MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE APPLIQUÉE AUX IMAGES RSO POUR LA DIFFÉRENTIATION DES TISSUS URBAINS : CAS DE LA VILLE DE DOUALA (CAMEROUN)

Timothée KOMBE[1] et René-Joly ASSAKO ASSAKO[2]

[1]Institut universitaire de technologie (I.U.T.), Département génie industriel et maintenance, Université de Douala, B.P. 8698, Cameroun.
Téléphone : (+237) 7777 20 39 ou (+ 237) 7513 98 67 ; télécopieur : (+ 237) 3340 24 82 ; courriel : tkombe@yahoo.fr
[2] Groupe de recherche sur les villes d'Afrique (GREVA), Département de géographie de l'École normale supérieure, Université de Yaoundé 1, B.P. 2986, Soa, Cameroun.
Téléphone: (+237) 9992 89 25 ou (+237) 2222 92 81 ; courriel : rjassako@yahoo.fr

Soumis le 13 novembre 2006 ; révisé le 22 janvier 2007 ; accepté le 23 juillet 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 251-270

Résumé

Dans cet article, les méthodes de classification par morphologie mathématique permettent d'établir une carte d'occupation des terres de Douala à partir d'une image radar à synthèse d'ouverture (RSO). La présence du chatoiement dans l'imagerie radar rend difficile l'usage des méthodes classiques d'analyse et de classification en milieu urbain, lequel est caractérisé par l'hétérogénéité des objets qui le composent. L'aspect très texturé des agglomérations dû au fait que l'habitat, généralement à toits de tôle et groupé, permet d'utiliser une méthode de classification basée sur la détection des points brillants. D'autre part, compte tenu du fait que les quartiers sont généralement bordés par un cours d'eau (marécage) ou par une route, leur délimitation est possible par détection des contours. Ces derniers sont mis en évidence grâce à un seuil bas supérieur au niveau radiométrique de l'eau et un seuil haut inférieur à celui des points brillants (tôle) qui permet d'isoler l'eau. Une binarisation réalisée après l'application des filtres FROST 5 x 5 et de Sobel bidirectionnel, nous permet de distinguer les régions non habitées et les différents quartiers. Les résultats obtenus permettent d'élaborer une carte d'occupation des terres de Douala.

Mots-clés : Douala, Cameroun, images RSO, morphologie mathématique, binarisation.

Mathematical morphology applied to SAR images for the detection of urban areas : the case study of the city of Douala (Cameroon)

In this article, the methods of classification based on mathematical morphology allow the elaboration of the land-use map of the Douala area based on SAR images. The presence of speckle in the SAR images makes more difficult the use of classical methods of analysis and classification in an urban environment, characterized by the heterogeneity of the objects that make it up. The highly textured aspect of agglomerations, due to the fact that urban housing is generally made of metal sheets and is grouped, allows the use of a classification method based on the detection of bright spots. On the other hand, considering that neighbourhoods are generally delimited by rivers (humid areas) or by roads, their delimitation is possible by using contour detection. These are enhanced thanks to the lower threshold greater than the radiometric level of water and the upper threshold smaller than the one of bright spots, which allows to isolate water. A binarization carried out after applying FROST 5 x 5 filtering and the application of a bidirectional Sobel filter permits the determination of uninhabited areas as well as the different neighbourhoods. The juxtaposition of these results contributes to the elaboration of the land-use map of the Douala area.

Keywords : Douala, Cameroon, SAR images, mathematical morphology, binarization.

1. INTRODUCTION

Les villes africaines sont confrontées à des croissances démographique et spatiale, incontrôlées, caractérisées par le développement de formes d'habitats informels (Kombé, 1999). Faute d'outils cartographiques adéquats, les décideurs ont du mal à déterminer les limites réelles des agglomérations et celles isolant les différents quartiers (Mouafo, 2000).

Les programmes de rationalisation du tissu urbain des urbanistes sont rapidement obsolètes. Beaucoup de villes ont ainsi échappé à leur urbanisation. Quand la construction est rapide et anarchique, la cartographie classique devient vite obsolète et la connaissance de l'occupation des terres est de plus en plus incertaine. Ce constat désolant donne tout son intérêt à l'étude de la ville par télédétection (Pouyllau, 1989).

La morphologie mathématique est l'une des méthodes d'analyse utilisées pour détecter l'urbain à l'aide de l'imagerie satellitaire. Elle est mieux adaptée à cette étude, car elle est basée sur l'étude de la forme : les objets constituant l'habitat étant caractérisés par celle-ci. Deux notions fondamentales sont prises en compte : la texture et la structure.

Dans le cadre des traitements de voisinage appliqués aux images satellitaires, la texture se conçoit comme une zone continue et répétée dans laquelle un changement de caractère n'est pas décelable (Girard et Girard, 1989). Un élément textural est ainsi constitué par l'ensemble des éléments de résolution (définie par les caractéristiques du capteur) qui ont une même valeur de luminance et qui sont connexes. Ainsi, l'ensemble des plages de même valeur texturale correspond à une texture.

La structure est définie par les relations répétées qui existent entre les éléments texturaux. Un élément structural se définit à partir des propriétés extrinsèques des éléments texturaux à savoir : la position relative des uns par rapport aux autres, la distance entre ces éléments texturaux, le contraste et les propriétés intrinsèques des éléments texturaux à savoir : la largeur, l'allongement, le rayon de courbure, le périmètre, la surface, etc. Ces propriétés participent à la définition de la forme.

Pour classifier l'urbain à l'aide de la morphologie mathématique, il faut d'abord construire l'ensemble sur lequel porte la mesure. Cette construction se fait au moyen de transformations successives qui, partant de l'image brute, vont peu à peu mettre en évidence l'ensemble à mesurer (Coster et Chermant, 1989 ; Robin, 1995). Les différentes transformations morphologiques utilisées sont : la binarisation, l'érosion, la dilatation, la fermeture, l'ouverture et la squelettisation. Des méthodes ne relevant pas de la morphologie mathématique, telles que la détection des contours et la détection des structures linéaires, sont utilisées en complémentarité pour peaufiner les résultats obtenus.

L'approche méthodologique globale est une démarche essai-erreur basée sur la comparaison entre les résultats obtenus et la réalité de terrain, traduisant ainsi la nécessaire complémentarité entre l'imagerie satellitaire et les autres sources d'information géographique (Assako Assako, 2000).

L'image utilisée est une image RSO (radar à synthèse d'ouverture) du satellite ERS-1 de l'Agence spatiale européenne (ESA), enregistrée le 23 août 1994. Les images RSO comportent souvent de très grands volumes de données (128 Mo, par exemple) et il est souvent nécessaire de procéder à un rééchantillonnage de ces données avant leur utilisation. Plusieurs techniques ont été élaborées, l'une des plus classiques intégrée dans le logiciel VOIR (Vision par ordinateur des images radar) développée par le Laboratoire d'électronique et de traitement du signal (LETS) de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé (Cameroun) est la réduction pyramidale combinée à l'approche orientée objet (Akono, 2000). Cette technique a pour but de résoudre le problème d'espace mémoire et d'occupation du disque sur un microordinateur ainsi que de pouvoir traiter plus rapidement des images RSO sur certaines régions du Cameroun. Dans un souci de diminution du temps de calcul et aussi de mise en évidence de la pertinence de la méthodologie choisie, nous avons travaillé sur une portion d'image d'une taille de 640 par 400 pixels. Seuls les paramètres au vol ont été utilisés pour le géopositionnement de l'image. Les caractéristiques de cette image sont données sur le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'image RSO utilisée. *Characteristics of the SAR image used.*

Satellite	ERS-1
Date d'enregistrement	23-08-1994
Surface couverte	100 km x 100 km
Polarisation	VV
Résolution spatiale	12,5 m x 12,5 m
Taille de l'image	640 x 400
Fréquence	5,3 GHz
Type	PIR (proche infrarouge)
Longueur d'onde	5,6 cm

Bande	C
Angle d'incidence	23°
Longitude	09° 42'
Latitude	04° 03'

2. MÉTHODOLOGIE

Le principe de classification d'une image est basé sur des concepts mathématiques permettant de décrire quantitativement des images de diverses natures. Les méthodes et techniques utilisées dépendent de la nature de l'image et surtout des différentes classes d'objets à rechercher (Kombé, 1999).

La classification aura ainsi deux objectifs principaux :

- l'identification des formes par comparaison à celles d'images types (images de référence) ;
- l'analyse morphologique des structures et la quantification de cette morphologie par des paramètres : c'est l'analyse quantitative de l'image.

Les différentes transformations morphologiques utilisées sont choisies en fonction de l'information recherchée et, surtout, de la classe texturale à détecter. Elles permettront ensuite de caractériser les catégories de couverture du sol et d'identifier les différents quartiers à Douala. Le logiciel utilisé pour les différents traitements est le logiciel VOIR (Akono, 2000).

2.1. Principes de la morphologie mathématique

La morphologie mathématique est une méthode d'analyse d'images fondée sur la théorie ensembliste. La première loi de la vision stipule que tout objet cache tout ce qui est placé derrière lui. Par exemple, si l'objet A est situé devant l'objet B, l'œil ne perçoit plus B, mais la différence ensembliste B-A. Ainsi, pour exprimer cette évidence que les corps sont généralement opaques, et non translucides, et qu'on les voit en perspective, l'esprit a recours aux concepts d'inclusion, d'intersection, de réunion, etc., soit une morphologie et donc une description des formes. Les objets étudiés n'étant pas directement accessibles à la mesure, l'analyseur doit au préalable construire l'ensemble sur lequel portera la mesure. Cette construction s'effectue au moyen de transformations successives qui, partant de l'image brute, vont peu à peu mettre en évidence l'ensemble à mesurer (Coster et Chermant, 1989). Cette mise en évidence s'effectue grâce aux outils de la morphologie mathématique que sont les transformations par érosion, dilatation, ouverture et fermeture ainsi qu'amincissement et épaississement.

