

Bulletin des Sciences Géographiques

Édité et publié par l'Institut
National de Cartographie
et de Télédétection

n° 19



Port de Tenes vue par QuickBird Digital Globe™ distribué par Eurimage 2006



INCT BULLETIN DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES

N° 19
Avril 2007

Publication semestrielle, de l'Institut
National de Cartographie et de
Télédétection (INCT), Algérie.

Fondée en Octobre 1997
N°19 - Avril 2007
ISSN 1112-3745

Responsable de la revue : INCT

Éditeur : Centre de la Documentation et de
la Conservation de l'Information
Géographique, INCT, Alger.

Adresse : Bulletin des Sciences Géographiques,
INCT, 123, rue de Tripoli Hussein Dey 16040,
BP 430, Alger, Algérie.
Tél : (021) 47 09 20
(021) 47 00 30
Fax : (021) 23 43 81
(021) 47 00 29
E-mail : inct99@wissal.dz

Publicité :

ANT Vertriebs GmbH
Postfach 210403 80764
Munich Allemagne.

Tirage :

400 Exemplaires

Comité de Rédaction :

- Mr. ABDEDOU Mohamed
Sous Directeur des Travaux Spécifiques
et Arts Graphiques, INCT (Président).
- Mr. DROUAI Fethallah
Chef du CDCIG, INCT.
- Mr. DEGAICHA Fethi
Master, CT, INCT.
- Mr. CHOUDER Med Tahar
Ingénieur, SDTS-AG, INCT.

Comité de Lecture :

- Mr. ABDELLAOUI Hassen
Magister, INCT, (Président)
- Mr. BELBACHIR Mohamed Faouzi
Professeur, USTO.
- Mr. OMRANE Naceur
PHD, INCT.
- Mr. AYADI Abdelkrim
Directeur de recherche, CRAAG.
- Mr. KAHLOUCHE Salem
Directeur de recherche, CNTS.
- Mr. OUGUINI Rachid
Maître de recherche, ASAL.
- Mr. GHEZALI Boualem
Chargé de recherche, CNTS.
- Mr. SI MOHAMED Mohamed Arezki
Chargé de recherche, CNTS.
- Mr. HADDAD Mahdi
Magister, INCT.
- Mr. BOURIAHI Djelloul
Ingénieur, INCT.

Sommaire / Contents

Pages

DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE UTILISATEUR DE GESTION D'UNE BASE DE DONNEES GRAVIMETRIQUES.....	2
<i>N. BENARABA , F. TOUATI</i>	
CARTOGRAPHIE DE LA DISTRIBUTION DES STOCKS SEDIMENTAIRES DES FONDS DU GOLFE D'ARZEW.....	6
<i>M. CHACHOUA , AMAR YUCEF et A. KERFOUF</i>	
THE RELATIONSHIP BETWEEN LITHOLOGY AND SLOPE MORPHOLOGY IN THE TUCSON MOUNTAINS, ARIZONA.....	14
<i>K. KHANCHOUL , R. ALTSCHUL et R. REEVES</i>	
NOUVELLE APPROCHE DU RESEAU ARTMAP FLOU : APPLICATION A LA CLASSIFICATION MULTI SPECTRALE DES IMAGES SPOT XS DE LA BAIE D'ALGER.....	28
<i>F. ALILAT, S. LOUMI, H. MERRAD et B. SANSAL</i>	
UTILISATION DES SIGNATURES DE TEXTURE D'ORDRE ELEVÉ POUR UNE MEILLEURE DISCRIMINATION DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL SUR UNE IMAGE RADAR A SYNTHÈSE D'OUVERTURE.....	38
<i>E. TONYE , A. AKONO, J-P. RUDANT, C. DZEPA et N. TALLA TANKAM</i>	
SPOT5 POUR LA DETECTION D'URBANISATION.....	52
<i>V. LACROIX, M. IDRISSE, A. HINCQ, H. BRUYNSEELS et O. SWARTENBROEKX</i>	

Le Bulletin des Sciences Géographiques est indexé dans la
*Bibliographie Internationale Geoabstracts et International
Bibliography of the Social Sciences*

© 2007

Tout droit réservé pour tous pays,
textes, illustrations, photos.

Développement d'une interface utilisateur de gestion d'une base de données gravimétriques

N. Benaraba, F. Touati

Centre National des Techniques Spatiales/Division Géodésie
BP 13, Arzew, 31200, ALGERIE – Fax : 041 47 36 65 -E-Mail: n_benaraba@yahoo.fr

ملخص: في تطبيقنا هذا، إن تسيير المعطيات الجرافيمترية BDG مؤمنة بتطوير واجهات مع هدف تزويد إلى المستخدمين أدوات بصرية من تعريفات وإدارة المعطيات، و يكون هذا بشكل كامل قدر الإمكان. وعن طريق هذه الواجهات يتم ترجمة الخصائص المستخدمين إلى أفعال قابلة للتنفيذ أي يهدف إلى تحقيق مختلف العمليات على (صنف المعلومات مفيدة من النقط الجرافيمترية، تحديث العمليات، تنظيم وحجز، إستشارة البحث عن المعلومات، نشر للورقة الوصفية للنقطة الجرافيمترية، إلخ..). وفي النهاية نقوم بتنفيذ معالجة خاصة للمعطيات وخاصة تخفيضات الرئيسية الجرافيمترية، حساب الجاذبية الناظمية وفقا للنظام المعلمي المتبنى.

Résumé : Le travail présenté dans cet article consiste principalement à un développement d'outils conviviaux permettant la gestion de la Base de Données Gravimétriques BDG.

Ces outils représentent des interfaces bien adaptées aux besoins de l'utilisateur. Ils permettent de traduire les spécifications des utilisateurs en actions exécutables qui ont pour objectif, d'une part, d'effectuer différentes opérations sur les données (archivage des informations utiles des points gravimétriques, opérations de mise à jour, organisation et saisie, consultation, recherche des informations, édition de la fiche signalétique d'un point gravimétrique, etc.), et d'autre part, d'exécuter des traitements spécifiques à la donnée de gravité notamment les principales réductions gravimétriques et le calcul de la pesanteur normale suivant le système de référence adopté.

Mots Clés: base de données, interface graphique, données gravimétriques, BDG.

Abstract: Work presented in this article consists mainly to a convivial tool development permitting the management of the data base gravimetric BDG. These tools represent interfaces well adapted to the user's needs. They permit to translate specifications of users in executable actions that have for objective, on the one hand, to do different operation on data (storage of the useful information of the gravimetric points, update operations, organization and seizure, consultation, research of information, edition of the descriptive card of a gravimetric point, etc.) and on the other hand, to execute some specific treatments notably to the data of gravity the main gravimetric reductions and the calculation of the normal weight according to the adopted frame of reference.

Key words: data base, graphical user interface, gravimetric data, GDB.

1. Introduction

Aujourd'hui, les données gravimétriques sont de plus en plus souvent gérées par des moyens informatiques permettant le traitement automatique de l'information qui peut servir de base pour les différents travaux géodésiques.

Il est clair que l'informatisation des activités gravimétriques n'est pas figée mais exige au contraire une remise en cause permanente de l'existant. Ce fait est dû d'une part, à la variation des données gravimétriques dans le temps (étude géodynamique) et d'autre part, à la précision des données qui dépend de l'évolution des techniques d'observation et des équipements. Ceci rend les chaînes de calcul et de gestion dépassées obligeant ainsi leur remplacement. A cet effet, l'organisation optimale des données gravimétriques doit être assurée par une base de données.

L'étude présentée dans cet article porte sur le développement d'interfaces bien adaptées aux besoins des utilisateurs de la Base de Données Gravimétriques (BDG). L'objectif est de mettre à la disposition des utilisateurs des outils de travail simples pour assurer une connexion flexible durant les opérations de manipulations et de mise à jour des données.

La présentation de cet article comporte trois parties : la première partie est consacrée à la description des données et leurs traitements, des systèmes de référence et des réductions gravimétriques.

La deuxième partie est décrite la méthodologie et l'implémentation de la base de données gravimétriques.

Enfin, la dernière partie, consacrée à l'application, porte sur le développement des interfaces visuelles conviviales de gestion des données.

2. Description et traitement des données

Les données gravimétriques sont issues de plusieurs sources différentes. Cet ensemble de données organisées en un ou plusieurs fichiers nécessite des traitements spécifiques.

Les étapes des traitements gravimétriques, depuis la mesure brute jusqu'au calcul d'anomalies et à la génération des grilles, peuvent être résumées par l'organigramme suivant (Touati F, 2004) :



Fig. 1 Organigramme général de la chaîne de traitement des données gravimétriques.

2.1 Systèmes de référence en gravimétrie

La pesanteur normale est une pesanteur théorique relative à un ellipsoïde de référence modèle d'une terre réelle. Les principaux systèmes de référence utilisés en gravimétrie sont :

a) Le système Postdam 1930 (Moritz, 1984) :

La pesanteur normale est donnée par la formule de Cassini, dite formule internationale de 1930 :

$$\gamma_{1930} = 978049,0 (A - B) \text{ mGal} \quad (1)$$

Avec :

$$A = 1 + 0,005288 \sin^2 \varphi ; B = 0,0000059 \sin^2 (2\varphi)$$

b) Les systèmes GRS67 et GRS 80 (Moritz, 1984)

Pour mieux répondre aux besoins de la gravimétrie et de la géodésie, un autre système dénommé GRS67 a été adopté en 1967, tel que :

$$\gamma_{1967} = 978031,84558 (C + D) \text{ mGal} \quad (2)$$

$$C = 1 + 0,005278895 \sin^2 \varphi ; D = 0,000023462 \sin^2 (\varphi)$$

Le GRS67 a été remplacé par le GRS80, dont la pesanteur normale est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{1980} = 978032,7 (E - F) \text{ mGal} \quad (3)$$

Avec :

$$E = 1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi ; F = 0,0000058 \sin^2 (2\varphi)$$

2.2 Réductions gravimétriques

Il s'agit d'une correction appliquée aux mesures de la pesanteur effectuées à la surface topographique afin de les comparer avec une pesanteur normale.

a) Réduction air libre

Cette réduction est donnée par la formule suivante (R.J. Blakely, 1995) :

$$C_r = -\frac{\partial \gamma}{\partial h} h_p = +0,3086 h_p \quad (\text{mGal}) \quad (4)$$

Où h_p et $\frac{\partial \gamma}{\partial h}$ représentent respectivement la hauteur de la station p par rapport au plan de référence des altitudes et le gradient normal.

A cette correction est associée l'anomalie à l'air libre donnée par :

$$\Delta g = g + C_r - \gamma_0 \quad (5)$$

Où γ_0 et g représentent respectivement la pesanteur normale et la pesanteur mesurée.

b) Réduction de Bouguer

Elle consiste à ôter de la pesanteur observée, l'influence du plateau de Bouguer. Pour une densité supposée constante (égale à 2,67 g/cm³), la correction de plateau Cp (Chouteau, 2002) est donnée par :

$$C_p = -2\pi G\rho \cdot h_p = -0,1119 h_p \quad (6)$$

L'anomalie complète de Bouguer est :

$$\delta g (\text{mGal}) = g + C_r + C_p + C_t - \gamma_0 \quad (7)$$

Avec :

p : densité, G : constante de gravitation, C_t : correction topographique.

3. Méthodologie

Le présent travail consiste à mettre en place une base de données dédiée à la gestion conviviale des données gravimétriques assurée par des interfaces graphiques.

Modèle Conceptuel de données :

Le Modèle Conceptuel de Données (MCD) gravimétriques utilisé dans notre application est celui établi au niveau de la division de Géodésie (Chemaa B, 1999). Ce modèle sert à représenter le plus fidèlement possible les caractéristiques des données d'applications. La figure 2 représente le schéma HBDS (Hypergraph Based Data Structure) des données gravimétriques (Dennouni N, 2004).

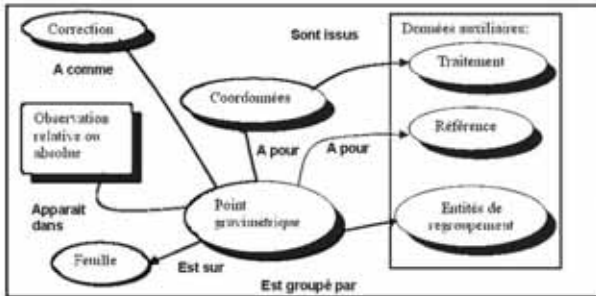


Fig. 2 Schéma HBDS des données gravimétriques (F. Duquenne).

Implémentation de la base de données gravimétriques :

L'implémentation d'une base de données diffère d'un environnement à un autre. Dans notre application, cette opération est assurée par le gestionnaire de données intégré dans l'environnement de développement du Visual basic (Belaid M et Sadaoui Y, 2003).

Il s'agit de :

- Choisir le pilote (Access, dbase, Paradox, etc) ;
- Définir le chemin d'accès à la base de données;
- Donner un nom à la base de données;
- Créer les tables en définissant leurs structures : champs, le type, la taille des champs, et un index pour chaque table;
- Etablir les relations entre les tables pour avoir une meilleure exploitation de données;
- Charger les données dans la table (étape de création des enregistrements);
- Créer des formulaires pour la saisie de données.

L'opération de la conception des interfaces graphiques de gestion la base de données vient après l'implémentation de la base de données.

4. Application

L'application comprend en plus des procédures de mise à jour, une partie traitement qui permet en fonction de certains paramètres de calculer la pesanteur normale du point considéré et les valeurs des anomalies (à l'air libre et de Bouguer).

L'interface de gestion de la BDG est donnée par la Figure 3.



Fig. 3 Interface de gestion de la base de données gravimétriques

L'interface de mise à jour des données (Fig.4) contient l'ensemble de la structure des menus d'une forme donnée appelée "Station Gravimétrique". Elle comporte toutes les données relatives au point gravimétrique. L'utilisateur trouve aussi des informations sur les systèmes géodésiques et sur les missions de terrain comme montre les figures 5 et 6 respectivement.



Fig. 4 Interface de mise à jour des données



Fig. 5 Interface systèmes géodésiques



Fig. 6 Interface sur les missions de terrain.

D'une façon générale, la fenêtre de mise à jour des données comprend deux parties principales : *une partie descriptive* dans laquelle sont affichées toutes les informations permettant la description et l'identification du point gravimétrique (Latitude, Longitude, Système géodésique, Altitude, coordonnées planimétriques et altimétriques, etc.), et *une partie traitement* permettant en fonction de certains paramètres à spécifier (Densité, Système de référence), de calculer la pesanteur normale du point considéré et par conséquent les valeurs des anomalies (à l'air libre et de Bouguer) correspondantes. Ces informations sont indispensables dans la validation de la donnée de gravité collectée et dans plusieurs applications liées à la géophysique et à la géodésie notamment dans la détermination du géoïde. En outre, la fenêtre principale comporte d'autres commandes de mise à jour des données destinées à alimenter la base de données par de nouvelles mesures en ajoutant de nouveaux enregistrements, à modifier le contenu de cette base en apportant les corrections nécessaires sur les enregistrements sélectionnés, de supprimer des enregistrements susceptibles de contenir des informations erronées, et enfin de rechercher dans la base de données des enregistrements qui répondent à certains critères.

5. Conclusion

Les outils de gestion des données relatives aux réseaux de points gravimétriques, développés dans le cadre de cet article, représentent des interfaces bien adaptées aux besoins de l'utilisateur. Ils permettent d'assurer une gestion simple et efficace des données de mise à jour, d'archivage, de recherche, et de calcul d'anomalie. Néanmoins, il est utile d'enrichir cet outil par d'autres fonctionnalités afin qu'il soit plus complet que possible.

