Télédétection, 2000, Vol. 1, pp. 183-204
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 Malaisie

Cartographie de la ligne de rivage par analyse texturale d'images radar à synthèse d'ouverture de ERS-1 et de E-SAR

EMMANUEL TONYE[a*], ALAIN AKONO[a], ANDRÉ NDI NYOUNGUI[a], CARICE NLEND[a] et JEAN-PAUL RUDANT[b†]

[a]Laboratoire d'Électronique et de Traitement du Signal (LETS), École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, B.P. 8390, Yaoundé, Cameroun et [b]Université de Marne-La-Vallée, IFG, Laboratoire de Géomatériaux, 5 boulevard Descartes, 77 454 Marne-La-Vallée, France

(soumis le 15 décembre 1998 ; révisé le 06 avril 1999 ; accepté le 22 juillet 1999)

Nous présentons dans cet article une méthode d'extraction de la ligne de rivage sur deux images radar à synthèse d'ouverture (RSO) par utilisation des paramètres de texture d'ordre deux. La contribution principale de cette étude est la détermination de la ligne de rivage sur une zone complexe, par une combinaison de la morphologie mathématique et des images de texture. Certaines fonctions algébriques, obtenues après de multiples essais expérimentaux, ont contribué à l'atteinte de l'objectif visé par la modification des histogrammes des images de texture. La cartographie de la ligne de rivage peut être faite à partir des données optiques ou radar. Dans le cas des données radar, un problème se pose du fait que le contact terre-mer y apparaît souvent très inégal. La rugosité de la mer est souvent très variable. Certaines parties de mer parfaitement lisses offrent le contraste le plus éclatant avec des surfaces d'eau ridées. Ces surfaces d'eau apparaissent identiques à des plages sur l'image radar. Ceci montre l'intérêt de l'étude que nous allons présenter, où l'analyse de texture est combinée à la morphologie mathématique, notamment à la squelettisation. Cette étude permet de faire une distinction entre la terre et la mer, et de déterminer la longueur d'une frontière ciblée. L'évaluation des performances des indices de texture utilisés peut permettre de faire un choix approprié de ces paramètres pour d'autres applications. Trois paramètres de texture extraits d'une matrice de cooccurrence ont été évalués, à savoir l'homogénéité, le contraste et la variance. Deux frontières ont été extraites de deux images RSO, une du satellite ERS-1 et l'autre d'un programme dénommé E-SAR sur la zone littorale camerounaise. Les longueurs de ces frontières ont été

* Correspondant. Tél. (237)22 86 20/22 92 99 Télécopieur : (237)2318 41 Courrier électronique : tonyee@hotmail.com / aakono@hotmail.com

† Correspondant. Tél. : (33)1–44 27 38 70 Télécopieur : (33)1–44 27 50 85 Courrier électronique : rudant@dedale.univ-mlv.fr

évaluées par la méthode proposée. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux donnés par un atlas permettant d'obtenir la distance réelle entre deux points quelconques du site d'étude. Les longueurs des lignes de rivage mesurées avec l'atlas se trouvent dans les limites calculées par la méthode présentée. Étant donné que la longueur de la ligne de rivage dépend de l'échelle de la carte à partir de laquelle cette ligne a été numérisée, le détail de la ligne de rivage n'est pas le même d'une échelle à l'autre. La méthode de calcul présentée ne dépend que de la résolution de l'image qui varie elle-même avec l'échelle. Notre méthode est donc indépendante de l'échelle et elle donne une indication pertinente de la longueur de la ligne de rivage sur une image de télédétection.

Mots-clés: Texture; image radar; cartographie de côte; morphologie mathématique

Shoreline Mapping by Texture Analysis of SAR ERS-1 and E-SAR Images

In this work, we present a method of extraction of coast lines on two Synthetic Aperture Radar (SAR) images, by using second order texture features. The principal contribution of this study is the determination of shoreline on a complex zone, by a combination of the mathematical morphology and the texture images. Some algebraic functions obtained after many experimental trials have been useful to reach the targetted goal, by modifying the histograms of the texture images. The coastal mapping may be done either by optical data or by radar data. In the case of radar data, the contact between the land and the sea is sometimes problematic, because of the occasional roughness of the sea. When interpreting the radar image, someone may confuse the beach and the sea when this last one has a great roughness. These two parts of the image present the same contrast at that moment. This problem shows the interest of a study like ours, where the texture analysis is combined to the mathematical morphology, especially to the thinning operation. This study is useful to make the distinction between the land and the sea, and to determine the length of a targetted boundary. The evaluation of the performances of the used texture features could help to make an appropriate choice of these parameters for other applications. Three texture features extracted from the second order histogram have been evaluated, namely the homogeneity, the contrast and the variance. It has been pointed out that the homogeneity and the contrast are useful to extract details of contours in this application. Thus, these texture features could be useful in an application such as the extraction of an hydrographical network. However, the images obtained with the homogeneity and the contrast are still very noisy due to the speckle in the original image. The variance has been useful to point out the external boundaries only; on the other hand, this texture feature has presented the benefit to produce clear images. Two boundaries have been extracted from SAR ERS-1 and E-SAR images on the coastal zone of Cameroon, and their lenght have been evaluated by the proposed methodology. The obtained results have been compared with those given by a geographical map, allowing us to get the distance between any two points on the area of study. The shoreline lengths measured with the map have been found to dwell within the boundaries predicted by the proposed methodology. It is well known that the shoreline length depends on the scale of the map from which it has been digitalized. For that reason the detail of the shoreline is not the same from one scale to another. So, one would not get exactly the same result when measuring the shoreline length on a map with a given scale, and comparing it with the shoreline length from another source. The presented methodology only depends on the image resolution, which depends itself on the scale. This means that if the scale of the image changes the resolution will also change by the same proportion, and a shoreline length obtained with the presented methodology will not change. Our methodology is then independent of the scale and it gives a pertinent indication of the shoreline length on a remote sensing image.

Keywords: Texture; radar image; coastal mapping; mathematical morphology

1. INTRODUCTION

À cause de leur aptitude à acquérir des images en tout temps, les capteurs radar sont de plus en plus utilisés pour des régions équatoriales. En effet, la couverture nuageuse quasi permanente planant au-dessus de ces régions, rend l'acquisition d'informations difficile avec les capteurs du visible et du proche infrarouge tels que ceux de LANDSAT ou de SPOT. Depuis 1992, plusieurs travaux sont menés avec des images radar sur le Cameroun en vue d'étudier l'écosystème de la zone littorale (Baltzer *et al.*, 1995; Rudant *et al.*, 1997). Dans le but de trouver des méthodes d'extraction d'informations de plus en plus précises, le Laboratoire d'électronique et de traitement du signal de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé (Cameroun) en collaboration avec l'Université de Marne-La-Vallée (France), a entrepris des recherches sur plusieurs aspects du traitement des images radar à synthèse d'ouverture (RSO) : filtrage du chatoiement, analyse de texture, compression des images et différentes méthodes de classification (To*nye et al.*, 1998; Akono, 1997; To*nye et al.*, 1994). L'extraction de la ligne de rivage sur la côte atlantique camerounaise est l'objet de cette étude. Nous entendons par ligne de rivage la ligne de contact entre l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère. Le littoral s'étend de part et d'autre de cette ligne et comprend des étendues marines et estuariennes ainsi que des étendues émergées. Cette ligne, encore appelée ligne de rivage instantanée, est une zone frontière, un lieu d'échanges, mobile, fragile, particulièrement vulnérable et très convoité (Verger, 1996). Cette étude permettrait d'actualiser l'information fournie par des cartes géographiques, généralement anciennes. L'un des buts visés est la mise en oeuvre d'une méthodologie permettant d'obtenir des frontières suffisamment fines, de manière à pouvoir mesurer leur longueur. Dans le domaine de l'espace intertidal, la télédétection offre un instrument incomparable pour la surveillance de l'évolution géomorphologique du littoral et l'étude du régime des côtes; elle permet de déterminer les secteurs d'érosion sur de vastes étendues synoptiques. Il importe de souligner l'intérêt des images spatiales dans ce domaine par rapport aux photographies aériennes. Elles offrent d'abord une vision synoptique et instantanée sur de grandes étendues, alors que les photographies acquises successivement et non simultanément au cours d'une mission aérienne doivent être assemblées et ne donnent donc que des mosaïques diachroniques.

