Télédétection, 2000, vol. 1, pp. 305-325
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

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

Évaluation comparative des méthodes pour la délimitation d'un périmètre urbain par télédétection

RENÉ-JOLY ASSAKO ASSAKO[a*] et EMMANUEL TONYE[b†]

[a]Département de Géographie, Université de Douala, B.P 8562, Douala-Déido, Cameroun et [b]Laboratoire d'électronique et de traitement du signal (LETS), École Nationale Supérieure Polytechnique, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun

(soumis le 1er juin 1999 ; révisé le 28 juin 1999 ; accepté le 3 août 1999)

Le périmètre urbain est une donnée essentielle en analyse urbaine. Sa détermination pose, sur le plan méthodologique, le problème plus général de la distinction entre « l'urbain » et le « non urbain », deux types d'espaces intrinsèquement différents mais interpénétrants. Pour réaliser cette discrimination, et délimiter le périmètre urbain de Yaoundé, nous avons utilisé comme source d'information une image HRV (XS). Cette approche par imagerie satellitale présente l'avantage de s'appuyer sur la couverture physique du sol. Elle pose cependant le problème de la recherche d'une méthode optimale. Nous avons expérimenté trois méthodes différentes dans leur formulation et dans leur articulation. La première, dite méthode texturale, est basée sur la morphologie mathématique. Ainsi, elle s'articule autour d'un certain nombre d'opérations algébriques simples (dilatation ou érosion) et combinées (fermeture ou ouverture). La deuxième méthode est celle de l'indice de végétation. Elle exploite le comportement spectral différentiel de la végétation chlorophyllienne, qui absorbe le rayonnement dans l'intervalle de longueur d'onde (0,60 µm – 0,69 µm) et en réfléchit abondamment dans l'intervalle (0,7 µm – 1 µm). Elle consiste donc en une combinaison fractionnaire des canaux XS3 et XS2. La troisième méthode est dite arithmétique. En combinant, dans une relation soustractive les canaux XS3 et XS2, elle est une variante de la méthode de l'indice de végétation. L'évaluation comparative de ces trois méthodes a donné des résultats satisfaisants : les trois méthodes présentent un taux de recouvrement de l'ordre de 87,73 %; le périmètre urbain obtenu est assez près de la réalité.

Mots-clés: télédétection satellitale; Yaoundé; périmètre urbain; morphologie mathématique; Cameroun

* Correspondant. Tél : (+237) 40–46–61 ou (+237) 40–40–61; télécopieur : (+237) 47–32–50; cé : assako@hotmail.com

† Correspondant. tél : (+237) 22–92–99 ou (+237) 22–86–20; télécopieur (+237) 23–18–41; cé : tonyee@hotmail.com

Comparative Assessment of Methods which the Aim is to Delimitate an Urban Perimeter

The urban perimeter is an essential data in urban analysis: it constitutes a prerequisite in the process of urban development and management. Beyond these considerations, in methodology, it poses the problem of the definition of the concept « urban », as opposed to « non urban » and thus the determination of the limit between these two land covers which are intrinsically different but at the same time imbricate. To realise this discrimination and delimitate the urban perimeter of Yaoundé, we have used as source of information the HRV (XS) image of SPOT. This satellite imagery approach presents the advantage of being based on the physical land cover. However, one major problem is posed here: the research of an optimal method. Therefore, in the present research, we have experimented three methods which are different in their formulation and their articulation. The first is said to be textural and is based on mathematical morphology. It articulates around a certain number of simple (dilatation or erosion) and combined (closure or opening) algebraic operations. The second method is the vegetation index. It exploits the differential spectral behaviour of the chlorophyllian vegetation, which absorbs radiation of which the wave length interval is (0,6 µm – 0,69 µm) and abundantly reflects it in the interval (0,7 µm – 1 µm). It therefore consists of the fractional combination of canals XS3 (near infrared) and XS2 (red). The third method is that of arithmetic. By combining through subtraction canals XS3 and XS2, it is a simplified variant of the vegetation index method. The comparative assessment of these three methods presents the overlapping rate of 87,73 %; the urban perimeter obtained is nearer to reality. The results given by the three methods have permitted to establish a strict numeric distinction between "urban" and "non urban" areas, using the technique of thresholds. However, the thematic reality is more complex. In fact, it is not possible to separate these two land covers in a rigorous way, due to their mutual imbrication. That is the reason why it is necessary to introduce intermediary zones, where a timid urban growth is still counterbalanced by a resisting vegetal cover. This nuance was introduced by a non supervised classification in three clusters applied to the first factorial axis of the principal components analysis (PCA). The three final categories of land cover based on this thematic nuance are: "urban", "non urban" and "intermediate" zones.

Keywords: satellite remote sensing; Yaoundé; urban perimeter; mathematical morphology; Cameroon

1. INTRODUCTION

Yaoundé est la capitale du Cameroun, pays d'Afrique centrale (figure 1). Sur le plan municipal, il s'agit d'une communauté urbaine regroupant six communes d'arrondissements depuis 1993, au carrefour de trois départements : le Mfoundi (80 %), la Mefou (17 %) et la Lékié (3 %). Trois traits caractéristiques permettent de décrire cette ville : un site collinaire abondamment arrosé, une forte croissance démographique et une urbanisation horizontale anarchique (Assako Assako, 1996).

