sont les enregistrements de télédétection et les photographies aériennes. Cette étude confirme les avantages d'utilisation, pour de grandes surfaces, des données de télédétection pour la création de la base géométrique du SIT de façon efficace et rapide. Les données satellitaires doivent être complétées avec des sources complémentaires d'information et le traitement de ces données doit être fait en concordance avec la réalité de terrain. Pour l'analyse plus détaillée, les photographies aériennes numérisées constituent une base pour prélever les informations nécessaires à la mise à jour de la base géométrique d'un SIT urbain.

Les technologies de télédétection dans notre étude répondent aux nécessités pratiques suivantes : 1) collecte de grands volumes de données; 2) élaboration d'études concernant l'occupation du sol, l'emplacement d'industries, voies de communication, etc; 3) mise au point du support technique pour les solutions concernant la conservation, la reconstruction ou le développement des zones urbaine et périurbaine.

L'analyse de l'espace urbain doit être effectuée périodiquement à l'aide de données satellitaires intégrées dans un SIT urbain. Nos prochaines préoccupations seront orientées vers l'insertion des images KVR-1000 dans le SIT et l'utilisation de la dimension multispectrale des données TM de Landsat et HRV (XS) de SPOT en vue de dresser la carte du biotope de la zone urbaine et de la zone périurbaine de la ville de Bucarest.

8. Références

- BONN, F. et ROCHON, G. 1992. Précis de télédétection – Volume 1 : Principes et méthodes. AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 485 p.
- CARBONNELL, M. 1990. Essai d'utilisation des images satellitaires SPOT pour la détection et le suivi des modifications du paysage urbain en Roumanie. Société française de photogrammétrie et télédétection, bulletin n° 118, p. 22-26.
- COULOMBE, A. et SEUTHÉ, C. 1993. Nouvelles méthodologies d'exploitation de SPOT pour le développement en milieu urbain. Actes 8^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 7-10 juin, p. 735-743.
- CZERANKA, M. 1992. Monitoring and analysis of urban trends of great Cairo using multitemporal satellite imagery. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, vol. XXIX, tome B7, p. 494-498.
- DUDA, O. and HART, P. 1973. Pattern classification and scene analysis. John Wiley & Sons, New York, 482 p.
- GREENFIELD, J. and SHENK, A. 1989. Experiments with edge-based stereo matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n° 12, p. 1771-1779.
- KRAUS, K. 1993. Photogrammetry – Vol. 1 : Fundamentals and standard processes. Ed. Dummmler, Bonn, 397 p.
- PAVLIDIS, T. 1984. Algorithms for graphics and image processing. Springer, Berlin-Heidelberg, 420 p.

- RIDD, M. and DUDLEY-MURPHY, E. 1992. Global change and urban ecosystems; a role for remote sensing. ASPRS/ACSM, Technical papers Washington D. C. Aug. 3-8, vol. 4, p. 508-513.
- STRUNZ, G. 1992. Feature based image orientation and object reconstruction. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, Aug. Washington D. C. Com. III, vol. B3, p.113-118.
- WOOSUG, C. and SCHENK, T. 1992. Resampling digital imagery to epipolar geometry. Archives internationales de photogrammétrie et de télédétection, Aug. 1992, Washington D. C., Com. III, vol. B3, p. 404-407.

19

Étude par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises à l'échelle du 1: 25 000

MICHEL LENCO

*Ministère de l'Environnement, Direction générale de l'administration et du développement, 20, avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP, France;
téléphone : +33 (1) 42-19-16-16; télécopieur : +33 (1) 42-19-18-33*

Résumé

Le ministère de l'Environnement développe depuis cinq ans l'étude de l'écologie urbaine au moyen d'une politique de plans municipaux et de chartes locales pour l'environnement basée sur le partenariat. Parallèlement à cette action, une étude expérimentale par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations a été lancée par l'environnement sur dix agglomérations-pilotes : Montbéliard, Le Havre, Nancy, Nantes, Limoges, Bordeaux, Mulhouse, Dunkerque, Saint-Étienne et Perpignan. La télédétection apporte en effet des informations intéressantes à l'échelle du 1: 25 000 dans le domaine urbain sur l'association « bâtiments + végétation + voirie » selon l'importance relative de chaque composante, sur l'ancienneté et la nature des matériaux de construction, sur la forme et la hauteur des bâtiments. Elle contribue à décrire les différentes unités paysagères et les écosystèmes urbains non disponibles par ailleurs. L'analyse des 10 unités urbaines choisies pour leur importance, pour la variété des sites géographiques et d'équipement en SIG, permet d'aboutir à une méthodologie éprouvée d'exploitation des données avec proposition d'une nomenclature commune à 60 rubriques fiable à la classification européenne *Corine-Land Cover*. L'approche d'interprétation visuelle assistée par ordinateur d'images HRV (XS + P) de SPOT, améliorées sur les plans géométrique et radiométrique, selon des unités d'une taille minimale de 1 ha, a été retenue comme démarche principale. Les résultats sont ensuite intégrés dans les SIG locaux afin d'être fusionnés avec d'autres informations exogènes géocodées. Le but est d'aider à la gestion de l'espace avec des

préoccupations d'environnement urbain de distance et de densité à certains écosystèmes ou équipements dans divers découpages administratifs ou géographiques. L'étude conduit à faire des recommandations de méthodes de traitement et de nomenclature commune pour être étendues aux autres villes de France et dans d'autres pays.

1. Introduction

Le ministère de l'Environnement développe depuis quatre ans l'étude de l'écologie urbaine au moyen d'une politique de plans municipaux et de chartes d'environnement basée sur le partenariat. Parallèlement à ces plans et chartes, et en prolongement de travaux prometteurs effectués sur la région parisienne (SFERES, 1986) une étude expérimentale par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations a été lancée par ce Ministère avec la participation financière du Centre national d'études spatiales (CNES), du ministère de l'Équipement, de l'Union européenne (DGXI, EUROSTAT) et d'une dizaine d'agglomérations-pilotes : Montbéliard (MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1989), Le Havre, Nancy (UNISFERE, 1992; Lenco, 1993; Lenco and TOURNEUX, 1993); Nantes, Limoges (VERCLER, 1994), Bordeaux (opération lancée par EUROSTAT et l'Institut national de statistiques) (GEOIMAGE, 1993), Mulhouse (SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995), Dunkerque (BOUSQUET, 1995), Saint-Étienne, Perpignan (certaines agglomérations sont constituées en communauté urbaine ou district, ou bien encore en syndicat de communes, d'autres non).

La télédétection apporte en effet des informations intéressantes sur l'association « bâtiments + végétation + voirie » selon l'importance relative de chaque composante, sur l'ancienneté et la nature des matériaux de construction, sur la forme et la hauteur des bâtiments. Elle contribue ainsi à décrire les différentes unités paysagères et les « écosystèmes urbains » non disponibles par ailleurs.

Les projets de développement de la connaissance de l'environnement urbain en Europe occidentale et orientale et, d'autre part, la méthode d'analyse par télédétection des grandes agglomérations au 1: 25 000 de plus de 1 ha étant semblable à celle de l'opération européenne *Corine-Land Cover* au 1: 100 000 et par unités de plus de 25 ha, expliquent la participation de l'Union européenne et du CNES à l'entreprise. Il sera ainsi possible de mettre au point une classification spécifique des écosystèmes urbains détaillée à 5 niveaux et compatible avec la nomenclature Corine qui n'en compte que 3.

Le ministère de l'Équipement s'est intéressé à l'expérience surtout pour l'aspect gestion de l'occupation du sol détaillée des grandes villes dans des systèmes d'information géographique (SIG) intégrant les données utilisées habituellement par les urbanistes. De leur côté, les agglomérations-pilotes, déjà sensibilisées aux problèmes d'environnement, attendaient de cette étude, l'obtention d'informations détaillées et actualisées sur l'occupation du sol avec introduction de préoccupations environnementales. Elles souhaitaient rapprocher ces résultats d'autres renseignements localisés disponibles dans des SIG, en cours de fonctionnement ou en cours de constitution, afin de parvenir à une gestion automatisée au 1: 25 000 de l'ensemble du territoire et des écosystèmes urbains de chaque agglomération. Le système mis en place doit en particulier servir à calculer des indicateurs d'environnement de densité et de proximité, et contribuer à analyser les paysages. Il donnera ainsi la possibilité de suivre l'exécution des plans et projets et de préparer des scénarios d'aménagement.