La détermination de la ligne de rivage instantanée peut être faite à partir des données optiques ou radar et des études ont déjà été menées dans ce

sens (Robin, 1990; Descombes *et al.*, 1996). Dans le cas des données optiques, on procède le plus souvent par la méthode de l'histogramme. Celui-ci est bimodal dans les régions littorales, présentant un mode pour les eaux et un autre, en général plus complexe, pour les terres. Entre les deux populations de pixels correspondant à ces deux modes, la ligne de rivage instantanée est située au sein d'une population intermédiaire de pixels à cheval sur cette ligne. Une seconde méthode consiste à rechercher les forts gradients qui existent entre la réponse spectrale dans l'infrarouge proche des surfaces d'eau, d'une part, et des surfaces terrestres, d'autre part (Verger, 1996). Descombes *et al.* (1996) ont proposé une méthode d'extraction de la ligne de rivage par segmentation markovienne des images RSO. La méthode proposée est une approche hiérarchique utilisant deux champs markoviens. À une faible résolution, un premier champ markovien, défini par une topologie à trous, réduit les inconvénients des approches classiques (sursegmentations). Ensuite, la segmentation initiale est projetée sur l'image à pleine résolution et une seconde classification est effectuée par un modèle d'Ising (Descombes et *al.*, 1996). Dans le cas des données radar, un problème se pose du fait que le contact terre-mer y apparaît souvent très inégal. La rugosité de la mer est souvent très variable. Certaines parties de mer parfaitement lisses offrent le contraste le plus éclatant avec des surfaces d'eau ridées, alors que les mêmes surfaces d'eau apparaissent identiques à des plages sur l'image radar.

Ceci montre l'intérêt de l'étude que nous allons présenter, où l'analyse de texture est combinée à la morphologie mathématique, notamment à la squelettisation. Cette étude permet de faire une distinction entre la terre et la mer, et de déterminer la longueur d'une frontière ciblée. L'évaluation des performances des indices de texture utilisés peut permettre de faire un choix approprié de ces paramètres pour d'autres applications. Trois paramètres de texture extraits d'une matrice de cooccurrence ont été évalués, à savoir l'homogénéité, le contraste et la variance. Deux frontières ont été extraites de deux images RSO, une du satellite ERS-1 et l'autre d'un programme dénommé E-SAR sur la zone littorale camerounaise. Les longueurs de ces frontières ont été évaluées par la méthode proposée. La comparaison des résultats obtenus avec ceux donnés par une carte géographique montre que la méthode présentée donne une indication pertinente de la longueur de la ligne de rivage sur une image de télédétection. Nous présentons donc successivement : les données utilisées et le site d'étude, la méthodologie utilisée, les résultats obtenus, un commentaire sur ces résultats et une conclusion.

2. DONNÉES UTILISÉES ET SITE D'ÉTUDE

Deux images radar à synthèse d'ouverture sont utilisées dans cette étude. La première est une image RSO du satellite ERS-1 (*European Remote Sensing satellite*) sur la côte atlantique camerounaise, acquise le 23 août 1994. La résolution spatiale initiale de cette image est de 12,5 m × 12,5 m, mais l'image traitée dans cette étude a subi un moyennage de 8 × 8 pixels en un pixel, ce qui a amené la taille d'un pixel à 100 m. La deuxième est une image RSO du programme E-SAR (*Experimental airborne SAR*), acquise le 1eroctobre 1992 lors d'une campagne aérienne au-dessus de la ville de Douala, au Cameroun. La résolution spatiale initiale de cette image est de 2 m × 2 m. L'image E-SAR traitée dans cette étude a subi un moyennage sur 9 images (9 vues), ce qui a amené la taille d'un pixel à 6 m. La ville principale se trouvant dans la zone d'étude est la ville de Douala, dont les coordonnées géographiques se situent entre les parallèles 4° et 5° Nord, et les méridiens 9° et 10° Est (figure 1). Cette ville est un port sur la rivière Wouri, débouchant sur l'océan Atlantique.

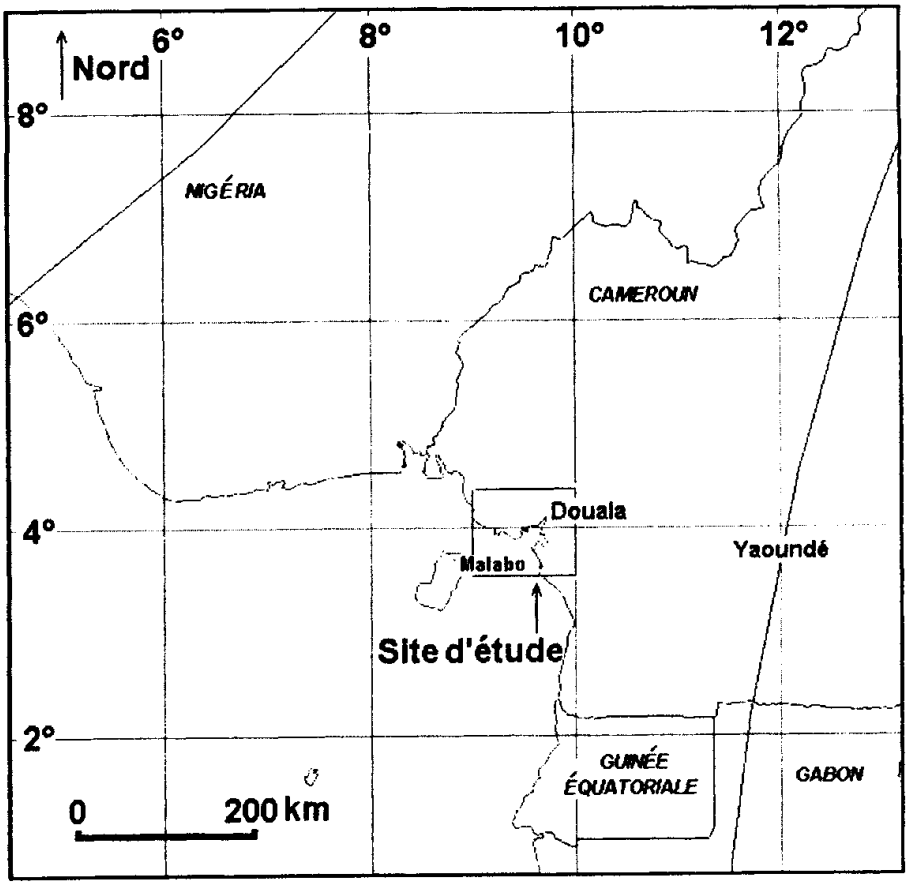
Les divers traitements d'images ont été effectués avec le logiciel VOIR (Vision par Ordinateur des Images Radar) conçu au Laboratoire d'électronique et de traitement du signal de l'École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé.

3. MÉTHODOLOGIE

Un filtre de chatoiement est d'abord appliqué à l'image originale. Après quelques essais, le filtre de Frost (Frost, 1982) a été retenu pour ses bonnes performances. On obtient ensuite une image de texture à partir de l'image originale filtrée, pour chaque paramètre de texture. Les images de texture obtenues ne permettent généralement pas de faire une partition de l'image en des classes distinctes, leur histogramme ne présentant pas des modes et des vallées précis. Pour pallier cet inconvénient, une méthode originale de modification de l'histogramme est mise en oeuvre. Cette méthode consiste en une transformation de l'échelle des niveaux de gris par des opérateurs algébriques entre deux ou plusieurs images, ou entre une image et une constante selon l'une des expressions ci-dessous (éq. 1):

$$\begin{cases} I_T' = I_T{}^*C \\ I_T' = a^*I_T{}^2 + b^*I_T + D \\ I_T' = a^*I_T{}^{3*}b^*I_T{}^2 + c^*I_T + E \\ I_T' = I_T + I_O \end{cases} \quad (1)$$

Dans ces expressions, I_O représente l'image originale. I_T représente l'image de texture initiale et I_T' représente l'image de texture modifiée. C, D, E, a, b, c, sont des constantes de multiplication et d'addition qu'on obtient après plusieurs essais expérimentaux.



(Source : logiciel DESCW de l'Agence spatiale européenne)

FIGURE 1 Localisation de la région de Douala

Dès que l'image de texture modifiée est obtenue, on procède au calcul de son histogramme, ce qui permet de choisir un seuil approprié pour la binarisation de cette image. Le seuil de binarisation est déterminé à partir des modes de l'histogramme. Il correspond au niveau minimum (vallée) de l'histogramme situé entre les modes (pics) consécutifs. Une détection de contours par les masques de Sobel est ensuite appliquée à l'image binarisée et l'on obtient une image de contours à laquelle on applique la squelettisa-

tion. Une fois que l'image squelettisée est obtenue, on procède au calcul de la longueur de la frontière ciblée. La méthodologie mise en oeuvre est résumée sur la figure 2.