Notamment, des requêtes de recherches et de sélection de données, des commandes d'affichage graphique usuel ainsi que d'autres routines de traitement gravimétriques.

Références

- Belaïd M, Sadaoui Y (2003) Programmer les bases de données avec Visual Basic6. Pages Bleues de Rims.
- B.G.I. (2000) Bulletin d'information du Bureau Gravimétrique International, N°87.
- Dennouni N (2004) Elaboration d'une base de données géodésiques intégrant les nouvelles missions spatiales. Mémoire de magister en techniques spatiales CNTS.
- Moritz H (1984) Advanced physical geodesy. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Chemaa B (1999) Base de données géodésiques, structuration et implémentation sous le SGBD ACCESS. Mémoire de magister en techniques spatiales, CNTS.
- Touati F (2004) Méthodologie d'ajustement des esures relatives de gravité. Mémoire de magister, en techniques spatiales, CNTS.

Cartographie de la distribution des stocks sédimentaires des fonds du golfe d'Arzew

M. CHACHOUA

Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire,
Faculté des Sciences de la Terre.GAT, Université d'Oran- Es-Sénia

Y. AMAR, A. KERFOUF

Département des Sciences de l'Environnement, Faculté des Sciences,
Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 22000, Algérie

Résumé : L'étude de la nature et texture des fonds du plateau continental entre Cap Carbon et la Pointe de la Salamandre a été entreprise afin d'établir une carte sédimentaire du golfe d'Arzew.

Le prélèvement des échantillons de sédiment a été effectuée dans 46 stations allant de -16m à -96m, à l'aide de la benne Aberdeen ou Smith McIntyre.

L'analyse granulométrique des échantillons prélevés et l'utilisation du triangle de Folk ont permis de mettre en évidence sept zones lithologiques: sables fins, sables fins envasés, sables graveleux, graviers, graviers envasés, vases sableuses et vases pures.

Cette étude a permis d'évaluer le phénomène de l'envasement qui a provoqué des changements au niveau du fond avec une nette extension de la grande vaseuse du golfe d'Arzew décrites dans les travaux précédents

Mots clés: Carte sédimentaire - Granulométrie - Zones lithologiques - Envasement - Golfe d'Arzew

1. Introduction

S'il s'agit ici de proposer quelques uns des résultats auxquels nous sommes parvenus, le but de ce présent travail est bien d'avantage :

- d'attirer l'attention sur le domaine.... un peu exceptionnel mais trop longtemps négligé.

- De trouver des solutions aux dépôts terrigènes qui continuent à envahir les fonds du golfe d'Arzew par l'extension des particules fines suivant les courants de fond. Ceci en matière d'hydrobiologie est très important car le facteur édaphique reste pour l'écologie d'un écosystème benthique, un des éléments le plus indispensable.

Cette approche permettra donc de mieux cerner le problème d'envasement des fonds du golfe d'Arzew d'une part et de mettre en lumière tout intérêt que présente ces fonds sur le plan scientifique et économique.

2. Présentation de la zone d'étude

Le golfe d'Arzew situé à l'est d'Oran, est compris entre le Cap Carbon à l'ouest et la Pointe de Salamandre à l'est (figure 1). Ce golfe présente un plateau réduit au pied des Djebels Ourousse et Sicioum (Leclair, 1972), et l'inclinaison de la pente devient de plus en plus douce de Mers El Hadjadj jusqu'à l'embouchure de l'Oued Cheliff, particulièrement entre l'isobathe -50m et -100m où les fonds descendent en pente très douce (Caulet, 1972). La sédimentologie est à dominance vaseuse au centre du golfe. Cette sédimentation est due à deux types d'apport: les apports terrigènes provenant de l'Oued Cheliff et de celui de la Macta et les apports biogènes marins d'origine benthiques et planctoniques. Ces apports sont relativement importants.

Les sables et les graviers sont assez peu répandus. La nature du golfe présente divers faciès superficiels: une sédimentation détritique et organogène ainsi qu'un envasement circalittoral dû à l'extension de la grande vaseuse (Amokies, 1993).

Le courant marin orienté vers l'Est circule parallèlement le long du littoral en créant à partir de 1° et 2° Est, des upwellings entre des tourbillons cycloniques et anti-cycloniques. Au niveau d'Arzew et sous l'influence des forces de Coriolis, une branche du courant atlantique provoque des contre-courants résultant du plaquage de cette branche contre le littoral du golfe (Millot, 1987 et 1989).

3. Matériel et méthodes

Localisation des stations et échantillonnage

46 stations ont été prospectées dans les fonds du golfe d'Arzew (figure 2). Les prélèvements de sédiments ont été réalisés, à l'aide de la benne Aberdeen ou Smith McIntyre (Figure 3) sur les fonds meubles du golfe. Cette benne présente une efficacité assez remarquable généralement (Reys et al, 1971).

La benne Smith McIntyre prélève en moyenne un volume de 5 litres pour une surface de 0,1 m². Pour l'ensemble du golfe d'Arzew, nous avons effectué deux prélèvements par station, soit deux coups de bennes correspondant à une surface prélevée de 0,2 m².

Analyse Granulométrique (taille des grains des sédiments)

L'échantillon sédimentaire, doit être bien lavé à l'eau douce et séché pour éviter la formation d'agrégats de grains nuisibles pour l'analyse granulométrique.

Première étape : elle consiste à faire passer une certaine quantité de sédiment séché non décalcifiée (100g) sur une colonne de tamis. Cette dernière comporte 16 tamis superposés.

Les tamis sont placés dans un ordre décroissant de haut en bas. Les dimensions des mailles de ces tamis sont : 2500, 1600, 1250, 630, 500, 400, 315, 250, 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50 et 40 microns.

Après 15mn de tamisage à l'aide d'un vibreur de type " Fristch " ; le refus de chaque tamis est pesé puis transformé en pourcentage cumulés (%) pondéraux, en masses cumulées puis en pourcentage cumulé. A partir de ces données granulométriques, nous avons pu tracer les courbes cumulatives sur papier semi-logarithmique. L'allure de la courbe obtenue est du type sigmoïde.

Les caractéristiques granulométriques du sédiment, sont résumées dans la courbe des fréquences de taille des grains (figure 4).

4. Résultat et discussion

Répartition des sédiments (Figure 7, 8 et 9).

La couverture sédimentaire des fonds du golfe d'Arzew présente sept zones lithologiques définies à partir des résultats de l'analyse granulométrique du sédiment de l'ensemble des stations étudiées. Ce facteur édaphique important, permet l'installation d'une biocénose bien définie (Picard, 1965), et de permettre l'établissement d'une cartographie, des peuplements benthiques des fonds meubles du golfe d'Arzew. L'utilisation du triangle de Folk (1965) a permis de préciser la nature des sédiments (figure 5). Les différents types de sédiments identifiés sont les suivants :

(Les sables fins purs (06 stations), les sables fins envasés (05 stations), les sables graveleux (11 stations), les sables graveleux envasés (04 stations), les graviers sableux (01 stations), les vases sableuses (04 stations) et les vases pures (15 stations « côtières et profondes).

Dans le secteur côtier, une bande de sables fins longe presque toute la côte en présentant une discontinuité au niveau de Stidia, Mers el Hadjadj et Bethioua, où ils sont remplacés par les sables graveleux. Ces sables se trouvent localisés entre -40 m et -54 m à l'Ouest, et entre -16 m et -31 m au centre et à l'Est du golfe d'Arzew. Ces sables présentent une médiane variant entre 0,052 et 0,90 mm (figure)

A l'embouchure de l'oued Macta, le matériel est essentiellement détritique. Ce matériel provient des apports, dû à l'érosion continentale et côtière, ainsi que des apports d'origine biogènes.

Au niveau de Stidia, les sables graveleux s'installent à proximité de la côte (F1 et F2) entre -16 m et -20 m. Ces sables moyens ont une médiane comprise entre 0,52 mm et 0,90 mm. Au delà de -20 m, jusqu'à 36 m de profondeur, se localisent les sables fins envasés, où le taux de pélite est de 13,96 %. Ce type de sédiment a une médiane de 0,115 mm.

Au large, nous rencontrons des sables graveleux, localisés entre -80 m et -96 m occupant la partie la plus externe du golfe d'Arzew, et pénétrant dans le secteur Ouest, entre Bethioua et Mers el Hadjadj (stations : C₁, C₂ et C₄) entre -20 m et -73 m. Ces sables présentent une médiane entre 0,49 mm et 1,34 mm. Au sein des sables graveleux, un fort pourcentage de pélite (> 10 %), existe aux stations B₄ et F₇ respectivement à -78 m et -88 m. La médiane au niveau de ces stations est de 0,44 mm et 0,30 mm.

A l'Ouest, les graviers sableux occupent une seule station A1 de 41 m de profondeur. Le taux de graviers au niveau de cette station dépasse 78 %. La médiane est de 1,90 mm. Au centre du golfe, les vases pures constituent la grande vase. La répartition de cette fraction fine, est essentiellement régie par les apports terrigènes de l'oued Cheliff. La partie centrale du golfe d'Arzew est donc soumise à un envasement, qui est en extension d'Est en Ouest dès 40 m jusqu'à 80 m de profondeur (Amokies, 1993). Cet envasement circalittoral concerne 15 stations, dont la médiane est inférieure à 0,05 mm.

L'analyse des courbes granulométriques et des différentes fractions sédimentaires, nous a permis de distinguer les différents sédiments, qui occupent les fonds du golfe d'Arzew. Pour les sédiments où la fraction de sables domine, les valeurs de la médiane permettent de mettre en évidence des sables grossiers, des sables moyens et des sables fins (figure 5).

Sables grossiers

Les sables grossiers présentent une médiane, comprise entre 0,5 et 2 mm.

La valeur maximale de la médiane se localise au niveau de la station A₁ (md = 1,90 mm), et la valeur minimale, est enregistrée au niveau de la station F₂ (0,52 mm). Ces sédiments occupent les fonds du large et à l'Ouest du golfe.

Au large, ils s'associent aux graviers et aux débris de coquilles de Gastéropodes, Lamellibranche et de Bryozoaires (entre -60 m et -92 m). Ils apparaissent également près de la côte à proximité de Stidia, entre 16 m et 20 m de profondeur; entre Mers el Hadjadj et Bethioua. Ils sont associés à des débris de calcaires, des graviers fins, et des débris de coquilles (entre -20 m et -35 m).

Sables moyens

Les sables moyens sont caractérisés par une médiane comprise entre 0,20 et 0,50 mm. La valeur maximale de la médiane (0,49 mm), se situe au niveau de la station C₄ et la valeur minimale (0,23 mm) à la station D₃. Ces sables occupent une partie des fonds du large entre -80 m et -92 m et à l'Ouest, ils se localisent entre -70 m et -86 m.

A ces sables moyens s'additionnent des graviers, leur taux est compris entre 14,03 % et 18,09 % (stations A, B₄, C₄, C₆ et F₇). Au niveau de Mers el Hadjadj, les sables moyens renferment des débris de coquilles et un faible taux de pélites (inférieur à 3 %). Ces sables moyens se localisent entre -22 m et -38 m.

Sables fins

Les sables fins présentent une médiane, variant entre 0,05 et 0,20 mm. La valeur maximale de la médiane (0,195 mm) se trouve à la station E₃ et la valeur minimale (0,052 mm) à la station E₂. Ils se localisent à six stations: B₁, B₂, E₁, E₂, E₃, et F₃. Ces sables fins forment une bande, qui s'étend de Stidia à la Macta.

En face de Stidia, les sables fins prennent place entre -28 m et -51 m et au niveau de la Macta, ils occupent les fonds de -20 m à -40 m. A l'Ouest du golfe et à proximité d'Arzew, ces sables se situent sur les fonds de -35 m à 60 m. Le taux de pélites dans les stations des sables fins varient entre 0,44 % (E₁) et 13,96 % (F₃)

5. Conclusion

Les caractéristiques de la texture du fond du golfe d'Arzew ont été étudiées dans le but de mettre en évidence le lien qui existe entre le facteur édaphique et les peuplements macrobenthiques. Le profil géopédologique avait fait l'objet d'une description récente du plateau continentale, déjà faite par

Leclaire en 1972 Cette nouvelle vision des fonds du golfe d'Arzew permet d'attirer l'attention sur le problème que rencontre un milieu jadis très riche en poissons.

A travers cette étude, il convient de souligner des conclusions les plus importantes qui découlent de l'ensemble de nos observations. Il s'agit en particulier du déplacement et dépôt de tous les éléments véhiculés par l'oued Cheliff. Les vases prennent un développement assez important beaucoup plus entre -50 et -80m. En période de crues, les apports terrigènes soulèvent certains problèmes surtout sur l'équilibre de l'écosystème benthique. Les dépôts disponibles permettent de s'installer à plusieurs niveaux sous l'action des courants de fond et contribuent efficacement aux possibilités d'extension de la grande vase d'Est en Ouest.

Cependant le plateau continental devient vulnérable et modifie la composition non seulement de la texture sédimentaire mais aussi la distribution de la faune benthique.

Nous avons constaté à travers les analyses faunistiques que le dépôt de la fraction fine est responsable au déséquilibre écologique du fond du golfe. A savoir que dans les stations où les pélites sont négligeable, les peuplements macrobenthiques sont bien équilibrés sur le plan quantitatif et qualitatif, contrairement aux stations où la fraction fine domine. La carte des pélites montre que la fraction pélitique dans les sédiments du golfe d'Arzew est importante. La zone côtière occupée par les sables fins et les sables graveleux présentent un taux de pétilite compris entre 0 et 5 % constituant une bande allant d'Arzew jusqu'à Mostaganem. Eventuellement au large et à l'Ouest, deux discontinuités se présentent au niveau des stations F₇ et B₄. Le taux de pélites dans ces stations est respectivement 13,52 % et 11,87 %. A proximité de Bethioua et Ain Bia, le taux de pétilite des stations B₁, B₂ et C₄ varie entre 5 et 10 %. Au centre du golfe d'Arzew, le sédiment des fonds localisé entre Bethioua jusqu'à Mostaganem est une vase pure fluide et parfois noirâtre. Les 15 stations de vase pure se situent entre -40 m et -80 m où le taux de pétilite est très élevé (supérieur à 95 %). Les caractéristiques de la texture du fond du golfe d'Arzew ont été étudiées dans le but de mettre en évidence le lien qui existe entre le facteur édaphique et les peuplements macrobenthiques (Amar et al, 2001). Le profil géopédologique avait fait l'objet d'une description récente du plateau continentale, déjà faite par Leclaire en 1972 Cette nouvelle vision des fonds du golfe d'Arzew permet d'attirer l'attention sur le problème que rencontre un milieu jadis très riche en poissons.

A travers cette étude, il convient de souligner des conclusions les plus importantes qui découlent de l'ensemble de nos observations. Il s'agit en particulier du déplacement et dépôt de tous les éléments véhiculés par l'oued Cheliff. Les vases prennent un développement assez important beaucoup plus entre -50 et -80m. En période de crues, les apports terrigènes soulèvent certains problèmes surtout sur l'équilibre de l'écosystème benthique. Les dépôts disponibles permettent de s'installer à plusieurs niveaux sous l'action des courants de fond et contribuent efficacement aux possibilités d'extension de la grande vase d'Est en Ouest.

Cependant le plateau continental devient vulnérable et modifie la composition non seulement de la texture sédimentaire mais aussi la distribution de la faune benthique par la présence des hydrocarbures (Sebih, 1993).