2. Objectifs

Les buts recherchés sont les suivants :

- établir une méthodologie éprouvée d'exploitation des données satellitaires sur l'occupation biophysique du sol (avec proposition d'une nomenclature commune détaillée et raccordable à la classification européenne Corine) et d'intégration des résultats dans les SIG locaux; ceci permettra de satisfaire les besoins d'information des aménageurs et des environnementalistes afin d'aider à la gestion à l'échelle du 1: 25 000 des grandes unités urbaines qui posent des problèmes d'environnement spécifiques à cause de leurs dimensions humaines et spatiales; c'est pourquoi les agglomérations retenues sont d'importance et de caractéristiques différentes ainsi que de niveau d'équipement variable en SIG;

- mettre au point un outil pour connaître l'état et les modifications des écosystèmes urbains au 1: 25 000 afin de suivre les changements à un rythme triennal ou quinquennal (DELAVIGNE *et al.*, 1991; VILLE DE STRASBOURG, 1992), des grandes unités urbaines en vue d'aider :

- . à la prise de décision pour la gestion et l'élaboration des scénarios relatifs à l'occupation du sol et aux unités paysagères, avec la prise en compte de préoccupations d'environnement pour améliorer le cadre de vie (POS : plan d'occupation des sols; SDAU : schéma directeur d'aménagement urbain);

- . à la sensibilisation des responsables locaux au moyen d'images et de résultats cartographiques intégrés dans un SIG avec d'autres informations exogènes;

- faire des recommandations pour entraîner les 50 autres grandes agglomérations françaises dépassant 100 000 habitants à utiliser la télédétection dans leur SIG, où les résultats numérisés issus des données satellitaires pourront être fusionnés avec d'autres informations géocodées : recensement de la population et des logements par îlot (DUREAU *et al.* 1991), équipements et services, réseaux linéaires, limites administratives, documents d'urbanisme, cadastre, établissements industriels classés, etc., pour déboucher sur un système d'indicateurs d'accès, de proximité et de densité, qui apportera des renseignements par îlot, quartier, commune, sur les grandes concentrations urbaines qui posent des problèmes d'environnement spécifiques.

Le traitement sur SIG permet, en effet, d'établir un système d'indicateurs d'environnement : 1) en décrivant le cadre de vie de la population vivant dans ou à proximité des diverses unités paysagères ou des divers écosystèmes urbains; 2) en mesurant la distance des logements et de la population à certains écosystèmes ou installations attractifs ou répulsifs dans l'agglomération; 3) en calculant la densité de la population par type et surface d'écosystème selon la distance ou selon divers découpages administratifs ou géographiques; 4) en appréhendant également la répartition et la densité en nombre et en surface de certains écosystèmes ou équipements suivant différentes limites administratives ou géographiques avec la population concernée.

Il est prévu aussi d'étendre l'opération dans le cadre de l'Union européenne (GÉOIMAGE, 1993) aux autres pays membres, aux pays de l'Est et à ceux du bassin méditerranéen (ANDRIAMIHAMINA, 1992; ÉQUIPE FRANCO-ÉGYPTIENNE, 1990; ÉQUIPE FRANCO-LIBANAISE, 1989; GAMBA, 1989; NASCIMENTO *et al.*, 1991).

3. Description de l'expérimentation

Les dix agglomérations-pilotes (tab. 1) ont été choisies en fonction de la diversité des sites géographiques et des équipements de SIG parmi les agglomérations ayant souscrit ou

Tableau 1. Agglomération retenues dans l'étude expérimentale par télédétection au 1: 25 000 des écosystèmes urbains des grandes agglomération de plus de 100 000 habitants

	Données utilisées	Particularités des sites	Particularités des études
Montbéliard	TM et HRV (XS)	Agglomération industrielle subissant d'importantes mutations. Conflit de zone d'influence avec l'agglomération voisine de Belfort. Proximité du tracé du TGV-est.	Étude diachronique et analyse des phénomènes thermiques. Utilisation pour des scénarios de développement. Mise sur SIG artisanal.
Nancy	TM et HRV (XS + P)	Agglomération traversée par la Meurthe avec de faibles écarts d'altitude et des types d'habitat particulier.	Évaluation de l'apport des différents types de données. Développement des prétraitements d'amélioration et fusion d'images. Utilisation importante sur SIG.
Le Havre	HRV (XS + P)	Agglomération portuaire en estuaire, sans cadre juridique et comportant des zones humides. Travaux d'équipement en cours.	Traitements sur petit équipement Multiscope d'un CETE. Utilisation d'une classification dirigée en deux temps. Essai d'analyse par quartiers. Étude d'évolution.
Limoges	HRV (XS + P) et MNT	Agglomération étendue ayant un dénivelé notable et recouvrant des milieux naturels importants.	Utilisation des résultats pour la préparation du SDAU et la création d'un SIG.
Nantes	HRV (XS + P)	Agglomération venant de se constituer, étendue en estuaire et comprenant des milieux naturels importants (zones humides notamment).	Traitements mixtes, partie en classification dirigée, partie en PIAO, selon les zones. Utilisation des résultats pour la création d'un SIG.
Mulhouse	HRV (XS + P), MNT et TM	Agglomération non constituée dans un cadre juridique. Zone frontalière (REGIO du district des trois frontières).	Agglomération disposant d'un SIG très perfectionné et d'un MNT. Développement de prétraitements et traitements en PIAO.
Dunkerque	HRV (XS + P)	Port de mer très important. Agglomération étendue située en zone frontalière et incluant des milieux naturels côtiers variés (zones humides et dunes notamment).	Agglomération ayant un SIG perfectionné.
Saint-Étienne	HRV (XS + P), MNT et TM	Agglomération non constituée dans un cadre juridique. Contact de zones d'influence avec l'agglomération voisine de Lyon. Situation en vallée fluviale à relief accentué.	Étude des aspects paysagers en 3D sur cette agglomération située en milieu accidenté à végétation préservée. Utilisation pour un SIG à créer.
Bordeaux	HRV (XS + P)	Agglomération portuaire en estuaire, très étendue, à limites physiques imprécises. Existence d'un fichier cadastral numérisé.	Essais de nomenclature EUROSTAT (U.E.) et étude des limites d'urbanisation par analyse morphologique. Absence de participation locale.
Perpignan	HRV (XS + P) et MNT	Agglomération méditerranéenne à proximité de la mer. Absence de cadre juridique.	Valorisation du SIG local. Étude d'évolution.

devant signer un plan ou une charte d'environnement et intéressées, en outre, par l'usage de la télédétection spatiale dans un SIG.

Dans le but de présenter des recommandations pour étendre l'utilisation de la télédétection à d'autres grandes unités urbaines et d'évaluer assez précisément les coûts et la méthodologie la plus adéquate, différents types de données satellitaires, associés ou non à un modèle numérique de terrain (MNT) selon le cas, ont été utilisés et soumis volontairement à des méthodes et ateliers de traitement différents (les ateliers étaient localisés en général à proximité des agglomérations, par exemple la société SERTIT, installée dans la banlieue de Strasbourg, a été choisie pour l'étude de Mulhouse).

Les opérations les plus réussies sont celles qui se sont déroulées en collaboration très étroite avec les responsables des services techniques locaux. Un suivi de l'utilisation des résultats dans les SIG est par ailleurs assuré *a posteriori*.

Dès les premières agglomérations examinées deux faits marquants ont ressorti : 1) les données TM de Landsat ou HRV (XS) de SPOT seules sont insuffisantes pour fournir des résultats cartographiques sur le milieu urbanisé à l'échelle du 1: 25 000 qui intéressent les services techniques des agglomérations pour gérer l'ensemble des territoires de leur ressort; les données HRV fusionnées XS + P sont celles qui apportent le meilleur tronc d'informations de base pour l'étude thématique des écosystèmes urbains au 1: 25 000, ce qui est évident pour la finesse géographique, mais l'était moins au départ quant à la richesse thématique par rapport à une fusion TM + HRV(P) par exemple; le complément TM permet d'améliorer la connaissance thématique de l'occupation du sol de certaines zones (voir section 4); 2) les classifications dirigées par pixel en approximativement 25 classes ne peuvent donner seules une description de l'occupation du sol très détaillée sur le milieu urbain avec une fiabilité effective de classement thématique du territoire suffisante de l'ordre de 90 à 95 % et sans comporter de rubrique rebut à classement indéterminé difficilement gérable dans un SIG (CETE, 1992). Le lien entre les classifications dirigées avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover* est quasi impossible du fait que la méthode utilisée pour parvenir à cette dernière repose sur une conception différente d'analyse d'image : celle de la photo-interprétation d'images assistée par ordinateur (PIAO) donnant une classification hiérarchisée par zone à plusieurs niveaux sans classe rebut.