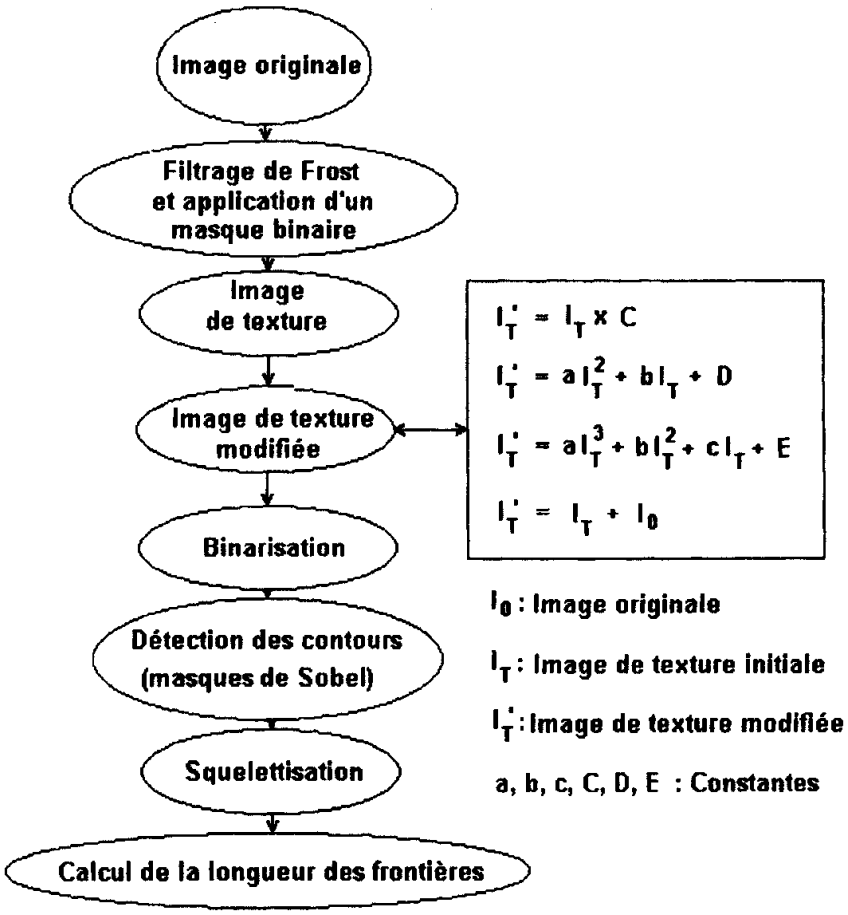


FIGURE 2 Méthodologie générale de traitement

3.1. Les paramètres de texture utilisés

Les paramètres de texture utilisés sont des paramètres extraits de la matrice de cooccurrence des niveaux de gris (Haralick *et al.*, 1973). Cette matrice est une estimation de la probabilité de rencontrer une paire de niveaux de gris (i,j) selon une direction et une distance inter-pixels données. Les trois paramètres utilisés dans cette étude sont : le contraste, l'homogénéité et la variance. Il existe de nombreux autres paramètres, mais ceux-ci ont été choisis pour leur bonne performance par rapport au

site étudié (Ndi Nyoungui, 1999). Ces paramètres de texture sont calculés avec les équations 2 à 4.

Le contraste (ou inertie) est une mesure de la variation locale des niveaux de gris de l'image (éq. 2). Ce paramètre a une valeur numérique importante si les p(i,j) sont concentrées hors diagonale, c'est-à-dire s'il existe de nombreuses transitions caractérisées par une différence importante de niveaux de gris (i-j) (Collorec, 1995). Son expression est donnée ci-dessous (éq. 2):

$$\mathrm{CONT} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i-j)^2 \times p(i,j) \tag{2}$$

Comme son nom l'indique, l'homogénéité permet de mesurer l'homogénéité locale d'une image. On l'appelle aussi moment différentiel inverse. Son expression est donnée ci-dessous (éq. 3):

$$\mathrm{HOM} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{1}{1+(i-j)^2} \cdot p(i,j) \tag{3}$$

La variance est une mesure de la répartition des niveaux de gris autour de la moyenne. Son expression est donnée ci-dessous (éq. 4):

$$\mathrm{VAR} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i-m)^2 \times p(i,j) \quad \text{avec} \quad m = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} i \cdot p(i,j) \tag{4}$$

Dans toutes les expressions précédentes, p(i,j) est la probabilité d'apparition d'une paire de niveaux de gris (i,j) de l'image, selon une direction et une distance inter-pixels données, et dans une fenêtre de taille donnée. N représente le nombre de niveaux de gris maximal.

Le choix d'une distance appropriée entre les pixels est étroitement lié à la finesse ou à la grossièreté de la texture de l'image à être traitée. Plus la texture est grossière, plus la distance d entre les pixels peut être choisie grande, ce qui réduira le temps de calcul. En général, on trouve à la fois des textures fines et des textures grossières dans les images. Une distance d choisie grande peut donc être bonne pour certaines textures et ne pas être bonne pour d'autres textures de la même image. Un moyen de résoudre ce problème consiste à choisir une distance d égale à 1, ce qui convient à la fois aux textures fines et aux textures grossières, bien que ce choix impliquerait un temps de calcul plus long.

Le succès d'une classification par analyse de texture dépend grandement de la taille de la fenêtre utilisée pour le calcul des paramètres de texture. Si

la fenêtre est trop petite, on ne pourra en extraire une information spatiale suffisante pour caractériser la zone étudiée. Si la fenêtre est trop large, elle risque de couvrir des types de texture différents, ce qui introduira des erreurs dans l'information spatiale obtenue. Un autre problème induit par les fenêtres trop larges est qu'elles ont tendance à créer des zones de transition très larges entre des régions voisines. Pour faciliter le choix d'une taille de fenêtre optimale, une stratégie consiste à calculer le coefficient de variation (c'est-à-dire l'écart type divisé par la moyenne) d'un paramètre de texture donné pour chaque classe, et ceci pour plusieurs tailles de fenêtre. La taille optimale est celle pour laquelle le coefficient de variation commence à être stable au fur et à mesure que les tailles de fenêtre deviennent petites (Anys and He, 1995). Une fenêtre de taille 7×7 a été utilisée dans le cadre de cette étude.

Pour résoudre le problème du choix d'une direction appropriée, Haralick *et al.* (1973) proposent de calculer les statistiques de la matrice de cooccurrence pour quatre directions (0°, 45°, 90° et 135°) et de calculer ensuite leur moyenne. Cette solution peut aussi être adoptée lorsqu'on désire obtenir des paramètres invariants après une rotation. Toutefois, une étude récente a prouvé que certaines directions, en plus de réduire le temps de calcul, permettent d'obtenir une distinction des classes meilleure que celle obtenue par moyennage des quatre directions (Franklin and Peddle, 1989). Il a été constaté que les textures des images traitées dans le cadre de cette étude n'ont aucune direction privilégiée et, pour cette raison, la direction 0° a été utilisée dans le calcul des images de texture.

3.2. La détection des contours

Les techniques d'extraction des contours sont nombreuses. Nous nous sommes intéressés aux opérateurs de type gradient utilisant une paire de masques de convolution qui mesurent l'amplitude du gradient dans deux directions perpendiculaires. Un point contour correspond à une forte valeur du module du gradient. Les masques utilisés sont ceux de Sobel (Collorec, 1995) (éq. 5):

$$W_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad W_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

L'algorithme de détection des contours utilisé est présenté sur la figure 3.

