Télédétection, 2005, Vol. 5, n°1-2-3, p 227-244

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

NOUVEL ALGORITHME D'ÉVALUATION DE TEXTURE D'ORDRE N SUR LA CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DES SOLS DE LA RÉGION VOLCANIQUE DU MONT CAMEROUN

ALAIN AKONO[1], NARCISSE TALLA TANKAM,
EMMANUEL TONYÉ et CHARLY DZEPA

Laboratoire d'Électronique et de Traitement duSignal (LETS)
École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé
Boîte Postale 8390, Yaoundé, Cameroun
Téléphone & télécopie : (237) 222-4547

Courriel (1) : aakono@yahoo.com

(soumis : 24 mai 2004 ; révisé : 27 septembre 2004 ; accepté 8 avril 2005)

Plusieurs chercheurs ont démontré que les données de texture augmentent la précision d'une classification lorsqu'elles sont combinées à l'information de niveaux de gris. Cependant, le calcul des paramètres de texture d'ordre 2 implique souvent des temps de calcul très longs. Le problème est encore plus complexe lorsqu'il faut calculer les paramètres de texture d'ordre supérieur, qui cependant peuvent apporter des améliorations considérables sur la précision d'une classification. Ce travail s'appuie sur les méthodes statistiques d'ordre deux pour le calcul des paramètres de texture d'image initialement mises sur pied par Kourgli et Belhadj-Aissa (1999) et sur les travaux de Akono *et al.* (2003) sur les méthodes statistiques d'évaluation des paramètres de texture d'ordre trois. On propose une nouvelle méthode de calcul des paramètres de texture beaucoup plus générale, qui ne se limite plus seulement à l'ordre deux ou trois, mais qui va jusqu'à l'ordre $n \geq 2$, tout en restant applicable aux ordres deux et trois.

Le principe de cette étude consiste à ramener le calcul d'une n-sommation du type $\sum_{a_0=0}^{L-1}\sum_{a_1=0}^{L-1}\sum_{a_2=0}^{L-1}\ldots\sum_{a_{n-1}=0}^{L-1}\Psi(a_0, a_1, a_2, \ldots, a_{n-1})$, généralement utilisée dans les formules d'évaluation des paramètres de texture, en une simple sommation du type $\sum_{i=0}^{L-1}\chi(i)$. Ψ est fonction de la matrice de fréquence (matrice de co-occurrence dans le cas de l'ordre deux) des n-uplets de niveau de gris dans une fenêtre de l'image. À l'issue de cette transformation, un gain considérable a été obtenu aussi bien en temps qu'en espace mémoire de l'ordinateur. Cette méthode produit exactement le même résultat que la formulation classique, mais un gain spatio-temporel croissant avec l'ordre n du paramètre est obtenu.

Cette méthode a été développée et testée successivement à l'ordre deux, à l'ordre trois, à l'ordre quatre et à l'ordre cinq avec deux images radar à synthèse d'ouverture (RSO) de ERS-1 et de ERS-2, de taille 986 × 1 390 pixels, sur un ordinateur ayant une mémoire vive de 352 mégaoctets et un processeur Pentium de 2,4 gigahertz de vitesse. Les résultats obtenus montrent que, pour l'évaluation du paramètre de texture somme d'ordre deux, en considérant une fenêtre de l'image de taille 7 × 7, la nouvelle méthode de calcul est 10 fois plus rapide que la méthode classique de calcul des matrices de co-occurrence des niveaux de gris. À l'ordre trois, elle est 19 fois plus rapide et à l'ordre quatre, elle est 12 000 fois plus rapide.

La méthodologie mise en œuvre a permis de faire une étude comparative de classification de l'occupation du sol dans la région volcanique du mont Cameroun, entre 1998 et l'an 2003. En effet, le paramètre de texture somme aux ordres deux, trois, quatre et cinq a été appliqué sur deux images RSO de cette région, l'une de ERS-1 acquise le 07 novembre 1998 et l'autre de ERS-2, acquise le 15 mars 2003. La comparaison des surfaces d'occupation du sol sur la zone d'étude s'est faite à partir d'une classification non dirigée réalisée sur l'image de texture et à partir de courbes de texture caractérisant ces surfaces. L'augmentation de l'étendue des coulées de lave due aux éruptions de 1999 et de l'an 2000 a été mise en évidence.

Mots-clefs : texture ; matrice de fréquence ; classification ISODATA ; courbe de texture ; image RSO.

A NEW ALGORITHM FOR EVALUATING TEXTURE PARAMETERS OF ORDER N IN THE CLASSIFICATION OF LAND USE IN THE VOLCANIC OF MOUNT CAMEROUN

Many researchers have demonstrated that textural data increase the precision of a classification when they are combined with grey level information. However, the calculation of textural parameters of order two is often too long by a computer. The problem is more complex when one must compute higher order textural parameters, which however can considerably improve classification precision. This work is based on statistical methods of order two for the calculation of textural parameters initially developed by Kourgli and Belhadj-Aissa (1999), and on the works of Akono *et al.* (2003) on statistical methods for the evaluation of textural parameters of order

three. In this work, we suggest a new method of calculation for textural parameters, which is more general, not limiting itself only to orders two or three, but up to order $n \geq 2$, while still remaining applicable to orders two and three. The principle of this study consists in reducing the calculation of a n-summation of type $\sum_{a_0=0}^{L-1} \sum_{a_1=0}^{L-1} \sum_{a_2=0}^{L-1} \ldots \sum_{a_n=0}^{L-1} \Psi(a_0, a_1, a_2, \ldots, a_{n-1})$, generally utilized in the evaluation of textural parameters, to a simple summation of type $\sum_{i=0}^{L-1} \chi(i)$. Ψ is a function depending on the matrix frequency (co-occurrence matrix in the case of order two) of the n-uplets of grey levels in an image window. After this transformation, a considerable gain in time and in memory space of the computer was obtained. This method produces exactly the same result as the classical method, but with a spatial and a temporal gain increasing with the order of the textural parameter.

This method was developed and tested successively at orders two, three, four and five with two ERS-1 and ERS-2 synthetic aperture radar (SAR) images, 986 × 1 390 pixels in size, on a computer with a random access memory (RAM) of 352 megabytes and a Pentium processor with 2,4 gigahertz of speed. The results obtained show that, for the evaluation of the "summation" textural parameter of order two, considering an image window size of 7 × 7, the new calculation method is ten times faster than the classical method for computing the co-occurrence matrix of grey levels. At order three, the new method is nineteen times faster and at order four, it is a twelve thousands times faster. The methodology developed permitted the implementation of a classification comparative study of the ground occupation in the volcanic area of mount Cameroon, between the years 1998 and 2003. In fact the "summation" textural parameter at orders two, three, four and five was applied to the two SAR images of the study region. The comparison of the ground occupation areas on the study site was done using a non supervised classification realized on the textural image and based on textural curves characterizing these areas. The increase in the area of the lava flows due to the 1999 and 2000 eruptions was put in evidence.

Keywords : texture ; matrix of frequency ; ISODATA classification ; texture curve ; SAR image.

1. INTRODUCTION

De nos jours, l'importance de l'analyse de texture pour la classification des images radar à synthèse d'ouverture n'est plus à démontrer. En effet, les champs d'application de l'analyse de texture sont multiples et plusieurs auteurs s'y sont exercés. Étant donné que la taille des images RSO à traiter est généralement assez importante, une des priorités dans l'analyse de texture de ces images consiste en l'amélioration du temps d'évaluation des paramètres de texture. C'est ainsi que Akono *et al.* (2003) ont proposé une nouvelle approche dans l'évaluation des paramètres de texture d'ordre 3. Le travail actuel est une généralisation du travail de Akono *et al.* (2003). Il propose une approche arborescente dans l'évaluation des paramètres de texture d'ordre $n \geq 2$. Cette approche consiste à explorer une fenêtre de l'image comme si c'était un arbre, tout en mémorisant les nœuds visités. Cette approche permet d'éviter le calcul de la matrice de co-occurrence assez consommatrice en temps d'exécution et en espace mémoire. Le tout se résume en l'évaluation d'un simple vecteur dont la somme des éléments donne la valeur du paramètre recherché. Le résultat est identique à celui que fournit la méthode classique d'évaluation des paramètres de texture, mais le temps d'évaluation est suffisamment réduit, quelque soit l'ordre. La méthodologie mise en œuvre a permis de faire une étude comparative de classification de l'occupation du sol dans la région volcanique du mont Cameroun, entre 1998 et l'an 2003. Le paramètre de texture de la somme à plusieurs ordres (2, 3, 4 et 5) a été appliqué sur deux images RSO acquises sur cette région. La première image est acquise par le satellite ERS-1, le 7 novembre 1998 ; la seconde par ERS-2, le 2 mars 2003. La comparaison des surfaces d'occupation du sol sur la zone d'étude s'est faite à partir d'une classification non dirigée réalisée sur l'image de texture et à partir de courbes de texture caractérisant ces surfaces. L'augmentation de l'étendue des coulées de lave due aux éruptions de 1999 et de l'an 2000 a été mise en évidence.