S'agissant du site, Yaoundé s'étend, en latitude, de 3°4 N à 4°19 et, en longitude, de 11°29 E à 12°08 E. La ville se développe en pleine zone forestière, sur un plateau dont l'altitude moyenne est de 750 m. Ce plateau

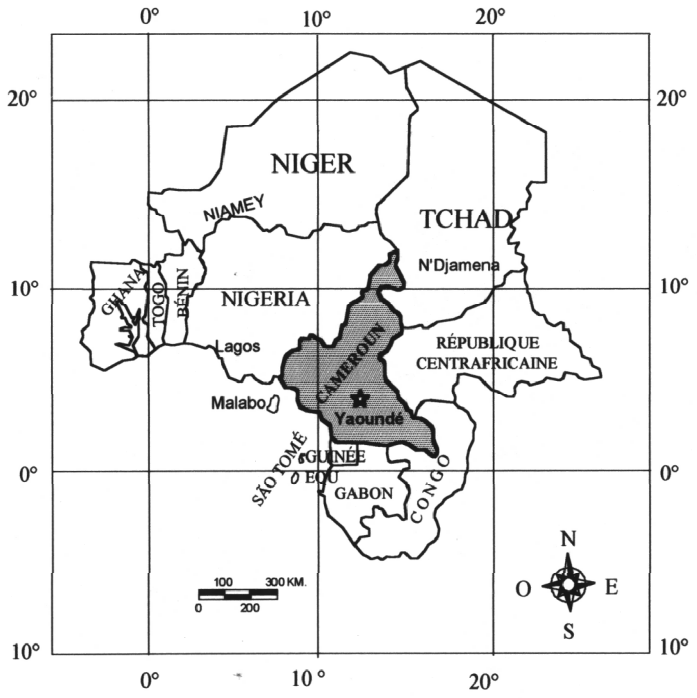


FIGURE 1 Situation de la ville de Yaoundé. *Location map of Yaoundé*

est diversement disséqué par un réseau hydrographique dense dont les eaux sont collectées par la rivière Mfoundi. Cette zone connaît un climat sub-équatorial : quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons des pluies). Les températures sont presque constantes autour de 22 °C et la pluviosité assez élevée (1 600 mm) par an. Le site de Yaoundé se singularise également par une géomorphologie contrastée où se côtoient trois unités de relief : les hautes terres, les zones marécageuses et les pentes. Les hautes terres cernent la ville dans sa partie nord-ouest où les sommets les plus significatifs sont : le mont Febé (1 073 m), le mont Mbankolo (1 096 m), et le mont Nkolondom (1 221 m). Les zones marécageuses localement appelées Elobi ont une altitude inférieure ou égale à 700 m.

Ce sont des sols hydromorphes, retenant entre 25 et 45 g d'eau pour 100 g de terrain (Franqueville, 1984). Ils présentent donc une consistance quasi nulle. À la jonction de ces deux premières unités de relief se trouvent

les pentes. Celles-ci sont à l'origine d'une remarquable instabilité pédologique : accélération de l'érosion hydrique, sédimentation, glissements de terrain.

Ce site contrasté est aujourd'hui en proie à une densification humaine remarquable. Estimée à plus d'un million d'habitants, la population de Yaoundé connaît une forte augmentation amorcée vers la fin des années 1960. C'est le résultat d'un taux de croissance qui s'est maintenu autour de 7 % annuellement pendant plusieurs décennies, malgré une relative baisse observée en cette fin des années 1990. Cet accroissement démographique résulte essentiellement d'un solde migratoire largement excédentaire au profit de la ville.

L'expansion spatiale de Yaoundé est la conséquence naturelle de cette croissance démographique basée sur des flux migratoires centripètes. Le résultat en est le développement des quartiers spontanés où s'entassent des masses urbaines à faible pouvoir d'achat. Ces quartiers qui se développent essentiellement dans les zones périphériques rendent encore plus préoccupante la question de la délimitation urbaine, d'autant plus que les documents de contrôle et de maîtrise de l'urbanisation (schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme, plans d'occupation du sol) sont largement en retard sur la réalité lorsqu'ils ne sont pas simplement absents.

2. PROBLÉMATIQUE DE LA DÉLIMITATION URBAINE

2.1. Approches fonctionnelle et physique du découpage de l'espace

La délimitation du périmètre urbain est l'une des préoccupations fondamentales de la gestion et de l'aménagement urbains. En fonction des pays et de l'objet de l'étude, cette délimitation peut être utilitaire, c'est-à-dire conventionnelle. Dans ce cas, le périmètre de l'agglomération se définit en fonction d'une préoccupation d'aménagement ou d'administration précise. Le découpage des zones de recensement de population, par exemple, ne s'appuie sur rien de physique. Il est donc possible qu'une frontière divise une même entité spatiale : on délimite donc l'espace en prenant compte des critères autres que la couverture du sol. Au Cameroun, et suivant la logique fonctionnelle, la délimitation urbaine est régie par le décret n° 79–189 du 17 mai 1979. Ce décret stipule notamment en son article 1, alinéa 1, que la délimitation du périmètre d'une agglomération est prononcée par décret.

Une telle délimitation a une visée essentiellement fiscale. C'est ainsi qu'elle aboutit à l'établissement d'un plan de délimitation par une commission technique dont les membres sont, entre autres, le service du cadastre, le service des domaines et le service de l'urbanisme. On peut donc parler d'une délimitation subjective, utilitaire ou fonctionnelle de l'espace.

Lorsque, par contre, on se sert de la couverture physique du sol, la démarche est différente. On définit d'abord les critères d'identification de l'espace urbain, de manière à pouvoir le distinguer des autres formes de couverture du sol. Suivant cette logique, Cogneau et Roubaud (1993) ont eu besoin de délimiter l'agglomération de Yaoundé pour s'en servir comme base de sondage d'une enquête sur le secteur informel. Travaillant sur une mosaïque de photographies aériennes, ils ont utilisé le critère de contiguïté du bâti : « pour qu'une zone bâtie soit incluse dans la ville, il faut qu'elle n'en soit pas séparée par plus de 200 mètres de végétation ». Leur travail est une application de la méthode de sondage aréolaire sur image satellitale développée par Dureau *et al.* (1989). Selon ces auteurs, on ne peut extraire d'une image qu'une délimitation traduisant un phénomène physique. Ils définissent donc la ville comme une « zone continue d'espaces bâtis ». Proposant pour supports d'analyse une image HRV (P) de SPOT et une mosaïque de photographies aériennes, ils prescrivent une enquête de terrain pour vérifier la fidélité du périmètre obtenu par le traitement des images spatiales.