Nous avons constaté à travers les analyses faunistiques que le dépôt de la fraction fine est responsable au déséquilibre écologique du fond du golfe. A savoir que dans les stations où les pélites sont négligeables, les peuplements macrobenthiques sont bien équilibrés sur le plan quantitatif et qualitatif, contrairement aux stations où la fraction fine domine (Amar et al, 2001)

Références

- Amar Y., Djahed B., Bakalem A. et Kandouci A. B., 2001 - Contribution à l'étude des Crustacés des fonds du golfe d'Arzew. Com. International Workshop on marine biodiversity in Islamic countries, Algiers, October 22nd - 24th 2001.
- Amar Y., Djahed B., Kerfouf A. et Kandouci A. B., 2001 - Etude de la sédimentologie des fonds du golfe d'Arzew. Com. 11^{ème} Séminaire national des sciences de la terre, Tlemcen, 28 - 30 Octobre 2001.
- Amokies D., 1993. - De l'existence d'un faciès coquillier relique en bordure externe de la Plate forme continentale du golfe d'Arzew. Rapp. Comm. Int Mer Medit. , 32, 1, 89.
- Bernard F. et Lecal-Schlauder J., 1953. - Rôle des flagellés calcaires dans la sédimentation actuelle en Méditerranée. C.R., 19^{ème} session, Congrès de Géol., Inst. Alger, Fasc. 4, 11 p.
- Caulet J., 1972. - Les sédiments organogènes du pré continent algérien. Mém. Museum Nat. Hist Nat., Paris, Sér. C, 25, 1-289.
- Folk K., 1965. - Petrology of sedimentary rocks. Edition Memphis, Texas, 139 p.
- Millot J. C., 1987. - Circulation in the western Mediterranean sea. Oceanologica Acta, 10 (2) : 134-149.
- Millot J. C., Taupier-Letage L. et Benzohra M., 1989. - The Algerian Eddies. Earth Sc. Rev., 27: 17.
- Leclaire L., 1972. - La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Précontinent algérien). Mémoire du Muséum National d'Histoire Naturelle, sér. C, Tome XXIV, Paris : 372-391.
- Picard J., 1965. - Recherches qualitatives sur les biocénoses marines des substrats meubles de la région marseillaise. Rec. Trav. St. Mar. Endoume, 36 (52): 1-160.
- Sebbih S., 1990. - Dosage des hydrocarbures par deux méthodes chromatographiques en phase liquide et en phase gazeuse. Cas du golfe d'Arzew. Thèse de Doctorat d'état, univ. USTHB, Alger : 185-192



Fig. 1 Golfe d'Arzew. Position géographique.

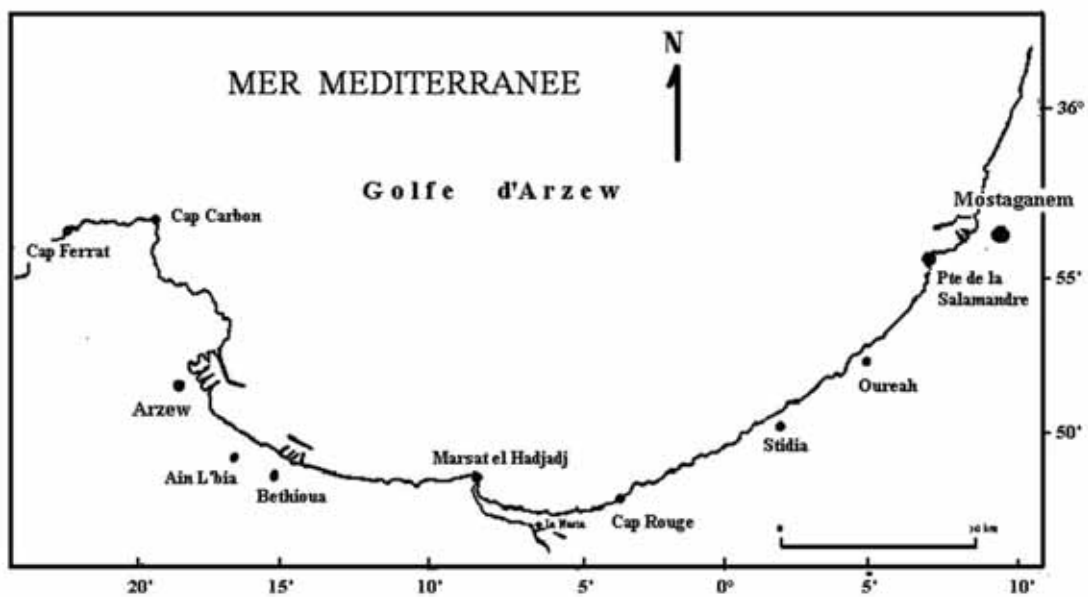


Fig. 2 Golfe d'Arzew. Zone d'étude.

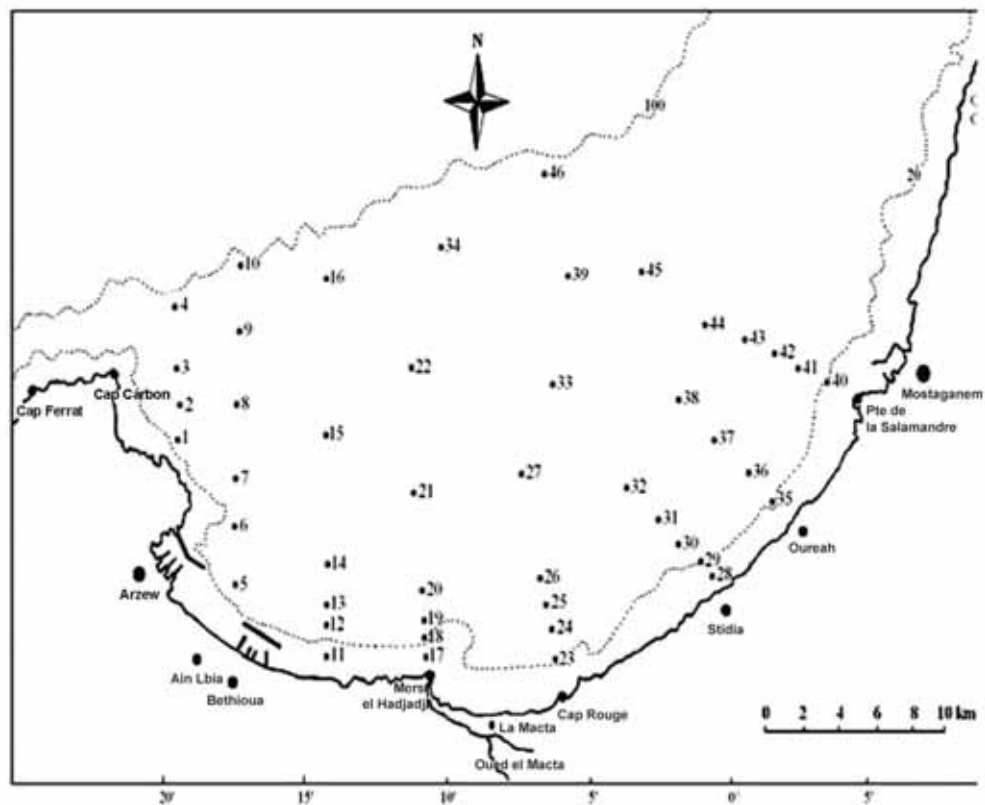


Fig. 3 Golfe d'Arzew. Localisation des stations d'échantillonnage.

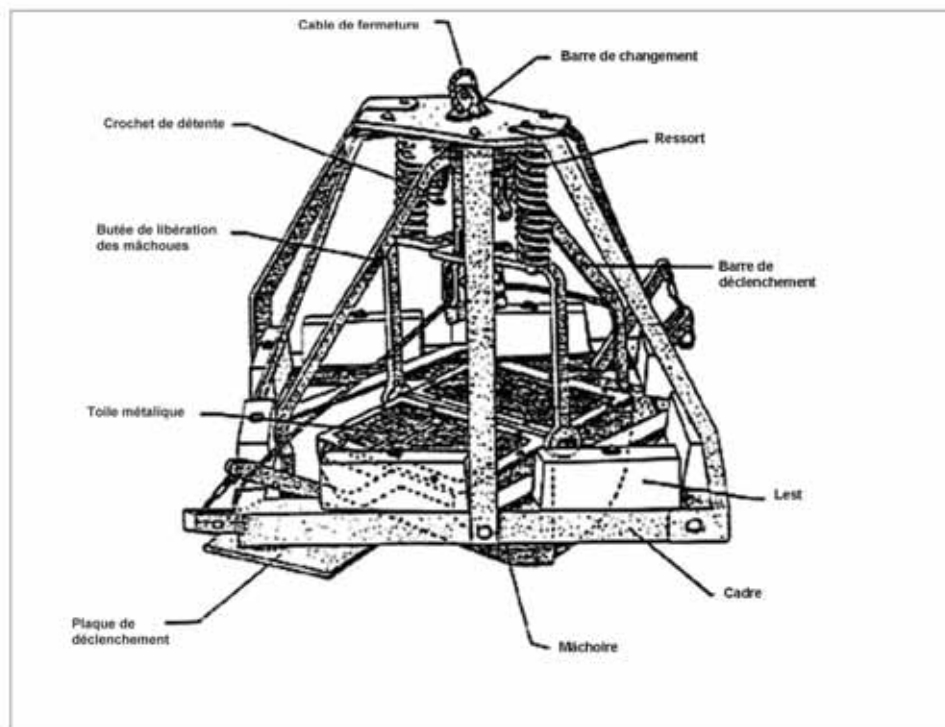


Fig. 4 Engin d prélèvement. Benne Smith McIntyre

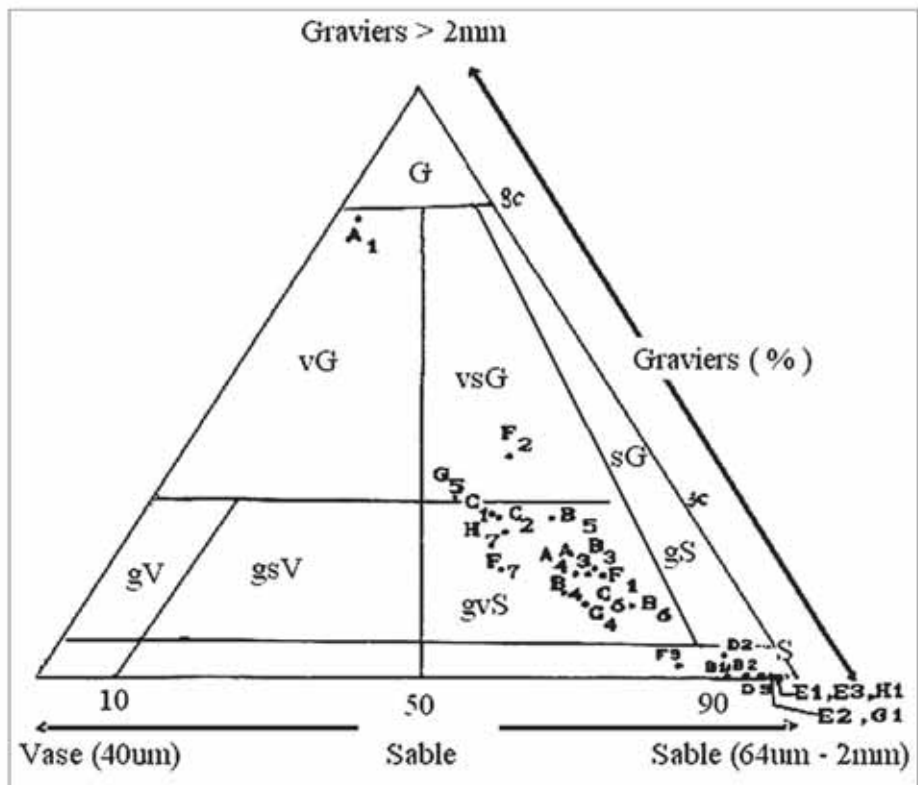


Fig. 5 Triangle de Folk (1965).

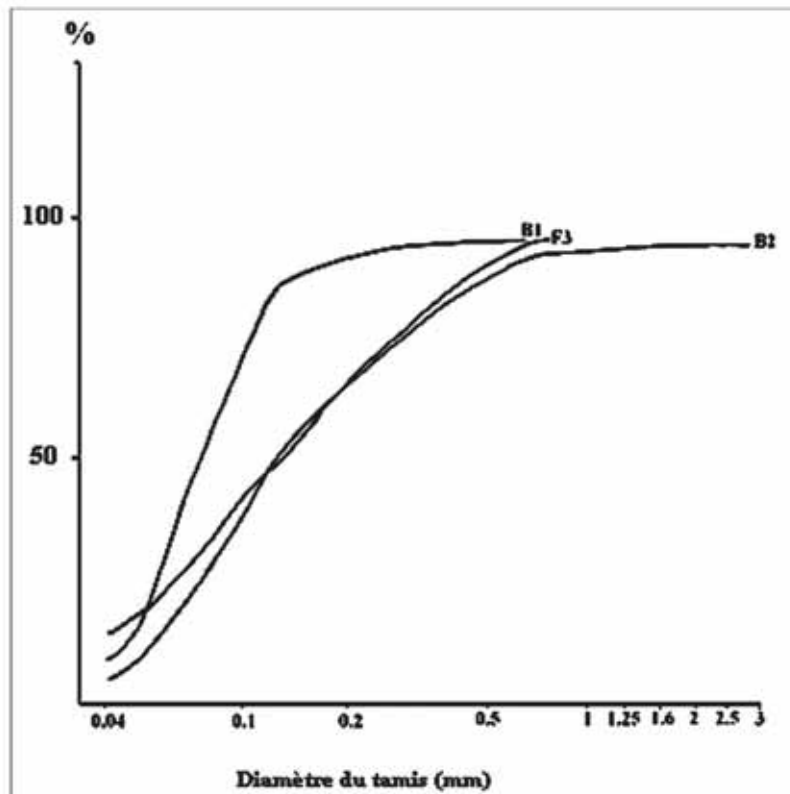


Fig. 6 Courbes granulométriques des stations de sables envasés du golfe d'Arzew.

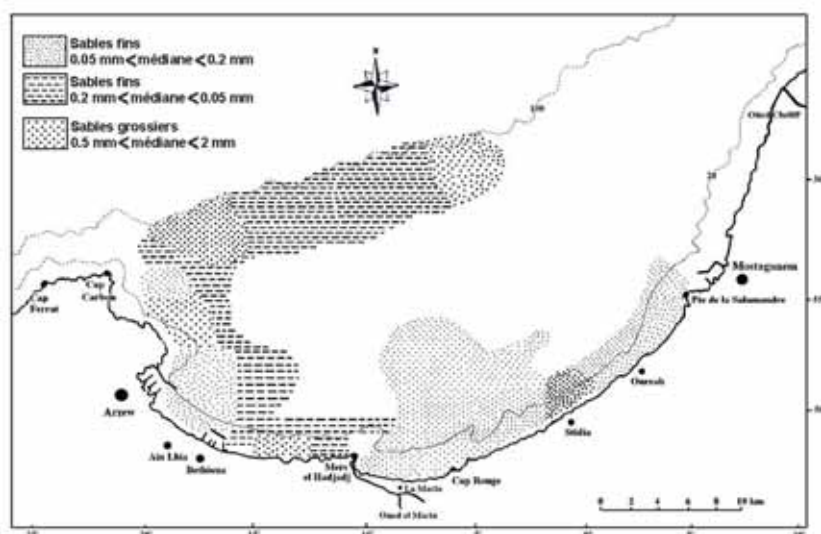


Fig. 7 Golfe d'Arzew. Carte de répartition des sables.