2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

Le mont Cameroun est situé au fond du golfe de Guinée, entre les latitudes 3°56' Nord et 4°25' Nord et les longitudes 9° Est et 9°25' Est (figure 1). I1 est limité au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord Est par le bas plateau de Kumba, au Sud Est par la mangrove et au Nord Ouest par l'estuaire du Rio Del Rey. Cette région volcanique fait l'objet de nombreuses recherches, notamment de géologues qui étudient les types de roches qu'on y trouve. Le mont Cameroun fait partie de ce qu'on appelle la ligne volcanique du Cameroun (LVC). Il s'agit d'un alignement d'anciens volcans continentaux et océaniques du Cameroun. La LVC se situe à l'Ouest du Cameroun, dans la direction Nord Est – Sud Ouest, et s'étend sur une distance d'environ 1 500 km. Une moitié de la LVC est continentale et l'autre moitié se situe dans l'Océan Atlantique. La partie océanique de la LVC comprend quatre îles volcaniques, à savoir, Pagalu, Sao Tomé, Principe et Bioko (figure 1). La partie continentale comprend : le mont Cameroun, le mont Manengouba, le mont Bamboutos, le mont Oku et le mont Biu.

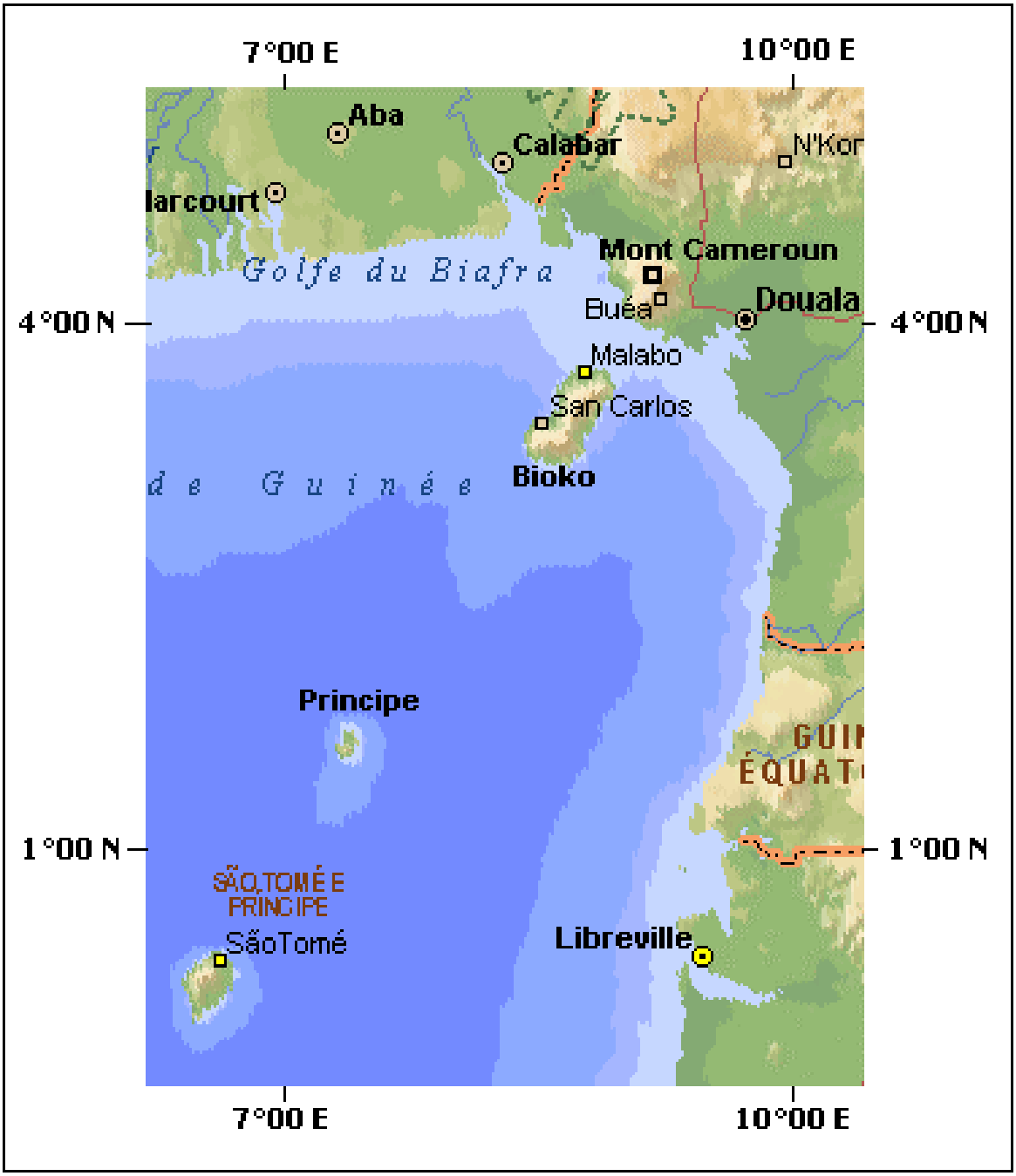


FIGURE 1 Situation géographique du site d'étude. *Geographical location of the study site.*

3. DONNÉES UTILISÉES

Les caractéristiques des deux images radar à synthèse d'ouverture (RSO) des satellites ERS-1 et ERS-2 sont présentées sur le tableau 1. Ces images ont été acquises en orbite ascendante, en bande C avec une polarisation verticale VV. Ces données ont été réceptionnées à la station de l'Agence spatiale européenne (ESA) située à Libreville (Gabon). Les images traitées dans cette étude ont une résolution de 25 m et elles sont présentées sur la figure 2.

TABLEAU 1 Caractéristiques des images satellitaires radar traitées dans cette étude. *Characteristics of the satellite radar images processed in this study.*

Satellite	Date d'acquisition	Taille de l'image	Coordonnées du point central	Numéro d'orbite selon l'ESA	Numéro de positionnement du satellite selon l'ESA (Frame)	Format des données
ERS-1	07/11/1998	4900 × 26823 pixels (513 743 Ko)	Latitude : 4,338 N Longitude : 9,128 E	38 243 (Ascendante)	3519	SLCI (Single Look Complex Image)
ERS-2	02/03/2003	4900 × 26810 pixels (513 494 Ko)	Latitude : 4,344 N Longitude : 9,127 E	41 115 (Ascendante)	3519	SLCI (Single Look Complex Image)

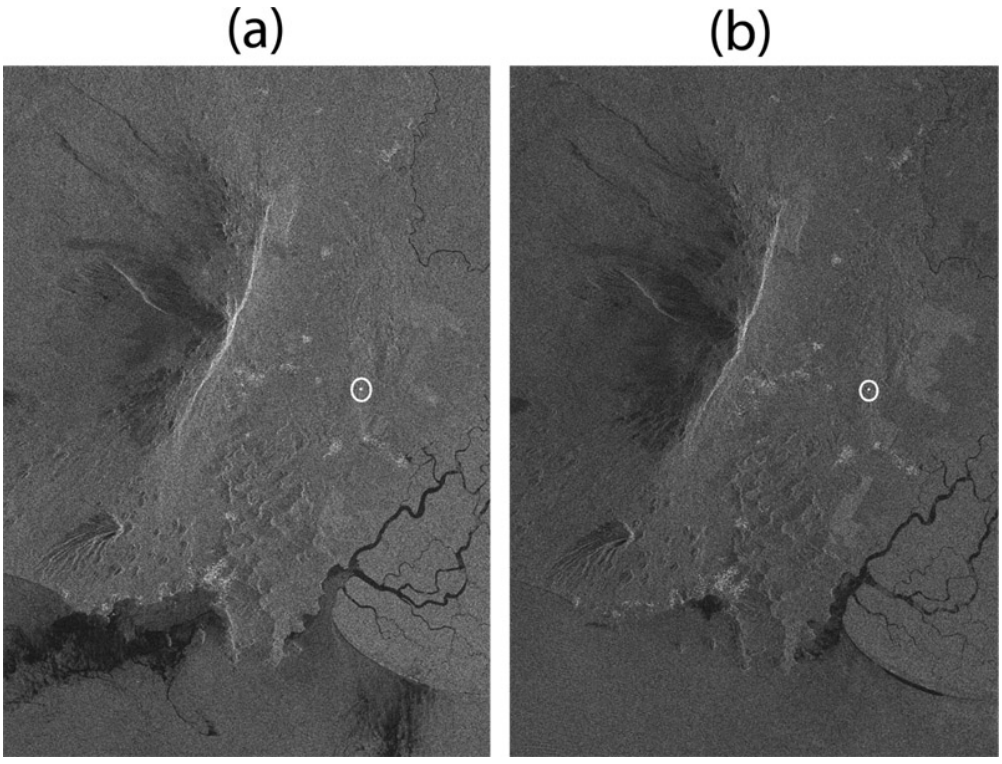


FIGURE 2 Images radar du site d'étude : (a) image RSO de ERS-1 acquise le 07 novembre 1998 ; (b) image RSO de ERS-2 acquise le 15 mars 2003. Le point encerclé sur l'image correspond à la zone des plantations de bananeraies et d'hévéa près de la ville de Tiko au Cameroun. *Radar images of the study site : (a) ERS-1 SAR image acquired on 07 November 1998 ; (b) ERS-2 SAR image acquired on 15 March 2003. The circle on the image corresponds to the area of banana and hevea plantations near the city of Tiko in Cameroon.*

4. MÉTHODOLOGIE

4.1. Méthode arborescente d'évaluation des paramètres de texture

Cette méthode consiste à réduire le nombre d'opérations nécessaires au calcul de la matrice de co-occurrence. À partir de chaque pixel de l'image, on atteint tous les autres pixels entrant dans l'évaluation de la matrice de co-occurrence et on effectue directement des opérations sur ces pixels. Ce processus permet d'éviter l'évaluation et le stockage de la matrice de co-occurrence dans la mémoire centrale de la machine. Dans l'approche arborescente, le parcours des pixels de l'image ne s'effectue plus ligne après ligne et pixel après pixel, mais plutôt en suivant un arbre générique. À partir d'un pixel et en fonction de sa position, on atteint directement, en suivant une règle de connexion, les pixels voisins qui entrent dans l'évaluation du paramètre de texture. On effectue ensuite sur ces pixels les opérations nécessaires.