L'idée de base de la morphologie mathématique est de comparer les objets que l'on veut analyser à un objet de forme connue, appelé élément structurant. Il se définit par des formes géométriques simples : rond, carré, hexagone (figure 1).

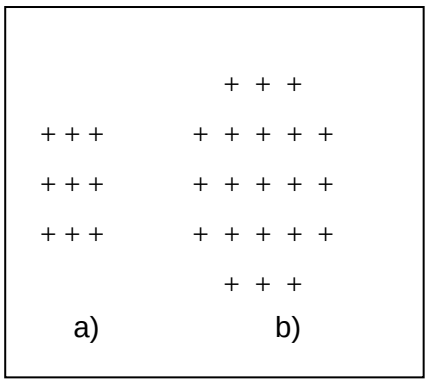


Figure 1 : Illustration d'éléments structurants. a) carré ; b) hexagonal. *Illustration of structuring elements. a) square ; b) hexagonal.*

2.1.1. Transformation par érosion

Considérons un espace R^2 partiellement occupé par un ensemble *X* et un élément structurant B_x. B_x est ensuite déplacé de telle sorte que son centre occupe successivement toutes les positions *x* de l'espace. Pour chaque position, on pose la question suivante : est-ce que B_x est complètement inclus dans *X* ? En d'autres termes, est-ce que $B_x \subset X$?

L'ensemble des positions *x* correspondant à une réponse positive forme un nouvel ensemble *Y* appelé *érodé* de *X* par B_x. Cet ensemble satisfait l'équation : $Y = \{X : B_x \subset X\}$. On obtient donc $Y = E^B(X)$.

Le principe de l'érosion d'une image binaire 10 x 4 (figure 2) par un élément structurant unitaire carré 3 x 3 (figure 3) de connexité d'ordre 8 est illustré à la figure 4 . Il consiste à positionner le pixel central de l'élément structurant sur chacun des pixels de l'image. Si le produit logique de tous les points de l'élément structurant avec ceux de l'image donne 1, nous attribuons la valeur 1 au pixel centré. Si un seul des produits logiques donne 0, nous attribuons la valeur 0 au pixel centré correspondant (figure 5).

Le résultat ainsi obtenu est spécifique au remplacement des vides par des 0 pour la gestion des bords de l'image. Cette considération sera la même pour tous les autres traitements ultérieurs. Il est important de signaler que le résultat aurait été différent si nous avions plutôt considéré une gestion symétrique des bords. Ce dernier principe n'est pas abordé dans cet article.

Avec une image à niveau de gris, il faut d'abord faire une binarisation, afin de n'obtenir que deux valeurs : 0 et 1. Les 0 représentent les parties sombres de l'image, alors que les 1 représentent les parties claires (Tonyé *et al*., 2000). Pour parvenir à une binarisation, il faudrait faire un seuillage sur différents niveaux de gris. Par exemple, si S1 et S2 désignent deux seuils, où S1 est le seuil minimal et S2 le seuil maximal, pour tous les niveaux de gris égaux ou compris entre S1 et S2, on affecte la valeur 0, tandis qu'on attribue la valeur 1 à tous les niveaux inférieurs à S1 et supérieurs à S2. Toutefois, le choix des niveaux de seuillage est fonction de l'information recherchée. Les résultats obtenus sur les figures 6 et 7 en donnent une bonne illustration.

Pour binariser l'image de la figure 6, on s'est fixé deux seuils : S_1= 0 et S_2 = 100. Ainsi, à tous les niveaux de gris égaux ou compris entre 0 et 100 on a attribué la valeur 0 et à ceux supérieurs à 100, la valeur 1.

1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

Figure 2 : Forme initiale d'une image binaire 10 x 4. *Initial form of a binary 10 x 4 image.*

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Figure 3 : Élément structurant carré 3 x 3. *Sauare 3 x 3 structurina element.*

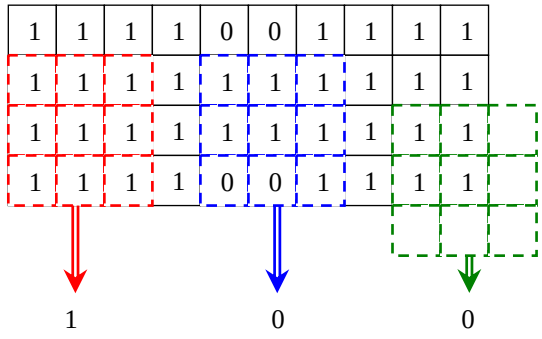


Figure 4: Exemple illustrant la transformation par érosion pour trois positions de l'élément structurant carré 3 x 3. *Example illustrating the transformation by erosion for three positions of the square 3 x 3 structuring element.*

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 5: Forme érodée de l'image binaire 10 x 4 de la figure 2. *Eroded form of the binary 10 x 4 image of figure 2.*

167	135	193	75	100	185	155	200
140	143	125	60	170	55	107	85
102	185	194	127	40	175	190	102
116	135	180	185	174	120	155	174
98	166	155	185	80	124	105	176
144	78	64	205	145	179	175	125
115	120	70	182	135	178	185	70
175	80	100	135	78	165	100	50

Figure 6 : Fenêtre 8 x 8 d'une image. *The 8 x 8 window of the image.*

1	1	1	0	0	1	1	1
1	1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	0	1	1	1
1	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	0	0

Figure 7 : Image binaire obtenue par seuillage de l'image de la figure 6 ($S_1 = 0$ et $S_2 = 100$). *Binary image obtained by thresholding of the image of figure 6 ($S_1 = 0$ and $S_2 = 100$).*

2.1.2. Transformation par dilatation

Dans le cas d'une dilatation, pour chaque position de l'élément structurant B_x dans l'ensemble *X*, on pose la question : B_x touche-t-il *X* ? En d'autres termes : $B_x \cap X \neq 0$? L'ensemble des points de R^2 correspondant aux réponses positives forme un nouvel ensemble *Y* appelé dilaté de X. La transformation par dilatation s'écrit : $Y = D^B(X)$.

Le principe consiste à positionner le pixel central de l'élément structurant sur chacun des pixels de l'image. Si la somme logique de tous les pixels de l'élément structurant avec ceux de l'image est différente de 0 au moins à un point, nous attribuons la valeur 1 au pixel centré. Si la somme logique donne 0 à tous les points, nous attribuons la valeur 0 au pixel centré correspondant (figure 8). Le résultat de la dilatation de l'image de la figure 2 est donné à la figure 9. On obtient ainsi une image unitaire.

L'érosion et la dilatation étant des transformations itératives, dans le but d'améliorer les résultats recherchés, on applique parfois une transformation par dilatation sur un érodé ou une érosion sur un dilaté. Ces deux types de transformations prennent, respectivement, les noms de fermeture et d'ouverture **(**Coster et Chermant, 1989), soit :

- dilatation + érosion → fermeture ;

- érosion + dilatation → ouverture.

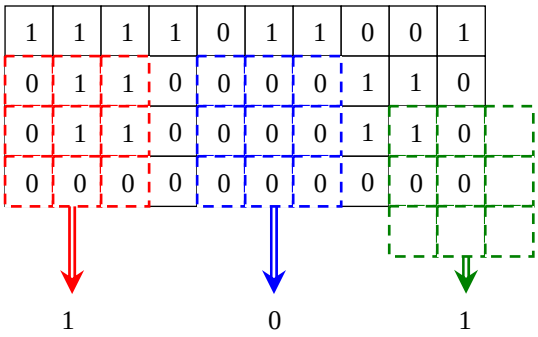


Figure 8 : Exemple illustrant la transformation par dilatation pour trois positions de l'élément structurant carré 3 x 3. *Example illustrating the transformation by dilatation for three positions of the square 3 x 3 structuring element.*

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 9 : Dilatation de l'image de la figure 2 par un élément structurant unitaire 3 x 3. *Dilatation of the image of figure 2 by a 3 x 3 unit structuring element.*

2.1.3. Ouverture et fermeture morphologiques

A) Ouverture

Si nous dilatons par son transposé chaque point *x* de $E^B(X)$, il sera remplacé par son élément structurant B_x. L'ensemble transformé $D^{\check{B}}(E^B(X))$ correspondra à l'union de tous ces éléments B_x, tel que $x \in E^B(X)$. On peut aussi dire que l'ouverture est l'espace qui n'est pas balayé lorsque l'élément structurant est entièrement inclus dans le complémentaire de l'ensemble.

L'ouverture s'exprime par O^B (X), ou X_B et se définit par :

$$O^B(X) = D^{\check{B}}(E^B(X)) \qquad (1)$$

La dilatation de l'image érodée de la figure 5 donne les résultats présentés à la figure 10. On observe ainsi un enrichissement en zones claires.