Charbonneau *et al.* (1985) définissaient la planification comme l'un des intérêts majeurs de la télédétection urbaine. Or, la planification consiste à organiser les zones constitutives d'un espace dont on connaît assez précisément les limites. C'est ainsi que leur analyse procède par le choix d'une classification dont le premier niveau, qui seul nous intéresse ici, produit trois classes : les surfaces à minéralisation dominante, les aires d'association végétation / bâti et les aires non bâties diverses. Une simple association des deux premières classes permet d'obtenir un périmètre d'agglomération relativement fiable. Ces auteurs reprennent, en l'adaptant à la région urbaine de Sherbrooke (Québec, Canada), une expérience concluante sur Arles et la vallée de l'Huveaune (France) menée par Chatelain et Grenoff (1982).

2.2. Objectifs

Le présent article a deux objectifs. Le premier est d'ordre méthodologique et comporte deux aspects. Premièrement, nous nous proposons de délimi-

ter le périmètre urbain de Yaoundé sur la base de la couverture physique du sol. Il s'agit donc de mettre en évidence les lignes de rupture de nature de l'occupation du sol, de manière à distinguer les espaces bâtis en continu (urbains) de ceux qui ne le sont pas (non urbains). Ceci étant, nous capitaliserons les expériences ci-dessus évoquées, et qui, utilisant l'imagerie satellitale, ont eu des résultats concluants sur d'autres espaces.

Deuxièmement, le présent article se situe dans le cadre de la recherche des outils permettant la reconnaissance automatique des formes urbaines. Il importe donc d'évaluer les méthodes permettant de parvenir à ce résultat. C'est pourquoi nous évaluons ici un ensemble de trois méthodes de délimitation urbaine : la méthode texturale utilisant la morphologie mathématique, la méthode arithmétique et la méthode de l'indice de végétation. Nous cherchons donc à savoir laquelle des trois méthodes donne un résultat plus fiable ou, dans le cas contraire, quelles sont les potentialités et les limites respectives de chacune d'entre elles.

Le deuxième objectif est d'ordre thématique. Il s'agit de voir si le périmètre obtenu à partir des traitements numériques de l'image cadre avec la réalité de l'occupation du sol. Cet objectif sera un peu difficile à atteindre, car l'image date de 1992 alors que le taux de croissance annuel de la ville avoisine les 7 %. Toutefois, une approximation sera recherchée.

Pour atteindre ces objectifs, les traitements se sont déroulés en trois étapes. La première consiste en une évaluation élémentaire d'un ensemble de trois méthodes. La deuxième porte sur une confrontation comparative des résultats. Dans la troisième étape, nous discutons des résultats, estimant que si un seuillage numérique absolu est possible, il risque d'aboutir à un résultat aberrant sur le plan de la couverture du sol dans la mesure où il existe, dans la réalité, des interpénétrations difficilement sécables entre l'urbain et le non urbain.

3. ÉVALUATION DES MÉTHODES POUR DÉLIMITER LE PÉRIMÈTRE URBAIN DE YAOUNDÉ

Les traitements dont le déroulement et les résultats seront décrits dans les lignes qui suivent ont été expérimentés dans le cadre d'une action de recherche partagée dont l'un des objectifs était de mettre au point un certain nombre de méthodes permettant la reconnaissance automatique des formes urbaines (Weber *et al.*, 1997). Notre travail dans ce projet répon-

dait au volet consacré au transfert méthodologique Nord-Sud (Assako Assako, 1997b). Trois méthodes ont été successivement appliquées:

- la méthode texturale.
- la méthode de l'indice de végétation,
- la méthode arithmétique.

3.1. Méthode texturale

3.1.1. Éléments de définition

La méthode texturale exploite les relations de voisinage des pixels. En ce sens, elle cherche à rehausser les structures spatiales significatives contenues dans l'image, en les dissociant du fond et en les isolant les unes des autres (Weber, 1995). Contrairement aux approches élémentaires, qui s'intéressent seulement à la proximité numérique des pixels, la méthode texturale permet d'extraire l'information à partir de la forme et de l'organisation contextuelle des objets. Ce faisant, on passe de la signature spectrale à la signature texturale des objets, ou mieux aux formes.

La méthode texturale décrite ici a pour base la morphologie mathématique. S'appuyant sur les travaux de Pratt (1978), de Coster et Cherman (1989) et de Flouzat (1988), Robin (1995) en donne une explication suffisamment didactique. L'essentiel de la définition que nous en donnons ici relève des travaux de ce dernier. La morphologie mathématique permet d'extraire des ensembles de pixels constituant des formes significatives dans une image, en comparaison avec des éléments structurants. Ceux-ci parcourent l'image d'entrée en jouant le rôle de filtres spatiaux. Ils la modifient au moyen d'opérations ensemblistes comme l'intersection ($\cap$), l'union ($\cup$), l'inclusion ($\subset$), la complémentation (C), la différence symétrique (Δ) : on parle d'opérations algébriques. Schmitt et Mattioli (1993) ont schématisé les transformations que ces opérations morphologiques peuvent faire subir à l'image originale (figure 2). Les explications que nous en donnons ici relèvent de cette expérimentation:

- l'érosion diminue les formes, ce qui permet de séparer les objets au niveau de leurs étranglements; elle fait disparaître les formes de taille inférieure à l'élément structurant:
- la dilatation grossit les formes, comble les trous et entraîne la connexion entre les formes proches;

- la squelettisation réduit l'information à l'axe médian de la forme d'origine, ce qui permet par exemple d'extraire les réseaux et autres éléments géographiques linéaires de l'image;
- l'ouverture (érosion suivie d'une dilatation) a pour effets de filtrer les contours, d'éliminer les petites convexités (tout en conservant les concavités), d'éliminer les particules trop étroites et de séparer en plusieurs composantes connexes des particules présentant un étranglement assez long et étroit;
- la fermeture (dilatation suivie d'une érosion) a un effet semblable à celui de la dilatation en ce sens qu'elle renforce la connexité entre des éléments distincts mais proches; l'érosion appliquée à la deuxième étape du processus entraîne la réduction des formes;
- le chapeau haut-de-forme (ou top-hat) permet d'extraire les structures contrastées et de faible étendue, indépendamment des valeurs des pixels voisins.

3.1.2. Traitements morphologiques appliqués à l'image de Yaoundé

Les opérations morphologiques appliquées à l'image HRV (XS) de SPOT de Yaoundé ont été effectuées à l'aide des logiciels ENVI et PCI qui proposent directement des filtres spatiaux adaptés.