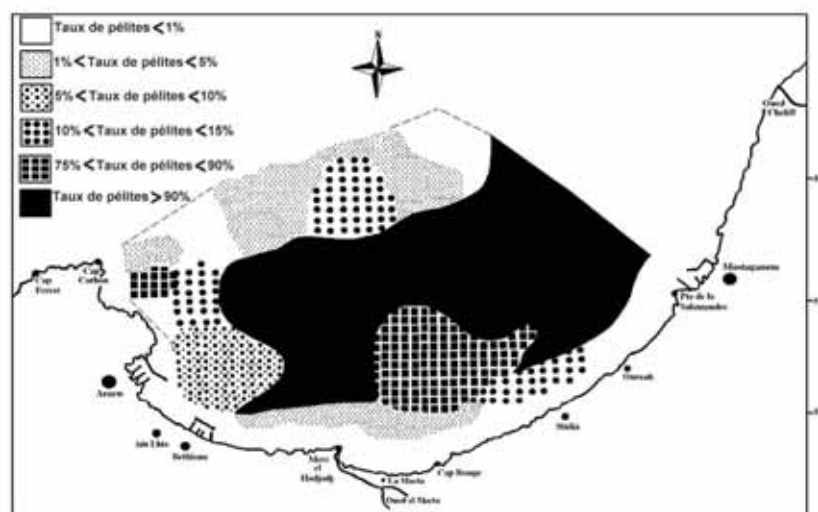


Fig. 8 Golfe d'Arzew. Distribution de la fraction fine (vase).

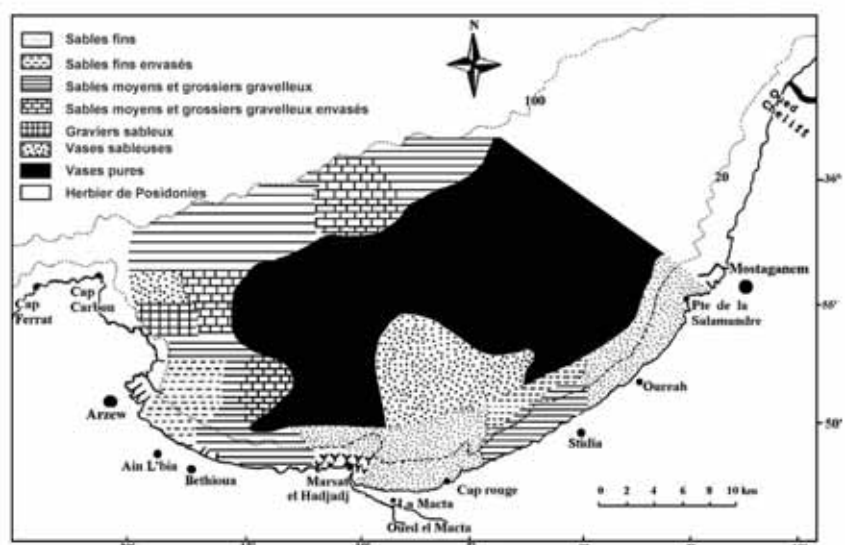


Fig. 9 Golfe d'Arzew. Carte sédimentaire.

The relationship between lithology and slope morphology in the Tucson Mountains, Arizona

K. Khanchoul

Department of Geology, Badji Mokhtar University, Annaba
e-mail: kkhanchoul@yahoo.fr

R. Altschul, R. Reeves

University of Arizona, USA - Department of Geography

ملخص: العلاقة بين صفة الصخور و مرفولوجية الانحدارات قد درست في ثمانية أماكن من الانحدارات الغرانيتية، الأندوزية و الرسوبية في جبال تكسون بالأريزونا (الولايات المتحدة الأمريكية). عدة طرق قد استعملت في هذه الدراسة بعد إنجاز مقاطع طولية للانحدارات، قد تم حساب و مقارنة مؤشرات التفرع، الأطوال و ميل الانحدار لشتى المقاطع الطولية. تحليل قطر الجزيئات سمح لنا تعيين، في بعض المقاطع الطولية الحد بين جبهة التل و البيدمنت. إن نوعية وخصائص البنية الجيولوجية هما اللذان يحددان شكل الانحدارات في هذه المنطقة الخاضعة لمناخ شبه جاف. هناك فعلا تغيرات بالمقارنة بالأساس الصخري لكل زوج. لقد سمحوا بتوضيح بعض تقارب الأشكال. إن من مقارنة الغرانيت و الأندوزيت من جهة و للصخور الرسوبية و الإندوزيت من جهة أخرى نتحصل على أحسن العلاقات بين صفة الصخر المرفولوجية و الانحدارات. هناك تشابه يظهر في الانحدارات الغرانيت و الإندوزية على مستوى الأميال المتوسطة في جهات التلال و البيدمنت.

مفتاح الكلمات : صفة الصخر - شكل المقاطع الطولية - بيدمنت - جبهة التل - رسييف صخري.

Résumé: La relation entre la lithologie et la morphologie des pentes sont analysées dans huit sites sur les versants granitiques, andésitiques et sédimentaires des monts de Tucson en Arizona (USA). Plusieurs méthodes sont utilisées dans ce travail. Après avoir réalisé des profils de pente, les indices de concavité, les longueurs et l'inclinaison des différents profils sont calculés et comparés entre eux. L'analyse de la taille des particules a permis la détermination, sur certains profils, de la limite entre front de colline et piémont. Ce sont surtout la nature et les caractéristiques structurales du substratum qui déterminent la morphologie des pentes dans ce secteur soumis à un climat de type semi-aride. Il y a en effet peu de variations entre des profils sur substrat de même nature mais différemment exposés. Des études morphologiques plus précises ont ensuite été effectuées en comparant les substrats lithologiques deux à deux. Elles ont permis de mettre en évidence certaines convergences de forme. C'est en comparant granite et andésite d'une part et roches sédimentaires et andésite d'autre part que l'on obtient les meilleures relations entre lithologie et morphologie des pentes. Une similitude apparaît sur les versants granitiques et andésitiques au niveau des inclinaisons moyennes des fronts de colline et de celles des piémonts.

Mots Clés: lithologie - forme des profils - front de colline - piémont - pédiment

Abstract: The relationship between lithology and slope morphology is investigated at eight sites on granitic, andesitic, and sedimentary hillslopes in the Tucson Mountains, Arizona (USA). Several methods are used in the study. Topographic profiles are constructed. Skewness indices, slope length, and mean slope angles of the different slope profiles are computed and compared with each other. Debris size analysis has permitted for some profiles, the determination of hillfront/piedmont junctions. The nature and structural characteristics of the bedrock are the ones that determine the hillslope morphology in this semi-arid region. There are, as a matter of fact, variations in profiles on the same bedrock nature but differently exposed.

More precise morphologic studies have been also done in comparing the different lithologic pairs. They have permitted to show some similarities in shapes. The granitic-andesitic slopes and andesitic-sedimentary slopes are the best comparisons which show the relationship between lithology and slope morphology. The granitic-sedimentary slope relationship is shown in the hillfront concavities, mountain front and piedmont mean slope angles.

Key Words: lithology - form of profiles - hillfront - piedmont - pediment

1. Introduction

Many studies have been done about the relationship between lithology and slope morphology (slope form and angle); however, these studies did not reach the same conclusions. In some investigations, rock type was found to be associated with slope morphology, while in others an opposite conclusion was reached, suggesting that slope morphology is not significantly related to lithology, but rather to other factors, such as tectonic activity and climate (Cooke, 1970, Abrahams and al, 1985). The study area, represented by the Tucson Mountains, Arizona are located in particular climatic conditions, defined by a semi-arid zone, where it appears that these conditions were determinant in showing the influence of lithology on hillslope development. This study is undertaken to determine the relationship between lithology and slope form and angle in the Tucson Mountains. Their hillslopes, which present piedmonts at the toe of the mountain slopes, are developed on three different lithologies: Amole Granite, Shorts Ranch Andesite, and Amole Arkose as a sedimentary formation. This study area was selected because of the presence of a variety of slopes from hillfronts to piedmont surfaces and the occurrence of different lithologies. Slope profiles were drawn on the selected lithologies, and these profiles were then submitted to computations and morphometric analysis of the following parameters: profile skewness, slope lengths, and slope angles. In addition, field measurements were made of the debris size distribution on the selected hillslopes. The sloping surface that connects the mountain to the level of adjacent plain is called the piedmont. It extends from the hillfront to the alluvial plain. Standing at the toe of the hillfronts are erosional surfaces called pediments, slope at less or equal to 11° .

2. Geographic and geologic setting

The variety of geological and climatic conditions in the Tucson Range give rise to a number of different morphological units; for practical reasons only the Tucson Mountains could be investigated. The Tucson Mountains lie within the Basin and Range Province of the U.S., about one kilometer of Tucson. These mountains occupy latitude $32^\circ 00'$ to $32^\circ 30'$ North and longitude $111^\circ 00'$ to $111^\circ 15'$ West (Fig.1). The range trends about north-northwest and is bordered on the eastern side by Santa Cruz valley and on the west by a smaller Valley locally called the Altar Valley.

Wassen Peak, which reaches 1594 m, is considered the highest hill of the Tucson Mountains. The hills armed by sedimentary rocks are the lowest ones where they do not generally exceed 1050m in height.

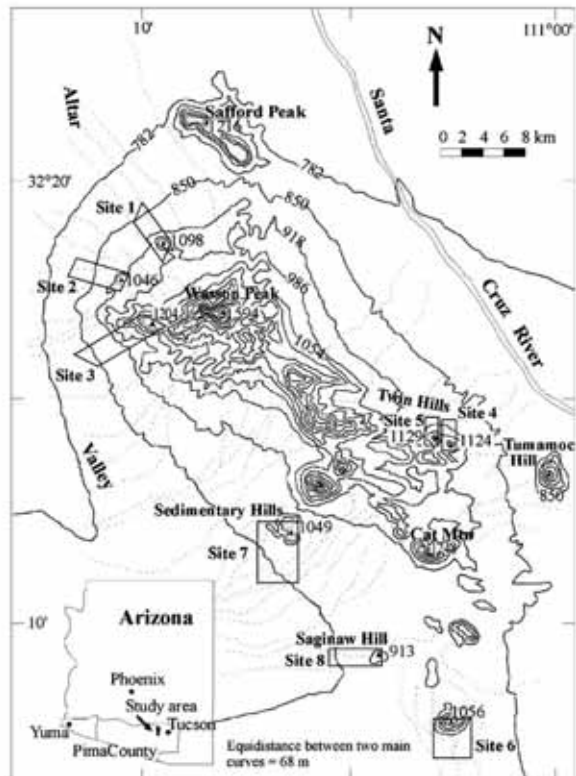


Fig. 1 Location map of the study sites in the Tucson Mountains, Arizona.

2.1 Climate and vegetation

The climate of the study area is semi-arid with wide daily temperature ranges and low rainfall. The temperature is characterized by a long hot season from April to October and daily temperatures above 32°C are present from May through September. The mean annual temperature is about 20°C at the Tucson Airport, with a mean daily maximum temperature of 37°C as the hottest month and a mean daily minimum temperature of 3°C in January as the coldest month (U.S. Weather Bureau and the National Weather Service, 2002). The mean annual precipitation is 277 mm with the highest average monthly precipitation of 64 mm in July and 51 mm in August. The distribution of precipitation through the year is such that 50 percent of the annual amount falls between July and September and usually from thunderstorm showers originating in moist air that flows into Arizona from the Gulf of Mexico.

A secondary maximum precipitation of gentle and widespread rainshowers is from December through March when pacific storms move far enough south in their journey across the country to affect Arizona, and thus providing over 20 percent of the yearly precipitation. The mean annual precipitation is 280 mm at the Tucson Airport Station, with the highest average monthly precipitation of 64 mm in July and 51 mm in August. The lowest averages of monthly precipitation occur in April, May, and June with 7.9, 3.8 and 6.1mm, respectively.

The region of Arizona and especially the pediments have undergone since the late Cretaceous until Pliocene a dry climate by accumulating gypsy and salty deposits. The climate was for instance not able to develop a drainage network for relief planation. The humid and cold periods of the Plio-quadernary are however the ones that have permitted the birth of stream networks.

If the region has been submitted in Quaternary to climatic variations such as precipitations, it seems, that glaciations, cold and probably humid periods, had little direct influence in Arizona (Corbel, 1963). The early Holocene (-11000 to -8000 yr), was rather cooler than today and may have been the wettest period. During this period, a strengthened summer monsoon brought in more moisture from the eastern Pacific Ocean and the Gulf of Mexico (Weng & Jackson, 1999). Then, the climate returned to its dryness, interrupted by some cooler periods.

Vegetation is characteristic of the semi-arid regions of the southwest of U.S.A. The common trees and shrubs in the Tucson Mountains are the mesquite, shrubs, palo verde, catsclaw, ocotillo (*fouquiera splendens*), and palo fierro. These plants grow mainly on the piedmont slopes and along the banks of the dry channels. In addition, there occur a large variety of the cacti, saguaro, prickly pear, and the cholla (*opuntia imbricata*), particularly on granitic and sedimentary slopes. Grass is scarce in the range.

The general vegetation on the sedimentary slopes resemble the one on the granitic and andesitic slopes. Among the most common plants are the cacti and saguaro, which thrive on the lower slopes. Prickly pear and related types are also common. Cholla are abundant on the sedimentary Hill surfaces and ocotillo are sparse. Palo verde and mesquite are common especially along drainages. The mesquite is very rare on the Sedimentary Saginaw Hill (Fig. 1), but creosote bush is abundant. The shrubs are distributed everywhere and the grass is very limited.

2.2 General geology

The Tucson Mountains are tilted fault blocks and contain a mixture of rocks of different types and age (Lipman & Fridrich, 1990). The Cretaceous sediments are seen along the western slopes of the Tucson Mountains (Fig. 2). The sediments include the Amole Arkose, seen in the central and southern parts of the range, and the Recreation Red Beds (red siltstones, sandstones, and minor conglomerate) found in the western side of the range. Besides these sedimentary rocks, there are volcanic rocks of the same age (Mayo, 1968). The Amole Arkose sedimentary rocks are found in the Sedimentary Hill (site 7) and the Saginaw Hill (site 8). These rocks are of Cretaceous age and contain largely siltstones with frequent beds of arkose, arkosic sandstones, and less frequent beds of shale and limestones (Bennett, 1957 & Risley, 1983). The Amole Arkose and older Mesozoic sediments and volcanics in the north-central part of the range are intruded by latite dykes (Amole Latite). The Amole Granite (sites 1 and 3) occupies a broad area in the range (Fig. 2). Along its eastern and southern borders, the granite is in contact with the granite porphyry and quartz monzonite. The western limit of the granite is bordered by the alluvium of the Altar Valley fill. This granitic exposure is of Lamaride age, which was a time of great disturbance in the Tucson Mountains between the early Cretaceous and Tertiary (74 m.y.). This granite has a medium to coarse grained texture and is composed mainly of quartz, biotite, and feldspar crystals.



Fig. 2 Geologic map of the Tucson Mountains, Arizona.

Rising in the eastern and southern parts of the Tucson Mountains are faulted and tilted series of different named rhyolite to andesite flows. One of the andesites named Shorts Ranch Andesite in sites 4 and 6 is a massive andesitic flow and is the uppermost unit of the Tertiary volcanic sequence dated at approximately 57 m.y. (Kinnison, 1958). Structurally, some of the Shorts Ranch Andesites are faulted at the Twin Hill (site 5) where it is in contact with the rhyolite, and at the extreme southern outcrop (site 6) where it is in contact with the lithologies of rhyolite and other andesite flows.