4.1.1. L'arbre générique

L'arbre générique de calcul des paramètres de texture (figure 3) a pour racine un pixel positionné à des coordonnées (a, b) quelconques de l'image, avec la condition $a \in [0, NL[$ et $b \in [0, NC[$, où NL et NC désignent respectivement le nombre de lignes et le nombre de colonnes de l'image. Les diverses conditions spécifient les bornes de variation de a et b. À partir du pixel positionné aux coordonnées (a, b) de la fenêtre de l'image, on peut atteindre le pixel positionné en $f_1(a, b, d_1)$ (resp. en $g_1(a, b, d_1)$) en respectant la règle de connexion $r_1(d_1, \theta_1)$ (resp. $r_1(d_1, \theta_1+180°)$), si la condition 1 (resp. la condition 2) est vérifiée. À partir du pixel positionné en $f_1(a, b, d_1)$ (resp. en $g_1(a, b, d_1)$) on peut atteindre le pixel positionné en $f_{11}(a, b, d_1, d_2)$ (resp. en $f_{12}(a, b, d_1, d_2)$) en respectant la règle de connexion $r_3(d_2, \theta_2)$ (resp. $r_4(d_2, \theta_2+180°)$), si la condition 3 (resp. la condition 4) est vérifiée. Nous rappelons qu'une règle de connexion $r_3(d_2, \theta_2)$ signifie qu'on considère une distance inter pixels de d_2 et un angle de θ_2 (et $\theta_2+180°$) degrés pour l'évaluation des paramètres de texture. Si on est à l'ordre 3, on obtient les sept pixels i, j, k, l, m, n, o présentés par l'équation 1 :

$$\begin{aligned} i &= (a, b) \\ j &= f_1(a, b, d_1) \\ k &= f_{11}(a, b, d_1, d_2) \\ l &= f_{12}(a, b, d_1, d_2) \\ m &= g_1(a, b, d_1) \\ n &= g_{11}(a, b, d_1, d_2) \\ o &= g_{12}(a, b, d_1, d_2) \end{aligned} \qquad (1)$$

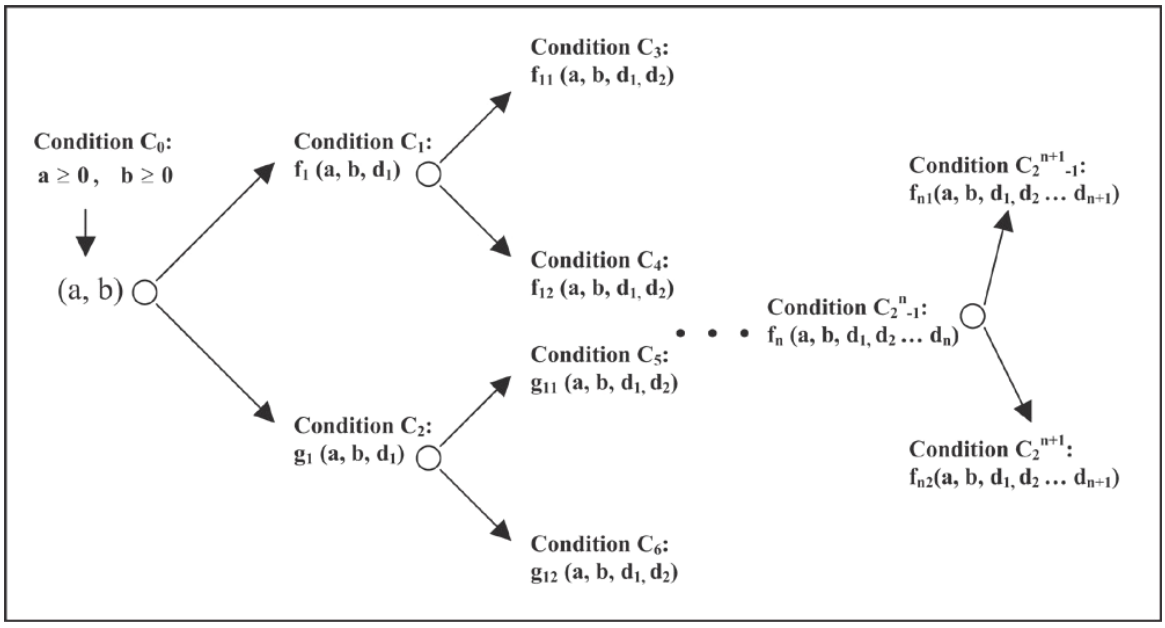


FIGURE 3 Arbre générique pour l'évaluation des paramètres de texture d'ordre n > 1. *Generic tree for the evaluation of the texture parameters of order n > 1.*

Dans l'équation 1,

– i est le pixel courant, identifié par ses coordonnées (a, b) dans l'image ;

– $f_1(a, b, d_1)$ est le pixel voisin de i respectant la règle de connexion $r_1(d_1, \theta_1)$;

– $f_{11}(a, b, d_1, d_2)$ est le pixel voisin de j respectant la règle de connexion $r_3(d_2, \theta_2)$; $f_{12}(a, b, d_1, d_2$ est le pixel voisin de j respectant la règle de connexion $r_4(d_2, \theta_2+180°)$; $g_1(a, b, d_1$ est le pixel voisin de i respectant la règle de connexion $r_2(d_1, \theta_1+180°)$;

– $g_{11}(a, b, d_1, d_2)$ est le pixel voisin de m respectant la règle de connexion $r_3(d_2, \theta_2)$;

– $g_{12}(a, b, d_1, d_2)$ est le pixel voisin de m respectant la règle de connexion $r_4(d_2, \theta_2+180°)$.

Nous généralisons donc en disant qu'à partir du pixel $f_n(a, b, d_1, \ldots, d_n)$, on peut atteindre le pixel $f_{n1}(a, b, d_1, d_2, \ldots, d_n, d_{n+1})$ (resp. le pixel $f_{n2}(a, b, d_1, d_2, \ldots, d_n, d_{n+1})$) en respectant la règle de connexion $r_{2n-1}(d_n, \theta_n)$ (resp. la règle de connexion $r_{2n}(d_n, \theta_n+180°)$), tout en respectant aussi les conditions $C_{2^n-1} \ldots C_{2^{n+1}-2}$ pour chaque valeur de n (n = 1, 2, 3, etc.). Les conditions $C_{2^n-1} \ldots C_{2^{n+1}-2}$ portent sur les contraintes que doivent respecter a, b, d_1, d_2, … , d_n et la taille de la fenêtre de l'image. Ces contraintes sont capitales dans le traitement des pixels situés en bordure de l'image ou en bordure de la fenêtre de l'image. L'ordre du paramètre de texture à évaluer n'est rien d'autre que la profondeur de l'arbre générique. Cet ordre est égal ici à n+1. Sur la figure 4, on présente l'arbre générique pour le calcul des paramètres de texture d'ordre deux et sur la figure 5, on présente l'arbre générique pour le calcul des paramètres de texture d'ordre trois, pour différentes règles de connexion. Les conditions $C_{2^n-1} \ldots C_{2^{n+1}-2}$ sont détaillées sur chacune de ces figures.

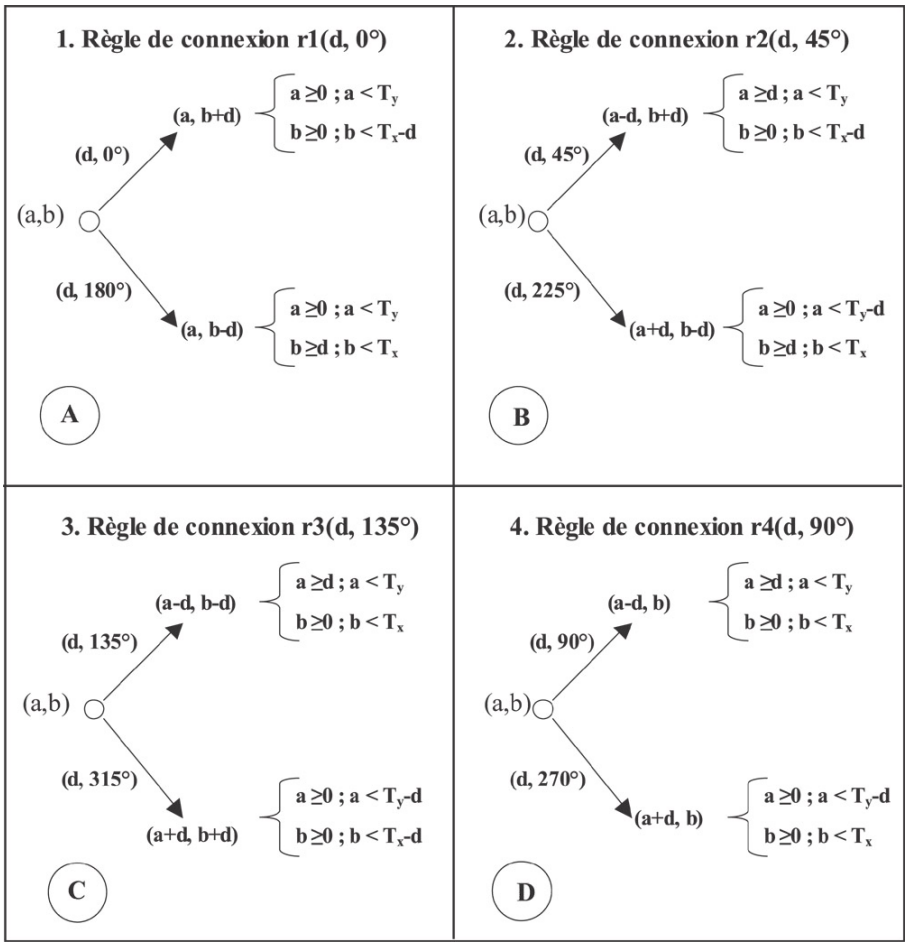


FIGURE 4 Exploration de l'arbre générique pour le calcul des paramètres de texture d'ordre deux. *Exploration of the generic tree for the calculation of the texture parameters of order two.*