Cependant, le choix des canaux devait être judicieusement opéré car, certains d'entre eux, compte tenu de l'intervalle de longueur d'onde où ils sont enregistrés, fournissent une information plus pertinente sur un type de couverture du sol donné. Ainsi, les deux canaux du visible des images multispectrales HRV (XS1 et XS2) donnent une information assez pertinente sur le minéral urbain, comparativement au canal proche infrarouge (XS3) dont nous verrons plus loin qu'il permet de mieux saisir le couvert végétal. XS1 et XS2 étant fortement corrélés, on peut utiliser l'un ou l'autre pour extraire le couvert minéral.

Le canal XS2 a donc servi d'image d'entrée pour les traitements de morphologie mathématique dont les étapes ont été:

- fermeture obtenue en appliquant une dilatation suivie d'une érosion sur XS2;
- ouverture obtenue en appliquant une érosion suivie d'une dilatation sur XS2;

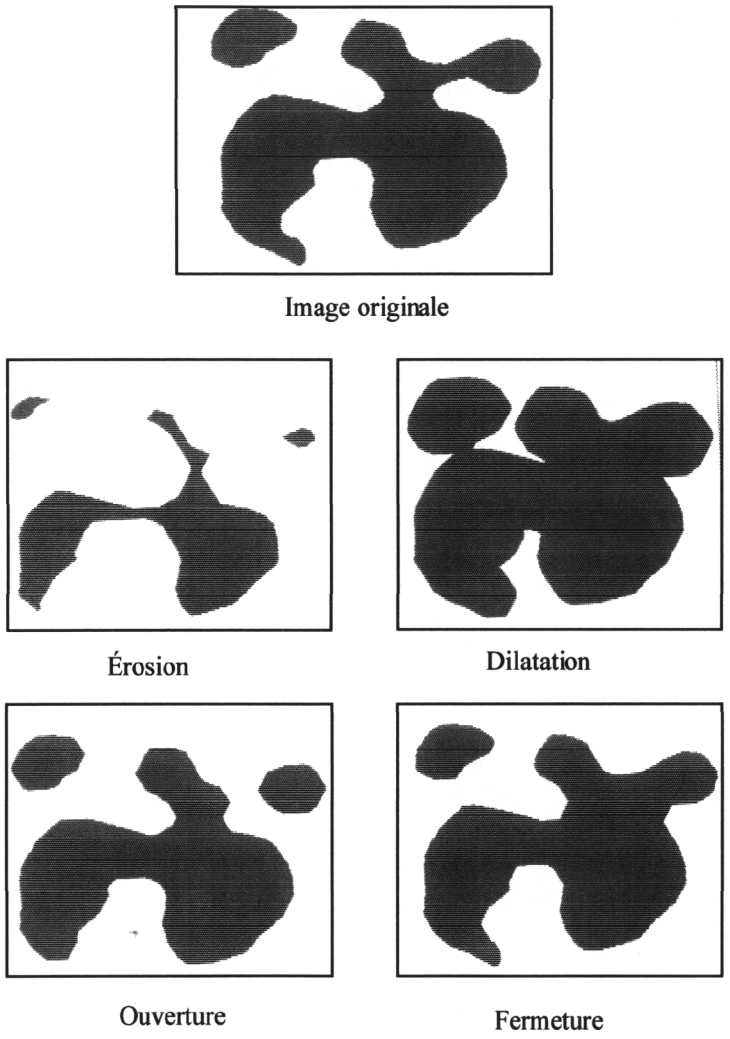


FIGURE 2 Présentation des résultats d'opérations morphologiques binaires. *Results of binary morphologic operations*

- premier chapeau haut-de-forme obtenu en soustrayant XS2 de la fermeture;
- deuxième chapeau haut-de-forme obtenu en soustrayant l'ouverture de XS2;

- somme des deux chapeaux haut-de-forme pour l'obtention de l'image des textures:
- seuillage de l'image des textures pour distinguer l'urbain du non urbain;
- filtre médian pour améliorer l'interprétation visuelle du résultat en éliminant les pixels isolés.

3.2. Méthode de l'indice de végétation

Le calcul de l'indice de végétation est l'un des moyens les plus utilisés en télédétection satellitale pour distinguer les espaces végétalisés de ceux qui ne le sont pas (espaces en eau ou espaces minéralisés). Cet indice de végétation se calcule suivant plusieurs formules qui se basent toutes sur le fait que la végétation chlorophyllienne absorbe le rouge et réfléchit le proche infrarouge, alors que le sol nu réfléchit surtout le rouge (Tricart et Trautmann, 1996). En combinant ces deux canaux (XS3 pour le proche infrarouge et XS2 pour le rouge, dans le cas d'une image HRV), on aboutit à une transformation différentielle des valeurs numériques des pixels de l'image. Les pixels ayant de fortes valeurs dans le proche infrarouge (traduisant la présence de la végétation chlorophyllienne) sont rehaussés; tandis que les pixels ayant de fortes valeurs dans le rouge (traduisant la présence des sols nus) sont réduits ou lissés. Dans le même ordre d'idées, les pixels ayant de faibles valeurs dans le rouge et de très faibles valeurs dans le proche infrarouge (traduisant la présence des espaces en eau ou hydromorphes), subissent le même lissage. L'image résultant d'un calcul de l'indice de végétation est donc un tableau de données numériques ordonnées où la densité de la végétation verte s'affirme au fur et à mesure que les valeurs s'élèvent (figure 3).

Dans le cadre de la présente étude, nous avons expérimenté deux formules d'indice de végétation (tableau I). La première : IV = 128 × (1+(PIR-R) / (PIR+R)) a été expérimentée par Dureau *et al.* (1989). Mais pour en optimiser le résultat, il aurait fallu le combiner avec l'écart-type local calculé sur une image panchromatique, comme le prescrivent les auteurs dans la fiche 6 de leur manuel de formation. Ne disposant pas d'image panchromatique, nous avons dû opter pour l'indice de végétation normalisé, le plus communément utilisé, dont la formule est la suivante : IVN = PIR-R/PIR+R, ce qui, en utilisant une image HRV (XS), donne : IVN = (XS3-XS2)/(XS3+XS2).