The northern and eastern sides of the range near Safford Peak and Tumamoc Hill consist of a sequence of faulted and younger rhyolite tuffs and andesites. These volcanic rocks indicate a late Oligocene-early Miocene age.

The Tucson Mountains are distinguished by broad deposits. The colluvium of different debris sorting cover to variable depths the hillfront and the pediments. It is thicker in andesitic and sedimentary slopes, in which it becomes more difficult to detect the pediment substratum. The origin of the colluvial mantle is the result of outcrop weathering, weathering in situ, and running water as an erosional and transporting agent. In contact with the above loose material are the alluvium sediments. They form the alluvial plains of the Santa Cruz and Altar rivers and are composed mainly of silt and clay.

3. Methodology

The main sources of data for this study were topographic maps, a geologic map, and field observations and measurements. The topographic maps at 1:24,000 each, of the Tucson Mountains, Arizona, Pima County are published by the U.S. Geological Survey (U.S.G.S, 1968). The topographic maps are: the Cat mountain, Brown Mountain, Avra, and San Xavier Mission quadrangles. In addition, a more recent geologic map, at 1:62,500, of the Tucson Mountains was used in this project (U.S.G.S, 1993). This work has been completed by a field survey of the debris size across hillfronts and piedmonts.

3.1 Topographic profile construction

Topographic profiles were constructed by first establishing randomly distributed points on the different selected rock exposure, and then drawing a line running up and down from these points perpendicular to the contour lines and without crossing any washes and channels.

The upper limit of each line was drawn to the maximum elevation and slope angle of the hill, before joining the crest slope. The lower limit was drawn to a fixed distance in the alluvium, taking into consideration that the lengths of the alluvium deposits from the bedrock pediments are more or less equal. However, some of the andesitic base profiles were ended at natural obstacles, such as channels or structural contacts, and these profiles include only minor alluvium surfaces.

Using a magnifying comparator, horizontal distances were measured in millimeters between every two contour lines crossing the profile line, going from the top to the base slope. Then, these map distances were converted into ground distances and then cumulative distances. The inclination of each segment of each profile line was computed by the following formula: $\text{Tangent } \theta = \text{contour interval (m)} / \text{horizontal distance (m)}$

3.2 Skewness and other parametric analysis

To determine the slope form of a slope profile, profile skewness analysis was used to show the degree to which either rectilinearity or concavity dominates the total profile and hillfront/piedmont profile. The Y axis (vertical distance or contour interval) and the X axis (horizontal distance) of each slope profile was converted into cumulative percentages from 0 to 100 (Fig. 3) and these converted profiles were then used in the profile skewness analysis.

The slope profiles were divided into hillfronts and piedmont profiles to examine their respective slope morphology. The division was determined by finding a subjective point of inflexion separating the hillfront from piedmont slope of each profile. The inflexion point was found by first delimiting a segment of the profile where the hillfront/piedmont junction was expected to occur. This junction is thus determined by the maximum break of slope between two adjacent segments. The formula used to estimate the slope form is :

$$\text{PSK} = \frac{(\text{Vp}90 + \text{Vp}10) - 2 * (100 - \text{Vp}50)}{\text{Vp}90 - \text{Vp}10}$$

Where Vp is the vertical percentile and PSK is the profile skewness index. Thus, a slope profile which is essentially concave will have a negative skewness index and a rectilinear one will approaches the zero (Pitty, 1970).

Values of elevation and distance of each profile, represented respectively in the vertical and horizontal axis, are converted in percentiles of 10% interval (Fig. 3).

Elevation percentiles are then reversed into decreasing order (100 to 0%). In order to better analyze the slope morphology, the subdivision of the profiles in two distinct parts: hillfronts and piedmonts has to be done. The junction between these two elements is represented thus by the maximal slope rupture between two adjacent segments.

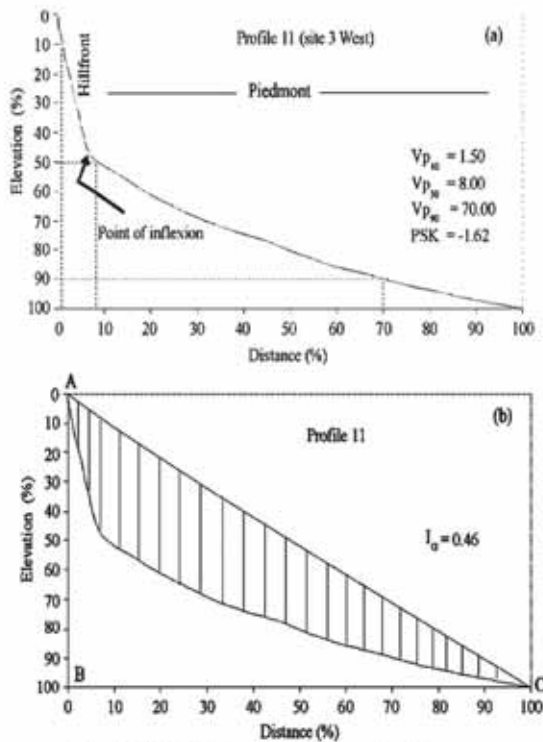


Fig. 3 Model Diagrams of the study indexes. (a) skewness index, (b) concentration index.

In case the rupture of slope (knick point) is not apparent, the point of inflexion is subjectively determined. The method requires taking segment falls of 7 meters and for each segment, the difference between slope segments is computed, especially where the breaking of slope is expected to occur. Then, the biggest difference of slope segments is taken and it is between these two slopes that the point of inflexion is placed.

As shown in Pitty formula, the concavity index is calculated using only three percentiles values. To verify the adequacy of this index in the interpretation of the results, a second formula is used; it is the concentration index. Taken from the curve of concentration of Gini (Combrouze, 1993), the index is defined graphically as the ratio of the dashed area to the area of the triangle (ABC). More the concentration index is high, more will be the concavity of the profile (Fig. 3).

Thereafter, an analysis of regression between the concavity and concentration indexes is made for each rock sample and that to check the accuracy of the concavity index. Besides, the skewness analysis, slope length and slope angle were used in this study. The purpose of these parameters is to provide additional details about the relationship between lithology and slope morphology.

3.3 Debris size analysis

Field investigation was done to determine the distribution of debris size from the upper slopes to the base slopes and to provide physiographic information on the study sites. The primary purpose of this investigation was to detect more accurately the hillfront/piedmont junctions.

Debris size distribution was done with the use of a 100 feet steel tape, a compass, and a vernier caliper. Starting from near the top of each site and ending at the base, slope inclination was determined. The tape was spread horizontally on the surface, and at one foot interval, the debris particle under the tape was measured at its b axis in millimeters by the vernier caliper. At least three measurements were made at the same slope angle, and 25-50 debris particles were collected from each measurement line. The debris was measured at selected intervals determined by the change of the debris size distribution.

A total of 3203 particles were recorded from the studied sites; 1003 were from the three granitic sites, 768 were from the two sedimentary sites, and 1432 were taken from the last three andesitic sites. Then, to show the degree of sorting, the first and third quartiles (Q1 and Q3) were taken at each selected slope angle. The degree of sorting, which equals Q3-Q1 and slope angles were plotted on graphs, on which increasing steepness of the graphic slope indicates less sorting. Decreased sorting means that the hillfront/piedmont junction is less apparent. In order to test rather than to assert this proposition, it is desirable to establish relations slope angle and debris size. Moreover, a regression analysis has been introduced in this study to examine more precisely the relationship between slope angle and debris size sorting.

3.4 Statistical testing of the parameters

Descriptive statistical testing was applied to profile skewness indices, slope lengths, and slope angles in order to test hypotheses about the relationship between each of the parameters and pairs of lithological populations.

Significance testing using the difference between two sample means was employed (Hammond & Mc Cullagh, 1978). The testing computation is as follows:

a- Compute the standard error of each parameter:

$$\sigma_{xi} = S_i / \sqrt{n_i - 1}$$

where S_i is the sample standard deviation of a parametric column ; σ_{xi} is the standard error, and n_i is the sample size.

b- Compute the estimated standard error: $\sigma_{X_1 - X_2}$

$$\sigma_{X_1 - X_2} = \sqrt{\sigma_{X_1} + \sigma_{X_2}}$$

c- Perform the significance test using the significance ratio :

$$S.R. = (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) / (\sigma_{X_1 - X_2})$$

where \bar{X}_1 and \bar{X}_2 are the means.

d- State the significance level at 1% and in some cases at 5 %, and:

- Obtain the degrees of freedom, which are $n_1 + n_2 - 2$.
- Identify the critical value of t (t^*) from the t distribution table.

e- State the null hypothesis (H_0) that there is no difference between each of the parameters at the pairs of the lithological populations, in case where S.R. is less than t^* . The null hypothesis is rejected when S.R. is greater than t^* .

4. Description of the sites

4.1 Granitic slopes

The granitic outcrops do not differ fundamentally from the other types of rocks. They are not more resistant than the surrounding sedimentary and andesitic rocks. Most of the granitic slopes are represented by a poorly developed dendritic drainage pattern and low drainage density and often scored by shallow intermittent channels. They are characterized by an abrupt break of slope which divides the slopes into hillfronts and piedmont surfaces (Photo 1).

The hillfronts are steep and irregular slopes ranging mostly from 26° and 52° (Fig. 4). The granitic hillfronts consist of apparent jointed bedrock and boulders standing either in isolation, in groups, or in clusters of residuals.

These boulders are certainly the most widely distributed of the surfaces developed on granite. They range in diameter from about 25 cm to 4 m or more, and they vary in shape from spherical to ellipsoidal forms (Strahler, 1981); the former shape is related to the process active at or near the land surface as granular disintegration, which changes the fresh rock mass from angular to rounded. The upper hillfront slopes of sites 1 and 2, which take the form of cliffs and whose morphology reflects the influence of variable joint spacing, are mainly occupied by boulders and blocks exceeding 2 meters in diameter. The roughness of the hillfront slopes vary from low to moderate due to the different distribution of the channels eroded by running water.



Photo.1 the granitic hillslopes (site3)

The piedmont surfaces are characterized by broad and gentle surface slopes, forming an abrupt break of slope where they meet the hillfront (Fig. 4). Some of these piedmonts are gently concave upward and others are almost rectilinear. Between the long streams that downcut the piedmonts, the slopes are smooth and more regular. The upper slopes vary from 4° to 11° and the lower slopes from $1^\circ 09'$ to $2^\circ 10'$. The upper piedmont surfaces adjacent to the hillfronts, defined by pediments, are veneered by sandy debris transported away from the upslopes by rainwash and ephemeral streams (unknown soil thickness).

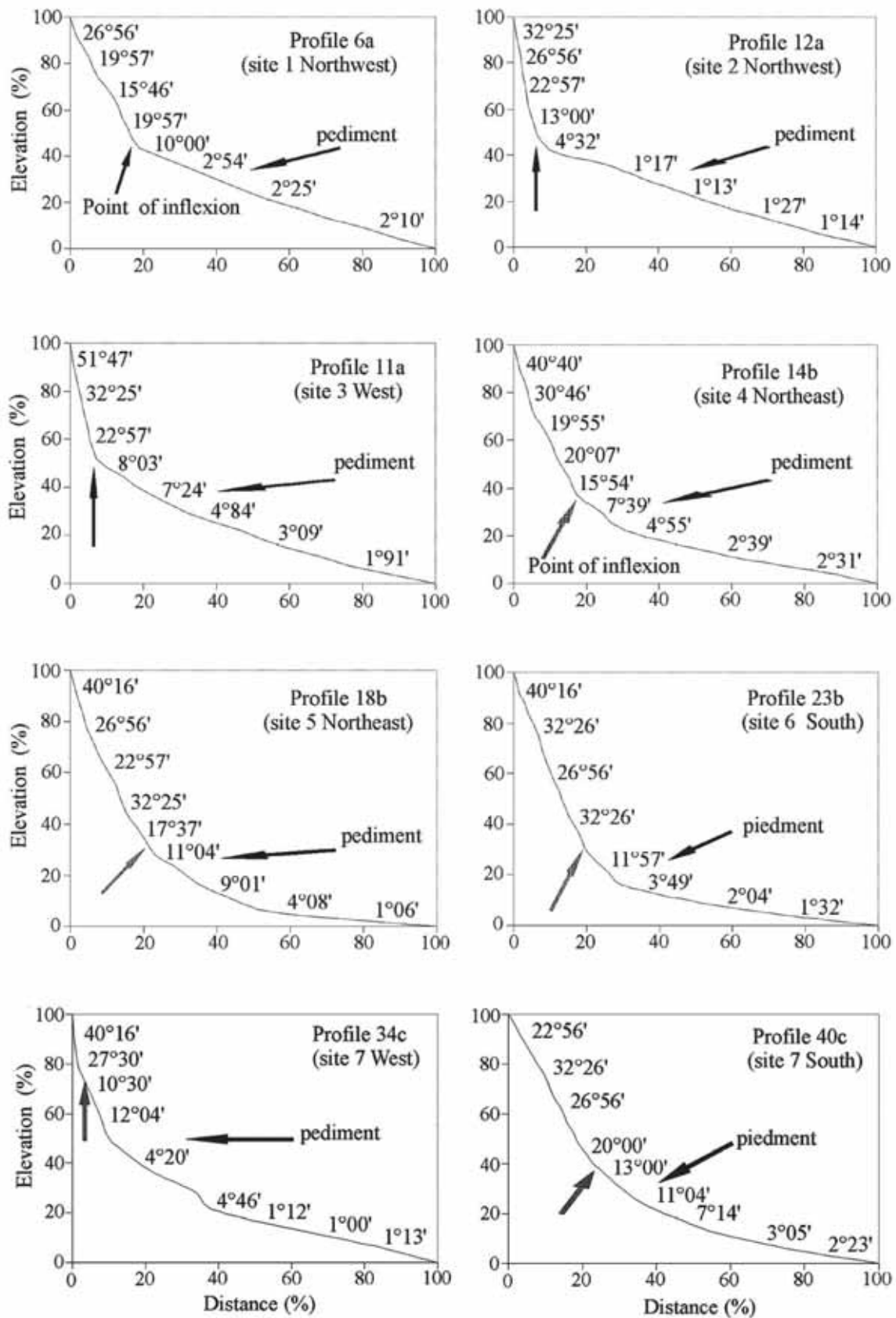


Fig. 4 Selected studied hillslopes. (a) granitic hillslopes, (b) andesitic hillslopes, (c) sedimentary hillslopes.

4.2 Andesitic slopes

There are two types of the andesitic slopes, one type is short and limited by the convergence of other andesitic hills as at the Golf Course Hill, site 4, or by different lithological contacts as at Twin Hills, site 5 (Photo 2). The other type is characterized by open slope surfaces as at site 6. The different lithological slopes do not show any apparent hillfront/piedmont junctions, but only continuous concave slopes (Fig. 4). The maximum inclinations on these surfaces range from 26° to 52° and the minimum inclinations are from $1^\circ 09'$ to $4^\circ 02'$. The steep slopes are characterized by an uneven debris size distribution of debris exceeding 100 mm and smaller ones, consisting of fractured bedrock outcrops. The debris is found loose on the surface or bedded on soil and may be covered by lichen. Going further downslope at angles inferior to 10 degrees, the bedrock outcrops and large debris decrease in their exposure. They are replaced by smaller debris generally from 6 to 20 mm (using median size) at inclinations of 5 degrees and less except in the Twin Hill area. The later do not show any debris size variation and the cobbles are thus the ones that dominate on the piedmont slopes, called stony pediments (Mabutt, 1977). Usually, this loose material is partially buried in soil and is enveloped by a desert varnish. Moreover, the debris on the Golf Course Hill and Twin Hill slopes is sub-rounded to rounded especially at slope angles between 25 and 10 degrees (even below 10 degrees at Twin Hills).