Ceci explique pourquoi l'interprétation d'image améliorée assistée par ordinateur avec l'appui d'informations exogènes a paru être la méthode la plus adaptée pour satisfaire les besoins exprimés par les agglomérations d'une classification très fiable comprenant 50 à 55 rubriques établie par zone de 1 ha ou plus. À l'exception de l'essai effectué sur Le Havre, toutes les agglomérations ont été analysées en PIAO, mais avec des variantes cependant.

4. Méthodologie proposée

4.1. Choix des images

L'idéal est d'obtenir un couple d'images HRV (XS-P) de SPOT enregistrées simultanément pendant la belle saison: ce qui a pu être réalisé sur les agglomérations de Nancy et de Bordeaux. La fusion d'images XS et P prises à des dates différentes ne pose pas de problème particulier, mais il faut éviter d'acquérir des images enregistrées pendant la mauvaise saison lorsque le rayonnement solaire et l'activité végétale sont affaiblis. Si ceci paraît évident pour les données multibandes XS, la remarque vaut aussi pour les données panchromatiques, destinées surtout à améliorer la finesse géométrique de l'image XS

associée. Cet inconvénient n'est pas dû aux corrections géométriques et a été rencontré sur les agglomérations de Limoges, Le Havre et Dunkerque : la fusion XS+P présente alors un aspect flou et l'on est conduit à examiner à part chacune des images XS (en belle saison) et P (en mauvaise saison). Il est recommandé d'éviter les images HRV présentant un angle de prise de vue trop important, de façon à ne pas avoir d'écarts de positionnement géométrique inégalement répartis sur l'ensemble de l'agglomération quel que soit le soin apporté aux corrections géométriques.

4.2. Prétraitements et améliorations d'images

L'acquisition d'images brutes au niveau 1A semble préférable pour effectuer en une seule fois les corrections géométriques suivies des améliorations d'images. Lorsque le relief de l'agglomération est relativement plat, on peut se contenter d'une correction orbitographique affinée par points de contrôle pour minimiser l'erreur de parallaxe des angles de prise de vues (cas de Nancy). L'orthorectification est conseillée pour les agglomérations à relief accusé ou observées avec des images ayant un angle de visée important. Elle permet une parfaite cohérence géométrique recherchée dans la combinaison P+XS et dans l'intégration des résultats obtenus en télédétection dans les SIG. Des MNT existants auparavant ont été utilisés pour l'étude de Mulhouse (pas de 40 m) et Perpignan (pas de 50 m), et des MNT ont été acquis spécialement pour Limoges (pas de 20 m), qui présentait un dénivelé de près de 500 m, ainsi que pour Saint-Étienne (pas de 40 m) où une analyse paysagère particulière en trois dimensions a été effectuée sur ce site collinaire. Dans les trois derniers cas, le MNT a été élaboré par l'Institut géographique national tandis que, pour Mulhouse, il a été établi à partir d'un couple stéréoscopique HRV.

Après une série de prétraitements de délignage ou décolonage et de suppression des artefacts par prise de moyenne ou filtrage, lorsque ces inconvénients se présentent, les données spatiales sont soumises à des corrections géométriques à partir de points d'appui et à un rééchantillonnage qui consiste à affecter une valeur à des pixels dont les dimensions ou la position ont été modifiées par rapport aux pixels d'origine. Pour le rééchantillonnage, on utilise en particulier la méthode de restauration par déconvolution qui fournit les meilleurs résultats. L'information radiométrique est restituée de façon correcte sur le plan physique et permet un suréchantillonnage par création de nouvelles informations très proches de la réalité et non par simple multiplication de pixels; c'est pourquoi les images résultantes ont des contours nets et respectent les détails. Le rééchantillonnage à 10 m ou à 7,5 m a été employé en calant XS sur P et a permis de diminuer la taille des pixels en minimisant l'effet de zoom dû au suréchantillonnage. L'image rééchantillonnée et suréchantillonnée permet d'obtenir des contours améliorés, de mieux mettre en lumière les objets linéaires et les phénomènes de texture, ce qui est important pour l'analyse par PIAO des écosystèmes urbains de forte et moyenne densités d'occupation.

Une bonne technique pour fusionner les données panchromatiques HRV (P) avec les données multibandes HRV (XS) est la transformation tristimulus, ou intensité-teinte-saturation, ou bien encore luminance-teinte-saturation (*intensity-hue-saturation = I.H.S.*). Cette technique consiste en un transfert de données entre deux référentiels de représentation des couleurs disponibles dans la station de traitement d'image :

- le référentiel de synthèse RVB (rouge, vert et bleu);
- le référentiel numérique en intensité-teinte-saturation qui code les couleurs au niveau de l'ordinateur (comme le RVB corrélé avec XS1 et XS2).

Le panchromatique est corrélé le plus fortement avec la luminance (gamme de gris) qui forme un canal indépendant. C'est pourquoi les valeurs panchromatiques sont recalées par

rapport à l'histogramme de répartition des valeurs de l'intensité. Le référentiel « intensité, teinte, saturation » devient alors « panchromatique, teinte, saturation » où la teinte et la saturation décrivent les valeurs radiométriques des canaux XS1, XS2 et XS3. Les 4 canaux XS3, XS2, XS1 et P se trouvent ainsi réunis dans un référentiel à 3 dimensions seulement. En repassant au référentiel RVB on récupère l'information colorée visualisable sous forme de 3 néocanaux (PXS3, PXS2, PXS1) dont une partie de l'information multibande a été éliminée par la substitution du panchromatique à l'intensité. Les néocanaux produits sont considérablement améliorés : le flou dû au suréchantillonnage des données disparaît. Le résultat de cette opération donne une nouvelle image riche en couleurs mais avec une bonne amélioration de la netteté des contours en plus.

L'amélioration des contrastes de l'image se fait par adaptation de dynamique des bandes spectrales (linéaire, égalisation de l'histogramme) au paysage de la scène; elle peut être globale ou locale, cette dernière distinction étant utile pour différencier l'étude des communes périphériques de celle de la partie centrale de l'agglomération. Les contours peuvent être rehaussés par application d'une convolution unidirectionnelle avec une fenêtre $n \times n$, variable ($3 \leq n \leq 51$) selon l'intensité des contrastes de l'image, où les pixels (en nombre impair) sont affectés de coefficients de pondération symétriques par rapport au pixel central qui a une pondération dominante.

4.3. Interprétation visuelle assistée par ordinateur

La PIAO (photo-interprétation assistée par ordinateur) peut être effectuée à partir de calques d'interprétation d'image sur tirage papier ou directement sur écran en station de traitement. L'interprétation sur écran immobilise davantage la station, mais permet d'éviter l'étape de numérisation des résultats sur calques, opération longue et source d'erreurs de codification (y compris les oublis) et d'écarts de positionnement. *A contrario*, le recours systématique à l'écran risque aussi de limiter la fonction de globalisation de l'œil et le temps de réflexion nécessaire au règlement des cas complexes ou litigieux. Dans le cas d'une analyse visuelle sur tirage papier, la restitution d'image doit être d'excellente qualité pour faciliter le travail de l'interprète.

L'interprète s'appuie sur une documentation exogène pour effectuer son analyse d'image : 1) cartes et documents divers disponibles localement (parfois même sur SIG); 2) échantillon de photographies aériennes verticales extrait de la dernière couverture disponible, au 1: 20 000 en général, pour aider à analyser l'image et à lever les cas douteux (problèmes de hauteur de bâtiments et de distinction entre zones commerciales et industrielles par exemple); 3) observations sur le terrain.

Le zonage des « écosystèmes urbains », avec un seuil minimum de 1 ha compte tenu de l'échelle de travail, repose sur des raisonnements multicritères de couleur, de texture, de structure et de forme. Il est effectué à 95 % sur la base des données satellitaires et à 5 % avec l'appoint de photographies aériennes pour une nomenclature de 50 à 60 rubriques. On peut estimer que les affectations thématiques des zones élémentaires délimitées à l'aide des données satellitaires sont faites à 80 % uniquement à partir des images satellitaires, à 15 % avec l'appui de photographies aériennes et à 5 % avec l'aide de la documentation exogène disponible ou de visites sur le terrain. Il est bien clair que certains espaces urbains spécialisés et fonctionnels comme les lieux scolaires, les parcs et châteaux, les campings boisés, les petites emprises industrielles et commerciales imbriquées dans les zones d'habitat, ne peuvent être repérés qu'avec l'appoint de sources complémentaires exogènes à la télédétection.