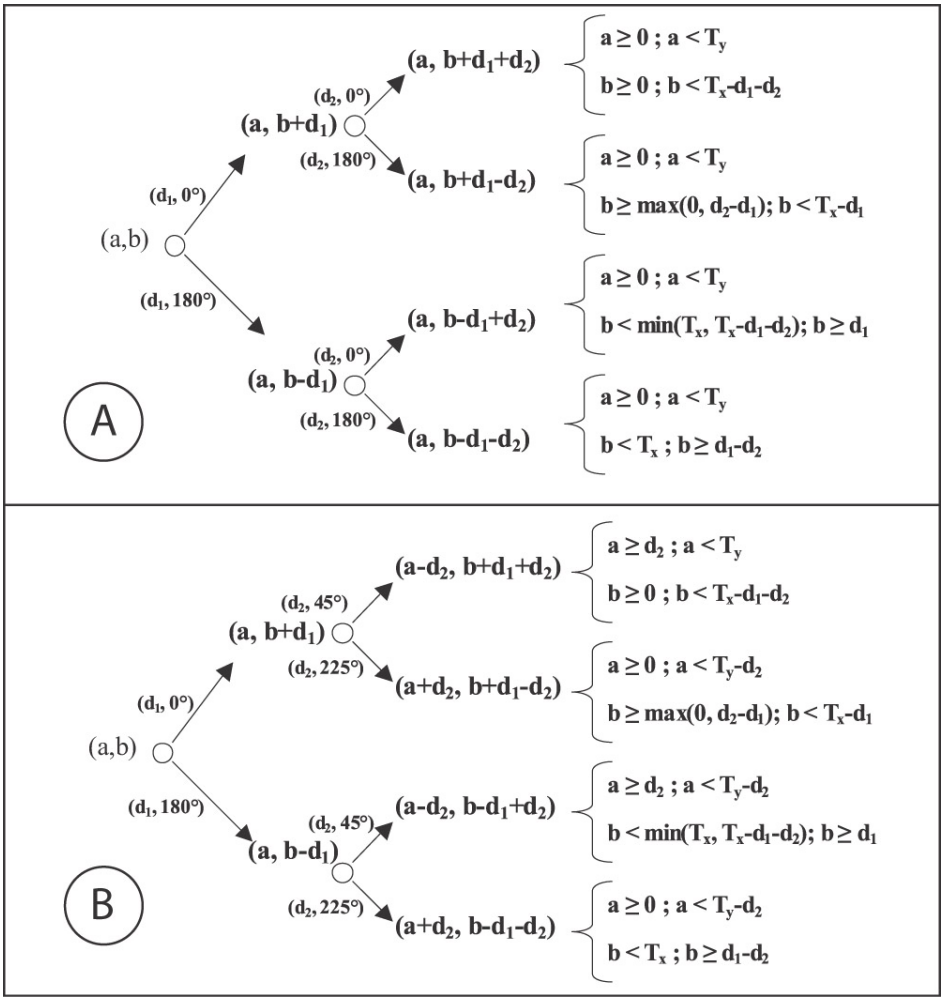


FIGURE 5 Exploration de l'arbre générique pour le calcul des paramètres de texture d'ordre trois. A : règle de connexion r1 (d_1, d_2, 0 °, 0 °) ; B : règle de connexion r2 (d_1, d_2, 0 °, 45 °). *Exploration of the generic tree for the calculation of the texture parameters of order three. A : connection rule r1 (d_1, d_2, 0 °, 0 °) ; B : connection rule r2 (d_1, d_2, 0 °, 45 °).*

4.1.2. Évaluation des paramètres de texture à partir de l'arbre générique

Intéressons nous par exemple, à l'évaluation du paramètre de texture « dissymétrie » à l'ordre deux en un pixel quelconque d'une image. La formulation classique de ce paramètre s'exprime par l'équation 2 :

$$\text{Diss2} = \sum_{i=0}^{N_g} |i-j| \times p(i,j) \qquad (2)$$

où N_g est le niveau de gris maximal dans la fenêtre de l'image et p(i,j) est la fréquence d'occurrence du couple de niveaux de gris (i,j) dans l'image, respectant la règle de connexion R(d,θ). Ce paramètre peut encore s'exprimer par l'équation 3 :

$$\text{Diss2} = \sum_{i=0}^{N_g} \left(\sum_{j=0}^{N_g} \underbrace{|i-j| + |i-j| + |i-j| + \ldots + |i-j|}_{p(i,j) \text{ fois}} \right) \qquad (3)$$

La nouvelle approche que nous proposons comporte les étapes suivantes :

1) Créer un vecteur DISS[N_g + 1] (c'est-à-dire un vecteur de taille N_g + 1) à une dimension telle que la relation ci-dessous (équation 4) soit vérifiée :

$$\text{Diss2} = \sum_{i=0}^{N_g} \text{DISS}[i] \qquad (4)$$

Cela veut dire que le vecteur DISS[ ]se calcule par l'expression suivante (équation 5) :

$$\text{Diss2} = \sum_{j=0}^{N_g} \left(\underbrace{|i-j| + |i-j| + |i-j| + \ldots + |i-j|}_{p(i,j) \text{ fois}} \right) \quad (5)$$

2) Initialiser le vecteur DISS[ ] à 0 (on affecte la valeur 0 à toutes les entrées du vecteur) ;

3) Pour l'entrée i du vecteur DISS[ ], on ajoute la quantité $|i-j|$, à condition que le pixel j existe et respecte la règle de connexion R(d,θ).

i étant le pixel en position (a,b) sur l'arbre générique (figure 3), si la condition C_1 (resp. la condition C_2) est vérifiée j sera le pixel en position $f_1(a, b, d_1)$ (resp. en position $g_1(a, b, d_1)$). En d'autres termes, l'entrée i du vecteur DISS[ ] sera évaluée de la manière suivante (équation 6) :

$$\begin{aligned} \text{DISS}[i] = |i - \text{NG}(a,b)| + |i - \text{NG}(f_1(a, b, d_1))| \\ + |i - \text{NG}(g_1(a, b, d_1))| \end{aligned} \quad (6)$$

NG(a,b), NG($f_1(a, b, d_1)$) et NG($g_1(a, b, d_1)$) étant respectivement les niveaux de gris des pixels positionnés en (a,b), $f_1(a, b, d_1)$ et $g_1(a, b, d_1)$ sur l'arbre générique.

4) Répéter le processus de l'étape 3 pour toutes les entrées j du vecteur DISS[ ], avec j = 0,1, … , N_g. Ces entrées j représentent les niveaux de gris des pixels se trouvant dans la fenêtre image considérée. Il s'agit de la fenêtre image centrée sur le pixel courant, c'est-à-dire le pixel pour lequel on veut déterminer la valeur du paramètre de texture.

5) Faire la somme de tous les éléments du vecteur DISS[ ]. Cette somme représente la valeur du paramètre de texture pour le pixel courant (équation 7) :

$$\text{Diss2} = \sum_{i=0}^{N_g} \text{DISS}[j] \quad (7)$$

Les résultats produits par cette nouvelle approche et ceux produits par l'approche classique sont exactement les mêmes, mais la méthode classique nécessite l'évaluation de la matrice de cooccurrence qui est très coûteuse en temps de calcul et en espace mémoire de l'ordinateur. Ceci est dû au fait que la nouvelle formulation nécessite uniquement l'évaluation d'un vecteur à une dimension dont la taille est égale au côté de la matrice de cooccurrence. De plus, l'évaluation de la matrice de cooccurrence fait intervenir beaucoup d'opérations de multiplications imbriquées dans de multiples sommations, ce qui est coûteux en temps machine. Il est important de remarquer que cette complexité de calcul augmente avec l'ordre du paramètre de texture.

4.1.3. Exemple

Considérons par exemple la fenêtre image ci-dessous, centrée en un pixel de niveau de gris 2. Évaluons le paramètre de texture « dissymétrie » sur cette fenêtre avec la règle de connexion R(2,45°).

0	1	2	4	3
4	0	0	2	3
4	4	2	0	1
4	3	2	1	2
4	2	4	4	4

a) Approche nouvelle

Le niveau de gris maximal de cette fenêtre image est 4. On crée donc un vecteur DISS[ ] de taille 5 qu'on initialise à zéro.