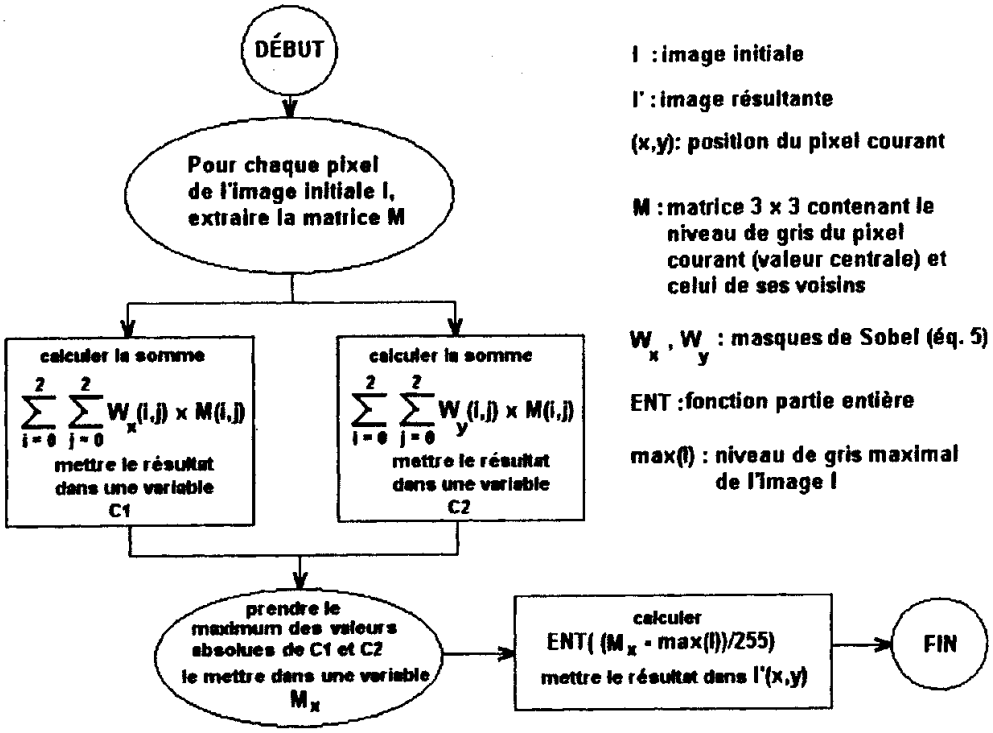


FIGURE 3 Algorithme de détection des contours

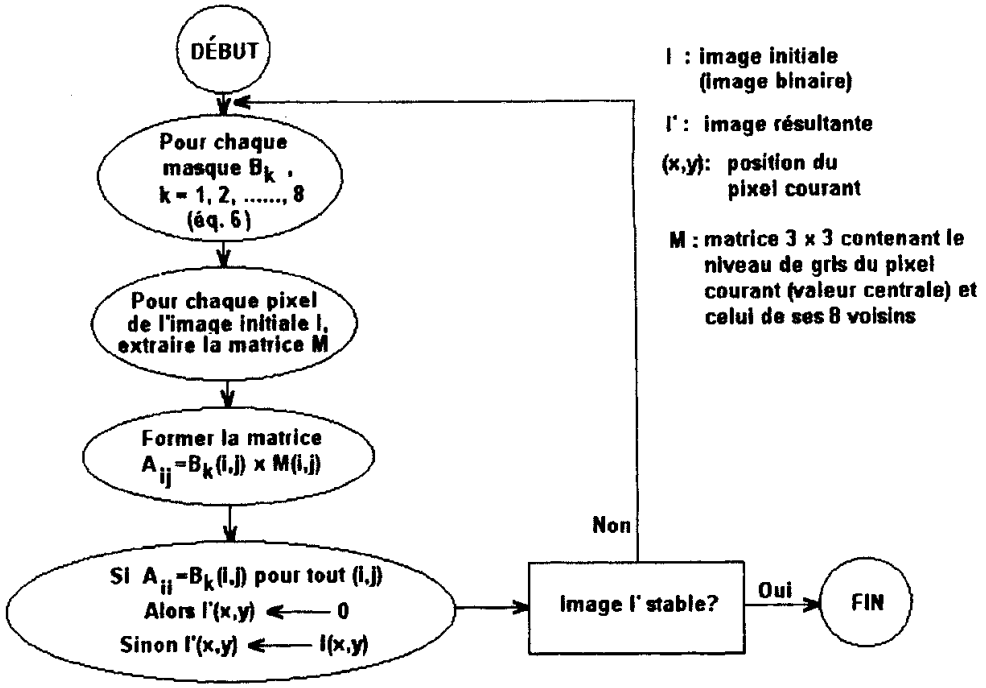
3.3. La squelettisation

Le but visé étant l'obtention du nombre de pixels appartenant aux frontières, il a été nécessaire de réduire les dimensions des contours de manière à obtenir des contours d'épaisseur égale à 1 pixel. Cela a été rendu possible par la squelettisation (Serra, 1982). Cette dernière s'effectue par une succession d'opérations appelées amincissement, jusqu'à l'obtention d'une structure stable ne pouvant plus être amincie. Ceci peut être réalisé en balayant l'image avec une série de huit masques obtenus à partir d'un masque B_1 par rotation de 45° (éq. 6a et 6b):

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6a}$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6b}$$

L'algorithme de squelettisation utilisé est présenté sur la figure 4.



N.B. L'image I' est considérée comme stable lorsqu'elle ne subit plus de changement d'une itération n à une itération n+1.

FIGURE 4 Algorithme de squelettisation

3.4. Le calcul de la longueur de la ligne de rivage

Une fois que l'image est squelettisée, les contours apparaissent nettement et on peut procéder au calcul de la longueur d'une frontière particulière. Pour cela, on isole la frontière ciblée de manière à obtenir une image binaire ayant deux classes distinctes : la classe des pixels appartenant à la frontière et la classe des pixels ne faisant pas partie de la frontière. L'histogramme de cette image binaire permet de connaître le nombre de pixels appartenant à la frontière. Des longueurs minimale et maximale sont ensuite évaluées en considérant les positions extrêmes possibles d'un point de l'image sur une cellule de résolution, selon le schéma présenté à la figure 5.

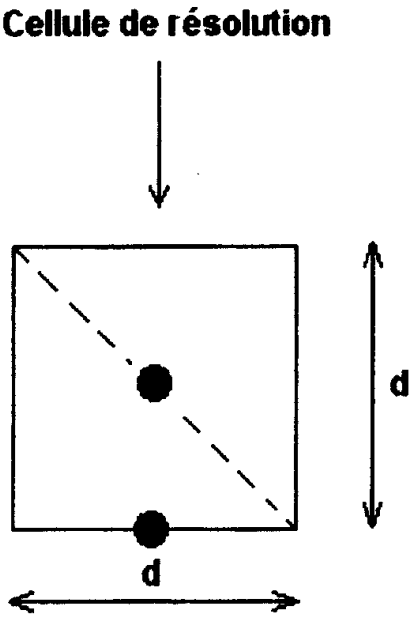


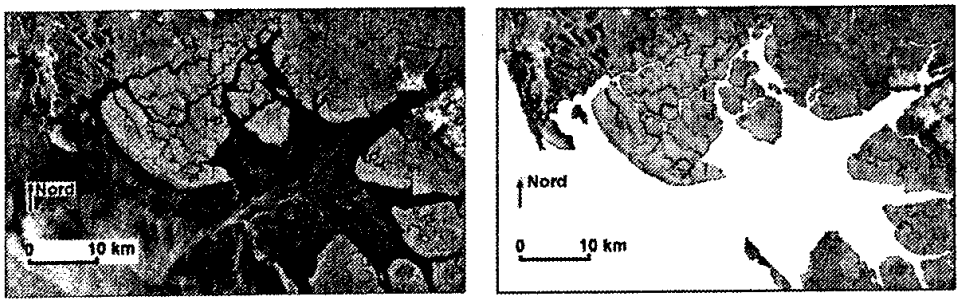
FIGURE 5 Méthode de calcul de la longueur de la ligne de rivage

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'image originale RSO de ERS-1 est présentée sur la figure 6a. Une image binaire de mêmes dimensions que l'image originale, constituée de valeurs 0