Au cours de son analyse d'image, l'interprète a accès à une station de traitement interactive pour visualiser et traiter les données de base. Il y effectue des zooms sur les zones à problèmes, procède à une décorrélation des canaux par analyse en composantes principales et à des transformations radiométriques : ratios et combinaisons linéaires de bandes spectrales donnant des néocanaux tels que : l'indice normalisé de végétation, l'indice de brillance, l'indice de minéralisation ou de cuirasse (SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995; BOUSQUET, 1995). Il se livre aussi à des analyses de voisinage à l'aide de filtres. Parmi les filtres utilisés, outre le filtre laplacien bidimensionnel, on citera les filtres passe-haut, de Wallis et de Sobel pour accentuer les contrastes locaux, et celui de Kirsch pour la détection des contours. On notera cependant que l'apport d'information dû à l'usage de filtres apparaît faible après les améliorations d'image effectuées au préalable. L'œil humain reste fondamental pour le choix des filtres.

L'interprète peut avoir recours aussi à des classifications automatiques dirigées ou non dirigées pour dégrossir ou, au contraire, affiner son interprétation.

Le concept de PIAO recouvre finalement des variantes de méthode assez nombreuses. Lors de son travail, l'interprète peut avoir recours à des images semblables prises à des saisons différentes ou par d'autres capteurs. Les données TM apportent en particulier des informations supplémentaires intéressantes dans les bandes spectrales TM1 (bleu) et TM5 (infrarouge moyen).

Seuls les axes majeurs des réseaux ont été pris en compte sur les images satellitaires car, au 1: 25 000, la représentation des réseaux (connus par ailleurs et incorporés dans les SIG locaux) ne peut être que symbolique, leur largeur ne représentant pas le plus souvent un nombre entier de pixels et l'erreur de superficie cartographiée pouvant être importante.

La cartographie obtenue est contrôlée par sondage spatial au moyen d'une grille de points ou de parcours de transects donnant lieu à une vérification ou à une validation sur photographies aériennes ou sur le terrain. Elle s'est avérée fiable à 95-97 % sur les agglomérations de Montbéliard, Nancy et Limoges en ce qui concerne la définition et la classification thématique des zones d'écosystèmes. Ces résultats sont valables pour l'ensemble des classes. En effet, la méthode de PIAO utilisée pour l'interprétation permet d'introduire des traitements plus développés et un recours plus important aux données exogènes pour discriminer les zones élémentaires des catégories les plus difficiles à isoler par télédétection. La méthode d'analyse explique le niveau de fiabilité assez uniforme obtenu sur l'ensemble des classes, ce qui n'est pas le cas dans les classifications automatiques. Une autre méthode a été essayée sur Mulhouse à partir de profils d'image qui permettent de repérer des séries de réponses sur les canaux ou indices et de les mettre en relation avec les séquences correspondantes de la nomenclature. Cette procédure semble prometteuse pour fournir une validation spatiothématique qualitative. Le tirage aléatoire de zones classées par thèmes à valider sur le terrain demande un positionnement rigoureux, un échantillonnage important et un travail assez lourd sur le terrain ou sur photographie aérienne; c'est pourquoi il s'avère peu opérationnel.

La nomenclature établie pour la connaissance des « écosystèmes urbains » (tab. 2) tient compte des possibilités offertes par l'imagerie satellitaire et des besoins des grandes agglomérations. Cette nomenclature conserve l'architecture de la classification générale européenne d'occupation du sol *Corine-Land Cover* qui a l'avantage de présenter des niveaux thématiques hiérarchisés partant d'une conception globale et qui peut être développée à des niveaux supplémentaires par affinements successifs de thèmes particuliers d'autant que les échelles sont plus précises. C'est ainsi que la nomenclature européenne a trois chiffres a pu être détaillée à des niveaux supplémentaires 4 et 5, sur les zones urbanisées principalement. Le travail sur les grandes agglomérations a ainsi permis d'exploiter au maximum toutes les possibilités offertes actuellement par la télédétection

Tableau 2. Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
1 Territoires artificialisés	11 Zones urbanisées	111 Tissu urbain continu dense	1111 Type centre ville	11111 Noyau (centre) dense (ancien, parcellaire étroit)
	12 Zones industrielles et commerciales, activités de services	112 Tissu urbain discontinu	1112 Type centre bourg (noyaux denses des communes périphériques)	11112 Faubourgs et quartiers denses ou moyennement denses
	13 Mines, décharges et chantiers	113 Espaces urbains spécialisés	1121 Habitat pavillonnaire bas	11211 Habitat d'extension linéaire des communes périphériques (villages-rues)
	14 Espaces verts artificialisés	121 Emprises industrielles commerciales et de services	1122 Habitat (ou bâtiment) collectif	11212 Forte densité de construit (peu de végétation et forte organisation linéaire) lotissements
	15 Espaces non affectés en milieu bâti résidentiel, commercial ou de service (espaces vacants et friches urbaines)	122 Réseaux de communication et espaces associés	1123 Habitat mixte collectif et pavillonnaire	11213 Moyenne densité de construit (présence de végétation et organisation parcellaire marquée)
		123 Zones portuaires (y.c. ports de plaisance)	1124 Habitat de type rural (bourg, hameau, mitage) bâtiments isolés	11214 Assez faible densité de construit (végétation marquée et organisation perceptible autour du réseau viaire)
		124 Aéroports, aérodromes	1131 Cimetières	11215 Faible densité de construit avec forte présence de végétation
		131 Extraction de matériaux (sablères, carrières, mines à ciel ouvert, gravières sous eau)	1132 Emprises militaires	11221 Grands ensembles avec grande emprise des bâtiments au sol, grands collectifs hauts (grandes barres et tours)
		132 Décharges et dépôts de remblais, déblais	1133 Emprises scolaires et universitaires	11222 Grands ensembles avec une petite emprise des bâtiments au sol, petits collectifs bas, cités minières
		133 Chantiers (espaces en construction, excavations et sol remaniés à l'exclusion des travaux d'aménagement foncier agricole)	1134 Emprises hospitalières	11321 Installations (casernes, camps,...)
		141 Espaces urbains aménagés (pelouses et zones arborées)	1135 Sites historiques, lieux culturels, emprises religieuses	11322 Autres (terrains de manœuvre, champs de tirs, pistes d'essai, etc.)
		142 Equipements sportifs et de loisirs	1136 Autres services publics (parcs des expositions, centres postaux, etc.)	11331 Emprises scolaires et universitaires
		143 Jardins familiaux ou ouvriers (en concentration)	1211 Emprises industrielles (y.c. entrepôts, stockage, accès, stationnement)	11332 Installations, bâtiments
			1212 Zones commerciales (au sens large)	11333 Autres (cours, campus, parkings)
			1213 Parcs technologiques, aires d'activité de service	1134 Emprises hospitalières
			1214 Emprise du retraitement de l'eau	11341 Installations, bâtiments
			1215 Stations d'élevage	11342 Autres (cours, jardins, parkings)
			1216 Friches industrielles	11361 Bâtiments, installations
			1221 Réseau routier principal et espaces associés (routes, autoroutes, échangeurs, aires de repos)	11362 Parkings
			1222 Réseau ferré et espaces associés	12111 Type industries lourdes (grandes unités) et production d'énergie