On calcule les 5 valeurs suivantes : DISS[0], DISS[1], DISS[2], DISS[3] et DISS[4] suivant l'équation (6), en respectant la règle de connexion R(2,45°) et les conditions de voisinage $C_{2^n-1} \ldots C_{2^{n+1}-2}$, avec n = 1 (ordre 2). On obtient donc les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \text{DISS}[0] &= |0-4| + |0-2| = 6 \\ \text{DISS}[1] &= |1-4| = 3 \\ \text{DISS}[2] &= |2-4| + |2-3| + |2-4| + |2-3| + |2-3| + |2-0| = 9 \\ \text{DISS}[3] &= |3-2| + |3-2| + |3-2| = 3 \\ \text{DISS}[4] &= |4-4| + |4-2| + |4-4| + |4-0| + |4-2| + |4-1| = 11 \end{aligned}$$

Le paramètre Diss[2] est égal à la somme des éléments du vecteur DISS[ ] selon l'équation 7. On obtient :

$$\text{Diss}[2] = \text{DISS}[0] + \text{DISS}[1] + \text{DISS}[2] + \text{DISS}[3] + \text{DISS}[4] = 32$$

b) Approche classique

Faisons maintenant le même calcul par l'approche classique de la matrice de cooccurrence des niveaux de gris. Dans ce cas, on calcule la dissymétrie dans la fenêtre considérée par la formule classique :

$$\text{Diss2} = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} |i-j| \times P(i,j),$$

P(i,j) étant le nombre de fois que la paire de niveaux de gris (i,j) apparaît dans la fenêtre, en respectant la règle de connexion R(2,45°). On obtient le résultat suivant :

$$\begin{aligned}
\text{Diss2} = \quad & (|0-1| \times P_{01}) + (|0-2| \times P_{02}) \\
& + (|0-3| \times P_{03}) + (|0-4| \times P_{04}) \\
& + (|1-0| \times P_{10}) + (|1-2| \times P_{12}) \\
& + (|1-3| \times P_{13}) + (|1-4| \times P_{14}) \\
& + (|2-0| \times P_{20}) + (|2-1| \times P_{21}) \\
& + (|2-3| \times P_{23}) + (|2-4| \times P_{24}) \\
& + (|3-0| \times P_{30}) + (|3-1| \times P_{31}) \\
& + (|3-2| \times P_{32}) + (|3-4| \times P_{34}) \\
& + (|4-0| \times P_{40}) + (|4-1| \times P_{41}) \\
& + (|4-2| \times P_{42}) + (|4-3| \times P_{43}) \\
& = [(1 \times 0) + (2 \times 1) + (3 \times 0) + (4 \times 1)] \\
& + [(1 \times 0) + (1 \times 0) + (2 \times 0) + (3 \times 1)] \\
& + [(2 \times 1) + (1 \times 0) + (1 \times 3) + (2 \times 2)] \\
& + [(3 \times 0) + (2 \times 0) + (1 \times 3) + (1 \times 0)] \\
& + [(4 \times 1) + (3 \times 1) + (2 \times 2) + (1 \times 0)]
\end{aligned}$$

Soit, Diss2 = 6 + 3 + 9 + 3 + 11 = 32.

On voit donc qu'on obtient le même résultat qu'avec la nouvelle approche. Cependant, l'approche classique est beaucoup plus complexe en terme de calculs.

4.1.4. Formulation des paramètres de texture d'ordre n > 1 à partir de l'arbre générique

Sur le tableau 2, on présente les expressions de quelques paramètres texture formulés par la nouvelle méthode à l'ordre $n > 1$. On y présente aussi les formulations classiques correspondantes.

4.2. CLASSIFICATION DES IMAGES DE TEXTURE

Les images de texture ont été classifiées par une méthode de classification non dirigée ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) (Jahne, 1991). Cette méthode calcule les moyennes des classes uniformément réparties dans l'espace des niveaux de gris et regroupe les pixels restants de façon itérative en utilisant la technique de la distance minimale. À chaque itération on recalcule les moyennes et on classifie à nouveau les pixels en tenant compte des nouvelles moyennes. La fusion, l'éclatement ou l'annulation itératifs des classes sont effectués à base des paramètres d'entrée fixant certains seuils. Tous les pixels sont associés à la classe qui leur est la plus proche à moins qu'un écart-type ou une distance seuil soit spécifié, et auquel cas certains pixels pourraient être non classifiés s'ils ne remplissent pas le critère choisi. Ce processus continue jusqu'à ce que le nombre de pixels dans chaque classe ne change plus d'une valeur supérieure au seuil fixé pour le nombre de pixels par classe, ou jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint.

5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Sur la figure 6, on présente deux courbes de texture mesurées au point de coordonnées (721, 650) en (x,y) sur les deux images RSO (points encerclés sur la figure 2). Ce point correspond à une zone de cultures dans la région de Tiko. Le choix de cette zone se justifie par le fait que nous en avons la connaissance sur le terrain et pourrons donc mieux interpréter le changement de l'allure des courbes de texture sur les deux images RSO. La courbe de texture en un point donné est une représentation graphique ayant en abscisse des numéros correspondant à des paramètres de texture et, en ordonnée, les valeurs de ces paramètres mesurés au point ciblé. Quatorze paramètres de texture ont été utilisés pour construire ces courbes. Il s'agit des paramètres suivants : la différence inverse, la dissimilarité, l'entropie, le contraste, le second moment angulaire, le moment différentiel inverse, la corrélation, la covariance, la variance, la probabilité maximale, le troisième moment angulaire, l'importance des petits nombres, l'importance des grands nombres, l'importance de la profondeur. Le détail des expressions de ces paramètres et leur signification peuvent être trouvés dans Haralick et Shanmugam (1973), Anys et He (1995), et Tonyé et al. (2000).

Sur la figure 7, on présente les images de texture issues du paramètre somme pour les deux images RSO de ERS-1 et de ERS-2, acquises sur le site du mont Cameroun respectivement le 07 novembre 1998 et le 15 mars 2003. Ce paramètre a été choisi pour sa fidélité à reproduire les classes d'occupation du sol telles qu'elles se présentent en réalité sur le site d'étude. Sur cette figure, les images de texture sont présentées pour les ordres deux, trois, quatre et cinq.

TABLEAU 2 Formulation classique et nouvelle formulation des paramètres de texture d'ordre $n \geq 2$. *Classical formulation and new formulation of the texture parameters of order $n \geq 2$.*

Paramètre de texture	Formulation classique	Nouvelle formulation	Remarque
Somme	$M = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{i_2=0}^{N_g} \dots \sum_{i_n=0}^{N_g} \sum_{u=1}^{n} (n - u + 1)\, i_u \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$	$M = \sum_{i=0}^{N_g} m[i]$ avec $m[i] = \sum_{u=1}^{n} (n - u + 1)\, i_u$	p est le nombre de branches possible reliant des nœuds distincts de l'arbre générique à la profondeur n, à partir du noyau i.
Différence inverse	$DINV = \sum_{i_1=0}^{N_g} \sum_{i_2=0}^{N_g} \dots \sum_{i_n=0}^{N_g} \left(\frac{P_{i_1 i_2 \dots i_n}}{1 + \sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} \lvert i_u - i_v \rvert} \right)$	$DINV = \sum_{i=0}^{N_g} d(i)$ avec $d(i) = \frac{1}{1 + \sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} \lvert i_u - i_v \rvert}$	i_u et i_v sont les niveaux de gris de paires de nœuds distincts possibles sur l'arbre générique, à la profondeur n, à partir du noyau dont le niveau de gris est $i_1 = 1$.
Dissimilarité	$DISS = \sum_{i_1=0}^{N_g} \sum_{i_2=0}^{N_g} \dots \sum_{i_n=0}^{N_g} \left(\sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} \lvert i_u - i_v \rvert \right) \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$	$DISS = \sum_{i=0}^{N_g} d_s(i)$ avec $d_s(i) = \sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} \lvert i_u - i_v \rvert$	i_u et i_v sont les niveaux de gris de paires de nœuds distincts possibles sur l'arbre générique, à la profondeur n, à partir du noyau dont le niveau de gris est i_u et $i_1 = i$.
Contraste	$CONT = \sum_{i_1=0}^{N_g} \sum_{i_2=0}^{N_g} \dots \sum_{i_n=0}^{N_g} \left(\sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} (i_u - i_v)^2 \right) \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$	$CONT = \sum_{i=0}^{N_g} d_c(i)$ avec $d_c(i) = \sum_{u=1}^{n} \sum_{v=u+1}^{n-1} (i_u - i_v)^2$	i_u et i_v sont les niveaux de gris de paires de nœuds distincts possibles sur l'arbre générique, à la profondeur n, à partir du noyau dont le niveau de gris est i_u et $i_1 = i$.