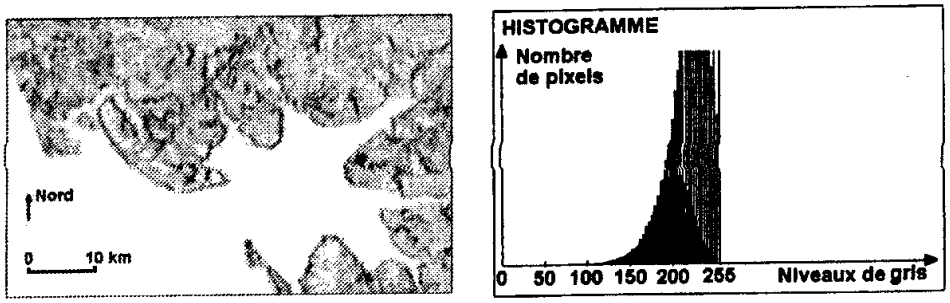
sur la partie mer et de valeurs 1 sur la partie terre, a été utilisée pour faire disparaître l'effet des vagues sur l'image originale. Cette image binaire a donc été utilisée comme un masque permettant de nettoyer l'image originale, par une opération de multiplication. L'image masquée est présentée sur la figure 6b. Sur les figures 7, 8, 9 et 10, on présente les images de texture, les images de texture modifiées et leurs histogrammes, tant pour les paramètres homogénéité que pour le contraste. Les images de texture modifiées ont été obtenues par addition des images de texture à l'image originale masquée. L'image de texture obtenue avec le paramètre variance et son histogramme sont présentés respectivement sur les figures 11a et 11b. Sur les figures 12, 13 et 14, on présente les images de texture binarisées et les images de contours associées, respectivement pour les paramètres homogénéité, contraste et variance. Les seuils de binarisation utilisés pour les trois images binarisées précédentes sont respectivement 140, 150 et 228. Sur la figure 15a, on présente l'image de contours squelettisée obtenue avec le paramètre de texture variance. Sur la figure 15b, on voit une frontière qui a été isolée de l'image de la figure 15a. Cette frontière a servi de test pour la fiabilité de la méthode présentée. Sur la figure 16, on présente les images suivantes : l'image RSO de E-SAR, l'image de texture obtenue avec le paramètre variance, l'image de texture binarisée, l'image de contours, l'image de contours nettoyée et l'image de contours nettoyée et squelettisée. Enfin, sur la figure 17, on présente une carte géographique de la zone d'étude. Cette carte géographique, extraite d'un atlas (Lemarchand, 1994), a permis de comparer les longueurs proposées par ce logiciel et celles calculées par notre méthode. L'atlas utilisé permet d'estimer la distance entre deux points quelconques se trouvant sur la carte géographique. Pour tester la fiabilité de la méthode présentée, une frontière a été choisie sur l'image de la figure 15a. Cette frontière, indiquée par une flèche sur la figure 15a et représentée sur la figure 15b, constitue les limites d'une presqu'île entourant la ville de Douala. Cette frontière a 543 pixels. D'après la méthode de calcul présentée à la figure 5, cette frontière a une longueur minimale de 54,3 km et une longueur maximale de 77 km, en tenant compte de la taille du pixel qui est de 100 m. La longueur de cette frontière est de 54,5 km selon l'atlas (figure 17a). Une autre frontière extraite de l'image RSO de E-SAR et présentée sur la figure 16f a aussi servi de test pour la fiabilité de la méthode présentée. Cette frontière a 1 099 pixels. Selon la méthode de calcul présentée à la figure 5, cette frontière a une longueur minimale de 6,6 km et une longueur maximale de

9,3 km, en tenant compte de la taille du pixel qui est de 6 m. La longueur de cette frontière a aussi été mesurée avec l'atlas et on a obtenu une longueur de 7,10 km (figure 17b).



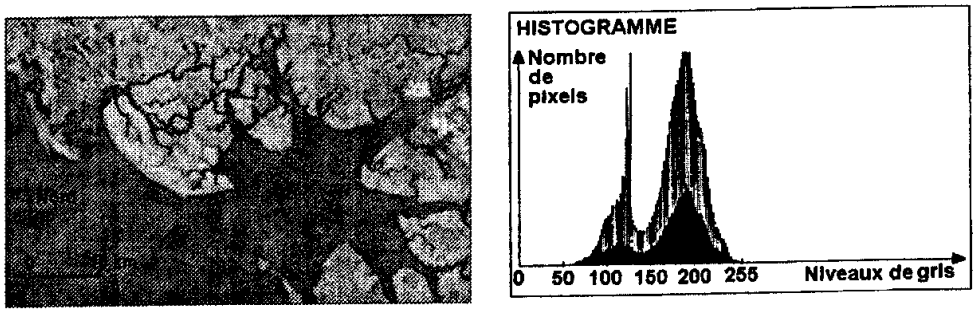
(a) (b)

FIGURE 6 Image originale RSO de ERS-1 de la zone d'étude (a) et image originale filtrée (filtre de Frost) et nettoyée (b)



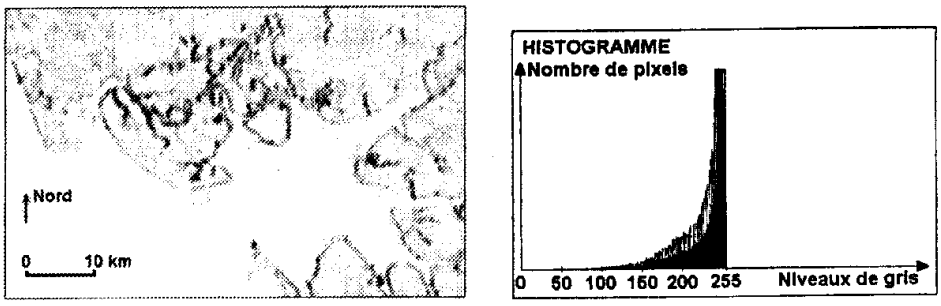
(a) (b)

FIGURE 7 Image de texture (homogénéité) (a) et histogramme associé (b)



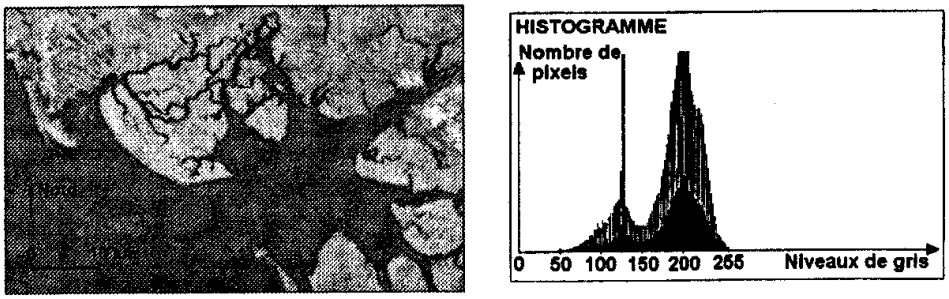
(a) (b)

FIGURE 8 Image de texture modifiée (homogénéité) (a) et histogramme associé (b)



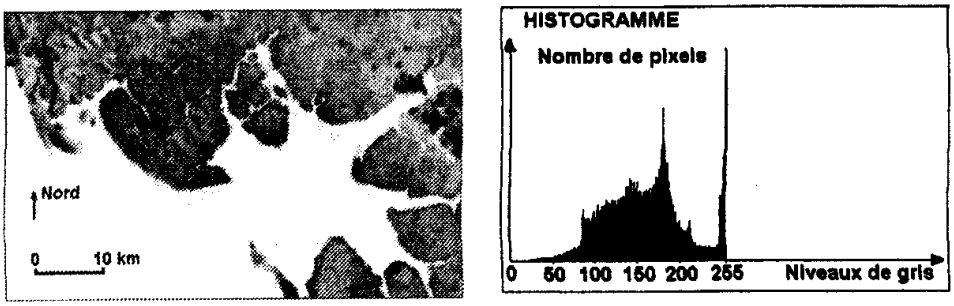
(a) (b)

FIGURE 9 Image de texture (contraste) (a) et histogramme associé (b)



(a) (b)

FIGURE 10 Image de texture modifiée (contraste) (a) et histogramme associé (b)



(a) (b)

FIGURE 11 Image de texture (variance) (a) et histogramme associé (b)

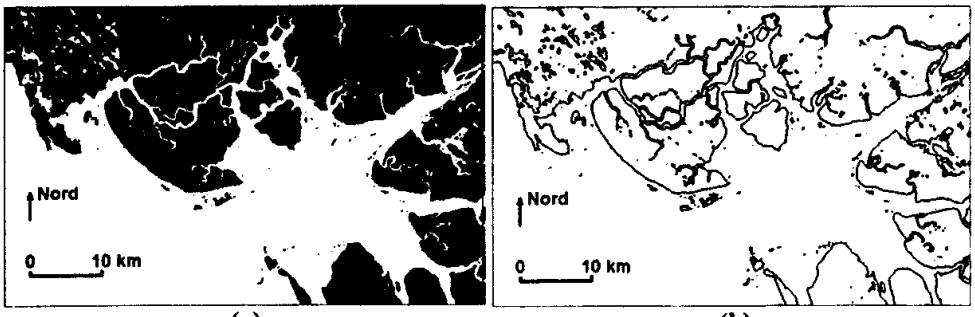


FIGURE 12 Image de texture binarisée (homogénéité) (a) et image de contours associée (b)