Tableau 2 (suite). Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

				1223	Espaces parkings hors des zones industrielles commerciales et de services Bassin de marée (avant port et rade) Bassin de radoub, chantiers navals Installations et entrepôts (y.c. quais) Aéroports Aérodromes Extractions actives et espaces associés Zones d'extraction en mutation (à l'abandon, en friche, en réhabilitation) Décharges et dépôts de remblais, déblais Dépôts de mines et industries lourdes (terrils, etc.) hydrocarbures Parcs et jardins publics ou privés Châteaux et parcs associés Golfs Hippodromes, centres équestres Équipements sportifs et de loisirs (stades, tennis, etc.) Campings Autres (vélodromes, motocross, karting, etc.)
				1231	12112 Autres activités industrielles (légères) 12113 Pistes et terrains d'essai 12121 Bâtiments, installations 12122 Parkings 12141 Station d'épuration 12142 Décanteurs, lagunage 12211 Tronçons, voiries (y.c. remblais) 12212 Espaces interconnexions, péages, aires de repos, gares routières 12221 Tronçons ferrés (y.c. remblais) 12222 Gares, triages, ateliers de réparation, entrepôts, quais 12411 Installations 12412 Pelouses 12421 Installations 12422 Pelouses 13111 Gravières et sablières actives 13112 Carrières actives 13113 Mines à ciel ouvert actives
				1232	
				1233	
				1241	
				1242	
				1311	
				1312	
				1321	
				1322	
				1411	
				1412	
				1421	
				1422	
				1423	
				1424	
				1425	
2	Territoires agricoles	21	Terres arables (y.c. jachères)	211	2111 Maraîchage, cultures florales 2112 Autres 212 Maraîchage, cultures florales 231 Prairies humides 232 Autres prairies
	22 Cultures permanentes	22	Terres arables hors périmètre d'irrigation	212	
	23 Prairies	23	Périmètre irrigué en permanence	221	
			Vignobles	222	
			Vergers et petits fruits	231	
			Prairies		
				2111	Mailage bocager important
				21112	Mailage bocager lâche ou absent
				21121	Mailage bocager important
				21122	Mailage bocager lâche ou absent
				21211	Mailage bocager important
				21212	Mailage bocager lâche ou absent
				23111	Mailage bocager important
				23112	Mailage bocager lâche ou absent
				23121	Mailage bocager important
				23122	Mailage bocager lâche ou absent

Tableau 2 (fin).

Nomenclature des écosystèmes urbains des grandes agglomérations françaises (synthèse); développement et raccord avec la nomenclature européenne *Corine-Land Cover*

3	Forêt et milieux semi-naturels	31 Forêt (y.c. coupes) 32 Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée 33 Espaces ouverts sans ou avec peu de végétation	311 Forêts de feuillus 312 Forêts de conifères 313 Forêts mélangées 321 Pelouses et pâturages naturels 322 Landes et broussailles (y.c. friches) 323 Végétation sclérophylle 324 Forêts et végétation arbustive en mutation (dégradation ou recolonisation) 331 Plages, dunes, sable 332 Roches nues 333 Végétation clairsemée 334 Zones incendiées	3111 En zone humide (forêt hydrophyle) 3112 En zone non humide 3311 Sable, plage de sable ou de galets 3312 Dunes	31111 Plantations (peupleraies, etc.) 31112 Boisements naturels (saulaie, hêtre, aulnaie, etc.) 33121 Dunes vives 33122 Dunes grises (Oyat, carex, chiendent, mousse et lichens, etc.)
4	Zones humides	41 Zones humides intérieures 42 Zones humides maritimes	411 Marais intérieurs 412 Tourbières 421 Marais maritimes 422 Marais salants 423 Zones intertidales (slikke, schorre, bancs de sable)	4111 Marais à roseaux 4112 Marais à juncs 4113 Marais à molinies 4114 Autres marais (caricaies, baccharis, etc.) 4211 Vasières 4212 Autres marais maritimes	
5	Surface en eau	51 Eaux continentales 52 Eaux maritimes	511 Cours et vides d'eau 512 Plans d'eau (y.c. espaces associés immergés) 521 Lagunes littorales 522 Estuaires 523 Mer et océan	5111 Cours d'eau 5112 Voies d'eau, canaux 5121 Naturels (lacs, étangs) 5122 Artificiels	

spatiale à usages civils pour décrire le tissu urbanisé.

Cette articulation par rapport à une classification de référence permet d'assurer une cohérence entre les différents résultats obtenus par diverses opérations utilisant la télédétection à des échelles différentes. Elle donne la possibilité d'effectuer des comparaisons dans le temps et dans l'espace et avec les séries statistiques existantes par ailleurs. La complexité de la nomenclature, faisant appel à des critères d'aspect et de fonction, interdit pratiquement l'emploi unique et généralisé de méthodes purement automatiques. Un ensemble de 50 à 60 catégories a été retenu avec des variantes par chacune des agglomérations-pilotes. Les modifications de la nomenclature existant entre les agglomérations, en dehors de celles dues aux particularités des milieux et des sites rencontrés, sont minimales et la nomenclature générale de synthèse (tab. 2) recueille un large consensus.

Les classes d'écosystèmes urbains apportent des informations originales de nature biophysique qui complètent bien les données habituellement utilisées par les urbanistes au niveau des SDAU, des POS et des BDU (banques de données urbaines). Inversement, les BDU fournissent des renseignements supplémentaires de type fonctionnel.

4.4. Numérisation de l'interprétation visuelle

L'interprétation cartographique sur calque ou sur écran de station de traitement est ensuite numérisée avec les limites des communes de chaque agglomération afin : 1) de disposer de statistiques sur les superficies par catégorie d'écosystème par commune et pour l'ensemble de l'agglomération; 2) d'avoir une représentation numérique thématique superposable aux images et intégrable dans le SIG de l'agglomération.

Il existe des écarts résiduels avec les superficies des communes de l'agglomération connues par ailleurs. Ces écarts sont normalement de l'ordre de 0,5 % sur l'ensemble d'une agglomération et proviennent des erreurs résiduelles des corrections géométriques, du tracé un peu schématique des limites communales sur la carte nationale au 1: 25 000 et, surtout, de la représentation vectorielle des contours communaux qui laisse toujours une petite marge d'erreur pouvant atteindre un total non négligeable de 5 ou 6 % en cas de contours très échancrés. En général, les écarts relatifs aux communes situées au centre du district urbain sont négligeables, tandis que ceux qui concernent les communes périphériques sont un peu plus importants, surtout si l'altitude varie.

Dans le cas d'une interprétation sur calque et de l'utilisation d'un MNT (Mulhouse), le résultat de l'interprétation est saisi par numérisation des contours et des attributs des polygones, le fichier est ensuite superposé à l'image HRV améliorée géoréférencée à partir du MNT. Par observation directe et interactive des limites des polygones, l'interprète contrôle la géométrie des objets identifiés; puis chaque rubrique de la nomenclature est vérifiée pour l'ensemble des polygones classés dans la catégorie qui sont placés sur le fond image. Cette démarche garantit un niveau de qualité élevé de la numérisation de l'interprétation et de ses aspects géométriques sans préjuger de la qualité de cette interprétation. La PIAO réalisée sur SIG évite des distorsions géométriques dues à l'utilisation de documents intermédiaires (suppression de la cartographie manuelle et de la numérisation) et aide l'interprétation si l'on dispose de données exogènes sur le SIG. Au moment de la numérisation de la cartographie interprétée, le balayage est préférable à la numérisation car cette dernière doit être vérifiée très minutieusement ainsi qu'on vient de la décrire. Le mode raster est mieux adapté que le mode vecteur pour les mises à jour et pour l'étude des zones complexes ou à contours compliqués, mais ce dernier, donne une meilleure définition des distances de connexion entre les bâtiments.

L'étude par télédétection des grandes agglomérations offre aussi la possibilité d'examiner la continuité du tissu bâti pour aider à fixer de façon automatique les limites physiques des agglomérations ou zones morphologiques urbaines en utilisant des logiciels de morphologie mathématique après avoir établi la cartographie de l'occupation du sol (cas de Bordeaux, étudié à l'initiative d'EUROSTAT et de l'Institut national de statistiques). Le recours aux algorithmes de morphologie mathématique peut aussi être utilisé en PIAO pour isoler ou préciser divers types de territoires, notamment certaines catégories d'habitat.

5. Délais et coûts, mise à jour

La durée de réalisation effective, sauf difficultés particulières telles que la mauvaise qualité des images restituées sur Limoges, est de l'ordre de 4 mois. Cependant, avec les délais pratiques séparant la commande de la remise des résultats et comprenant les discussions avec les responsables des agglomérations ainsi que les étapes intermédiaires de contrôle et réflexion, elle peut atteindre 12 mois. Le coût de l'investissement initial est de l'ordre de 180 000 F TTC sans usage de MNT pour une superficie de 20 000 à 60 000 ha selon la configuration, la densité et l'importance des agglomérations en population et en surface. En phase opérationnelle, les coûts initiaux devraient être légèrement moins élevés que ceux observés sur les agglomérations-pilotes qui incluaient des travaux exploratoires avant d'aboutir à la méthodologie de synthèse exposée ci-dessus.