Photo 2. The andesitic Twin Hills (site 5).

The gradual erosion of the andesitic hillslopes has given the birth of pediments which unfortunately do not show an apparent knick at the toe of the hillfronts.

For this reason, a subjective method has been adopted to subdivide the profiles into hillfront and pediments. However, this method has revealed that these pediments were not always in contact with the hillfronts. There are 46% of piedmonts (sites 5 and 6) where the pediments are connected to colluvial foot slopes. The length of these foot slopes exceeds often 110 m and their upper slopes vary from 12° to 14° . The pediments of site 5, are occupied by large boulders derived essentially from debris slopes; they may be called stony pediments (Mabutt, 1977). Furthermore, the drainage pattern on the andesitic surfaces is dendritic and is characterized by a fairly low drainage density (2.67 Km-1) of few intermittent streams cutting through these slopes. Sites 5 and 6 are primarily incised by shallow channels, but site 4 and its surrounding slopes are scored by deeper intermittent channels.

4.3 Sedimentary slopes

The sedimentary slopes are characterized by a dendritic drainage pattern and a medium drainage density. Site 8 is represented by a moderate drainage density (2.98 Km-1) and scored principally by shallow channels. The western part of site 7 is highly dissected by deep intermittent channels. The southeastern part of these hills is moderately incised, and stands as topographic highs in the weak and unresistant siltstones and argillites. The slope shapes of the sedimentary rocks resemble those of the andesitic rocks. They are mostly concave without clearly marked hillfront/piedmont junctions; however, they do show more open and longer slope surfaces (Photo 3). The sedimentary slopes are generally moderate to fairly steep ranging from 17° to 32° at the upper slopes and $0^\circ 56'$ to 4° at the base slopes (Fig. 4). Covered by a thick mantle of debris, the piedmont slopes do not show any structural irregularities. The debris size distribution on slopes of 5° or steeper are much less sorted. The gentle slopes of 5° and less are characterized by smaller debris ranging from 8 to 15 mm in median. The loose material covering these slopes is mainly angular to sub-angular arkose, sandstone, siltstone and some calcareous elements. Most of the piedmonts in sites 7 (Photo 3) and 8 with west exposure, have pediments directly related to hillfronts. The ones exposed south show for instance slopes characterized by colluvial foot slope-pediment surfaces. The length of these colluvial foot slopes range between 90 and 140 m.



Photo 3. The West facing slopes of the Sedimentary Hills (site 7).

5. Analysis of slope profiles

The subdivision of the slope profiles into hillfronts and piedmonts was sometimes difficult since in some cases the knick point has been defined according to debris size sorting along the profiles. The test of significance between each pairs of rock types was introduced to permit comparisons between lithology and morphology of slopes.

5.1 Debris size sorting

This analysis was determined for the three lithologic slopes. The graphs in figure 5 show only the general trend of the debris sorting along the slopes and consequently points out of the segments alignment have been neglected. It is in the regression analysis that the totality of elements is taken in consideration and that to provide more information on debris distribution along the study hillslopes.

On the granitic slopes, the steep slopes are characterized by large sized debris which was brought from the higher slopes or was derived from in situ weathering. The debris size decreases downslope, occurring where piedmont slopes are inclined less than 5 or 10 degrees. Between this unit and the hillfront toes of 12 to 15 degrees, there is an abrupt increase of size elements where they almost tripled in diameter (Fig. 5). This change is often observed by a break of slope at 10 to 11 degrees; it is the knick point. The debris elements in the piedmont slopes continue to decrease until reaching 9 mm on slopes less than 11 degrees. This type of size distribution has given excellent associations ($r = -0.94$) between slope and debris sorting (Fig. 6). Indeed, the graphs have shown that the change in debris size coincide perfectly with the estimated point of inflexion (Fig. 5).

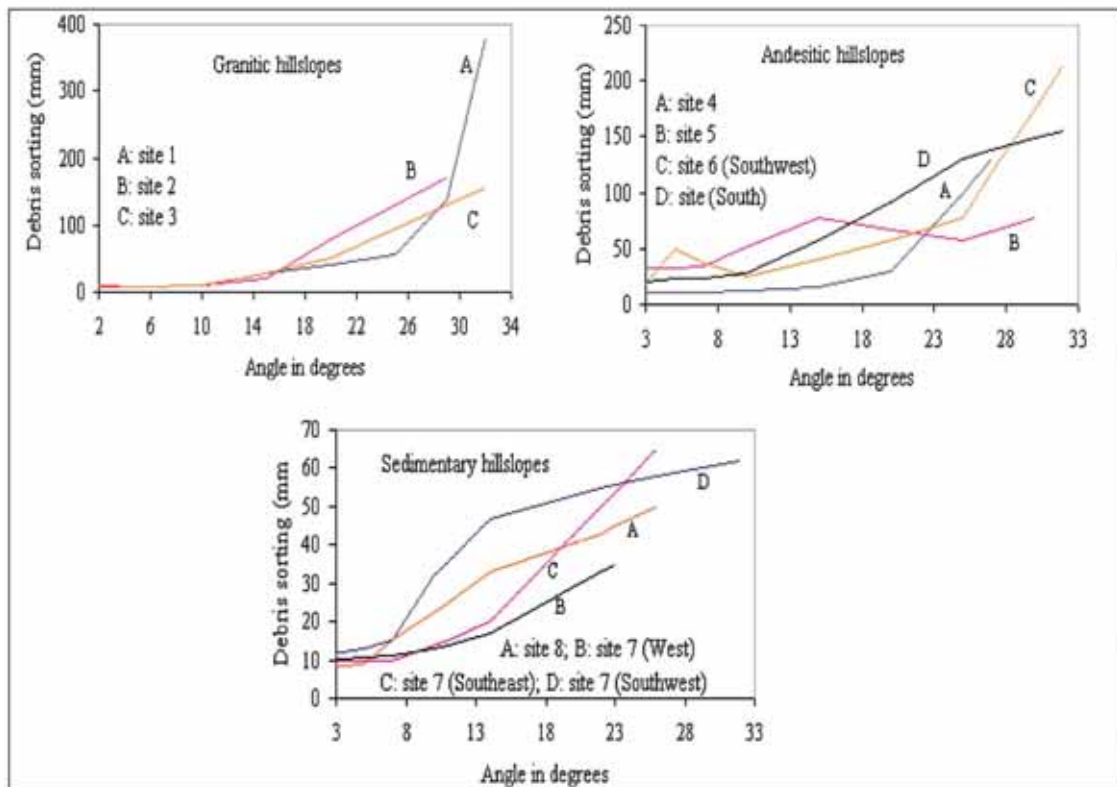


Fig. 5 Debris size distribution in fonction of slope on the studied hillslopes.

On the other hand, the debris sorting analysis done on andesitic slopes has been of less interest, where three sites out of four show a low debris sorting from almost 5 degrees and up (Fig. 5). the larger elements, including boulders of 70 mm in diameter, are found not only on steep slopes, but also on moderate and gentle slopes, especially at the Twin Hills (site 5) and hills of site 6. Contrary to site 6 ($r = - 0.80$), profiles of site 5 show a moderate relationship between debris size sorting and slope ($r = - 0.72$) with an important scattering of points around the line of regression (Fig. 6). In fact, the analysis has shown that a decrease of slope is not automatically followed

by a reduction of debris size. The only well sorted slope is at the Golf Course Hill (site 4), where the larger particles are confined to the steep slopes (greater than 12 degrees). On lower slopes the decrease in debris size is more significant, so that the selection of the hillfront/piedmont junction at that slope angle coincides well with the subjective inflexion point. Moreover, the coefficient of correlation ($r = - 0.92$) shows a good relationship between the two variables (Fig. 6). On slopes below 12 degrees, where is located the less marked break of slope, the debris size remains generally unchanged (mean size of 11 mm).

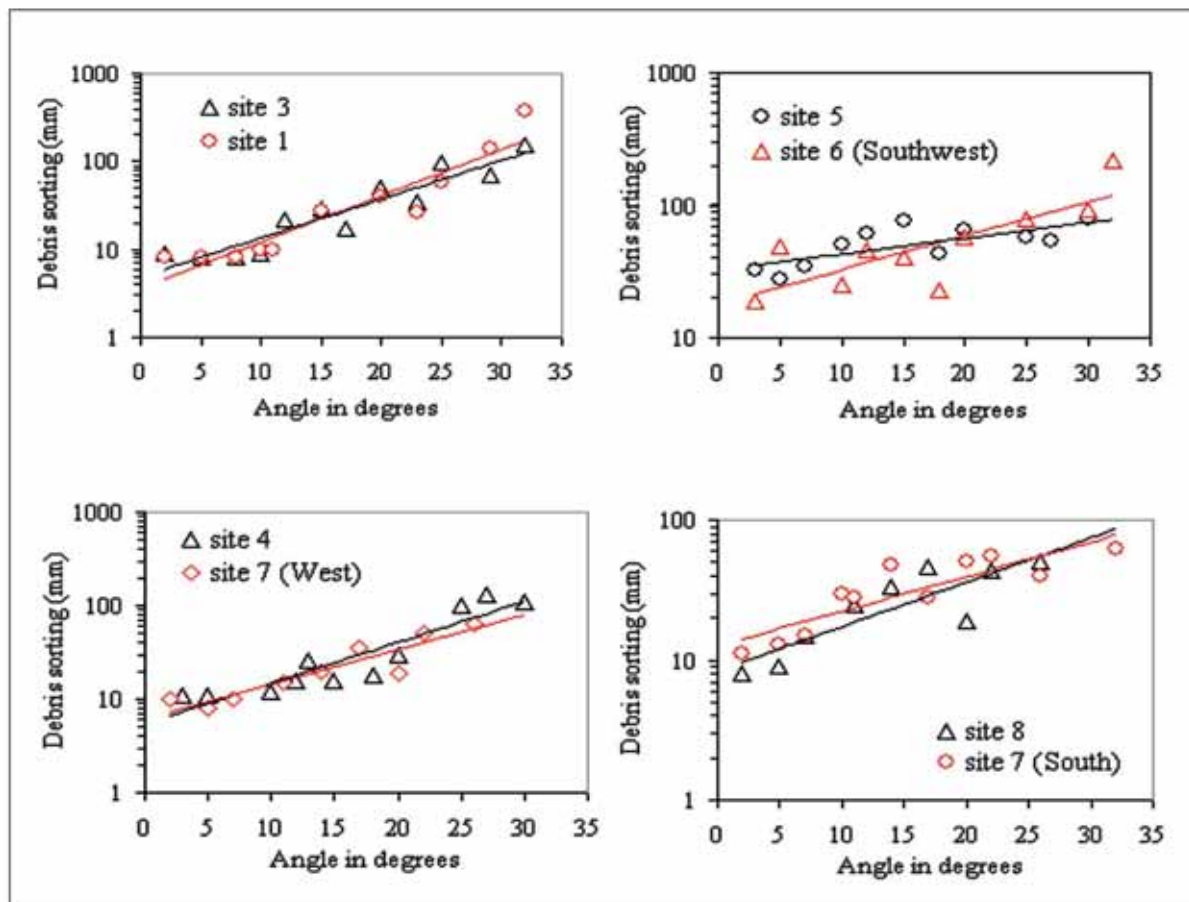


Fig. 6 Relationship of particle size versus slope angle in selected traverses.

The sedimentary slopes show larger particles (14 to 35 mm) on slopes between 6 and 11 degrees (Fig. 5) at Saginaw Hill (site 8) and at one third of the sedimentary Hills (site 7). On these hills, the remaining 2/3 of the hillslopes present a progressive decrease of the size of elements (median value of 12 mm) on slopes less or equal to 10 degrees. The regression analysis of slope and particle size has revealed that these variables are strongly related with coefficients of correlation ranging from -0.87 to -0.92 (Fig. 6). Although, these analyses have given good relations; they did not mark really the part of the slope in the large particle size decrease, and thus a difficulty is found in the determination of the hillfront/ piedmont junction. Even though, the point of inflexion remains the most useful criteria, the debris size analysis has sometimes helped to locate this point.

5.2 Form and length of slopes

Results of the regression analysis on profiles and piedmonts have revealed strong relationships between concavity and concentration indices ($r > 0.92$). Therefore, it is quite possible to introduce without major risks the concavity index in the determination of the profile forms (Fig. 7). Comparisons between each couple of profiles on granite-andesite on one hand, and granite-sedimentary rocks on the other hand, have given some unexpected results. We expected that the granitic slopes would be more concave, but the computed concavity index has shown that the concavity on andesitic and sedimentary slopes is more pronounced (Fig. 8). The tests have indeed given higher values of the significance ratios than the critical t (t^*), and thus the hypothesis of concave similarity is rejected at 99% (Table 1). On the other hand, the comparison between andesite and sedimentary profiles did not show any difference in their concavity form.

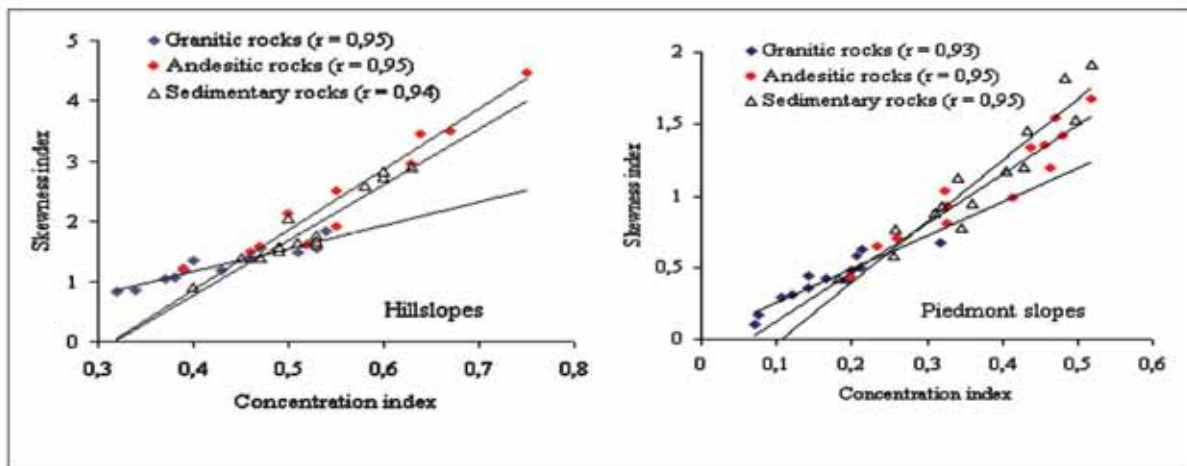


Fig. 7 Relationship of skewness index versus concentration index.

The granitic piedmont slopes show the least concave profiles (PSK between -0.01 and -0.68). They are slightly concave to nearly rectilinear, whereas, piedmonts on andesite and sedimentary piedmont slopes are distinctly different but quite similar between themselves. Their concave indices vary indeed between -0.43 and -1.92 (Fig. 8). Using statistical tests, the lithologic couples granite-andesite and granite-sedimentary rocks do not show similarity in their concavities (Table 1). The slope form similarity in the couple andesite and sedimentary piedmonts is due primarily to the

lithological heterogeneity and texture of the sedimentary formation, and also to the shortness of some andesitic piedmont surfaces, which do not provide a representative picture of the complete andesitic slope forms. Piedmont slopes present differences in their lengths. Slopes on andesite which range from 412 to 1006 m, are the least short. Piedmont lengths on granite and sedimentary rocks are similar, of which offer more extended pediment and alluvium surfaces. They range from 749 to 2096 m on granitic slopes and 725 to 1298 m on sedimentary slopes.