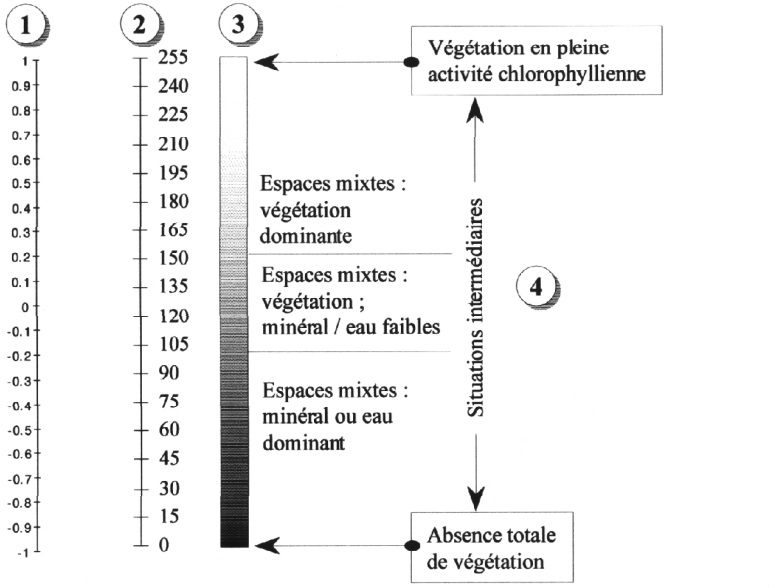


FIGURE 3 Indice de végétation et discrimination des formes de couverture du sol. *Vegetation index and land cover discrimination*

En exploitant la hiérarchisation des valeurs évoquées à la figure 2, nous avons pu fixer un seuil pour distinguer de façon binaire les espaces végétalisés. Ce faisant, nous avons obtenu, par opposition, le périmètre urbain.

3.3. Méthode arithmétique

Elle se fonde sur une opération arithmétique entre le canal proche infrarouge (PIR) et le canal rouge (XS2). En effet, comme nous le verrons plus loin, l'opération (XS3 – XS2) permet de ressortir le minéral urbain. L'application des méthodes de morphologie mathématique sur ce résultat et notamment de l'érosion a permis d'opérer une distinction entre l'urbain

et le non urbain. Cette distinction est concrétisée par un seuillage dont le résultat est ensuite amélioré grâce à un filtre moyen.

TABLEAU I Application de deux formules d'indice de végétation à quelques pixels. *Two formulas for vegetation index applied to some pixels*

N° Pixels	*XS2 (R)*	*XS3 (PIR)*	*I.V.*	*I.V.N.*	*Type de couverture du sol*
1	15	70	210,82	0,65	Végétation très verte
2	40	80	170,67	0,33	Végétation verte
3	28	32	136,53	0,07	Mixte : végétation dominante
4	5	5	128,00	0,00	Mixte : minéral dominant
5	4	0	0,00	−1,00	Eau
6	20	8	73,14	−0,43	Minéral
7	11	7	99,56	−0,22	Minéral / Eau

R = Canal rouge; PIR = Canal proche infrarouge; I.V. = Indice de végétation = 128 × [1 + (XS3 − XS2) / (XS3 + XS2)] ou 128 × [1 + (PIR − R) / (PIR + R)]; I.V.N. = Indice de végétation normalisé = (XS3 − XS2) / (XS3 + XS2) ou (PIR − R) / (PIR + R)

Dans la mesure où elle procède aussi par combinaison des canaux rouge et proche infrarouge, et en observant le résultat, on peut dire que la méthode arithmétique est une variante de la méthode de l'indice de végétation ci-dessus présentée. En effet, comme elle, la méthode arithmétique exploite le comportement spectral différentiel de la végétation chlorophyllienne qui absorbe beaucoup le rouge et réfléchit abondamment le proche infrarouge. De cette manière, en soustrayant les valeurs du canal rouge de celles du proche infrarouge, on aboutit à une quasi binarisation de l'image dont le seuillage permet de faire une nette distinction entre les espaces végétalisés et les espaces minéralisés ou en eau.

4. INTERPRÉTATION COMPARATIVE DES RÉSULTATS

Par trois méthodes différentes (dans leur formulation et dans leur articulation), nous sommes parvenus à trois résultats de délimitation urbaine (figure 4). La comparaison que nous avons faite a montré la complémentarité entre ces méthodes, en soulignant leurs apports respectifs. Cette comparaison s'est faite numériquement (par l'examen des tables de contingence issues du croisement des trois résultats) et thématiquement (par l'examen de la distribution spatiale de chacune des variables).

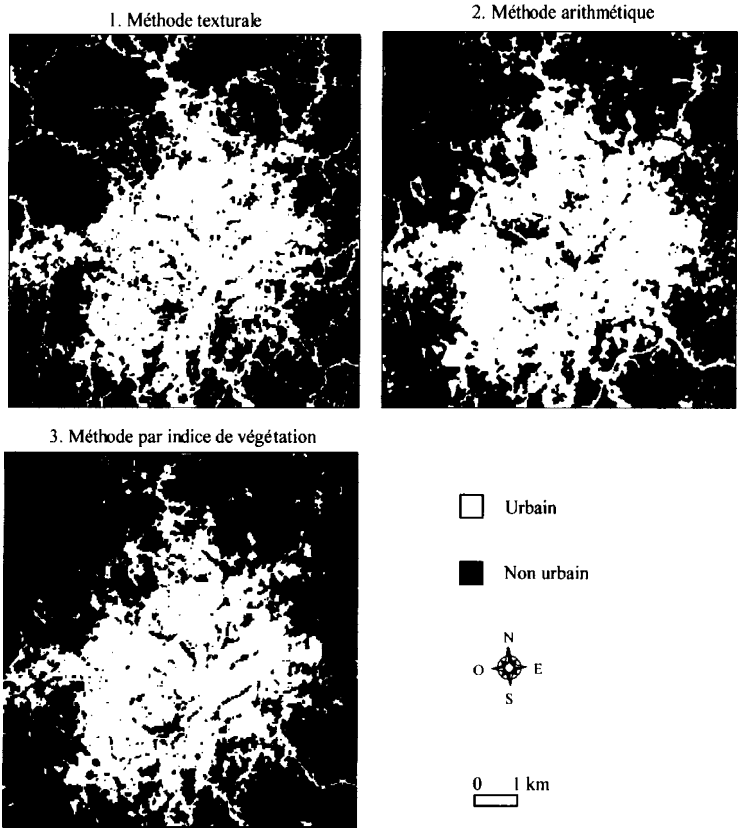


FIGURE 4 Les résultats des trois méthodes de délimitation urbaine. *The results of the three urban delimitation methods*