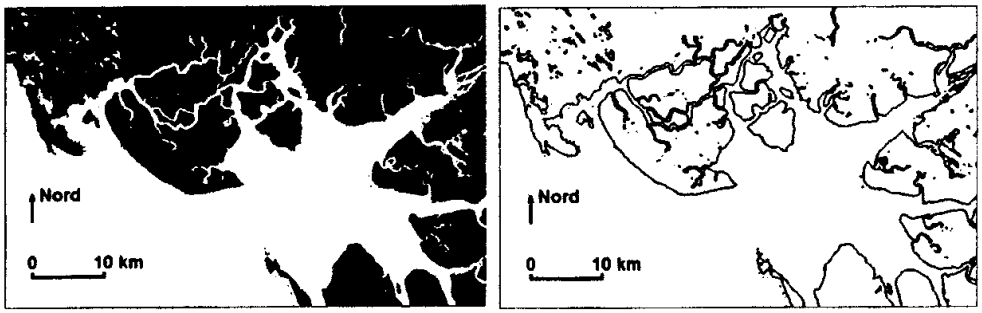


FIGURE 13 Image de texture binarisée (contraste) (a) et image de contours associée (b)

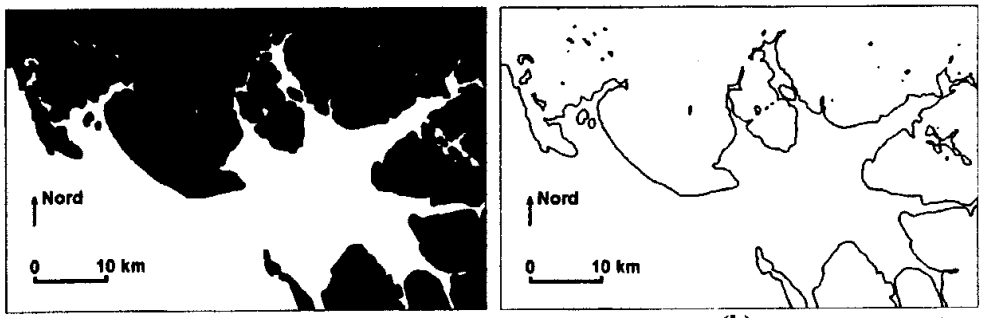


FIGURE 14 Image de texture binarisée (variance) (a) et image de contours associée (b)

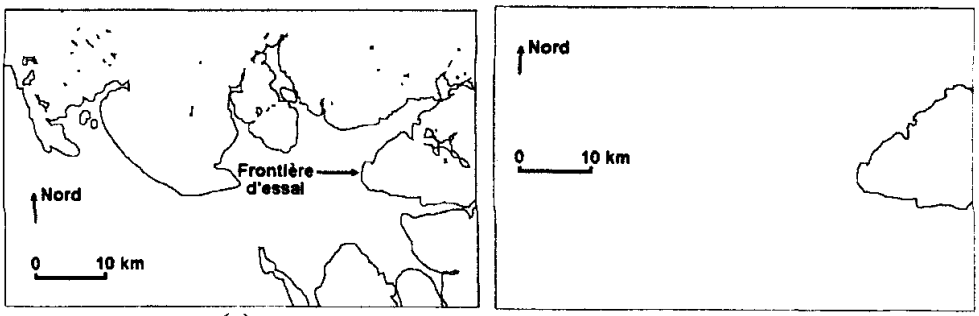


FIGURE 15 Image de contours squelettisée (paramètre de texture : variance) (a) et contour servant de test de validité de la méthode (b)

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

La méthode présentée pour la modification de l'histogramme de l'image de texture est utile pour séparer les classes mer et terre. Lorsqu'on compare les histogrammes des figures 7 et 8, d'une part, et ceux des figures 9 et 10, d'autre part, on voit que la transformation appliquée à l'image de texture permet de faire apparaître deux modes distincts dans l'histogramme des niveaux de gris. Il n'a pas été nécessaire d'appliquer une transformation à l'image de texture du paramètre variance, puisque son histogramme (figure 11b) permet déjà de séparer les classes mer et terre. Le mode dominant de cet histogramme, correspondant au niveau de gris 255, représente la mer et tous les autres niveaux de gris correspondent à la partie terre. On obtient des contours assez détaillés avec les paramètres de texture homogénéité et contraste (figures 12b et 13b), qui font apparaître les rivières. On n'a pas cet avantage avec le paramètre variance qui ne fait apparaître que les frontières externes (figure 15a). En revanche, le paramètre variance a un grand avantage sur les autres paramètres du point de vue clarté de l'image.

On voit que les longueurs des lignes de rivage mesurées avec l'atlas se trouvent dans les limites calculées par la méthode présentée, aussi bien pour l'image RSO de ERS-1 que pour l'image RSO de E-SAR. Étant donné que la longueur de la ligne de rivage dépend de l'échelle de la carte à partir de laquelle cette ligne a été numérisée, le détail de la ligne de rivage n'est pas le même d'une échelle à l'autre. Les résultats de l'atlas sont donc présentés ici à titre d'indication et non de validation. Toutefois, la méthode de