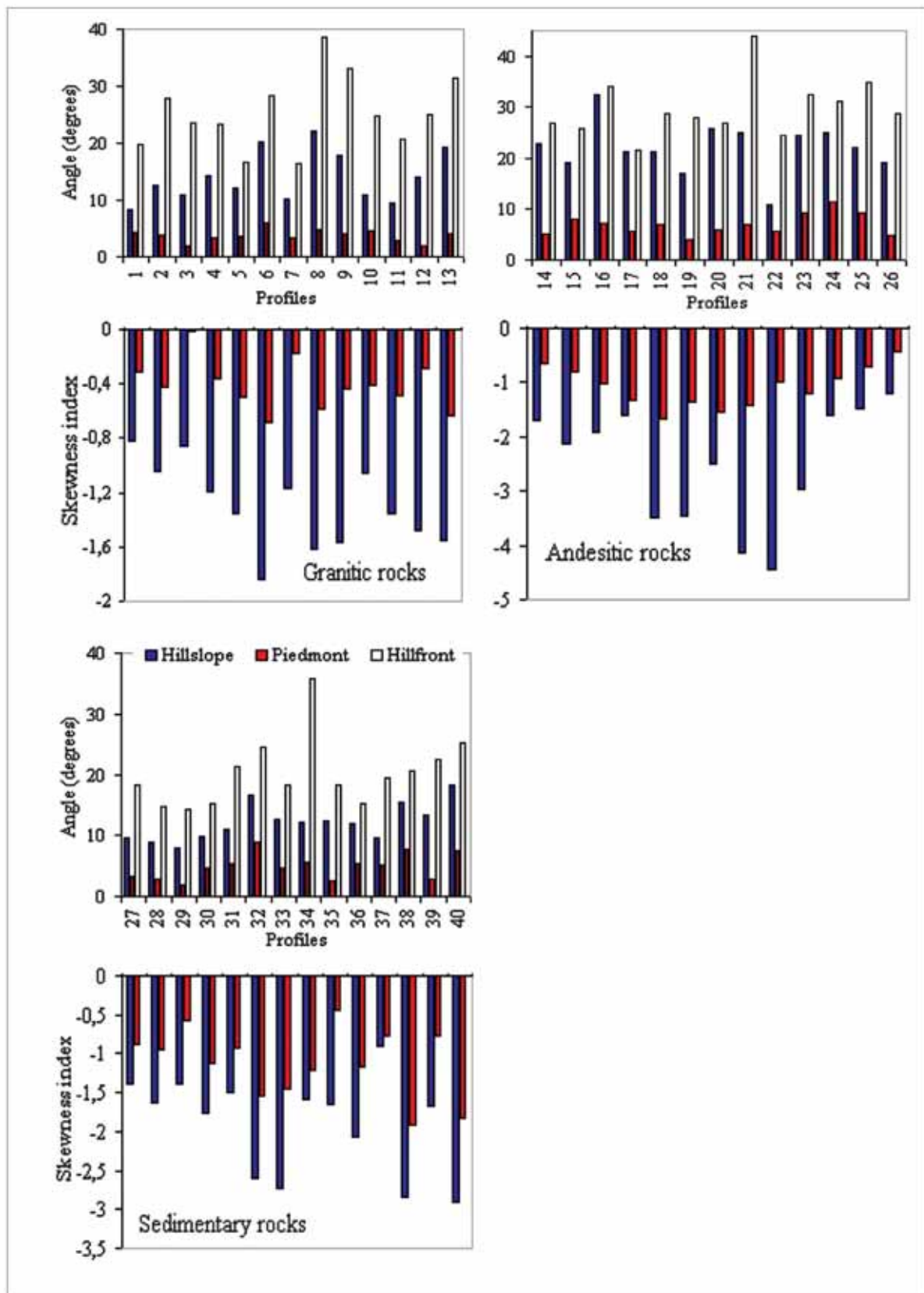


Fig. 8 Slope angles and skewness indexes of the studied profiles.

Table 1. Comparison of the three selected lithologic slopes.

1- Hillslopes							Decisions		
	1	2	3	S.R. 1 - 2	S.R. 1 - 3	S.R. 2 - 3	1 - 2	1 - 3	2 - 3
Skewness index mean	- 1.30	- 2.50	- 1.91	0.68	0.18	1.69	S.R. < t* accept Ho	S.R. < t* accept Ho	S.R. < t* accept Ho
Mean slope angle (θ°)	13°38'	21°08'	11°07'	3.81	1.62	7.63	S.R. > t* reject Ho	S.R. > t* accept Ho	S.R. > t* reject Ho

2- Piedmont slopes								S.R. > t* reject Ho	S.R. < t* accept Ho
Skewness index mean	- 0.40	- 1.08	- 1.15	6.18	5.81	0.45	S.R. > t* reject Ho	S.R. > t* reject Ho	S.R. < t* accept Ho
Mean slope length (m)	1699.80	672.53	1546.30	6.70	0.85	6.10		S.R. < t* accept Ho	S.R. > t* reject Ho
Mean slope angle (θ°)	3°44'	6°46'	4°25'	4.70	1.46	2.70			

Note: For granite (1), andesite (2) : degrees of freedom = 24, t* = 2.492
 For granite (1), sedimentary rocks (3) and (2),(3): degrees of freedom = 25, t* = 2.485
 Significance level (v) = 1%

5.3 Slope angles

Profile analysis has revealed that the similarity in mean slope angle is only valid for the couple granite-sedimentary hillslopes. The rest of couples show significance ratios greater than 3.5 and thus their slope angles are practically different (Table 1). The forty study hillfronts show slopes developed on granite possess a mean slope angle of 31°57' and a range of 16°24' to 38°28' (Fig. 8). The andesitic and sedimentary slopes are characterized respectively by mean slopes of 29°44' and 21°49', and by ranges of 21°27' to 43°52', and 14°18' to 35°49' (Fig. 8). From comparisons done on these profiles, one can conclude that the couples, except the one on andesite-sedimentary rocks, present a similarity in their mean slope angles (Table 1). In this case, it is probably that the heterogeneity of slope angles in this couple reflects the role of lithology in the determination of the hillfront slope (Cooke, 1970). Granitic piedmonts and those on sedimentary rocks show that their slopes are not significantly associated to lithology. The former piedmonts, ranging between 1°57' and 6°00' (Fig. 8), have a low mean slope of 3°42'. The sedimentary piedmonts are generally characterized by slightly low slopes with a mean value of 5°16' and slope angles varying from 1°50' to 8°53'. The andesitic piedmont slope analysis has provided a net difference from those slopes of the other rock types. This means that the relationship between slope angle and lithology is significant (Table 1). Given the importance of this relationship, it is worth considering in more detail the steepness of the upper andesitic piedmonts, which range between 11°57' and 14°15' in 46% of the study slopes.

6. Conclusion

As a result of the study in the Tucson Mountains, it can be concluded that profiles on granite and sedimentary rocks cover extended areas; however, the former profiles are less concave than the two other lithological formations alike in their shape. The subdivision of the profiles into hillfronts and piedmonts and the determination of their point of inflexion, have been possible by using the method of a subjective choice and the debris size analysis in the study hillslopes. It is for instance on granitic slopes and at a least degree on sedimentary slopes that the junction is apparent and the good sorting coincide perfectly with the break of slope between the two physiographic units. Concerning the andesitic slopes, the junction has been determined by the point of inflexion, the larger debris distribution is continuous along the hillslopes. The relationship between lithology and slope angle in the chosen hillfronts is significant. The high values of slopes angles in the granitic and andesitic slopes and the moderate values in the sedimentary rocks reflect the importance of the lithological nature in the evolution of every landform. The morphology of granitic and sedimentary piedmonts whose slopes are low and the moderate andesitic slopes allow the appearance of a strong relationship between lithology and slope morphology, particularly in the form and slope angle of piedmonts. Thus it is possible to extract from this study the existence of a knick point in granitic hillfront/piedmont junction and the extension of slightly concave to rectilinear piedmont surfaces. More concave piedmont slopes are noticeable in both andesitic and sedimentary rocks with a subjective point of inflexion designation.

A set of such results can be suspected that both the hillslope morphology at hillfront/piedmont junction and the degree of concavity are in part functions of the types of weathering products of the different rock types. Granitic rocks weather to grus, which tends to be washed off the hills and is transported with relative ease across the piedmont. Rock types such as andesite and sedimentary rocks that result in blocky detritus would tend to be associated with thicker and wider colluvial wedges and more concave piedmonts.

Références

- Abrahams A.D., Parsons A.J. & Hirsch P.J. (1985). Hillslope gradient-particle relations : evidence for the formation of debris slopes by hydraulic process in the Mohave Desert. *Journal of Geology*, 93, 347-357.
- Abrahams A.D. & Parsons A.J. (1991). Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, Southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 122, 49-59.
- Bennett P.J. (1957). The geology and mineralization of the Sedimentary Hill area, Pima County, Arizona. University of Arizona, MS thesis, 43p.
- Blong R.J. (1975). Hillslope morphometry and classification : a New Zealand example. *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 19, 405-429.
- Brown W.H. (1939). Tucson Mountains, an Arizona Basin and Range type. *Geological Society of America Bulletin*, 50, 697-760.
- Clark M. & Small J. (1982). Slopes and weathering. Cambridge University Press, New York, 45-91.
- Combrouze A. (1993). Probabilités et statistiques. Edition Presses Universitaires de France, Paris, 785-791.
- Cooke R.U. (1970). Morphometric analysis of pediments and associated landforms in the Western Mojave Desert, California. *American Journal of Science*, 269, 26-38.
- Cooke R.U. and Reeves R. (1972). Relations between debris size and the slope of mountain fronts and pediments in the Mojave Desert, California. *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, N. F., 16, 76-82.
- Kinnison J.E. (1958). Geology and ore deposits of the southern section of the Amole Mining District, Tucson Mountains, Pima County, Arizona. University of Arizona, MS thesis, 123p.
- Hammond R. & McCulagh P.S. (1978). Quantitative techniques in geography – an introduction. Oxford University Press, Oxford, 159-218.
- Lipman P.W. & Fridrich, C.J. (1990). Cretaceous caldera systems, Tucson and Sierrita Mountains, Arizona. *Ariz. Geol. Survey Special Paper* 7, 51-65.
- Mammerickx J. (1964). Quantitative observation of pediments in the Mohave and Sonoran Deserts. *American Journal of Science*, 262, 417-435.
- Mayo E.B. (1968). A history of geologic investigation in the Tucson Mountains, Pima County, Arizona. *Arizona Geological Society, Southern Arizona Guidebook*, 3, 155-170.
- O'Neil M.P. & Mark D.M. (1987). On the frequency distribution of landslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 127-136.
- Pitty A.F. (1970). A scheme for hillslope analysis : indices and tests for differences. *Occasional Papers in Geography*, 17, 18-30.
- Risley, R. (1983). Sedimentary and stratigraphy of the lower Cretaceous Amole Arkose, Tucson Mountains, Arizona. M.S. thesis, University of Arizona.
- Strahler A.N. (1981). *Physical geology*. Harper and Row Publishers, Inc., New York, 366-371.
- Weng C.Y., Jackson S.T. (1999). Late glacial and Holocene vegetation history and paleoclimate of the Kaibab Plateau, Arizona. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 153, 179-201.

Nouvelle Approche du Réseau Artmap Flou : Application a la Classification Multi Spectrale des Images Spot XS de la Baie d'Alger *

Farid ALILAT, Saliha LOUMI, Hamoud MERRAD et Boualem SANSAL

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene,
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Institut d'Electronique,
Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement Atmosphérique,
BP 32, El-Alia Bab - Ezzouar, 16111, Alger Algérie
Télécopieur : +213 (21) 24-76-07 et +213 (21) 24-71-87

Email: falilat@usthb.dz ou faralilat@yahoo.fr, salihaloumi@yahoo.fr, hmerrad@usthb.dz

Résumé: Dans cet article nous proposons une modification de l'algorithme d'apprentissage du réseau de neurones ARTMAP (Adaptive Resonance Theory) flou. Cette modification consiste à faire apprendre au réseau une base d'exemples non pas une seule fois comme c'est d'usage, mais autant de fois que son architecture est en évolution ou que l'objectif erreur n'est pas atteint, et ceci sans trop se soucier des valeurs à imposer aux huit (08) paramètres du réseau ARTMAP flou. Jusqu'au jour d'aujourd'hui, il n'existe pas de méthodes universelles pour le choix de ces paramètres, leurs valeurs étant fixées suite à une série d'expériences. Pour évaluer les performances du réseau ainsi modifié, une comparaison entre ce dernier et un réseau PMC à rétro propagation du gradient optimisé par l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) est réalisée. Comme application, nous avons effectué une classification de l'image multi spectrale SPOT XS de la baie d'Alger. Nous utilisons comme critère d'évaluation les temps d'apprentissage et de généralisation d'une part et l'erreur quadratique moyenne d'autre part. Les résultats de cette étude présentés sous forme de courbes, de tableaux et d'images montrent que la modification proposée contribue à une réduction importante du temps et de l'erreur d'apprentissage.

Mots-clés: Réseaux de neurones, PMC, Levenberg-Marquardt, ARTMAP flou, Télédétection, Classification.

Abstract: In this paper we suggest a modification of the algorithm of training of the fuzzy neural network ARTMAP. This modification consists in passing the base not only once time as usual but as many times as necessary.

At this time, the architecture of the network is in evolution to converge towards an imposed error. During this operation, we don't take into account of the choice of the eight parameters of the fuzzy neural network. Until now, there are not universal methods for the choice of these parameters, their values being fixed following a series of experiments. To evaluate the performances of the modified neural network, a comparison between this last and a neural network MLP with back propagation of the optimized gradient by the algorithm of Levenberg-Marquardt (LM) are realized. As application we carried out a classification of the image of the bay of Algiers taken by SPOT XS. We use as criterion of evaluation the time of training and generalization on the one hand and the average quadratic error on the other hand. The results of this study presented in the forms of curves, tables and images show that the suggested modification contributes to a significant improvement of time and error of training.

Keywords : Neural Networks, MLP, Levenberg - Marquardt, Fuzzy - ARTMAP, Remote Sensing, Classification.

1. Introduction

Les systèmes ARTMAP [Tan97] flous [Dagher99, Charalampidis99, Aggarwal 99] sont des réseaux de neurones basés sur la connaissance (réseaux à apprentissage supervisé), utilisant des données et des opérateurs de la logique floue. Ces réseaux ont trouvé une place de choix parmi la multitude des réseaux connexionnistes grâce à leurs aptitudes à résoudre des problèmes qui peuvent être décrits par des données partiellement correctes et/ou incomplètes [Carpenter92, 95].

* Article publié dans la revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection n° 177 (2005-1), et repris dans le BSG Avec l'amiable autorisation de l'auteur.

Leur inconvénient est qu'ils possèdent beaucoup trop de paramètres à fixer correctement pour les faire converger vers la solution désirée. Pour palier cette difficulté, nous laissons, par la technique proposée dans cette étude, le réseau en phase d'apprentissage tant que l'objectif n'est pas atteint ou que son architecture reste en évolution. La présentation du ARTMAP flou et son amélioration fait l'objet de la section 3.

Pour pouvoir évaluer les performances du réseau ainsi modifié, nous l'avons comparé au perceptron multi couches (PMC) à apprentissage rapide à rétro propagation du gradient utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt [Hagan94, Wilamowski01] que nous présentons dans la section 4. Les critères d'évaluation utilisés sont: l'erreur quadratique moyenne et les temps d'apprentissage et de généralisation.