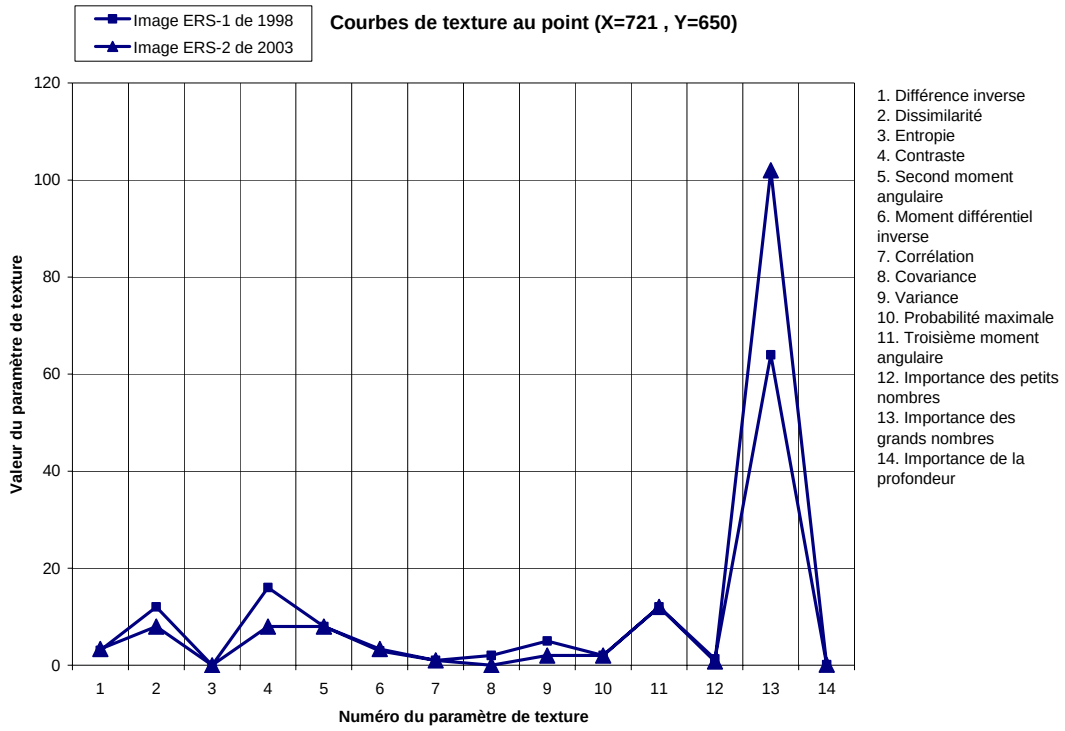


FIGURE 6 Courbes de texture mesurées au point de coordonnées (x = 721, y = 650) sur les images RSO. *Texture curves measured at the coordinate point (x = 721, y = 650) on the SAR images.*

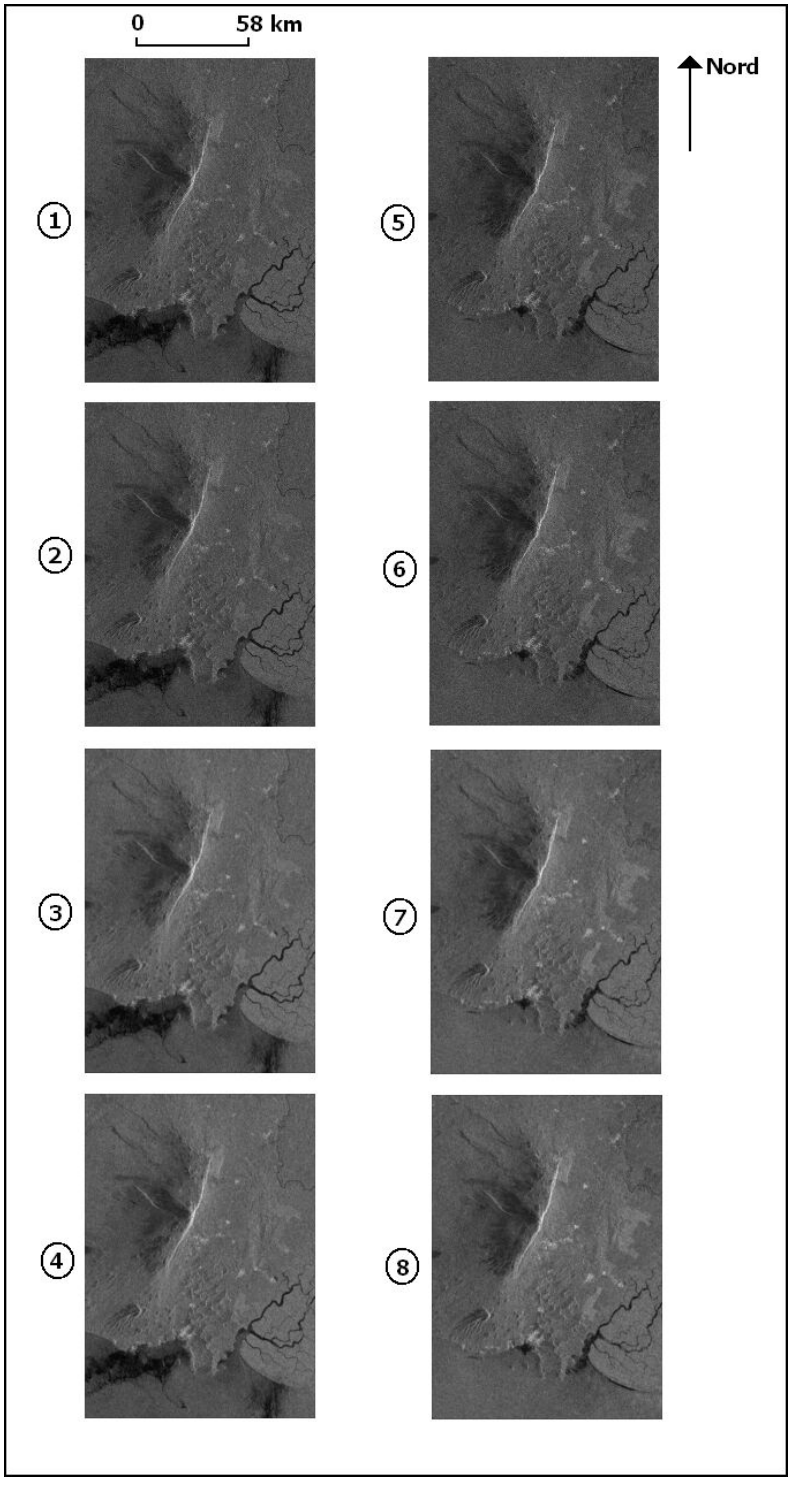


FIGURE 7 Images de texture évaluées aux ordres 2, 3, 4, 5 et obtenues avec le paramètre somme sur les images RSO de ERS-1 et RSO de ERS-2 du site d'étude. *Texture images evaluated at the orders 2, 3, 4, 5 and obtained with the sum parameter on the ERS-1 and ERS-2 SAR images of the study site.*

Sur la figure 8, on montre les histogrammes des images de texture présentées sur la figure 7 et, sur la figure 9, se trouvent les résultats de la classification de ces images de texture par la méthode de classification ISODATA. Les images de texture ont été classifiées en trois grandes classes d'occupation du sol, à savoir : (1) les vagues de mer ou la forêt dense humide ; (2) la mangrove ou les cultures, ou la végétation de montagne ; (3) l'eau calme ou les coulées de lave. Les vagues de mer ont parfois une réponse spectrale semblable à celle de la forêt dense humide, à cause des propriétés du signal radar qui est sensible à la rugosité de surface. C'est pour cette raison que ces deux entités ont été regroupées en une seule grande classe d'occupation du sol. Tout ce qui ressemble à de la végétation (mangrove, culture, végétation de montagne) a aussi été regroupé en une seule grande classe à cause de la similitude des réponses spectrales. La troisième grande classe d'occupation du sol concerne l'eau calme et les coulées de lave. En effet, les surfaces formées par les coulées de lave ont tendance à être planes sur le site d'étude et elles ne renvoient presque pas de signal vers le capteur RSO embarqué sur le satellite. Il en est de même de l'eau calme, c'est-à-dire l'eau de la mer quand elle n'est pas agitée. C'est pour cette raison que ces deux entités (eau calme et coulées de lave) ont été regroupées en une seule grande classe d'occupation du sol. Le niveau de reflectance de telles surfaces est presque nul sur l'image RSO.

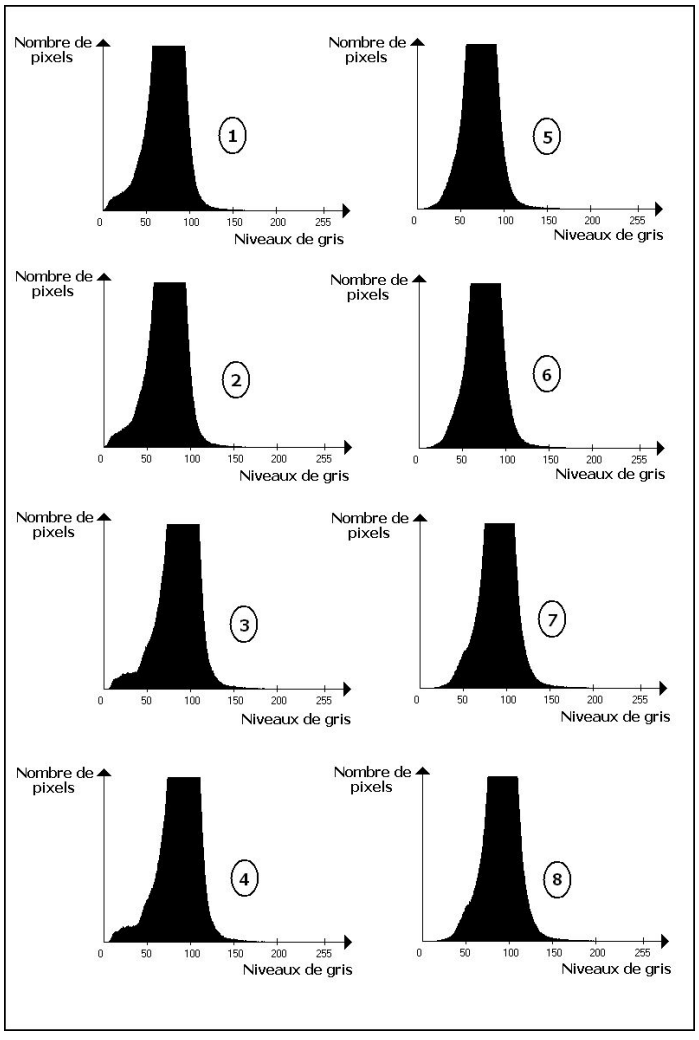


FIGURE 8 Histogrammes des images de texture présentées sur la figure 7. *Histograms of the texture images presented on figure 7.*