La mise à jour devrait être prise en main par les agglomérations elles-mêmes qui ont été normalement associées à l'inventaire initial pour bénéficier des transferts du savoir-faire en télédétection. On peut envisager une mise à jour tous les 3 ans sur le domaine périurbain et tous les 5 ans sur la zone urbaine dense centrale qui change peu. Les travaux effectués sur les évolutions multidates à Montbéliard, Le Havre, Mulhouse, et Perpignan, et les réflexions présentées par les différents centres de traitement et les agglomérations-pilotes conduisent à proposer la procédure suivante : achats de nouvelles images enregistrées à une même époque soumises aux mêmes prétraitements, comparaison ou fusion en créant une image multidate avec les images anciennes, interprétation des changements sur SIG. Le coût de la mise à jour est sensiblement moindre que l'investissement initial. Le chiffre de 40 % peut être avancé, mais les estimations des ateliers de traitement restent encore disparates et doivent être affinées.

6. Utilisation des résultats dans les SIG des agglomérations

Les résultats de la cartographie des écosystèmes urbains donnant le découpage des agglomérations en zones élémentaires classées et codées ont été intégrés sans grande difficulté dans les SIG et bases de données urbaines existants, plus ou moins perfectionnés et développés, avec l'aide technique des ateliers de traitement de données télédétection. L'opération télédétection menée en collaboration avec des agglomérations ayant souscrit un plan ou une charte d'environnement a été entreprise dans le but d'introduire et d'identifier des éléments d'environnement dans le domaine urbain et de pouvoir en suivre l'évolution de façon régulière, ce qui prolonge l'approche globale inhérente aux chartes.

Les expériences dans les agglomérations ont montré que, pour les services techniques, les données de télédétection ont aujourd'hui acquis un caractère opérationnel en complétant les autres types de données traditionnellement utilisées par ces services. Les résultats

obtenus par télédétection ont permis de faire un bilan de l'occupation biophysique détaillée du territoire tenant compte de l'association végétation-tissu bâti et de la densité des constructions. Ces renseignements cartographiques et statistiques n'étaient plus à jour ou faisaient souvent défaut. Ce bilan fournit une référence de base pour décrire l'état actuel, pour élaborer des projets et pour suivre la dynamique de l'occupation du territoire par les différents services. Il semble bien que les résultats sur les écosystèmes urbains, bien utilisés en priorité par les urbanistes et les aménageurs, entraînent de nouvelles réflexions chez les responsables locaux quant à la gestion, au suivi et à la prévision de l'usage du sol avec des préoccupations environnementales. Les données issues de l'imagerie satellitaire peuvent aussi facilement trouver place dans un tableau de bord ou un observatoire de l'environnement au niveau de chaque agglomération.

La mise en relation des données socio-économiques exogènes avec les résultats sur les écosystèmes urbains issus de l'interprétation des images satellitaires est une opération plus complexe qui n'est pas encore achevée dans les agglomérations-pilotes, et il est encore trop tôt pour faire un bilan de l'utilisation des résultats dans cette direction, un certain nombre d'actions en cours ou en projet n'étant pas terminées. Par exemple, on peut, à partir des résultats des recensements par îlot, présenter les caractéristiques sociales de la population et des logements dans les différents écosystèmes qui décrivent le cadre de vie et le paysage urbain. On aura ainsi une meilleure perception des conditions de vie des différents groupes sociaux.

On peut aussi connaître la densité de la population par écosystème et mieux délimiter et décrire les quartiers. Il est possible également de répartir la population selon la distance aux espaces verts, à certains services, à certaines sources polluantes, ou bien encore selon l'appartenance à des zones de risque (inondation par exemple), ceci dans différents découpages administratifs : quartier, commune, centre-ville et couronnes périphériques successives, ensemble de l'agglomération. Le rapprochement des résultats de télédétection avec les données socio-économiques permet alors d'aboutir à des indicateurs utilisables pour une meilleure prise en compte et gestion de l'environnement urbain.

Le développement des travaux de rapprochement des données socio-économiques avec les écosystèmes urbains dépend surtout de l'initiative des services de l'environnement des agglomérations qui sont souvent relativement jeunes et ne gèrent pas directement les SIG locaux, à l'inverse des aménageurs et des urbanistes. Enfin, la mobilisation des ressources pour l'exploitation des données dans les SIG dépend aussi de la volonté des autorités locales d'utiliser le système ainsi créé pour l'application des politiques d'aménagement et d'environnement. L'inventaire des utilisations sur SIG de l'information de télédétection produite dans les agglomérations-pilotes est important car il doit permettre de mettre en évidence le rôle des différents partenaires : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, gestionnaires, associations, public, aux différents niveaux de décision dans la création, la maîtrise et l'utilisation de tels outils. L'information thématique élaborée finale doit être suffisamment simple et illustrative pour servir dans les processus de consultation et d'information du public et des élus sur les plans de l'environnement et de l'aménagement.

La cartographie numérique des écosystèmes urbains semble bien satisfaire les besoins d'information de gestion locale aux niveaux de l'ensemble d'une agglomération, de la ville-centre, des quartiers, des premières et deuxièmes couronnes périphériques et des schémas directeurs. Par contre, les résultats par commune rurale en périphérie paraissent moins intéressants, à l'échelle du 1: 25 000, aux gestionnaires de cette catégorie de communes. En effet, en ces lieux le paysage urbain a un champ plus restreint et l'intérêt se cristallise sur certains bâtiments individualisés de faible taille que l'échelle ne permet pas d'analyser de manière assez fine : l'école, le terrain de sport ou le dispensaire du village par exemple. Lorsque les exemples concrets d'application sur SIG sur l'étude de

l'environnement urbain et l'aménagement intégrant l'environnement seront achevés par les agglomérations-pilotes, une action de sensibilisation auprès des autres grandes agglomérations françaises sera entreprise pour développer l'étude des écosystèmes urbains de manière opérationnelle.

7. Conclusion

La télédétection spatiale s'avère être l'une des rares sources d'information opérationnelle permettant d'appréhender (par PIAO), en 50 à 60 classes avec une bonne fiabilité, un espace étendu d'un seul bloc et de façon uniforme pour une prise en compte globale au 1: 25 000 des écosystèmes des grandes agglomérations. Le fait que quelques thèmes soient reconnus grâce à l'apport d'informations exogènes ne retire rien à cet avantage.

Les résultats de l'opération-pilote se sont révélés satisfaisants autant sur le plan technique que sur celui de l'intérêt manifesté par les autorités locales. Du fait que les bases méthodologiques sont communes aux différentes villes, que l'on a recours à une même source d'information satellitaire (HRV) et que la nomenclature des écosystèmes comporte un tronc commun, les résultats statistiques et cartographiques peuvent être comparés entre agglomérations. L'intérêt apparaît aussi d'examiner des agglomérations européennes transfrontières (par exemple celle de Mulhouse - Bâle - Fribourg). La dimension des agglomérations de plus de 100 000 habitants fait aussi, pour des questions de relation d'échelle et de population, que la télédétection spatiale est directement utilisable à l'échelle du 1: 25 000 par les aménageurs et environnementalistes pour gérer des ensembles urbains de cette taille, en attendant SPOT 5 qui permettra d'atteindre le 1: 10 000 après l'an 2000. L'étude par télédétection des écosystèmes urbains des grandes agglomérations peut être étendue dès maintenant à l'ensemble des grandes cités françaises et européennes.

8. Références

- ANDRIAMIHAMINA, R. 1992. Connaissance de l'occupation du sol du grand Antananarivo à Madagascar. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 28 p.
- BOUSQUET, S. 1995. Cartographie de l'occupation des sols sur l'agglomération de Dunkerque, Wasquehal. Société SIRS, 30 p.
- CETE (Centre d'études techniques de l'équipement), 1992. Étude de l'agglomération du Havre par télédétection, CNES - Équipement - Environnement et CETE de Rouen, Rouen, 51 p.
- DELAVIGNE, R. *et al.* 1991. Télédétection et schéma directeur, le SDAU d'Arcachon. CNES, ministère de l'Équipement et IAURIF, Paris, 87 p.
- DUREAU, F. *et al.* 1991. Sondages aéroportés sur image satellite pour les enquêtes socio-démographiques en milieu urbain, Quito. CNES - ORSTOM, Paris, 12 p.
- ÉQUIPE FRANCO-ÉGYPTIENNE, 1990. Le développement urbain du Grand Caire. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 47 p.
- ÉQUIPE FRANCO-LIBANAISE, 1989. Le Grand Beyrouth, occupation du sol et évolution. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 215 p.
- GAMBA, A. 1989. Observatoire urbain de l'aire de Buenos Aires. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 40 p.