B) Fermeture

La dilatation d'un ensemble *X* par un élément structurant B_x, suivie d'une érosion par le même élément structurant, correspond à une opération de fermeture. Elle s'exprime par $F^B(X)$ ou X^B. Elle se définit par :

$$F^B(X^C) = E^B(D^B(X)) \qquad (2)$$

L'érosion de l'image dilatée de la figure 9 donne les résultats présentés à la figure 11. Tous les bords de l'image deviennent sombres.

1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

Figure 10 : Ouverture de l'image de la figure 2 par un élément structurant unitaire 3 x 3. *Opening of the image of figure 2 by a 3 x 3 unit structuring element.*

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 11 : Fermeture de l'image de la figure 2 par un élément structurant unitaire 3 x 3. *Closing of the image of figure 2 by a 3 x 3 unit structuring element.*

2.1.4. Squelettisation

Le squelette conserve les propriétés topologiques de la forme qu'il représente. La notion de squelette est apparue pour l'étude des objets minces. L'idée de squelettisation consiste à centrer, dans une forme, un squelette qui soit significatif de son allongement et de ses déformations. Le squelette d'un cercle va alors devenir son centre et celui d'une ellipse son grand axe (Coster et Chermant, 1989). Ainsi, dans le plan, il transforme une forme en un ensemble de lignes qui passent au milieu des objets. Dans l'espace, ce sera une union de nappes.

Un homéomorphisme simple consiste à réduire l'épaisseur des composantes connexes de *X* jusqu'à une valeur infiniment petite, de telle sorte que l'on ne change ni leur nombre, ni leur genre. Si la réduction d'épaisseur se fait de la manière la plus isotrope possible, *T(X)* sera très proche d'un ensemble de lignes qui pourrait représenter l'ossature de *X*. La notion de squelette va permettre de définir deux nouvelles transformations de l'image : l'épaississement et l'amincissement, qui feront appel à des éléments structurants non convexes, permettant ainsi d'introduire la notion générale de transformation de voisinage.

La transformation qui produit le squelette d'un objet n'est pas réversible : on ne peut pas revenir à l'objet en partant de son seul squelette, mais elle donne une allure de l'objet codé et elle est particulièrement adaptée aux objets minces.

Considérons un ensemble *X* et sa frontière ∂x. Un point *s* de *X* appartient au squelette identifié $sq(X)$, si la distance euclidienne de *s* à ∂x est atteinte en au moins deux points distincts de *x*, soit : $s \in sq(X) \Leftrightarrow \exists\, y_1, y_2 \in \partial x, y_1 \neq y_2 \quad tel\ que \quad d(s, \partial x) = d(s, y_1) = d(s, y_2)$.

A) Érosion, ouverture et squelette

Le théorème qui permet d'exprimer le squelette en termes d'érosion et d'ouverture se définit comme suit :

$$sq(X) = \bigcup_{\lambda \succ 0} \bigcap_{\mu \succ 0} [E^{\lambda B}(X) / O^{\mu B}(E^{\lambda B}(X))] \qquad (3)$$

Le squelette est l'union suivant tous les λ positifs de l'intersection suivant tous les μ positifs de la différence entre l'érodé de *X* par λB avec l'érodé de *X* par λB ouvert par μB, soit :

$$x \in \bigcap_{\mu \succ 0} [E^{\lambda B}(X) / O^{\mu B}(E^{\lambda B}(X))]$$

Ceci signifie que *x* est le centre d'une boule maximale de rayon λ.

La méthodologie consiste à réduire l'épaisseur des entités d'une image à la dimension d'un pixel. Lors du processus de squelettisation, les entités de l'image sont amincies par le biais d'un élément structurant, jusqu'à ce qu'il y ait stabilité. L'image est alors balayée avec une série de huit masques (numérotés de *B1* à *B8*), obtenus à partir d'un masque *B1*, par rotation

d'un angle de 45° (Akono, 2000). Cette rotation de tous les pixels par rapport au pixel central se fait dans le sens des aiguilles d'une montre (figure 13).

$$B1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

B) Squelette d'images numérisées

Le squelette des images numérisées peut-être obtenu par l'intermédiaire de nouvelles catégories de transformations, soit l'épaississement et l'amincissement homotopiques, qui sont introduites à partir d'une transformation plus généralisée : la transformation de voisinage. Il s'agit d'une généralisation de l'approche « tout ou rien utilisée » pour les opérateurs E (érosion) et D (dilatation). Elle est nécessaire pour définir le processus d'obtention d'un squelette.

Considérons un ensemble numérisé dans le cas d'un réseau hexagonal. Le voisinage d'un point n'est autre que l'hexagone élémentaire centré sur ce point. Dans le cas d'un réseau carré, le voisinage d'un point sera le carré de taille 2 centré sur ce point. Si l'on attribue des valeurs 1 (point blanc) ou 0 (point noir) à chacun des points constituant l'hexagone ou le carré élémentaire, on forme une configuration de voisinage (figure 14). Chacune de ces configurations constitue un élément structurant, associé au réseau considéré. Dans le cas d'un réseau hexagonal, il existe 2^7 configurations possibles et pour le réseau carré 2^9.

Dans la plupart des algorithmes utilisant des configurations de voisinage, ces dernières peuvent être regroupées en famille notée $\upsilon = \upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3 \ldots \upsilon_n$.

Soit *X* une image numérisée et *x* un point appartenant à la trame. Appelons υ_X la configuration de l'image binaire *X* centré en *x*. La transformation de voisinage par la famille υ consiste à attribuer la valeur 1 à chaque point de la trame ayant une configuration appartenant à la famille de voisinage. On l'exprime par :

$$X \vartheta \upsilon_X = \begin{cases} 1 & si \quad \upsilon_X \in \upsilon \\ 0 & si \quad \upsilon_X \notin \upsilon \end{cases}$$

C) Amincissement et épaississement

L'amincissement d'un ensemble *X* consiste à lui enlever des points qui correspondent à une configuration donnée, tandis que l'épaississement consiste à lui en ajouter (Schmitt et Mattiolli, 1993). Si l'on désigne par O l'amincissement et par Θ l'épaississement, pour l'amincissement, on aura $X \, O \, \upsilon = X / (X \vartheta \upsilon)$ et, pour l'épaississement $X \, \Theta \, \upsilon = X \cup (X \vartheta \upsilon)$.

L'amincissement et l'épaississement sont deux opérations duales complémentaires. Amincir un ensemble et épaissir son complémentaire sont deux opérations équivalentes, soit $(X \, O \, \upsilon)^C = X^C \, \Theta \, \upsilon^C$.

La deuxième propriété est celle de relation de double inclusion qui existe entre l'amincissement et l'épaississement puisque $X \, O \, \upsilon \subset X \subset X \, \Theta \, \upsilon^C$.

D) Amincissement homotopique et squelette

Si on amincit un grand nombre de fois un ensemble de manière homotopique, du fait de cette homotopie, on tendra vers une limite qu'il n'est plus possible de dépasser. Si on amincit un objet *X* de connexité 1, l'amincissement digital maximal correspond à 1 pixel. Si l'on veut encore amincir ce point, cela ne sera plus possible sans enlever la connexité. Sur une image numérisée, il existe donc un nombre d'itérations maximal au-delà duquel, la transformation devient idempotente (toute autre application ne modifie plus l'image).

Considérons les images numérisées selon une trame hexagonale. Les configurations locales tirées de l'alphabet de Golay qui ne brisent pas la connexité sont exprimées sur la figure 15 et le symbole • signifie que la valeur du pixel n'a pas d'importance.

Par exemple l'amincissement par L, fonctionne de la manière suivante :

- pour tous les pixels de l'image en parallèle, mettre à 0 tous les pixels qui ont pour voisinage L ;
- tourner L de 60° et recommencer à amincir.

Le squelette habituellement utilisé est calculé à l'aide de *L*. Celui qui est obtenu par *M* fournit de trop nombreuses branches, dites barbules. La configuration *D* réduit à un point tout objet sans trou et peut donc être utilisée pour marquer de manière homotopique un objet, c'est-à-dire transformer chaque objet en un point unique (figure 16).

E) Épaississement homotopique

Comme pour les amincissements, la famille *M* donne beaucoup plus de branches parasites que la famille *L* : elle est donc à priori moins intéressante. Lorsqu'on désire effectuer un épaississement homotopique et que l'ensemble initial est susceptible de contenir des points isolés, il est préférable d'épaissir une fois avec *M*, puis d'effectuer un épaississement séquentiel avec la famille *L*.