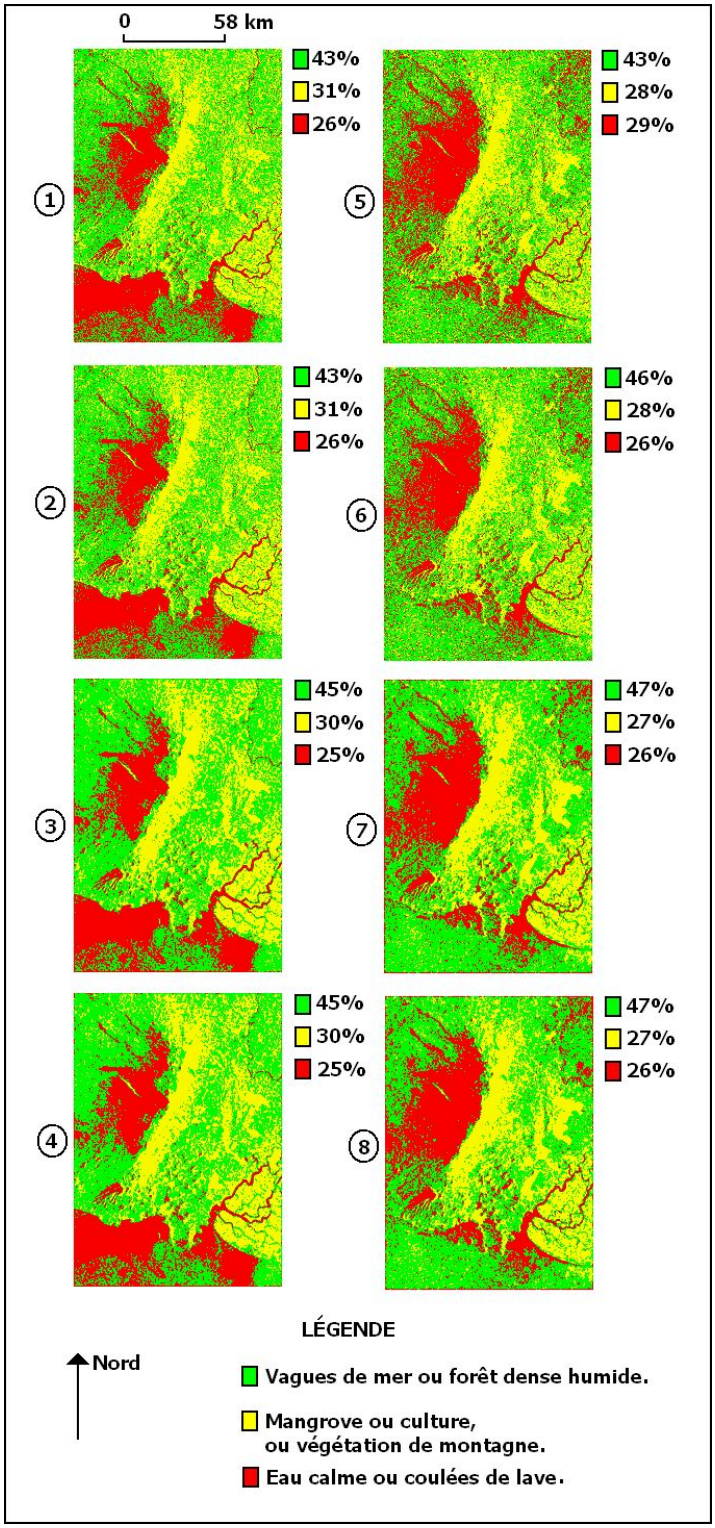


FIGURE 9 Résultats de la classification des images de textures de la figure 7 par la méthode de classification non dirigée ISODATA. *Results of the classification of the figure 7 texture images using the unsupervised ISODATA classification method.*

La figure 10 présente une carte d'occupation du sol dans la région du mont Cameroun. Cette carte a été utile dans le choix du paramètre de texture le plus approprié pour effectuer la classification des images RSO de ERS-1 et ERS-2, et pour la confection de la légende des images classifiées de la figure 9.

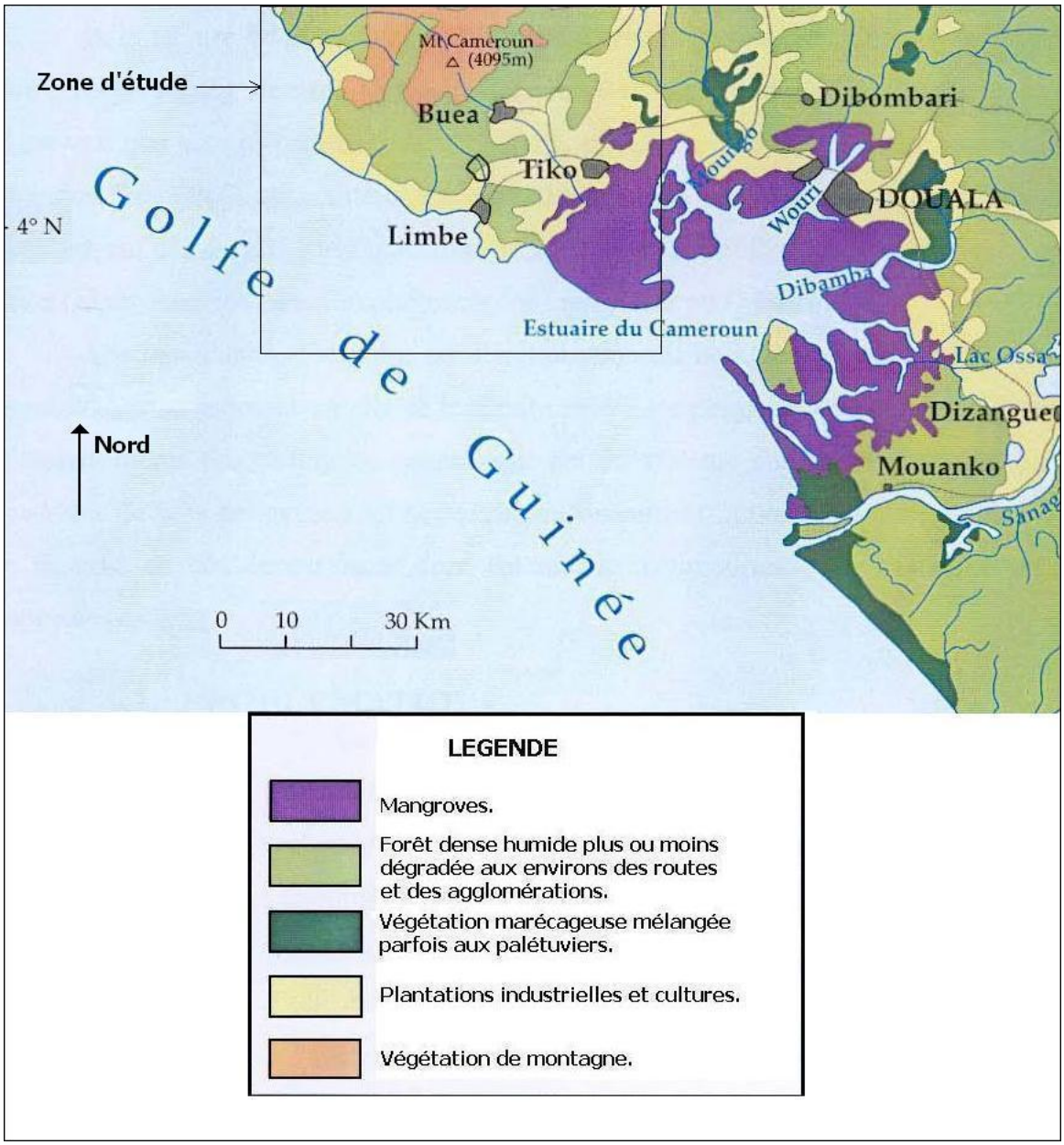


FIGURE 10 Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (Din et Blasco, 1998). *Land use map of the study area (Din et Blasco, 1998).*

6. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'allure des courbes de texture de la figure 6 montre que la courbe de texture de l'image ERS-1 de 1998 est en général au dessus de celle de l'image ERS-2 de 2003, sauf pour le paramètre de texture « importance des grands nombres ». En effet, pour la plupart des paramètres de texture considérés, la valeur du paramètre est proportionnelle à la différence des niveaux de gris de

pixels voisins. Or, l'image de 1998 a été acquise en saison pluvieuse (novembre) où la végétation est en pleine croissance. Il y a donc une grande variété de réponses spectrales au niveau de la végétation du sol pendant cette saison. Ceci explique probablement la forte valeur des paramètres de texture mesurés sur le site d'étude pendant cette période. Le phénomène contraire est observé sur le même site en mars 2003 où la saison est totalement sèche. En saison sèche, la couverture du sol a une tendance uniforme sur le point où les paramètres de texture ont été mesurés. Il s'agit de la zone des plantations de la ville de Tiko, où l'on trouve de vastes bananeraies et de grandes palmeraies.