- GÉOIMAGE, 1993. Télédétection et statistiques urbaines, projet Bordeaux. Journée de présentation à Paris par Eurostat, Luxembourg, 23 p.
- LENCO, M. 1993. Étude des écosystèmes urbains des grandes agglomérations par télédétection au 1/25 000. Journée d'étude ville et statistiques du Conseil National de l'Information Statistique, Institut national de statistiques, Paris, 5 p.
- LENCO, M. and TOURNEUX, F. 1993. Remote sensing from space at 1/25 000 scale to study and watch the urban ecosystems in the built up areas above 100 000 inhab. Vienna ERIM symposium, Ann Arbor, 5 p.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1989. Étude par télédétection des écosystèmes urbains des agglomérations moyennes de Belfort et Montbéliard. Environnement- Équipement, région Franche-Comté, Paris, 12 p.
- NASCIMENTO, I. *et al.* 1991. Occupation du sol, aptitude à l'urbanisation des grandes villes brésiliennes : Brasilia, Rio-de-Janeiro et Sao-Paulo. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, 30 p.
- SERTIT et LABORATOIRE IMAGE ET VILLE, 1995. Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivée de l'imagerie SPOT dans le SIG de la ville de Mulhouse. Illkirch, 86 p.
- SFERES, 1986. Analyse du tissu urbain de Paris et des départements de la petite couronne par télédétection. Environnement - IAURIF, Montrouge, 26 p.
- UNISFERE, 1992. Étude des grandes agglomérations de plus de 100.000 habitants par télédétection, application au district de Nancy. CNES -Environnement, Besançon, 51 p.
- VERCLER, 1994. Étude par télédétection des écosystèmes urbains de l'agglomération de Limoges. Environnement - Syndicat de communes de Limoges, Paris, 78 p.
- VILLE DE STRASBOURG, 1992. Urbanisation, évolution. CNES-Agence d'urbanisme de Strasbourg, Ministère de l'Équipement, Strasbourg, 13 p.

20

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)

ALI BOUCHERIT, MALEK HÉMIS, MOHAMED DAOUDI et
ABDELKADER ABDELLAOUI

*Département de géographie, Université des sciences et de la technologie Houari
Boumediene, B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie;
téléphone : +213 (2) 75-12-85; télécopieur : 213 (2) 76-43-11*

Résumé

Le présent travail a pour objet l'analyse d'une partie de la scène HRV (XS) de SPOT englobant l'agglomération blidéenne et son environnement proche dans le but : 1) d'identifier les grands thèmes d'occupation de l'espace; 2) d'extraire la tache urbaine; 3) de caractériser les différentes composantes de l'espace bâti (densité, âge, types spécifiques, voiries, etc.). Plusieurs traitements ont été testés pour lever les multiples ambiguïtés de différenciation des thèmes particuliers à la nature de la zone (roche nue en altitude et bâti, terres en jachère et bâti, etc.). Les principaux traitements effectués ont consisté en des rehaussements d'images, filtrages, ACP, indices, analyse de contours, etc. Des résultats bien corrélés avec la réalité du terrain ont été obtenus : 1) la mise en évidence de la forte corrélation entre les canaux XS1 et XS2; la troisième composante de l'ACP, malgré sa faible contribution, a été utilisée pour faire ressortir certaines caractéristiques; 2) la délimitation de la tache urbaine; 3) l'identification de plusieurs classes de bâti en fonction de l'âge et de la densité; 4) l'identification des voies principales de communication; 5) l'identification de seuils de discrimination des artères et des voies de communication à l'intérieur et à l'extérieur du tissu urbain.

1. Introduction

L'agglomération blidéenne (ville de Blida et les foyers urbains satellites) est située sur une zone de contraste entre plaine (plaine de la Metidja, zone à l'origine essentiellement agricole) et montagne (piémont nord de l'Atlas blidéen) à proximité de la capitale (45 km). Cette double particularité géographique a induit une très forte croissance se traduisant principalement par un développement notable de l'activité commerciale et de l'activité industrielle (petite industrie et industrie de transformation), par une forte augmentation de la population avec un taux de croissance annuel moyen voisin de 4 % jusqu'au recensement de 1977 tel qu'illustré par la figure 1 (ABDELLAOUÏ *et al.*, 1994) et, enfin, par une extension du bâti à la fois accélérée et anarchique aux dépens des zones initialement agricoles; à titre d'exemple, 1 055 ha de terres agricoles ont été accordés à la construction entre 1979 et 1982, soit une extension de 260 ha/an; depuis 1982, la situation a encore empiré.

La diminution de la surface agricole utile ajoutée et la croissance de l'activité ainsi que de la population ont provoqué une augmentation de la demande en ressources (notamment hydroagricoles) et en même temps une réduction des surfaces exploitables. Cette situation rend vitale une gestion rationnelle de l'espace et des ressources par l'utilisation de moyens adaptés aux changements rapides du milieu naturel. Les outils dont disposent actuellement les services chargés de la gestion de l'espace ne leur permettent pas de produire des documents suivant de manière fidèle les changements si bien que les plans d'occupation et d'aménagement sont successivement et rapidement dépassés. Ce constat nous a amenés à commencer un projet d'évaluation de l'apport de l'imagerie satellitaire pour l'étude et la gestion de l'espace en zone particulière de transition montagne/plaine, d'une part, et des capacités locales à intégrer l'outil dans l'activité courante, d'autre part. La résolution élevée du capteur HRV ouvre en effet de nouveaux champs d'investigations, particulièrement dans le domaine urbain (FLOURIOT et GOSSO, 1987). En outre, l'utilisation d'algorithmes

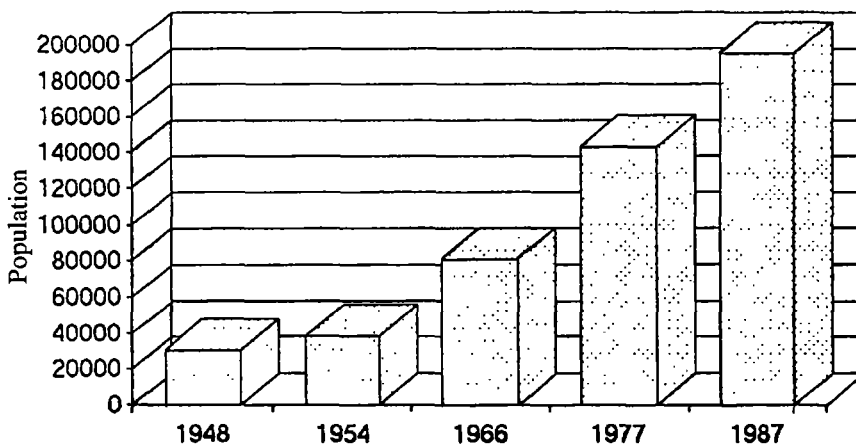


Figure 1. Évolution comparée des populations de Blida et Médéa entre 1948-1987 : une forte croissance de la population est observée après l'indépendance (1962) suite à l'immigration venant des villes limitrophes

appropriés permet de cartographier les grandes classes d'affectation (DEKEERSMAECKER *et al.*, 1987). Nous nous sommes intéressés dans le présent travail à l'étude de la tache urbaine et nous nous sommes fixés comme objectifs principaux : 1) la délimitation de la tache urbaine et son analyse intrinsèque; 2) l'estimation de l'apport de l'imagerie satellitaire pour cette analyse; 3) l'élaboration d'une chaîne spécifique de traitements; 4) l'essai de réalisation d'un modèle de système d'information urbaine pour notre zone d'étude. Nous avons utilisé pour cela une partie de la scène HRV de SPOT multibande de 1986 que nous avons combinée avec des photographies aériennes de la zone prises successivement en 1972 et en 1992 ainsi qu'à des cartes topographiques (1960) et des plans de la ville réalisés en 1916 et 1960. Ces documents sont complétés par une enquête terrain.

2. Méthodologie

2.1. Traitements préliminaires

Des traitements préliminaires classiques ont servi à préparer l'image : 1) pour la corriger géométriquement, nous nous sommes basés sur les travaux réalisés par DAOUDI (1994) sur l'Atlas blidéen; nous avons appliqué, par la suite, plusieurs algorithmes d'amélioration d'image, en particulier une transformation linéaire d'histogrammes qui nous a permis d'améliorer le contraste et pallier ainsi à la faible dynamique (fig. 2) due à la similitude relative des réponses spectrales des thèmes de cette zone de complexité particulière (ABDELLAOUI *et al.*, 1994); 2) des combinaisons de canaux (notamment composition colorée et analyse en composantes principales) et des masques de convolution ont été également appliqués à l'image multibande pour augmenter la probabilité de discrimination des thèmes.