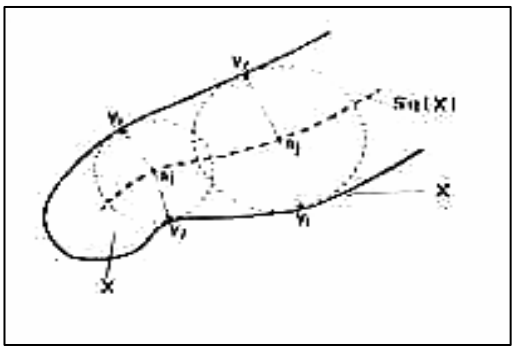


Figure 12 : Illustration de la définition du squelette. *Illustration of the definition of the skeleton*



Figure 13 : Illustration du sens de rotation des masques a) original ; b) après la première rotation. *Illustration of the direction of rotation of the masks a) original ; b) after the first rotation.*

	1 1	
0	0	1
	1 1	

a)

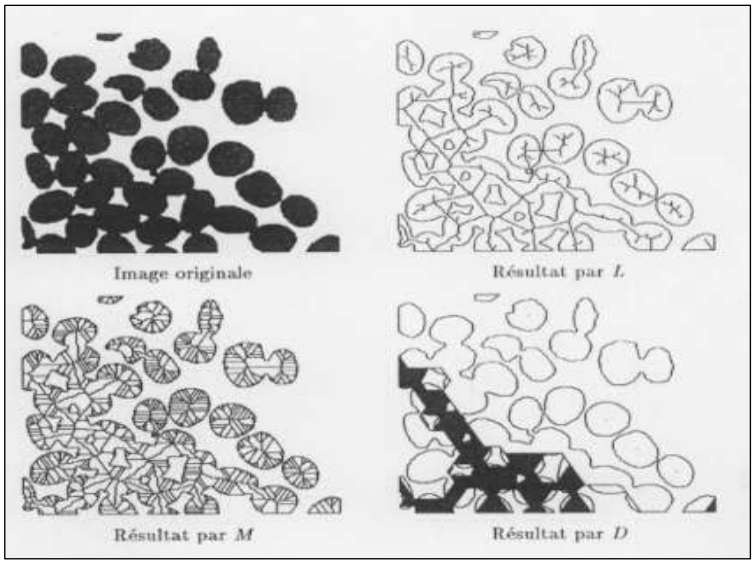
1	1	1
0	0	0
1	1	1

b)

Figure 14 : Configuration de voisinage a) réseau hexagonal ; b) réseau carré. *Configuration of vicinity a) hexagonal network ; b) square network.*

$$L = \begin{matrix} & 1 & 1 \\ \bullet & 1 & \bullet \\ & 0 & 0 \end{matrix} \qquad M = \begin{matrix} 1 & 1 & \bullet \\ 1 & 1 & \bullet \\ \bullet & 0 & \end{matrix} \qquad D = \begin{matrix} & 1 & \bullet \\ \bullet & 1 & 0 \\ & 0 & 0 \end{matrix}$$

Figure 15 : Configurations locales ne brisant pas la connexité. *Local configurations not breaking the connexity.*



Tiré de Coster et Chermant (1989)

Figure 16 : Squelette par amincissement homotopique. *Skeleton by homotopic thinning.*

2.2. Caractérisation des catégories de couverture du sol à Douala

Le signal radar reçu d'une zone urbaine est fonction des facteurs de rugosité (les surfaces rugueuses ou lisses) et de conductivité (les surfaces conductrices, les mélanges, l'humidité).

2.2.1. Rugosité

Sont dits rugueux des objets dont les irrégularités de surface sont suffisamment prononcées par rapport à la longueur d'onde et à l'angle d'incidence. Chaque objet réfléchit le signal de façon indépendante par rapport aux autres objets. Le signal réémis par de telles surfaces est alors de type incohérent. Il s'agit principalement ici des zones de végétation (parc public, jardin, zones non habitées, etc.) et d'aires ayant une base lisse mais comportant un grand nombre de petits objets. Cela correspond, en termes de modèle de Goodman (Lorette, 1999), à une construction du chatoiement comportant un grand nombre de réflecteurs (N) ayant une phase uniformément répartie (φ_j) et une amplitude (a_j) gaussienne. Le champ électrique complexe s'écrit alors :

$$E = \sum a_j e^{i\varphi_j} \qquad (4)$$

Ainsi, la loi d'amplitude ($A=|E|$) est une loi de Rayleigh en mono-vue et une loi d'amplitude $\chi(L)$ en multi-vue (pour L vues). La densité de probabilité pour l'amplitude A de E est définie par :

$$P_L(A)=\frac{2L^L}{(2\alpha^2)^L\Gamma(L)}A^{2L-1}e^{-\frac{L\alpha^2}{2\alpha^2}} \qquad (5)$$

où α est le paramètre de la loi χ et Γ la fonction gamma (Veysseyre, 2001).

2.2.2. Conductivité

Les surfaces lisses sont celles dont l'écart quadratique moyen des hauteurs est petit par rapport à la longueur d'onde d'émission du radar. Cette condition s'exprime grâce au critère de Rayleigh (Lorette, 1999) :

$$\Delta h << \frac{\lambda}{8\cos(i)} \qquad (6)$$

où Δh est l'écart quadratique moyen des hauteurs, λ la longueur d'onde, et i l'incidence du radar.

Pour les objets couverts par ce type de matériau, les lois de la rétrodiffusion sont celles de Fresnel (Armand et Hernandez, 1987), soit une faible réponse en réflexion spéculaire des surfaces vitrées et de certaines surfaces métalliques constituant les façades verticales des immeubles et les plans d'eau en visée nadirale. Par conséquent, la géométrie de l'objet détermine la puissance du signal mesuré par le radar. Si nous considérons un grand nombre de pixels contenant ce type d'objets, l'amplitude moyenne rétrodiffusée sera fonction de la taille des objets et donc de la surface apparente des immeubles, des maisons groupées ou même de la surface de l'eau calme. Suivant la direction de visée du radar et leur forme, ces objets auront une réponse forte ou pas. Nous aurons donc une loi possédant une moyenne forte correspondant aux configurations favorables, additionnée d'un ensemble de pixels de valeur faible (proche du bruit thermique du capteur) correspondant aux configurations défavorables.

2.2.3. Surfaces conductrices

Les surfaces conductrices sont des surfaces métalliques que l'on trouve principalement en couvertures de bâtiments sous les tropiques et comme principaux matériaux de construction dans les zones industrielles. Ces surfaces ne sont jamais planes (pour des raisons de rigidité) et forment donc des réseaux de réflecteurs périodiques.

Les tôles utilisées comme éléments de construction ont deux propriétés importantes : les ondulations sont verticales et leurs bords sont presque parallèles au sol. La tôle est de période D, elle constitue donc un réseau de *Bragg plan* (Armand, 1986) dont la période apparente dépend de l'angle entre la direction azimutale du radar (α) et la direction des ondulations de la tôle (β). Cette période est :

$$d=\frac{D\sin\alpha}{\cos\beta} \qquad (7)$$

Le $n^{ième}$ élément de la tôle aura donc pour rétrodiffusion dans le plan contenant la direction de propagation et la normale à la tôle :

$$E(\alpha)=a(\alpha)e^{i(\varphi(\alpha)+\frac{2\pi nD\sin(\alpha)}{\lambda\cos(\beta)})} \quad (8)$$

La rétrodiffusion totale de la toiture en tôle s'écrit donc :

$$E_t(\alpha)=\sum_{j=1}^{n-1}a(\alpha)e^{i(\varphi(\alpha)+\frac{2\pi jD\sin(\alpha)}{\lambda\cos(\beta)})} = a(\alpha)e^{i\varphi(\alpha)}\frac{\sin(2\pi\frac{nD\sin(\alpha)}{\lambda\cos(\beta)})}{\sin(2\pi\frac{D\sin(\alpha)}{\lambda\cos(\beta)})}E(\alpha) \quad (9)$$

Ce modèle permet de dire, à propos de la rétrodiffusion des tôles, qu'en présence de nombreuses toitures aléatoirement réparties, on trouvera probablement une loi bimodale où prévalent les fortes valeurs et les très faibles.

2.2.4. Cas des mélanges

Du fait du chatoiement, il est difficile d'utiliser les mesures sur un seul pixel. Il est nécessaire de considérer des échantillons (par exemple une fenêtre carrée de taille *n x n*) de pixels résultats de la rétrodiffusion des trois types d'objets définis précédemment, soit les objets rugueux, les surfaces lisses et les surfaces conductrices).

Si nous considérons une zone homogène et un échantillon de pixels de taille suffisante, nous obtiendrons probablement une loi d'amplitude χ en multi-vue. L'introduction d'objets urbains écarte les distributions du modèle de chatoiement pleinement développé car l'amplitude de rétrodiffusion sera alors le résultat de la sommation de trois variables aléatoires :

- E_s (en proportion q_s) pour les zones non cohérentes (X_s) ;

- E_f (en proportion q_f) pour les zones de type Fresnel (X_f) ;

- E_t (en proportion q_t) pour les zones de rétrodiffusion de Bragg (X_t) ; soit :

$$E = 1_{x\in X_s}E_s + 1_{x\in X_f}E_f + 1_{x\in X_t}E_t \quad (10)$$

La densité de probabilité pour l'amplitude A de E vaut donc :

$$P(A) = q_sP_s(A) + q_fP_f(A) + q_tP_t(A) \quad (11)$$

Il en ressort, au vu des parties décrivant la rétrodiffusion en milieu urbain, en fonction des proportions de chaque distribution, une répartition des pixels par rapport à la loi du chatoiement pleinement développée telle que :

- les pixels sombres seront en surnombre à cause des configurations de type Fresnel, mais dans une mauvaise direction ou de condition défavorable pour les tôles ;
- les pixels brillants seront en surnombre du fait des réflexions de Fresnel favorables et des interférences constructives ;
- les zones de distribution centrée autour de la moyenne des pixels non cohérents ne seront pas ou peu modifiées.