4.1. Comparaison numérique

Les trois méthodes (méthode texturale, méthode arithmétique et méthode de l'indice de végétation normalisé) sont respectivement codées *a*, *b* et *c* et leur ensemble est représenté par E. Pour comparer ces méthodes deux à deux, nous avons procédé par croisement de E avec lui-même, soit E × E, ce qui donne:

$$E^2 = \{(a,a), (a,b), (a,c), (b,a), (b,b), (b,c), (c,a), (c,b), (c,c)\}$$

Nous ne pouvions prendre en compte les 9 éléments de E^2. Ceci s'explique par le fait que *a*, *b*, et *c* sont des images binaires où les pixels de l'urbain sont codés en 1 et les pixels du non urbain codés en 0. Ce faisant, toute la diagonale du tableau II est sans intérêt puisque le croisement d'une des méthodes par elle-même donne le même résultat que les images d'entrée. D'autre part, on remarque une symétrie de part et d'autre de la diagonale. Cette symétrie est simplificatrice dans la mesure où, tenant compte de la nature binaire des images d'entrée ci-dessus évoquée, (a × b) = (b × a); (c x a) = (a × c); (b × c) = (c × b). On peut donc ne prendre qu'un terme sans que cette omission soit préjudiciable pour la suite des traitements. À l'issue de cet écrémage, il n'est resté que trois possibilités de croisement représentées par l'ensemble P_c tel que:

$$P_c = \{(b,a,), (c,a), (c,b)\}.$$

TABLEAU II Croisement des méthodes et élimination des doublons. *Crossing the three methods to eliminate useless elements*

X	a	b	C
A	~~(aa)~~	~~(ab)~~	~~(ac)~~
b	(ba)	~~(bb)~~	~~(bc)~~
c	(ca)	(cb)	~~(cc)~~

(ba) Élément pris en compte

~~(aa)~~ Élément non pris en compte

Littéralement, cela revient à croiser:

- le résultat de la méthode texturale par celui de la méthode arithmétique (a × b);
- le résultat de la méthode texturale par celui de l'I.V.N. (a × c);
- le résultat de la méthode de l'I.V.N. par celui de la méthode arithmétique (c × b).

Les images d'entrée étant binaires (1 = « urbain » et 0 = « non urbain »), leur croisement deux à deux a permis de générer quatre classes correspondant aux quatre possibilités ainsi définies:

- non urbain dans les deux résultats:
- urbain dans les deux résultats:
- urbain dans l'un des résultats;
- non urbain dans l'un des résultats.

Il s'agit là de deux couples de situations marquant l'identité ou la différence entre les méthodes, comme on le montre sur les tableaux III à V. En combinant les données des tableaux III à V, on met en évidence les notions d'identité et de différence entre les images résultant des trois méthodes.

TABLEAU III Table de contingence en fréquences relatives issue du croisement de a (colonnes) et de b (en lignes). *Contingency table in relative frequencies resulting from the crossing of a (columns) and b (rows)*

$a \rightarrow \times b \downarrow$	*Non urbain*	*urbain*	*Total*
Non urbain	51,77	04,26	56,03
urbain	8,83	35,14	43,97
Total	60,60	39,40	100,00

TABLEAU IV Table de contingence en fréquences relatives issue du croisement de c (colonnes) et de a (en lignes). *Contingency table in relative frequencies resulting from the crossing of c (columns) and a (rows)*

$c \rightarrow \times a \downarrow$	*Non urbain*	*urbain*	*Total*
Non urbain	56,71	3,89	60,60
urbain	8,09	31,30	39,40
Total	64,81	35,19	100,00

TABLEAU V Table de contingence en fréquences relatives issue du croisement de c (colonnes) et de b (en lignes). *Contingency table in relative frequencies resulting from the crossing of c (columns) and b (rows)*

$c \rightarrow \times b \downarrow$	*Non urbain*	*urbain*	*Total*
Non urbain	54,56	1,47	56,03
urbain	10,25	33,72	43,97
Total	64,81	35,19	100,00

L'identité ou le recouvrement concerne les zones appartenant à une même classe dans les deux résultats. Comme le croisement s'est effectué avec des images binaires, ces pixels sont classés soit en « urbain » soit en « non urbain » dans les deux images. L'identité témoigne de la similitude des résultats. Plus le pourcentage en est élevé, moins la différence est importante. Au regard du tableau VI, on peut dire que les trois méthodes donnent des résultats très proches : la méthode texturale et celle de l'indice de végétation produisent des résultats qui se recouvrent à 86,91 %; les résultats des méthodes texturale et arithmétique quant à eux se recouvrent à 88,01 %. Le taux de recouvrement le plus élevé est donné par le croisement des résultats des méthodes de l'indice de végétation et arithmétique, soit 88,28 %. Ceci s'explique probablement par le fait que la dernière est une variante de la première, comme nous l'avons d'ailleurs mentionné plus haut.

TABLEAU VI Synthèse des résultats de croisement. *Synthesis of the crossing results*

	Identité 1 : Identité « urbain » dans les deux images	*Identité 2 : « non urbain » dans les deux images*	*Total identité*	*Différence:*
a × b	35,14 %	51,77 %	86,91 %	13,09 %
c × a	31,30 %	56,71 %	88,01 %	11,99 %
c × b	33,72 %	54,56 %	88,28 %	11,72 %

À l'opposé, la différence se produit lorsqu'un pixel est classé en « urbain » dans une image et en « non urbain » dans une autre. Elle entraîne la notion de confusion qui peut compliquer l'interprétation thématique des résultats. Comme les résultats des trois méthodes se recouvrent à plus de 85 %, on observe que leur différence est moindre (inférieure à 14 %). Les résultats les plus éloignés sont ceux de la méthode texturale et de la méthode de l'indice de végétation, soit 13,09 %. Mais ce n'est pas très loin de la différence moyenne qui est de 12,26 %.