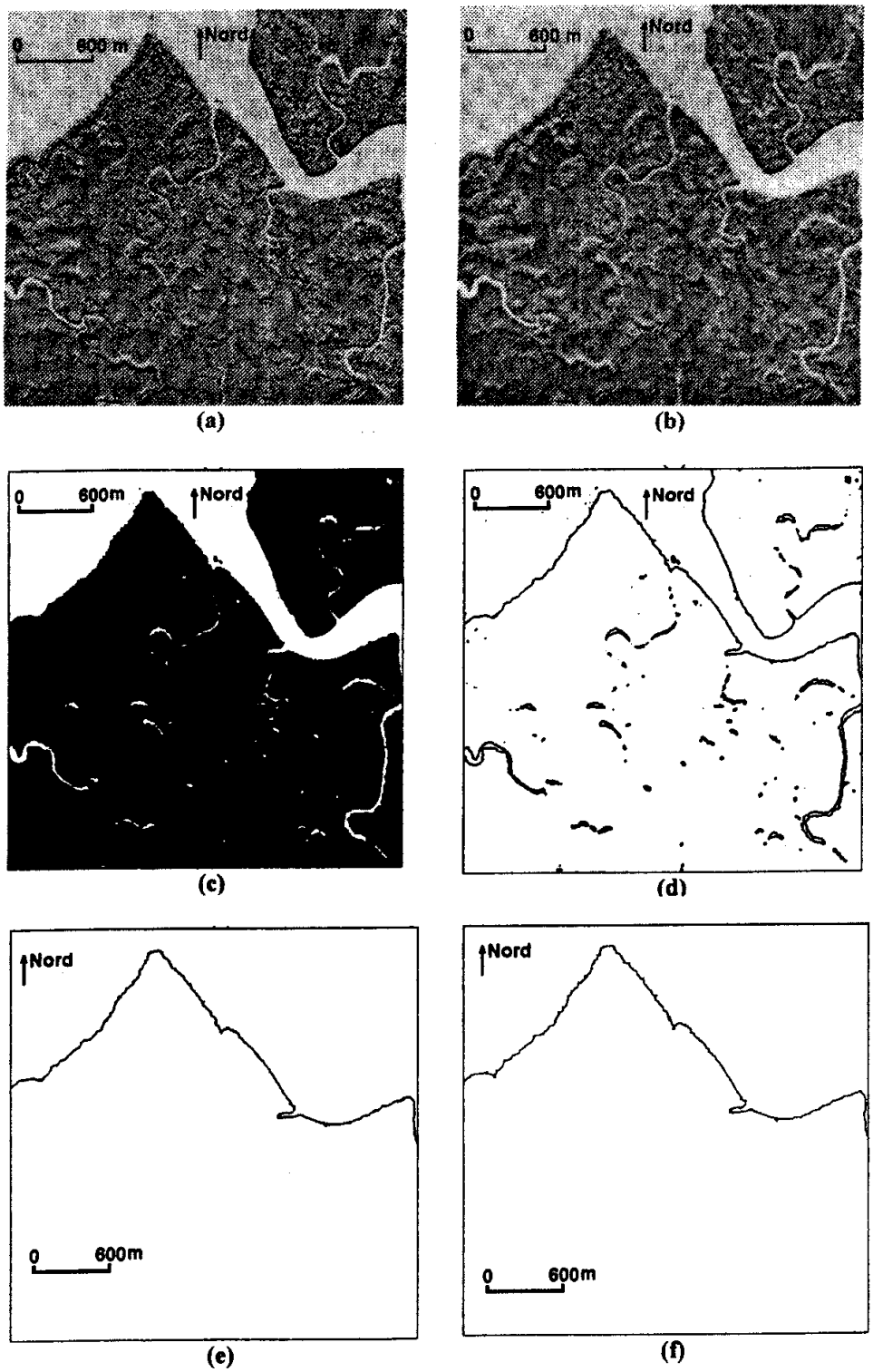
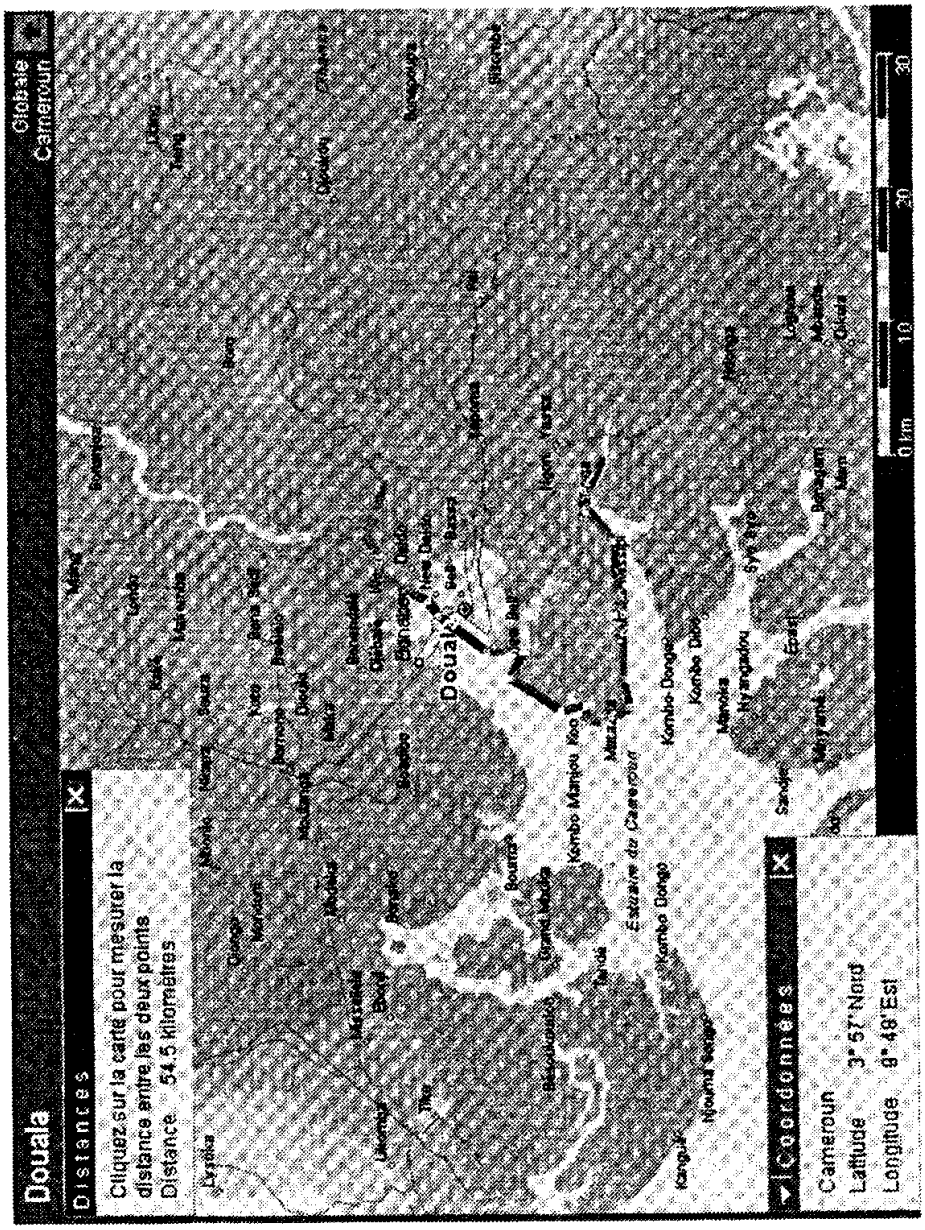
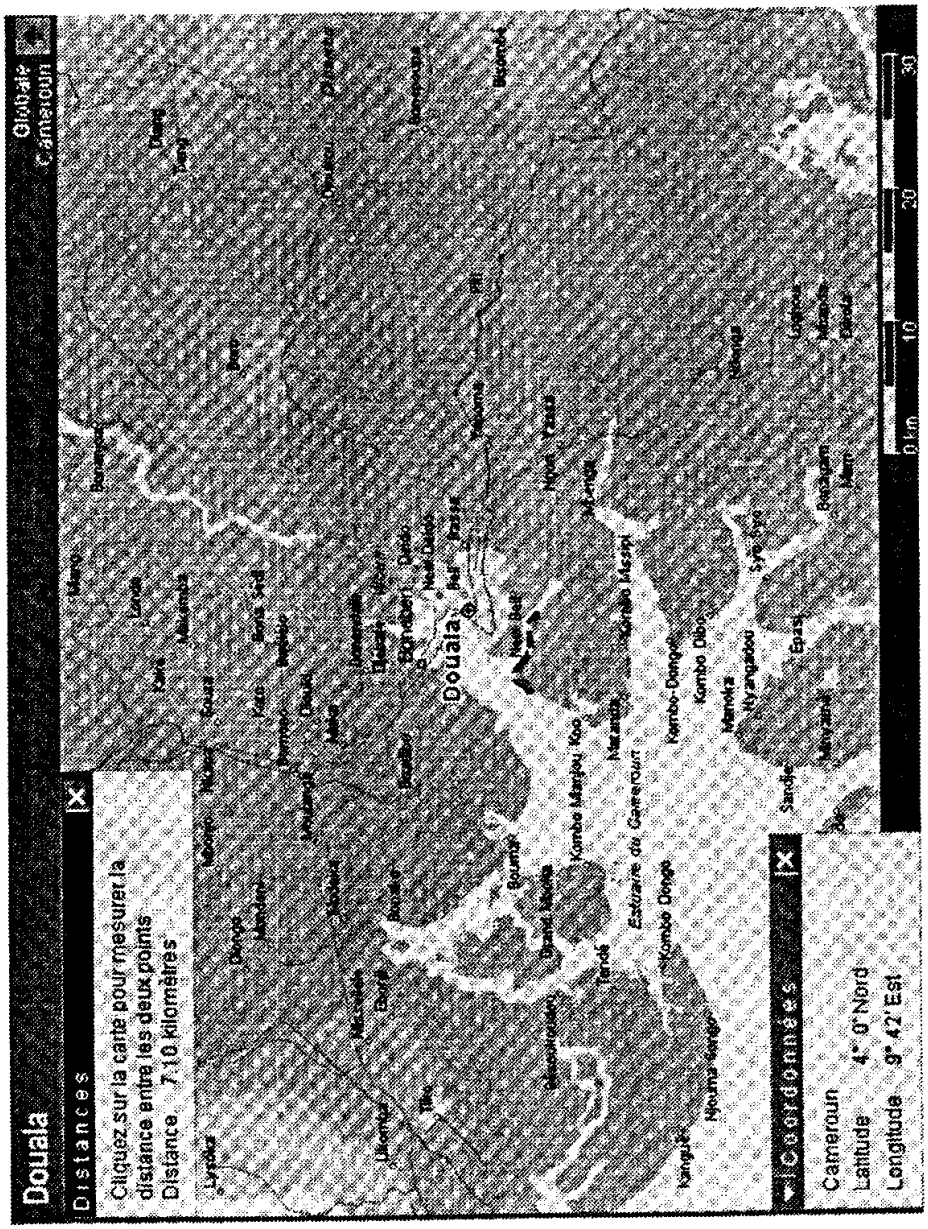