En fonction de cette loi de distribution et du fait que l'habitat dans la ville de Douala est généralement en tôle et groupé, l'influence du chatoiement serait considérablement moindre. Ainsi, le paramètre à prendre en compte serait essentiellement l'intensité. Nous utiliserons donc une binarisation pour la détection des points brillants. Le seul aspect à prendre en compte est que, Douala étant une ville située au bord du fleuve Wouri, il y a des risques de détecter les régions du fleuve présentant des vagues, résultant notamment de l'influence de l'océan Atlantique dans lequel il se jette. Comme ces régions sont généralement peu étendues et grâce à une bonne connaissance du terrain, nous avons pu les supprimer en filtrant d'abord l'image. D'après des mesures faites sur l'image, différents niveaux radiométriques obtenus nous ont permis de choisir de façon judicieuse les seuils de binarisation. Pour ce faire, nous avons utilisé le filtre Frost 5 x 5, en intensité et en amplitude, pour le lissage de l'image et, après interprétation de multiples essais, les seuils de binarisation ont été choisis comme suit : S1 = 0, S2 = 130.

2.3. Détection des différents quartiers de la ville de Douala

Certains quartiers de la ville de Douala présentent un habitat groupé ; d'autres présentent un habitat dispersé et partiellement masqué par une forte végétation. Ces différentes formes présenteront une loi de distribution de Fresnel concentrée et favorable, dans chaque zone. Ainsi, les zones d'habitat groupé présentent un surnombre de pixels brillants, tandis que les zones d'habitat dispersé et à prédominance végétale ont un surnombre de pixels sombres. On peut alors facilement détecter les contours caractérisant le passage d'une catégorie d'habitat à une autre, et même d'une classe texturale à une autre. On se fixe alors quatre classes texturales :

- classe à niveau de gris correspondant à l'eau ;
- classe à niveau de gris correspondant à des surfaces minéralisées (au bitume en général) ;
- classe à niveau de gris correspondant aux zones à habitat groupé (tôle) et donc à réflectance très élevée ;
- classe à niveau de gris correspondant aux zones à prédominance végétale (jardins publics, arbres longeant les routes, zones non habitées, etc.).

Le traitement comprend les étapes suivantes : l'application sur l'image originale d'un filtre de chatoiement (FROST 5 x 5), ensuite un seuillage bas supérieur à 0 permet d'éliminer les contours entre les bords de l'eau et la rive et, finalement, un seuillage haut délimite les différentes classes à détecter. Deux approches sont ensuite utilisées. D'abord, une binarisation de l'image des contours (ayant pour seuils S1 = 0 et S2 = 130) fait ressortir deux classes de l'espace urbain. Les zones habitées et non habitées, dont le calcul des superficies est aisé à partir de la résolution de l'image. Ensuite, l'application d'un filtre de Sobel bidirectionnel permet de faire ressortir les différents quartiers de Douala, soit les quartiers denses à habitat regroupé et les zones à prédominance végétale.

L'organigramme des types d'occupation des terres de la ville de Douala est présenté sur la figure 17.

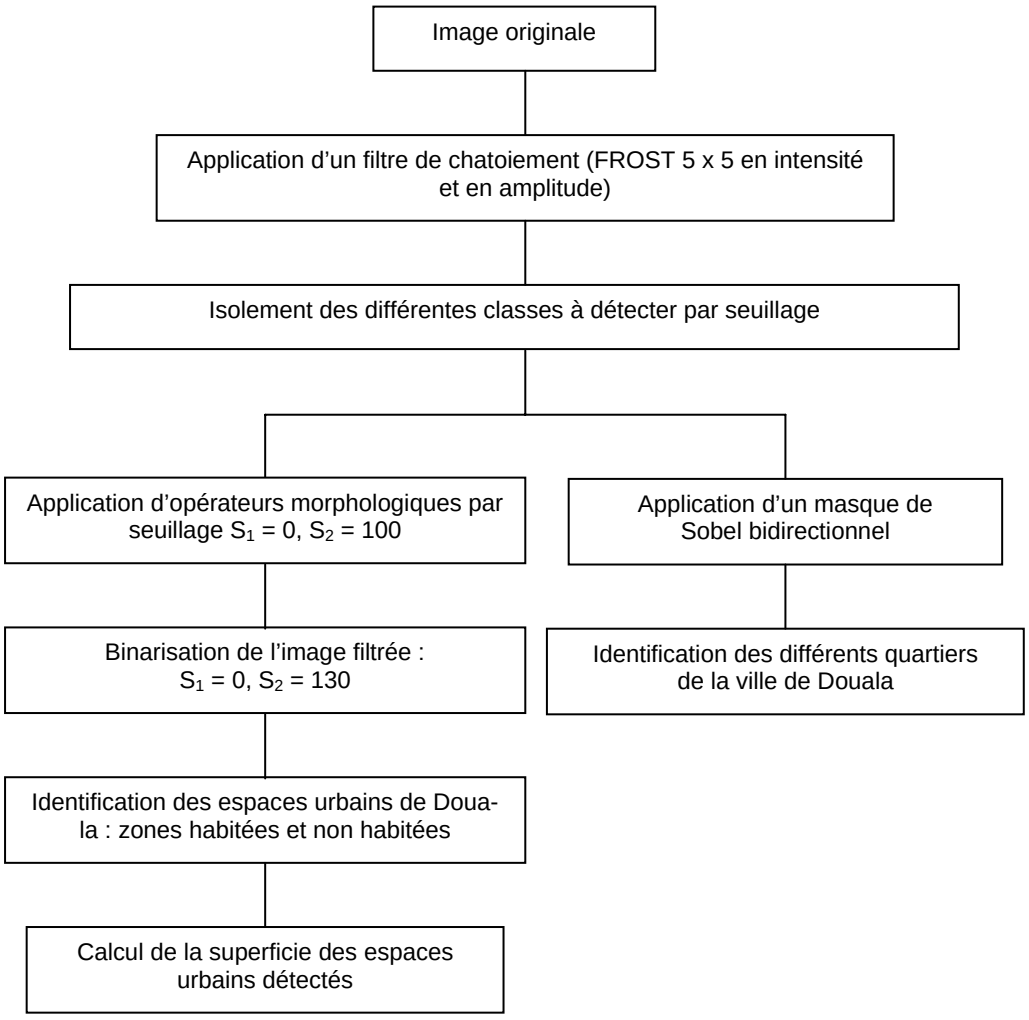


Figure 17 : Organigramme de la caractérisation des types d'occupation des terres de la ville de Douala (Cameroun). *Flow chart of the characterization of the types of land occupation of the city of Douala (Cameroon).*

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

En utilisant les méthodes classiques de classification, la différenciation des tissus urbains semble assez complexe. En réalité, il est moins aisé, voire même impossible de faire une distinction stricte entre l'urbain et le non urbain car, dans le contexte africain, à l'intérieur d'une même ville, on peut rapidement passer d'une zone de bâti, à une zone de végétation (Assako Assako et Tonyé, 2000). Mais, puisque la morphologie mathématique s'appuie sur des traitements peu sensibles aux variations radiométriques (Kombé, 1999), elle permet d'obtenir des résultats encourageants.

De la portion de l'image RSO de 640 x 400 pixels de la région de Douala qui est notre site d'étude (figure 18) ressort trois grandes zones : une zone urbaine (zones urbaines de Douala et de Bonabéri), une zone mangrovienne et l'eau de mer. La binarisation de cette image (figure 19) après application du filtre FROST 5 x 5 par seuillage ($S_1 = 0$ et $S_2 = 100$) permet d'obtenir deux classes thématiques : en blanc, les pixels dont la valeur binaire est 1, en noir ceux dont elle vaut 0. L'application de la transformation par érosion sur cette image (figure 20) permet de mettre en évidence l'une des propriétés fondamentales de cette transformation à savoir : l'érosion réduit les pics et élargit les vallées. La dilatation (figure 21), opération inverse de l'érosion, montre que cet opérateur morphologique comble les vallées et épaissit les pics, tandis que l'ouverture morphologique (figure 22) adoucit les contours, élimine les petites convexités, supprime les particules trop étroites et sépare en plusieurs composantes connexes des particules présentant un étranglement assez long. Les résultats de la figure 23 représentent la fermeture morphologique. Cet opérateur bouche les canaux étroits, supprime les petits lacs et les golfes étroits.

De l'analyse des résultats obtenus, il en découle le constat suivant : dans le cas d'une transformation par ouverture, les formes fines (lignes en noir) sont maintenues et les zones hétérogènes à dominance blanche deviennent plus compactes, tandis que, pour une fermeture, les formes fines et hétérogènes ont disparu ainsi que les zones noires d'aires trop petites.

L'opérateur morphologique permettant de déterminer l'aspect filiforme de chaque objet est appelé squelettisation (figure 24). Les informations qui ressortent de ce traitement sont les suivantes : le squelette de l'eau calme (sans vagues) apparaît plus clairement sur l'image (zone 2), celui de la région mangrovienne donne des petits points (zone 1). Le résultat génère une zone blanche là où apparaissent de hautes vagues (zone 4) ainsi que de nombreuses barbules à leurs limites (zone 5), résultat consécutif à leur interférence. Le squelette des zones urbaines ne donne pas de détails sur cette image car les réseaux urbains sont difficilement accessibles directement à partir d'une image radar. Ces zones sont identifiées par des régions blanches (zones 3 et 6). La détection du réseau urbain (routes) va exiger l'application d'autres transformations non morphologiques, par exemple une détection de contours suivie de la détection des structures linéaires (Kombé *et al.*, 2005).

Afin de réduire le chatoiement sur la portion de l'image originale de la région de Douala, nous avons testé plusieurs filtres de chatoiement (filtre KUAN, LEE, FROST) (Akono, 2000). La détection des différents contours par le masque de Sobel bidirectionnel donne les meilleurs résultats sur une image filtrée par le filtre FROST 5 x 5 (figure 25). Une binarisation de l'image de la figure 18, après application du filtre FROST 5 x 5 par seuillage ($S_1 = 0$, et $S_2 = 130$), permet de faire ressortir la zone urbaine et les zones non urbaines (figure 26).