4.2. Comparaison thématique

La comparaison thématique se fait au moyen de l'interprétation visuelle des résultats de croisement des méthodes. Elle se fait sur la base de la figure 5 qui en donne la synthèse. Les trois méthodes ressortent bien la

distinction entre l'urbain et le non urbain, de manière à permettre le tracé du périmètre d'agglomération. Les problèmes majeurs viennent des zones de confusion, soit en moyenne 12,26 % de la superficie totale de l'image. Ils s'agit notamment des espaces en eau et hydromorphes (classés comme non urbain par la méthode texturale, mais inclus dans la classe de l'urbain dans d'autres méthodes). Les voies routières posent également des problèmes dans leur prolongement périurbain. Ainsi, elles sont considérées comme espaces urbains dans certaines méthodes et non urbains selon d'autres.

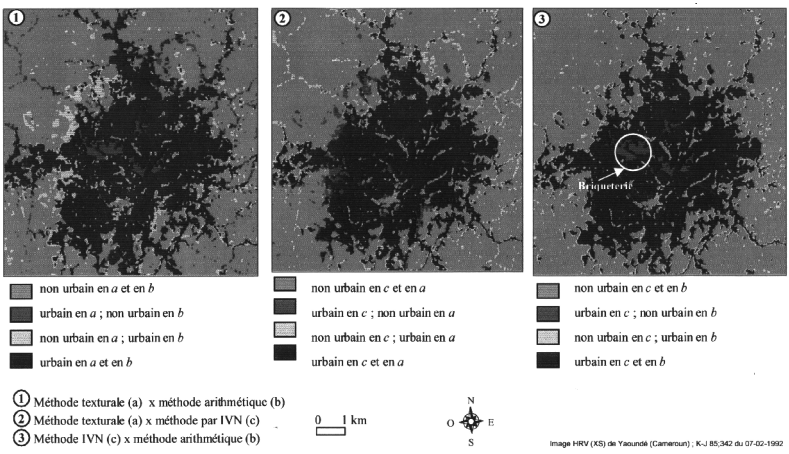


FIGURE 5 Interprétation comparative des trois méthodes. *Comparative interpretation of the three methods* (voir image couleur X à la fin de cette revue)

De façon générale, la classe « non urbain » est prédominante. Elle englobe tout l'espace végétal urbain et surtout périurbain constitué des champs, des jardins, des parcs et des forêts. La classe « urbain » englobe quant à elle les zones de sols nus (routes asphaltées ou en terre), rails, bâti.

Le croisement de *a* par *b* ainsi que le croisement de *a*par *c* montrent une différence significative sur les zones de contact entre l'urbain et le non urbain. Par contre, le croisement de *c* par *b* permet de mettre en évidence les limites de la méthode arithmétique qui a désigné comme « non urbain » une partie d'un des quartiers populaires les plus denses de la ville : la « Briqueterie ».

5. DISCUSSION SUR LA DÉLIMITATION URBAINE

Les résultats que nous venons d'examiner permettent, en délimitant l'enveloppe urbaine, de faire une stricte distinction entre l'urbain et le non urbain. Mais dans la réalité, cette distinction est moins aisée, voire même impossible. Le projet pilote EUROSAT (1993) s'appuyant sur la notion de contiguïté du bâti, stipulait notamment : « pour qu'une zone bâtie soit incluse dans la ville, il faut qu'elle n'en soit pas séparée par plus de 200 m de végétation ». C'est sur cette définition que Cogneau et Roubaud (1993) ont basé leur méthode évoquée plus haut. Dans le contexte des villes africaines et à Yaoundé notamment, l'application d'une telle indication risque d'occulter la réalité. Les quartiers populaires, et même des lotissements modernes comme le Camp SIC de Mendong (dans la banlieue sud de la ville) qui se développent de préférence sous formes de poches d'urbanisation dans les zones périphériques, sont souvent séparés du noyau urbain proprement dit par de vastes espaces agricoles que la croissance spatiale grignote progressivement (Assako Assako, 1997a, 1998). On s'aperçoit donc qu'il est nécessaire d'individualiser ces zones de contact où s'entrecroisent « l'urbain » proprement dit et un « non urbain » en cours d'urbanisation. C'est pour cette raison qu'il convenait de nuancer la délimitation en y introduisant la notion de « zone mixte », qui servirait de passage de l'une à l'autre catégorie de couverture du sol. Charbonneau *et al.* (1985) sont parvenus à la même prescription lorsqu'ils parlent des « aires d'association végétation / bâti ».

Nous y sommes parvenus par une série de traitements comportant notamment:

- l'analyse en composantes principales (ACP) où la première composante a permis de ressortir le bâti;
- le lissage (pour éliminer les pixels isolés);
- la classification automatique qui a permis de dégager les trois classes d'occupation du sol : « non urbain », « zone mixte » ou « front d'urbanisation » et « urbain » (figure 6).