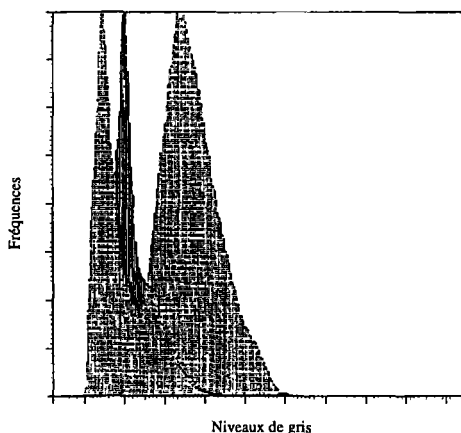


Figure 2. Histogrammes des trois bandes XS1, XS2 et XS3 : les réponses spectrales dans les trois canaux occupent un intervalle restreint

2.2. Traitement des divers documents

Une mise à la même échelle de tous les documents disponibles a été réalisée. Nous avons par la suite effectué une numérisation des cartes et plans en utilisant une table à numériser avec l'objectif de pouvoir comparer nos divers documents et estimer ainsi l'évolution de la tache urbaine sur la base de l'analyse de situations à différentes dates, sur une période significative, de 1961 à 1987 dans le cas présent.

La photographie aérienne a été analysée par les techniques classiques de photo-interprétation; elle a permis de préciser des éléments du paysage non visibles sur l'image satellitaire. Divers traitements ont été effectués sur l'image HRV, notamment l'application d'indices de végétation, des filtres spécifiques, une classification dirigée et un étalement dynamique des résultats de l'analyse en composantes principales. Des fichiers « vecteur » ont été réalisés pour identifier des structures particulières, notamment les grandes artères du complexe urbain, les lignes de chemin de fer, le réseau hydrographique et les limites de la tache urbaine. Une carte de synthèse de l'occupation de l'espace et une base de données, prélude au système d'information urbain sont enfin réalisées.

3. Résultats et discussion

L'analyse en composantes principales a confirmé la forte corrélation entre les divers canaux de l'image HRV et plus particulièrement les canaux XS1 et XS2 comme cela est montrée au tableau 1. La troisième composante ACP3 de l'analyse en composantes principales est très pauvre en informations (0,69 % de l'information totale) mais ne peut être négligée à cause de la spécificité de l'information apportée, en particulier, l'identification des grandes artères de la ville et la composition du centre-ville; ceci est montré sur la figure 20-3 (voir cahier couleur).

L'application de l'indice de végétation NDVI a permis de mettre en évidence les grands thèmes présents dans l'image : tache urbaine, végétation spontanée (forêt), végétation artificielle (culture, arboriculture) et réseaux (route, chemin de fer, oued); ces résultats sont précisés sur la figure 20-4 (voir cahier couleur). Nous noterons cependant les confusions entre certains thèmes (notamment surfaces bâties et terre nue) qu'il était difficile de lever à l'extérieur de la tache urbaine.

Pour préciser la tache urbaine, nous avons utilisé une classification dirigée basée sur la sélection de quatre échantillons pour chacun des thèmes principaux de l'image. Les réponses spectrales moyennes des quatre thèmes sont données sur le tableau 2 où nous montrons l'existence des plages de confusion plus prononcée pour les thèmes bâti et route d'une part, et, bâti et sol nu, d'autre part. Les données de la figure 5 confirment ce résultat.

L'application de l'indice de brillance nous a permis de préciser les zones d'activités (zone industrielle, zone d'activité spécifique) et l'emprise au sol de la tache urbaine. Enfin,

Tableau 1. Indice de corrélation des trois bandes XS1, XS2 et XS3

	XS1	XS2	XS3
XS1	1,000	0,975	0,095
XS2	0,975	1,000	0,015
XS3	0,095	0,015	1,000

Tableau 2. Plages moyennes des réponses spectrales des grands thèmes présents dans l'image : des confusions sont observées entre les thèmes bâti et route, bâti et terre nue

	XS1	XS2	XS3
Bâti	63-90	67-88	65-79
Végétation	42-53	28-41	100-140
Terre nue	59-76	58-77	71-100
Route	49-79	41-83	66-81

l'application d'un masque de convolution approprié nous a permis de distinguer différents types de constructions selon l'âge de celle-ci. Sur le tableau 3, nous récapitulons les différents thèmes et sous-thèmes mis en évidence.

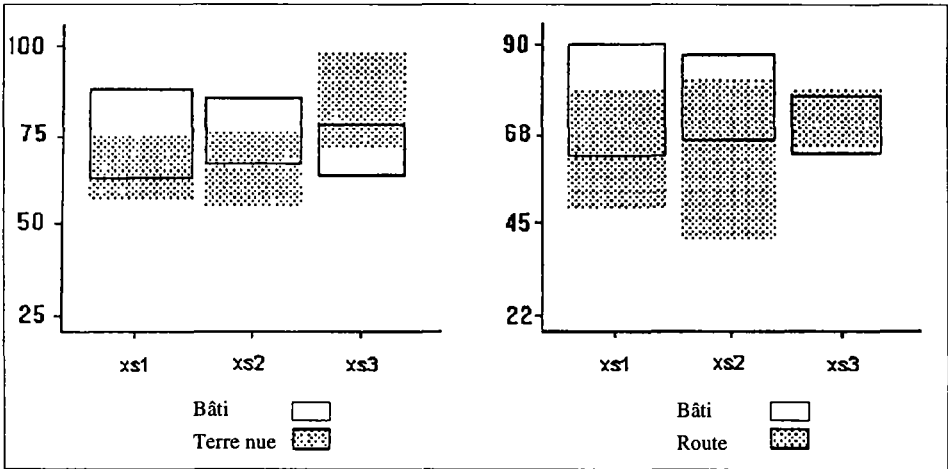


Figure 5. Représentation des signatures spectrales des grands thèmes : une confusion existe entre le bâti et la terre nue, le bâti et le réseau de voirie

4. Conclusion

L'utilisation de l'image multibande HRV de SPOT nous a permis, après essai de plusieurs algorithmes de traitement, d'extraire la tache urbaine avec une bonne précision. Cependant, la résolution de l'image XS ne nous semble pas suffisante pour distinguer les différentes composantes du tissu urbain et pousser plus loin nos investigations pour le cas particulier de notre zone d'étude. À l'extérieur de la tache urbaine, les divers traitements effectués sur l'image n'ont pas permis de lever totalement les confusions entre surfaces bâties isolées et terres nues. L'utilisation de l'image panchromatique devrait permettre de pallier à ces imprécisions.

Tableau 3. Thèmes et sous-thèmes retenus

Thème	Sous-thème
1. Emprise au sol	1.1. Forte emprise 1.2. Faible emprise
2. Tissu urbain	2.1. Tissu continu 2.2. Tissu discontinu
3. Habitat	3.1. Habitat collectif 3.2. Habitat individuel et semi-collectif
4. Age des constructions	4.1. Construction ancienne 4.2. Construction récente
5. Culture	5.1. Arboriculture 5.2. Culture annuelle 5.3. Friche agricole
6. Végétation spontanée	6.1. Forêt dense 6.2. Forêt faiblement dense
7. Zone industrielle	
8. Zone d'activité spécifique	
9. Aéroport	

5. Références

- ABDELLAOUI, A., ROUGAB, A. et BENTRIA, B. 1994. Intégration de données multi-sources pour l'étude des paysages urbains : cas de l'agglomération blidéenne. Colloque international « Information géographique, télédétection et formation », Toulouse, 17-19 mai 1994.
- DAOUDI, M. 1994. Étude de l'espace par utilisation des systèmes d'informations géographiques et les images satellitaires : application à l'Atlas blidéen (Algérie). Thèse de magister, Département de géographie et d'aménagement du territoire, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, 110 p.
- DEKEERSMAECKER, M. L., JACQUES, P. et WILMET, J. 1987. Analyse de données multi-spectrales de SPOT relatives à une zone de contact entre deux régions géographiques de la Belgique méridionale. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepaduès éditions, Toulouse, p. 637-646.
- FLOURIOT J. et GOSSO, F. 1987. Croissance des grandes agglomérations tropicales. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats. Paris, novembre 1987, Cepaduès éditions, Toulouse, p. 499-504.