Connaissant la résolution de l'image, il est facile d'obtenir la superficie de ces zones à l'intérieur du périmètre d'étude. La méthodologie consiste à compter à l'aide d'un programme, le nombre de pixels sombres ou clairs qui sont contenus dans chaque zone, ensuite de les multiplier par la résolution de l'image. On peut facilement distinguer, en blanc, toutes les zones habitées de Douala et de Bonabéri, et, en noir, toutes les zones non habitées, cette dernière regroupant l'eau, principalement le fleuve Wouri, la région mangrovienne et les zones non habitées à l'intérieur de l'espace urbain. Une navette image-terrain, a permis de distinguer quatre zones non habitées à l'intérieur de l'espace urbain : la zone I, d'une superficie de 12 ha, est une zone marécageuse s'étendant de Bépanda Tonnerre à Elf Bonamoussadi ; la zone II, d'une superficie de 7 ha, est une zone non habitée qui s'étend de l'I.U.T. de Douala (Ndogbong), jusqu'à la voirie municipale ; la zone III, d'une superficie de 13 ha, est une zone non habitée qui s'étend de gendarmerie Mbopi jusqu'à la gare de Bessengue ; la zone IV, d'une superficie de 18 ha, est une zone non habitée qui s'étend de Nyalla à la zone industrielle de Bassa.

D'autre part, des calculs faits sur l'image de la figure 26 ont permis d'obtenir les résultats suivants : la superficie de la ville de Douala visible sur la zone d'étude est d'environ 7 500 ha, celle de la zone urbaine de Douala est de 4 200 ha, celle de la zone urbaine de Bonabéri est de 875 ha et celle de la région mangrovienne est de 2 425 ha. Il convient de mentionner que le format de 640 x 400 pixels utilisé pour cette application ne permet pas de couvrir toute l'étendue de la région de Douala. Son choix est motivé par les raisons suivantes : un gain en temps de calcul et moins d'occupation de l'espace mémoire de l'ordinateur, ensuite, pour une meilleure mise en évidence de la pertinence des principales classes identifiées par le seuillage de l'image. Évidemment, avec un format beaucoup plus grand, on obtiendrait des données beaucoup plus proches de la réalité du terrain en termes de calcul de la superficies pour toute la région.

Compte tenu de l'aspect très texturé des agglomérations dans les quartiers dits populaires, de la prédominance de la végétation dans certains quartiers où l'on rencontre des espaces verts et les jardins publics, et du fait que les quartiers sont généralement séparés par une route, le passage d'une classe texturale à l'autre est facilement décelable. Ainsi, une détection des contours avec un seuil bas supérieur à celui de l'eau ou des surfaces minéralisées (bitume) et un seuil haut inférieur à celui des points brillants, permet de faire ressortir les différents quartiers de la ville de Douala (figure 27).

Une navette image-terrain permet de distinguer deux grands groupes. Le premier groupe est celui des quartiers dits populaires : New-Bell, Nylon, Akwa, Bassa, pour la zone F ; Bonabéri pour la zone A ; Deïdo, Akwa Nord pour la zone B ; Bonamoussadi et Maképé pour la zone C ; Bépanda et Béssengué pour la zone D ; Madagascar et Dibom pour la zone E. Le deuxième groupe est celui des quartiers dits à prédominance végétale ; il s'agit des quartiers Bonapriso et Bonanjo pour la zone G.

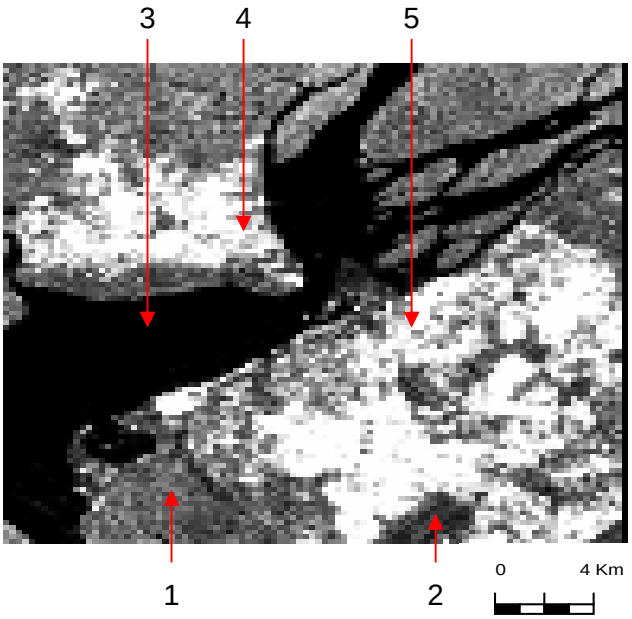


Figure 18 : Portion d'une image RSO de 640 x 400 pixels de la région de Douala (côte atlantique camerounaise) : 1 = région mangrovienne (zone couverte de végétation) ; 2 = zone aéroportuaire de Douala ; 3 = eau captive de mer (fleuve Wouri) ; 4 = zone urbaine de Bonabéri ; 5 = zone urbaine de Douala. *Portion of a 640 x 400 pixel SAR image of the area of Douala (Cameroonian Atlantic coast): 1 = mangrovian area (zone covered by vegetation) ; 2 = airport zone of Douala ; 3 = captivate sea water (Wouri River) ; 4 = urban zone of Bonaberi ; 5 = urban zone of Douala.*

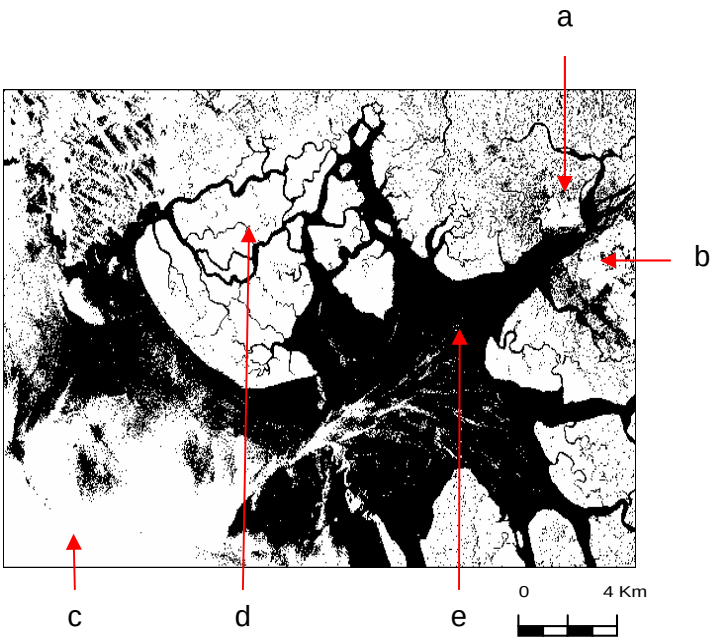


Figure 19 : Binarisation de l'image de la figure 18 après application du filtre FROST 5 x 5 par seuillage ($S_1 = 0$, $S_2 = 100$). □ = pixels à niveau de gris supérieur à 100 ; ■ = pixels à niveau de gris égal ou compris entre 0 et 100 ; a = zone urbaine de Bonabéri ; b = zone urbaine de Douala ; c = région de la mer présentant de hautes vagues ; d = région mangrovienne ; e = eau de mer (fleuve Wouri). *Binarization of the image of figure 18 after filtering using the FROST 5 x 5 filter by thresholding ($S_1 = 0$, $S_2 = 100$).* □ = *pixels with a grey level higher than 100 ;* ■ = *pixels with a grey level equal or ranging between 0 and 100 ; a = urban zone of Bonaberi ; b = urban zone of Douala ; c = area of the sea presenting high waves ; d = mangrovian area; e = sea water (Wouri River).*

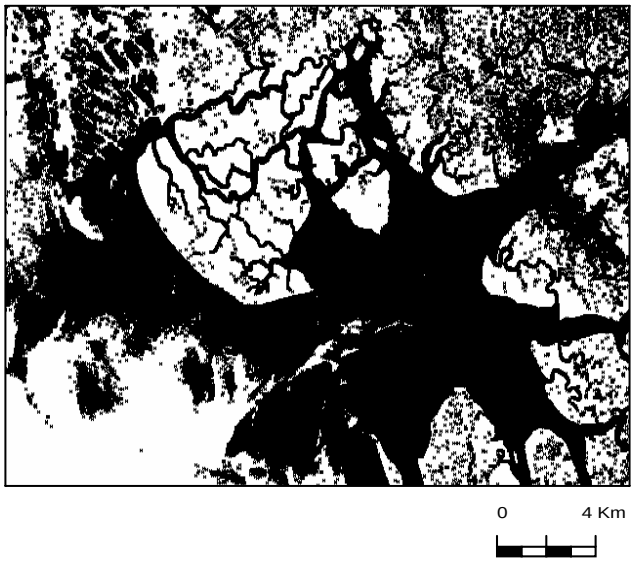


Figure 20 : Image érodée de l'image de la figure 19. *Eroded image of the image of figure 19.*