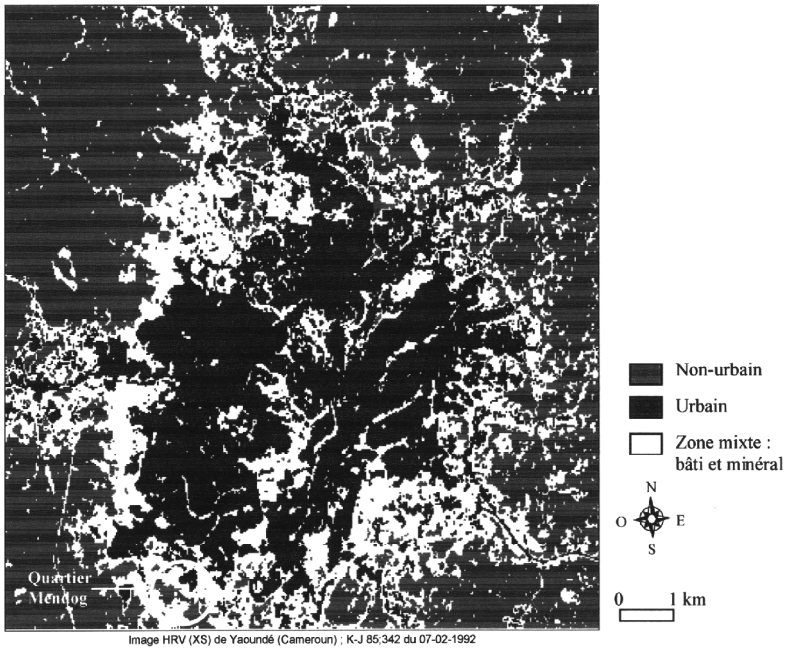


FIGURE 6 Analyse en composantes principales (ACP) et introduction de la classe mixte dans la délimitation. *Using Principal Components Analysis (PCA) to introduce an intermediate cluster in the urban delimitation* (voir image couleur XI à la fin de cette revue)

6. CONCLUSION

Après avoir montré la complexité et l'importance de la délimitation du périmètre urbain, nous avons déroulé trois méthodes dont les résultats se sont avérés fort semblables. Cette similitude des résultats impose une approche compensatoire, par opposition à une approche exclusiviste. La première permet en effet de combler les lacunes d'une méthode par les avantages des autres, ce qui permet, à la fin, d'obtenir une information plus complète.

Le périmètre urbain ainsi délimité est assez fiable. Validé par des observations de terrain et confronté (visuellement) aux prévisions d'aménagement et d'urbanisme de 1990, il donne une image près de la réalité. Un recalage image / carte topographique aurait rendu cette confrontation plus pertinente.

L'expérience capitalisée dans la présente recherche peut servir de base à des travaux plus avancés, portant notamment sur la réalisation d'une carte d'occupation du sol où on pourrait distinguer des subdivisions de chacune des trois formes de couverture du sol ci-dessus isolées à la figure 6, à savoir « l'urbain », le « non urbain » et les « zones mixtes ». Il s'agirait alors d'une approche combinatoire, mettant en synergie l'imagerie satellitaire, les documents cartographiques et le travail de terrain. Une autre perspective peut être l'analyse diachronique de la croissance urbaine. Il faudrait dans ce cas disposer de plusieurs images à des dates différentes. Un croisement de périmètres établis à l'aide de ces différentes images permettrait non seulement de déceler la direction du front d'urbanisation, mais aussi d'en évaluer la vitesse de progression.

Remerciements

Le présent article est le fruit d'une expérimentation menée dans le cadre d'une action de recherche partagée (ARP) financée par l'AUPELF-UREF sur le thème : « Télédétection des milieux urbains et péri-urbains; reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord – Sud ». Nous remercions Monsieur Claude Collet, professeur titulaire de géomatique, directeur du Laboratoire de géomatique de l'Institut de géographie de l'Université de Fribourg (Suisse) et Monsieur Pierre Terretaz, chercheur dans la même institution. Nous remercions particulièrement Madame Christiane Weber du Laboratoire Image et Ville (URA 902 CNRS) de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Leurs divers apports ont été nécessaires à l'aboutissement de cette expérimentation.

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.

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

Assako Assako, R.J. (1997b) Yaoundé : essai de délimitation de l'enveloppe urbaine à partir d'une image HRV de SPOT. Rapport d'expérimentation dans le cadre de l'ARP Télédétection des milieux urbains et périurbains; reconnaissance des formes; transfert méthodologique Nord-Sud, Fribourg, Suisse, 14 p.

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

Charbonneau, L., Morin, D. et Brochu, R. (1985) Détection des unités d'utilisation et de couverture du sol urbain au moyen d'une simulation SPOT. *Cahiers de Géographie du Québec*, vol. 29, n° 76–1985, p. 29–47.

Chatelain, A. et Grenoff, J.D. (1982) Analyse de la morphologie urbaine. Bilan des expériences : Arles et la vallée de l'Huveaune. In Simonin, A. (dir.) Journées de Télédétection en milieu urbain, CNRS, Paris, 141 p.

Cogneau, D. et Roubaud, F. (1993) Utilisation de la télédétection pour l'élaboration du plan de sondage d'une enquête sur le secteur informel : le cas de Yaoundé. Revue *STATECO*, p. 5–25.

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

Dureau, F., Barbary, O., Michel, A. et Lortic, B. (1989) Sondage aréolaire sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain; Manuel de formation. Éditions ORSTOM, Paris, 15 fiches.

EUROSAT (1995) Projet pilote délimitation des agglomérations européennes par télédétection. Résultats et conclusions. Luxembourg, 20 p.

Flouzat, G. (1988) Morphologie mathématique et analyse des images de télédétection. *Photo-interprétation*, n° 1988–5, p. 1–16.

Franqueville, A. (1984) Yaoundé : construire une capitale. Éditions ORSTOM, Bondy, 192 p.

Pratt, W.K. (1978) Digital image processing. Willey inter-sciences, New York, 743 p. Robin, M. (1995) La télédétection. Nathan, Paris, 318 p.

Simonin, A. (dir.) (1982) Journées de télédétection en milieu urbain. CNRS, Paris, 141 p.

Schmitt, M. et Mattioli, J. (1993) Morphologie mathématique. Masson, Paris, 211 p. Tricart, J. et Trautmann, J. (1996) La télédétection appliquée à la géomorphologie continentale et aux systèmes écogéographiques. In Bonn, F. (dir.) Précis de télédétection. Vol. 2. Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte-Foy, p. 57–89.

Weber, C. (1995) Images satellitaires et milieux urbains. Éditions Hermès, Paris, 185 p.

Weber, C., Donnay, J.-P. et Collet, C. (1997) Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud. In J.-M.M. Dubois, J.-P. Donnay, A. Ozer, F. Boivin et A. Lavoie (dir.) Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éditions AUPELF, Montréal, p. 133–144.