FIGURE 16 Image RSO de E-SAR de la zone d'étude : (a) image originale ; (b) image de texture (variance) ; (c) image de texture binarisée ; (d) image de contours ; (e) image de contours nettoyée ; (f) image de contours nettoyée et squelettisée


Douala
Distances
Cliquez sur la carte pour mesurer la distance entre les deux points
Distance : 54.5 kilomètres
Coordonnées
Cameroun
Latitude 3° 57' Nord
Longitude 9° 48' Est
Estuaire du Cameroun
Kombo Dongo
Kombo Manjou Koo
Kombo Dido
Kombo Dongo
Douala
Edéa
Kribi
Limbe
Tiko
Mbonge
Nyangono
Bakassi
Bamenda
Bafoussam
Foumban
Mbouda
Ngaoundéré
Garoua
Maroua
Yaoundé
Ebolowa
Sangmélima
Mamfé
Ikom
Obudu
Calabar
Oron
Ogoja
Abakaliki
Enugu
Onitsha
Awka
Owerri
Port Harcourt
Bonny
Opobo
Ikot Ekpene
Uyo
Aba
Umuahia
Afikpo
Abakaliki
Abudja
Makurdi
Lafia
Jos
Kaduna
Zaria
Kano
Katsina
Sokoto
Gusau
Maiduguri
Damaturu
Potiskum
Gombe
Bauchi
Yola
Mubi
Ngaoundéré
Tibati
Banyo
Tignère
Meiganga
Bertoua
Batouri
Kentzou
Abong-Mbang
Lomié
Yokadouma
Moloundou
Ouesso
Sangha
Mambéré
Nola
Berbérati
Carnot
Bangui
Bossangoa
Bozoum
Bossembélé
Bouar
Baoro
Baboua
Nanga Eboko
Mbalmayo
Sangmélima
Ambam
Kribi
Campo
Mouanko
Nkongsamba
Bafang
Bafoussam
Foumban
Bamenda
Mbouda
Dschang
Kumba


Douala
Distances
Cliquez sur la carte pour mesurer la distance entre les deux points
Distance 7.10 kilomètres
Coordonnées
Cameroun
Latitude 4° 0' Nord
Longitude 9° 42' Est
Douala
Estuaire du Cameroun
Nkongsamba
Yaoundé
Bafoussam
Bamenda
Edéa
Kribi
Limbé
Buéa
Mbanga
Manoka
Nyangadou
Sandé
Bekoko
Japoma
Bonabéri
Deido
Bonanjo
Akwa
Bonapriso
Bonamoussadi
Ndokoti
Bonaberi
Logbaba
Makepe
Ndogbong
Ndogpassi
Ndogbati
Kotto
Mouanko
Dibombari
Nkongmondo
Ngwelle
Ndom
Mbanga
Kumba
Mundemba
Idenau
Tiko
Limbe
Victoria
Bota
Mutengene
Muea
Buea
Tombel
Kumbo
Bamenda
Ndop
Wum
Nkambe
Bafoussam
Dschang
Mbouda
Foumban
Bafang
Nkongsamba
Loum
Manjo
Melong
Mbanga
Kumba
Mundemba
Idenau
Tiko
Limbe
Victoria
Bota
Mutengene
Muea
Buea
Tombel
Kumbo
Bamenda
Ndop
Wum
Nkambe
Bafoussam
Dschang
Mbouda
Foumban
Bafang
Nkongsamba
Loum
Manjo
Melong
Edéa
Kribi
Sangmélima
Ebolowa
Ambam
Kyé-Ossi
Yaoundé
Mbalmayo
Obala
Mbalmayo

calcul présentée est cohérente, puisqu'elle ne dépend que de la résolution de l'image qui varie elle-même avec l'échelle. Cette méthode de calcul est donc indépendante de l'échelle et elle donne une indication fiable de la longueur de la ligne de rivage sur une image de télédétection.

6. CONCLUSION

Le but de cette étude consistait à présenter une méthodologie de calcul de la longueur d'une ligne de rivage sur une image radar à synthèse d'ouverture. Il a été possible, grâce à une combinaison de la morphologie mathématique et des images de texture modifiées, d'extraire des lignes de rivage sur une zone complexe où le contact terre-mer est souvent sujet à de nombreuses perturbations. La méthodologie présentée permet d'obtenir une bonne indication des longueurs de rivage et elle peut être utile avant la réalisation d'une carte. Il sera possible d'étendre cette étude à l'extraction des réseaux routiers et des réseaux hydrographiques sur des images RSO d'autres zones du Cameroun. De telles études pourront être utiles aux communautés urbaines dans la planification de leurs travaux d'aménagement urbain. Une autre application intéressante pourrait être l'étude de l'évolution de la croissance urbaine. Cette application est possible grâce à l'application de la méthodologie présentée sur des images RSO multidates. La méthodologie présentée permet aussi de faire un choix approprié des paramètres de texture, en fonction de l'application envisagée. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que les paramètres de texture homogénéité et contraste seraient très appropriés pour l'extraction d'un réseau hydrographique, tandis que le paramètre variance convient à la délimitation d'une ligne de rivage.

Remerciements

Les images RSO de ERS-1 traitées dans cette étude ont été obtenues grâce à une collaboration entre l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé (Cameroun) et l'Université de Marne-La-Vallée (France), dans le cadre du projet AOL-F203 de l'Agence Spatiale Européenne. Nous remercions la Mission de Coopération Française qui a financé l'acquisition des données RSO de E-SAR et l'Agence Universitaire de la Francophonie qui soutient le laboratoire LETS (Laboratoire Associé Francophone n° 601). Nos remerciements s'adressent également au professeur Jean-Marie

Dubois de l'Université de Sherbrooke, pour ses précieuses observations qui ont permis une meilleure présentation de cet article.

Références

Akono, A. (1997) Vision par ordinateur des images radar : application à l'interprétation des images radar à synthèse d'ouverture. Rapport de stage effectué au Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 53 p.

Anys, H. and He, D.C. (1995) Evaluation of textural and multipolarization radar features for crop classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 23, n°5, p. 1169–1181.

Baltzer, F., Rudant, J.P. et Tonye, E. (1995) Applications de la télédétection micro-onde en bande C (aéroporté E-SAR et satellitaire ERS-1) à la cartographie des mangroves de la région de Douala (Cameroun). Proceedings of the Second ERS Applications Workshop, News views of the Earth, London, 8 december 1995, p. 455–462.

Collorec, R. (1995) Images numériques. LTSI Campus de Beaulieu, Université de Rennes I, France, p. 60–79.

Descombes, X., Moctezuma, M., Maître, H. and Rudant, J.-P. (1996) Coastline detection by a Markovian Segmentation on SAR images. *Signal Processing*, vol. 55, p. 123–132.

Franklin, S.E. and Peddle, R.D. (1989) Spectral texture for improved class discrimination in complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, n°8, p. 1437–1443.

Frost, V.S. (1982) A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, p. 157–165.

Haralick, R.M., Shanmugan, K. and Dinstein, I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, p. 610–621.

Lemarchand, Philippe (dir.) (1994) L'Afrique et l'Europe. Atlas du xx^{e} siècle. Éditions Complexes, Bruxelles.

Ndi Nyoungui, A. (1999) Analyse de texture et classification neuronale des images RSO : application à la cartographie forestière en milieu tropical humide. Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I, 359 p.

Robin, M. (1990) Cinématique d'un littoral par squelettisation de formes. *Photointerprétation*, n° 90–2, p. 65–70.

Rudant, J.P., Baltzer, F., Tupin, F. and Tonyé, E. (1997) Distinction entre formations végétales littorales et continentales dans leur rapport avec la géomorphologie : intérêt des images ERS-1. Symposium ERS-1, Florence, 14–21 mars 1997, Publications ESA, p. 1069–1073.

Serra, J. (1982) Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 628 p.

Tonye, E., Akono, A., Tricot, P. et Awono, O. (1994) La didactique de l'image. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, n° 10, p. 1957–1980.

Tonye, E., Ndi Nyoungui, A. et Akono, A. (1998) Évaluation comparative de plusieurs méthodes de réduction du chatoiement et de plusieurs méthodes d'analyse de texture pour la classification des images RSO. Actes du 4ème Colloque Africain sur la Recherche en Informatique (CARI'98), Dakar (Sénégal), 12–15 octobre 1998, p. 675–686.

Verger, F. (1996) La télédétection des domaines littoraux. Chap. 9, in Bonn, F. (réd.) Précis de télédétection, Volume 2, Applications thématiques. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte-Foy, p. 325–337.