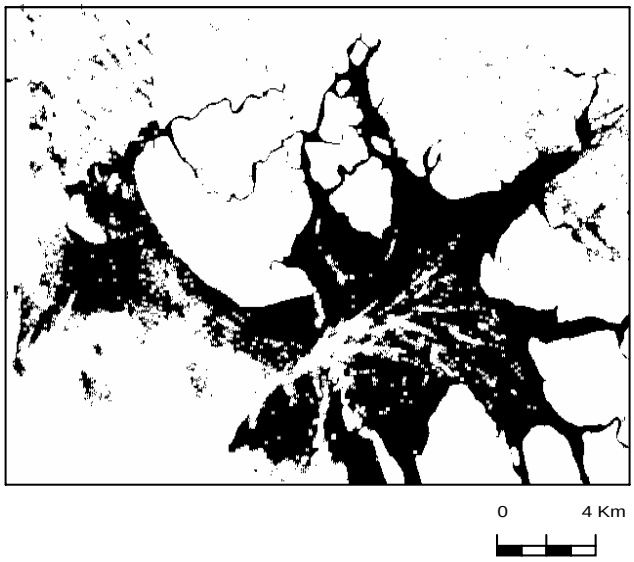


Figure 21 : Image dilatée de l'image de la figure 19. *Dilated image of the image of figure 19.*

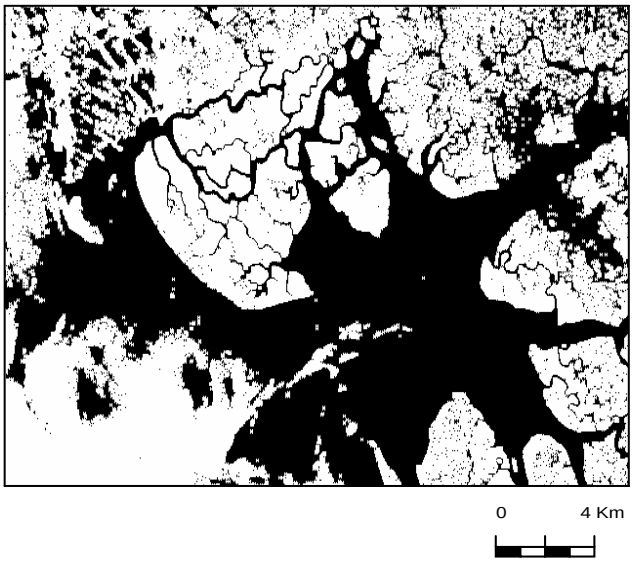


Figure 22 : Ouverture de l'image de la figure 19. *Opening of the image of the figure 19.*

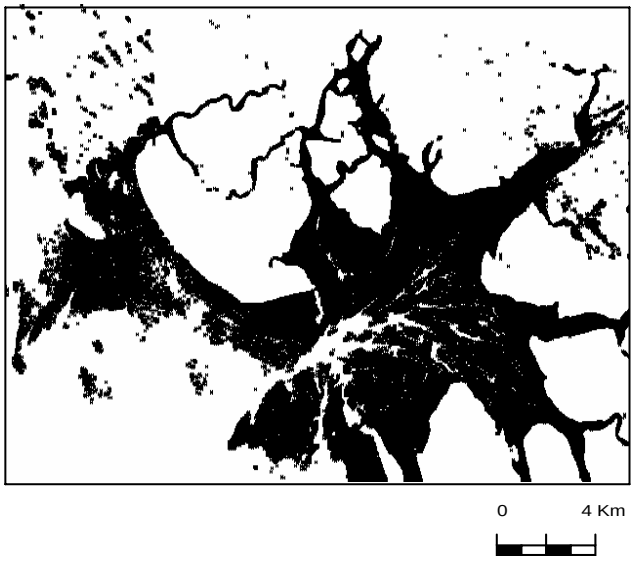


Figure 23 : Fermeture de l'image de la figure 19. *Closing of the image of figure 19.*

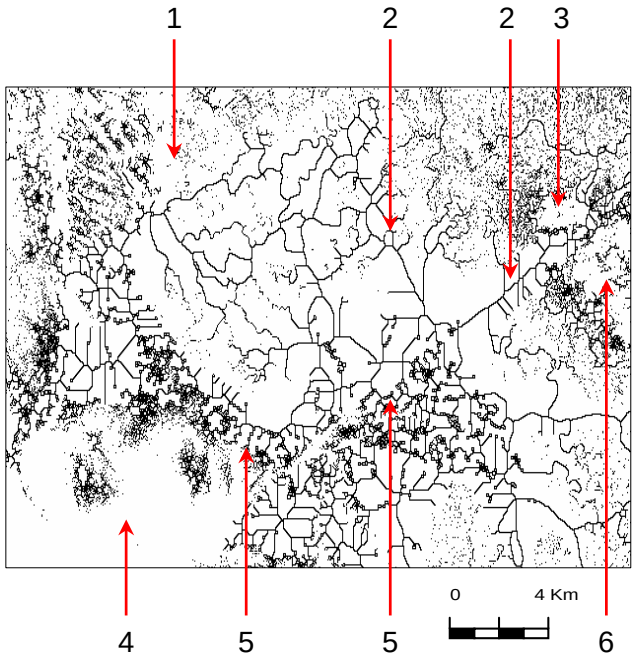


Figure 24 : Squelette de l'image de la figure 19 : 1 = région mangrovienne ; 2 = squelette de la mer calme (sans vagues) ; 3 = zone urbaine de Bonabéri ; 4 = région de la mer présentant des vagues hautes ; 5 = versant des vagues ; 6 = zone urbaine de Douala. *Skeleton of the image of figure 19: 1 = mangrovian area ; 2 = skeleton of the calm sea (without waves) ; 3 = urban zone of Bonaberi ; 4 = area of the sea presenting high waves ; 5 = wave surface; 6 = urban zone of Douala.*

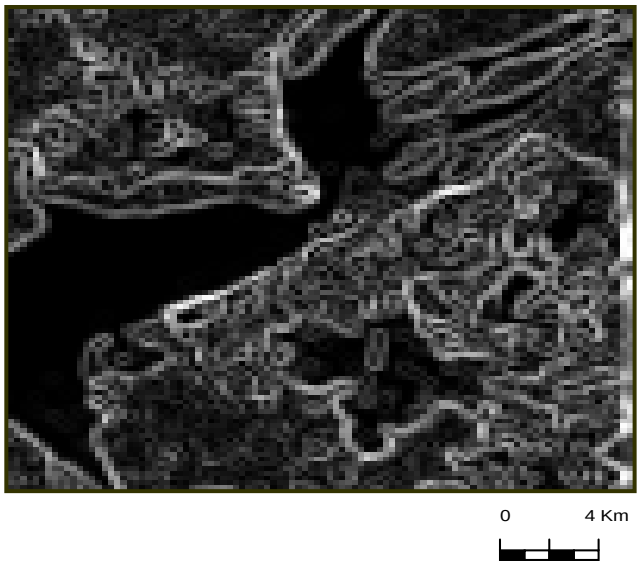


Figure 25 : Image des contours de l'image de la figure 19 par le masque de Sobel bidirectionnel après filtrage par le filtre FROST 5 x 5. *Contour image of the image of figure 19 using the Sobel bidirectional mask after filtering by the FROST 5 x 5 filter.*