Les images de texture présentées sur la figure 7 montrent l'avantage d'utiliser des ordres élevés lors de l'évaluation des paramètres de texture. En effet, on y voit que la clarté et la distinction des éléments de surface sont de plus en plus croissantes au fur et à mesure que l'ordre du paramètre de texture augmente, aussi bien pour l'image de 1998 que pour celle de 2003. Par exemple, la différence visuelle en netteté est très prononcée entre l'image de texture d'ordre deux (image numéro 5) et l'image de texture d'ordre cinq (image numéro 8), pour l'image ERS-2 de l'an 2003. Les histogrammes présentés sur la figure 8 confirment l'apparence sombre de l'image de 1998 par rapport à celle de 2003. En effet, les histogrammes issus de l'image de 1998 montrent une concentration de pixels autour de niveaux de gris de faibles valeurs (inférieures à 25), contrairement à ceux de l'image de 2003. L'explication physique de ce phénomène est que le signal rétrodiffusé radar est sensible à l'humidité du sol. Ce signal est faible quand le sol est très humide et c'est le cas du signal observé sur l'image ERS-1 de novembre 1998, acquise en saison pluvieuse. On remarque aussi une tendance à la formation d'un regroupement de pixels autour du niveau de gris de valeur 50 au fur et à mesure que l'ordre du paramètre de texture augmente sur l'image de 2003 (figure 8). Cette tendance confirme l'amélioration de la qualité discriminatoire des paramètres de texture au fur et à mesure que leur ordre augmente.

Les résultats de la classification présentés sur la figure 9 montrent l'augmentation de l'étendue des coulées de lave sur l'image de 2003 par rapport à l'image de 1998. Ce résultat confirme les deux grandes éruptions volcaniques qu'a connu le mont Cameroun en 1999 et en l'an 2000, périodes situées entre les deux périodes d'acquisition des images faisant l'objet de la présente étude. Les images classifiées confirment aussi la netteté des résultats en fonction de l'ordre de la classification. Par exemple, les entités sont beaucoup plus distinctes sur l'image de texture d'ordre 5 classifiée (image numéro 4 de la figure 9) par rapport à celles apparaissant sur l'image de texture d'ordre 2 classifiée (image numéro 1 de la figure 9).

Sur les tableaux 3 et 4, on montre la performance de la nouvelle méthodologie mise en œuvre pour la production des images de texture. Cette méthode a été développée et testée successivement à l'ordre deux, à l'ordre trois, à l'ordre quatre et à l'ordre cinq avec deux images radar à synthèse d'ouverture de ERS-1 et de ERS-2, de taille 986 × 1 390 pixels, sur un ordinateur ayant une mémoire vive de 352 mégaoctets et un processeur Pentium de 2,4 gigahertz de vitesse. Les résultats obtenus montrent que, pour l'évaluation du paramètre de texture somme d'ordre deux, en considérant une fenêtre de l'image de taille 7 × 7, la nouvelle méthode de calcul est 10 fois plus rapide que la méthode classique de calcul des matrices de co-occurrence des niveaux de gris. À l'ordre trois, elle est 19 fois plus rapide et à l'ordre quatre, elle est 12 000 fois plus rapide. Le degré de performance de la nouvelle méthode par rapport à l'ancienne augmente avec l'ordre du paramètre de texture à cause de la complexité croissante du calcul. Cette complexité de calcul est elle même reliée à l'imbrication de plusieurs sommations dont le nombre croît avec l'ordre du paramètre de texture. Des tests ont été faits à l'ordre 5, pour des tailles de fenêtre variant de 3 × 3 à 15 × 15 (voir tableau 4), et on remarque que la performance de la nouvelle méthode décroît quand la taille de la fenêtre augmente. La nouvelle méthode reste tout de même beaucoup plus performante que la méthode classique, quelques soient les paramètres utilisés. Des essais ont été faits pour des ordres élevés ($n \geq 6$) et pour diverses valeurs de niveaux de gris de l'image ($NG_{max} = 8, 16, 32, 64, \ldots$), mais il a été constaté qu'à partir de l'ordre 6 et à partir de $NG_{max} = 16$, le temps d'exécution des algorithmes devient prohibitif (il faudrait laisser tourner la machine plusieurs jours pour pouvoir observer quelque résultat). Cette conclusion, bien que n'étant pas tirée sur la même base que celle de Li Wang (1994), vient en appui à celle-ci, car on y conclut que les ordres supérieurs à 5 n'améliorent pas le niveau de discrimination.

TABLEAU 3 Performances de la nouvelle méthode de calcul des paramètres de texture par rapport à la méthode classique de calcul de la matrice de co-occurrence des niveaux de gris, pour une taille de fenêtre de 7 × 7. *Performances of the new texture parameter method of calculation in relation to the classical method of calculation of the grey-level co-occurrence matrix for a 7 × 7 window size.*

Paramètre de texture	Ordre du paramètre	Taille de l'image (pixels)	Méthode de calcul	Taille de fenêtre	Temps d'exécution	Ratio des temps
Somme	5	986 × 1 390	nouvelle	7 × 7	15,547 s	1/958
Somme	5	986 × 1 390	classique	7 × 7	14 897,1 s	
Somme	4	986 × 1 390	nouvelle	7 × 7	7,969 s	1/12110
Somme	4	986 × 1 390	classique	7 × 7	96 507,3 s	
Somme	3	986 × 1 390	nouvelle	7 × 7	4,032 s	1/19
Somme	3	986 × 1 390	classique	7 × 7	78,640 s	
Somme	2	986 × 1 390	nouvelle	7 × 7	2,359 s	1/10
Somme	2	986 × 1 390	classique	7 × 7	24,875 s	

TABLEAU 4 Performances de la nouvelle méthode de calcul des paramètres de texture par rapport à la méthode classique de calcul de la matrice de co-occurrence des niveaux de gris, à l'ordre 5, pour des tailles de fenêtre variant de 3 × 3 à 15 × 15. *Performances of the new texture parameter method of calculation in relation to the classical method of calculation of the grey-level co-occurrence matrix for a window size varying from 3 × 3 to 15 × 15.*

Paramètre de texture	Ordre du paramètre	Méthode de calcul	Taille de fenêtre	Temps d'exécution	Ratio des temps
Somme	5	nouvelle	3 × 3	78 ms	1/375
Somme	5	classique	3 × 3	29 s 265 ms	
Somme	5	nouvelle	5 × 5	125 ms	1/241
Somme	5	classique	5 × 5	30 s 125 ms	
Somme	5	nouvelle	7 × 7	172 ms	1/169
Somme	5	classique	7 × 7	29 s 219 ms	
Somme	5	nouvelle	9 × 9	234 ms	1/125
Somme	5	classique	9 × 9	29 s 250 ms	
Somme	5	nouvelle	11 × 11	344 ms	1/91
Somme	5	classique	11 × 11	31 s 438 ms	
Somme	5	nouvelle	13 × 13	437 ms	1/72
Somme	5	classique	13 × 13	31 s 516 ms	
Somme	5	nouvelle	15 × 15	547 ms	1/58
Somme	5	classique	15 × 15	31 s 532 ms	

7. CONCLUSION

Par ce travail, on a présenté une nouvelle méthodologie de calcul des paramètres de texture en faisant une généralisation à l'ordre $n \geq 2$. Cette méthode est très utile lorsqu'on doit traiter des images RSO de très grande taille. En effet, malgré la performance des ordinateurs actuels, le calcul des paramètres de texture demeure une opération très consommatrice en temps de calcul, surtout lorsqu'on voudrait produire des images de texture d'un ordre supérieur à deux. La méthodologie mise en œuvre dans ce travail a permis de faire une étude comparative de l'occupation du sol dans la région du mont Cameroun entre le 07 novembre 1998 et le 15 mars 2003. L'augmentation de la surface occupée par les coulées de lave entre ces deux périodes a été mise en évidence, confirmant ainsi l'apparition des éruptions volcaniques survenues sur ce site en 1999 et en

l'an 2000. Il est prévu de faire une étude comparative des deux images précédentes par la technique de l'interférométrie radar dans le but de déterminer avec précision certaines données telles que le déplacement des laves au cours des éruptions volcaniques survenues. Une autre perspective intéressante consisterait à faire un essai de construction d'un modèle numérique d'altitude sur ce même site du mont Cameroun en utilisant la technique de l'interférométrie. Un tel modèle pourrait être utile pour la détermination de la direction des coulées de lave sur les flancs de montagne.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du concours de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) (projet « Action de Recherche en Réseau » P2-2092RR515 du Réseau Télédétection de l'AUF). Nos remerciements s'adressent aussi à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour la fourniture d'images RSO des satellites ERS-1/2."

Références

Akono, A., Tonyé, E., Ndi Nyoungui, A., Rudant, J.P. (2003) Nouvelle méthodologie d'évaluation des paramètres de texture d'ordre trois. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, n°9, 10 mai 2003, p. 1957-1967.

Anys, H. and He, D.-C. (1995) Evaluation of textural and multipolarization radar features for crop classification. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 23, p. 1169-1181.

Din, N. et Blasco, F. (1998) Mangroves du Cameroun, statut écologique et déforestation. In Géosciences au Cameroun, (Eds.) J.P. Vicat, P. Bilong, Presses Univ. Cameroun, Yaoundé, p. 15-22.

Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. (1973) Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, n°6, p. 610 - 621.

Jahne, B. (1991) Digital Image Processing, New-York : Springer-Verlag, 383 p.

Kourgli, A. et Aissa, B. (1999) Nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture appliqué à la classification d'images satellitaires. Actes des 8e Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), Lausanne, 22 - 25 novembre 1999, AUPELF-UREF, Montréal, p. 385-394.

Tonye, E., Akono, A. et Ndi Nyoungui, A. (2000) Le traitement des images de télédétection par l'exemple. Gordon & Breach Sciences Publishers, Paris, ISBN 90-5699-330-5, 179 p.

Wang, L. (1994) Vector choice in the texture spectrum approach. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, n°18, p. 3823–3829.