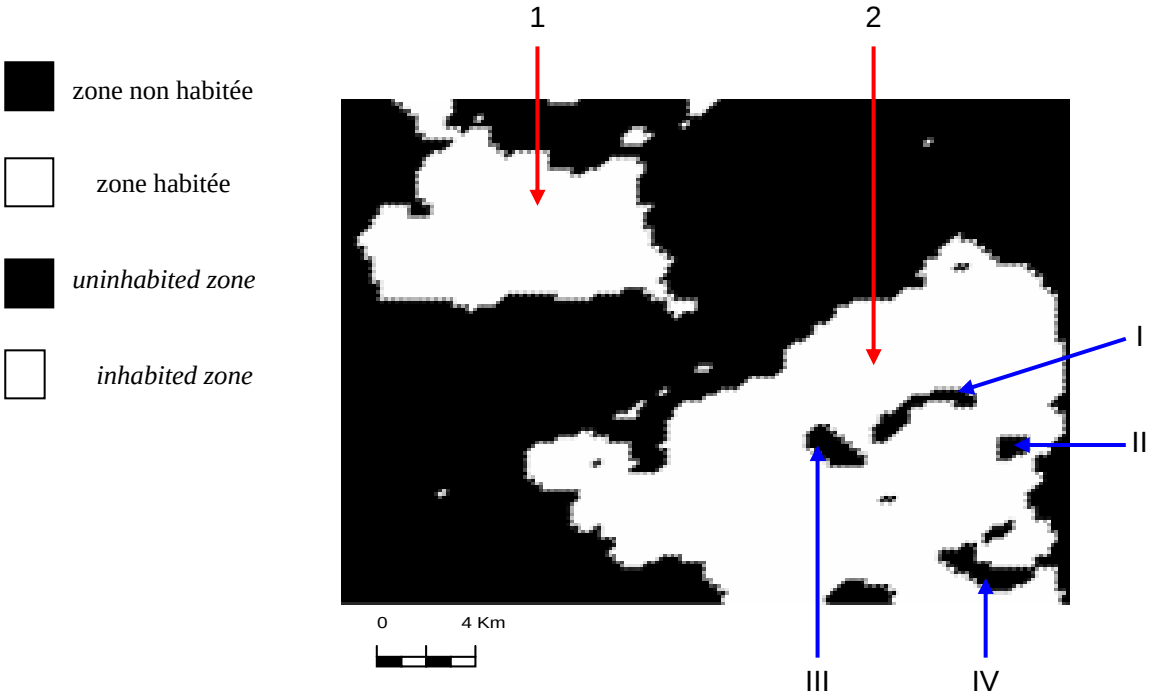


Figure 26 : Binarisation de l'image de la figure 18 après application du filtre FROST 5 x 5 par seuillage (S_1 = 0 et S_2 = 130). 1 = zone urbaine de Bonabéri ; 2 = zone urbaine de Douala ; I = zone marécageuse s'étendant de Bépanda Tonnerre à Elf Bonamoussadi ; II = zone non habitée s'étendant de l'I.U.T. de Douala, à la voirie municipale ; III = zone non habitée s'étendant de gendarmerie Mbopi à la gare de Bessengue ; IV = zone non habitée s'étendant de Nyalla à la zone industrielle de Bassa. *Binarisation of the image of figure 18 after filtering by the FROST 5 x 5 filter by thresholding (S1 = 0, S2 = 130). 1 = urban zone of Bonaberi ; 2 = urban zone of Douala ; I = marshy area extending from Bepanda Tonnerre to Elf Bonamoussadi ; II = uninhabited zone extending from the UIT of Douala to the municipal roadworks ; III = uninhabited zone extending from Mbopi gendarmerie to the Bessengue station ; IV = uninhabited zone extending from Nyalla to the industrial zone of Douala Bassa*

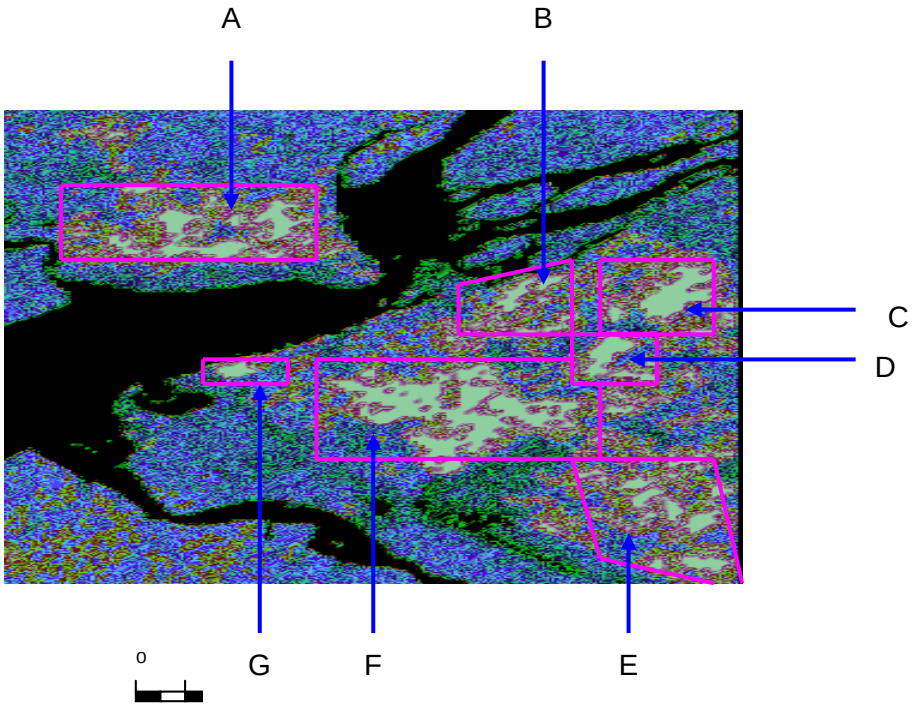


Figure 27 : Portion de l'image de 640 x 400 pixels des différents quartiers de la ville de Douala : A = Bonabéri ; B = Déïdo, Akwa Nord ; C = Bonamoussadi, Maképé ; D = Bépanda, Bessengué ; E = Magascar, Dibom ; F = New-Bell, Nylon, Bassa, Akwa ; G = Bonanjo, Bonapriso. *Portion of the 640 x 400 pixel image of the different neighbourhoods of the city of Douala: A = Bonabéri ; B = Déïdo, Akwa Nord ; C = Bonamoussadi, Maképé ; D = Bépanda, Bessengué ; E = Magascar, Dibom ; F = New-Bell, Nylon, Bassa, Akwa ; G = Bonanjo, Bonapriso.*

4. CONCLUSION

Puisqu'elle permet d'obtenir des résultats difficilement décelables par cartographie classique, l'imagerie satellitaire devient un moyen incontournable pour l'étude de l'urbain. Dans le domaine scientifique, elle assure : le suivi de la population, l'étude de la pollution, l'étude des risques tels que les inondations, les glissements de terrain, etc. Dans le domaine économique, elle permet de faire une prévision de l'aménagement des réseaux, une surveillance de la pression des espaces urbains sur les territoires agricoles, et même vers les zones à risque telles que les marécages et les régions mangroviennes, cette tendance étant marquée dans les pays en développement.

Les méthodes de classification appliquées dans cet article permettent de mettre en évidence la complémentarité entre les méthodes de classification par morphologie mathématique et les autres méthodes de classification pour la détection des tissus urbains. Les résultats obtenus sont satisfaisants. Cependant, même si la binarisation de l'image originale après filtrage par le filtre FROST 5 x 5 permet de distinguer parfaitement les régions habitées de celles qui ne sont pas habitées, la méthode de détection des différents quartiers quant à elle n'est efficace que dans les agglomérations. Il n'est pas aisé d'identifier les quartiers masqués par la végétation. Nous pensons, qu'avec les images optiques d'une résolution meilleure que celle de RSO de ERS-1 (12,5 m), comme les images du capteur Quickbird (résolutions de 0,82 m en panchromatique et de 3,28 m en multibande), et en combinant une analyse texturale par morphologie mathématique ainsi qu'une classification markovienne, on obtiendrait des informations beaucoup plus fines et plus proches de la réalité de terrain.

Les travaux présentés dans cet article se poursuivent dans une perspective d'approche mettant en synergie les méthodes de classification par morphologie mathématique et la classification markovienne.

Remerciements

Ce travail n'aura jamais abouti sans l'apport des experts. Nous remercions donc grandement le regretté Ferdinand Bonn pour tout ce qu'il a apporté à la communauté scientifique dans le domaine de la télédétection.

Références

Akono, A. (2000) Logiciel VOIR (Vision par Ordinateur des Images Radar). CD-ROM *in* E. Tonye (dir.) Le traitement des images de télédétection par l'exemple. Gordon and Breach Science Publishers, Paris, 179 p.

Armand, M. (1986) Images satellitaires et planification des villes du Tiers-Monde. Mondes en développement, Tome 14, n° 56, p. 197-222.

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

Assako Assako, R.J. (2000) Méthode navette image-terrain pour la réalisation des cartes d'occupation du sol en milieu urbain africain : le cas de Yaoundé (Cameroun). Télédétection, vol. 1, n° 4, p. 285-303.

Assako Assako, R.J. et Tonyé, E. (2000) Évaluation comparative des méthodes pour la

délimitation d'un périmètre urbain par télédétection. Télédétection, vol. 1, n° 4, p. 305-325.

Coster, M. et Chermant, J.L. (1989) Précis d'analyse d'images. Presses du CNRS, Paris, 560 p.

Girard, M.C., et Girard, C.M. (1989) Télédétection appliquée aux zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris, 260 p.

Kombé, T. (1999) Analyse texturale par morphologie mathématique et classification markovienne : cas d'une image radar de la région de Douala (Cameroun). Mémoire de DEA, École nationale supérieure polytechnique, Université de Yaoundé I, 107 p.

Kombé, T., Assako Assako, R.J. et Tonyé, E. (2005) Traitement de voisinage en vue de l'extraction du réseau routier urbain : application à une image RSO de Douala (Cameroun). P. 47-52, *in* A. Akono, E. Tonyé, A. Dipanda and Kokou Yétongnon (réd.) Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Signal & Image Technology and Internet Based Systems (SITIS 05). Yaoundé (Cameroun), 27 novembre au 1er décembre 2005, Éditions Dicolorgroupe, Ahuy (France), 160 p.

Lorette, A. (1999) Analyse de texture par méthodes markoviennes et par morphologie mathématique : application à l'analyse des zones urbaines sur des images satellitales. Thèse de doctorat, Université de Nice, Sophia Antipolis, 178 p.

Mouafo, D. (2000) Télédétection radar et délimitation des formes urbaines : application à la ville de Douala au Cameroun. P. 71-84, *in* J.-M. Dubois, R. Caloz et P. Gagnon (réd.) La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, 463 p.

Pouyllau, M. (1989) Télédétection et Tiers monde. Presses du CNRS, Paris, 365 p.

Robin, M. (1995) La télédétection. Édition Nathan, 318 p.

Schmitt, M. et Mattioli, J. (1993) Morphologie mathématique. Masson, Paris, 211 p.

Tonyé, E., Akono, A., Ndi Nyoungui, A. et Assako Assako, R. J. (2000) Extraction du

réseau routier sur une image RSO de ERS-2 et sur une image HRV (XS) de SPOT par analyse de texture et morphologie mathématique : application à la ville de Yaoundé (Cameroun). P. 95-103, *in* J.-M. Dubois, R. Caloz et P. Gagnon (réd.) La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, 463 p.

Veysseyre, R. (2001) Statistique et probabilités pour l'ingénieur. Dunod, Paris, 422 p.