L'objectif étant la classification de l'image multi spectrale SPOT XS de la baie d'Alger, les résultats des classifications réalisées par les deux réseaux mis en compétition, ainsi que les résultats expérimentaux de la comparaison de leurs performances sont présentés dans la section 5. La section 6 présente la conclusion de cette étude.

2. Données et site d'étude

Le site d'étude est la baie d'Alger de coordonnées géographiques 36° 39' 00 N à 36° 51' 00 N et 3° 00' 30 E à 3° 16' 20 E. Les données utilisées représentent une image multi spectrale (XS1, XS2 et XS3) fournie par le capteur HRV de SPOT (image prise le 1 avril 1997). Cette image représente une partie de la mer Méditerranée au nord, la ville et le port d'Alger le long de la côte, le bois de Baïnem à l'ouest de la ville, et de la terre nue ou agricole principalement au sud. La taille de l'image est de 1500 x 1000 pixels sur 3 bandes. De cette image, nous avons extrait 252 échantillons représentatifs des quatre classes (87 pour la classe 1, 38 pour la classe 2, 63 pour la classe 3 et 64 pour la classe 4) qui vont servir comme base d'apprentissage, et 217 autres échantillons (69 pour la classe 1, 31 pour la classe 2, 52 pour la classe 3 et 65 pour la classe 4) pour le contrôle des classifieurs neuronaux étudiés.

3. Le réseau ARTMAP flou

Le réseau ARTMAP flou est un réseau de neurones à apprentissage supervisé (l'apprentissage est contrôlé par une base d'exemples, où chaque exemple est une association d'un vecteur d'entrée à un vecteur de sortie désirée).

Son architecture est évolutive, il est composé de deux réseaux ART (Adaptive Resonance Theory) flou [Frank98, Baraldi02, Charalampidis02], ARTa et ARTb, ces deux réseaux sont liés par l'intermédiaire d'un réseau de cellules neuronales MAP (figure 1).

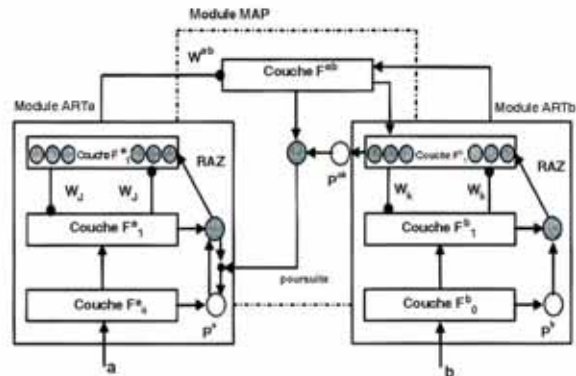


Fig. 1 Schéma bloc du réseau ARTMAP flou.

Chaque module d'ART flou est un réseau de neurones non supervisé composé de trois couches [Carpenter91]. Une couche F0 (couche de préparation des données), une couche F1 de comparaison et une troisième couche F2 de compétition.

L'ARTa reçoit les corps des vecteurs d'entrée des exemples, et l'ARTb reçoit le vecteur de sortie désirée associé.

Chaque module ART flou a trois couches:

- La couche de codage F0 possède un nombre de nœuds double de la taille du vecteur de l'entrée du module du fait d'un codage en complément, et génère le vecteur $A=(a,a^c)$ dans ARTa et $B=(b,b^c)$ dans ARTb, a et b étant des vecteurs flous (leurs éléments sont compris entre 0 et 1).

Pour des raisons de simplification des écritures, notons I le vecteur A ou B selon qu'il s'agisse du vecteur d'entrée du ARTa ou du ARTb.

- La couche de comparaison F1 possède le même nombre de nœuds que F0. Chaque nœud de F1 est lié au nœud de même ordre de F0 par un poids égal à un. Le vecteur X (x^a pour l'ARTa et x^b pour l'ARTb) exprime l'activation de F1.

- La couche de compétition F2 est entièrement interconnectée à F1. Un nœud j de F2 par exemple est connecté avec tous les nœuds de F1, le vecteur des poids adaptatifs associé est noté W_j (W_j^a pour l'ARTa, et W_j^b pour l'ARTb). Le vecteur Y (y^a pour l'ARTa, et y^b pour l'ARTb) exprime l'activation de F2.

La dynamique du réseau ART flou dépend [Carpenter92,95] du choix du paramètre $\alpha > 0$ (utilisé lors de la compétition entre neurones dans F2), du paramètre d'apprentissage $0 \leq \beta \leq 1$, et du paramètre de vigilance ρ ($0 \leq \rho \leq 1$).

L'ARTMAP flou possède en plus trois autres paramètres qui sont: La valeur minimum du paramètre de vigilance de l'ARTa noté $\bar{\rho}^a$, le paramètre de vigilance ρ^{ab} et le paramètre d'apprentissage β^{ab} de la couche MAP.

La phase d'apprentissage du réseau ARTMAP flou consiste en une adaptation de l'architecture (nombres de cellules de F2a, F2b et du MAP) et en une mise à jour des poids des différentes connexions établies [Tan97, Charalampidis01, Aggarwal99]. Cette évolution de l'architecture du réseau découle du fait que dans cette phase d'apprentissage un neurone gagnant dans chaque ART est recherché (compétition), il est ensuite comparé au vecteur d'entrée (comparaison). Si cette comparaison est concluante dans chaque ART ; le résultat de la comparaison est supérieur à un seuil (critère de vigilance) une mise à jour des poids est réalisée. Dans le cas contraire, une nouvelle recherche dans le ART correspondant est faite. Si aucun gagnant ne satisfait le critère de vigilance, un neurone est créé dans la couche F2 du ART correspondant, et une couche ou un neurone par couche (selon que l'évolution de l'architecture s'est faite dans l'ARTa ou l'ARTb) est rajouté dans le MAP.

Ainsi l'algorithme d'apprentissage du réseau ARTMAP flou [Carpenter92] se présente comme suit:

3.1 Algorithme

Pour chaque exemple (a,b) (a étant le vecteur d'entrée de l'exemple, et b sa sortie associée) de la base d'apprentissage, on réalise les étapes suivantes:
 Etape 1 : Présentation de l'entrée

$$\rho^a = \bar{\rho}^a, \quad x^a = A, \quad x^b = B$$

Etape 2 : Activation de F2

Etape 2.1 : Sélection d'une catégorie.

Pour chaque module ART, calculer l'activation T_j (le degré avec lequel le vecteur poids W_j est un sousensemble de l'entrée I) pour chaque nœud j de F2. Choisir ensuite le nœud J qui a la plus grande valeur, il est considéré comme le neurone gagnant ou la catégorie (un seul neurone peut être altéré pour chaque entrée).

T_j est définie par:

$$T_j(I) = \frac{|I \wedge W_j|}{\alpha + |W_j|} \tag{1}$$

Où \wedge est l'intersection floue donnée $(p \wedge q)_i = \min(p_i, q_i)$ et la norme $|\cdot|$ par:

$$|p| = \sum_i |p_i| \tag{2}$$

Etape 2.2: Pour chaque nœud pré sélectionné dans l'étape 2.1 (J dans F2a et K dans F2b), calculer la fonction m_j (degré avec lequel l'entrée est un sous-ensemble du prototype W_j):

$$m_j(I) = \frac{|I \wedge W_j|}{|I|} \tag{3}$$

Si cette fonction pour le nœud J et/ou K est supérieure ou égal au critère de vigilance ρ (ρ^a et/ou ρ^b) on supposera qu'il y a résonance et que la couche F2 associée est activée: ainsi pour l'ARTa $Y_j = 1$ et $Y_i = 0$ pour tout $j \neq J$ (pareillement pour ARTb). Dans le cas contraire, désactiver ce nœud en le mettant à zéro (RAZ), sélectionner un nouveau nœud et refaire l'étape 2.2 dans le module respectif.

Si aucune catégorie n'a pu être choisie, un (des) nouveau(x) nœud(s) est (sont) créé(s) dynamiquement, soit J et/ou K ce(s) nœud(s). Avec:

$$W_J^a = 1, W_J^{ab} = 1, y_J^a = 1 \text{ et } y_J^b = 0 \text{ pour } j \neq J$$

$$\text{et/ou } W_K^b = 1, W_K^{ab} = 1, y_K^b = 1 \text{ et } y_K^a = 0 \text{ pour } k \neq K$$

Etape 3 : Test de vigilance dans la couche MAP. Dans cette couche on calcule $x^{ab} = W_J^{ab} \wedge y^b$.

Si $|x^{ab}| |I| |y^b| \geq \rho^{ab}$ on exécute l'étape 4. Sinon il y a mauvaise catégorisation dans le ARTa on exécutera, alors l'étape 5.

Etape 4 : Apprentissage ou mise à jour des poids.

W_J^a, W_K^b : sont mis à jour comme suit:

$$W_j^{(\text{nouveau})} = \beta(I \wedge W_j^{(\text{ancien})}) + (1 - \beta)W_j^{(\text{ancien})} \tag{4}$$

Et W_J^{ab} est mis à jour comme suit:

$$W_j^{ab(\text{nouveau})} = \beta^{ab}(y^b \wedge W_j^{ab(\text{ancien})}) + (1 - \beta^{ab})W_j^{ab(\text{ancien})} \tag{5}$$

Il est à remarquer que l'apprentissage rapide correspond au choix $\beta=1$ dans chacune des couches. Etape 5 : Changement du critère de vigilance du ARTa.

Mettre $\rho^a = m_j^a(A) + \varepsilon$, et $T_j = 0$ et aller de nouveau à l'étape 2.

3.2 Modification du réseau ARTMAP flou

Une amélioration de cet algorithme est proposée dans ce papier. Elle consiste à faire passer l'ensemble des exemples de la base d'apprentissage non pas une seule fois comme c'est d'usage, mais autant de fois que le réseau est en évolution architecturale (c'est à dire jusqu'à stabilité de l'architecture du réseau) ou que l'erreur fixée n'est pas atteinte. Cette amélioration est la conséquence de deux principaux constats:

1°/ Le réseaux ARTMAP flou possède beaucoup trop de paramètres à fixer pour atteindre un taux d'apprentissage raisonnable.

Ces paramètres sont: les coefficients de vigilance et les coefficients d'apprentissage des ARTa, ARTb et du MAP, et les coefficients de comparaison des ARTa et ARTb.

Pour mettre en évidence cette difficulté de choix des paramètres, une étude consistant à faire varier un paramètre et à fixer les autres pour amener le réseau à classifier une base d'apprentissage de 252 exemples en 4 classes, a été réalisée. Cette étude consiste à déterminer l'erreur d'apprentissage et le nombre de cellules du réseau en fonction du paramètre mis en jeu, l'algorithme utilisé étant celui décrit plus haut (classique), et les paramètres fixes à:

$$\bar{\rho}^a = 0,1, \rho^b = 0,1, \rho^{ab} = 0,1, \beta^a = 1, \beta^b = 1, \beta^{ab} = 1, \alpha^a = 0, \alpha^b = 0.$$

Les résultats sont présentés en figure 2 sous forme de courbes d'erreur et du nombre de cellules du réseau en fonction du paramètre étudié.

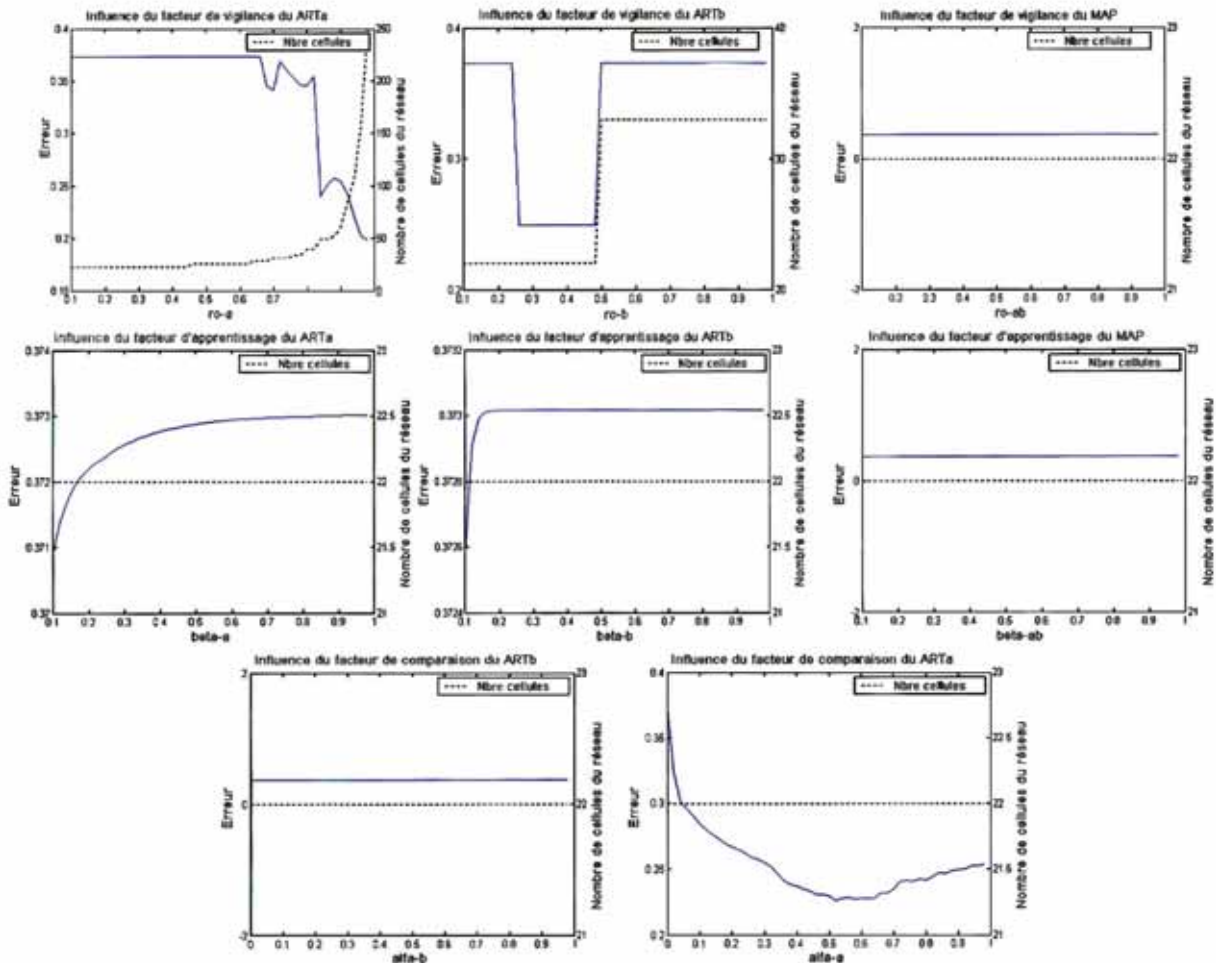


Fig. 2 Etude de l'influence d'un paramètre sur le taux d'apprentissage et sur le nombre de cellules du réseau.

Il apparaît clairement qu'il est très difficile de trouver les valeurs adéquates des paramètres pour faire converger le réseau au résultat escompté. Cette difficulté est encore plus ardue par l'existence du nombre important de combinaisons possibles. Dans cette optique une étude complémentaire consistant à faire varier deux paramètres à la fois en fixant les autres a été réalisée sans qu'elle donne des résultats probants. la figure 3 illustre à titre d'exemples l'étude de l'erreur et du nombre de cellules en fonction de $(\bar{\rho}^a, \rho^b)$, $(\bar{\rho}^a, \alpha^a)$ et (β^a, β^b) .

2°/ L'algorithme d'apprentissage du réseau ARTMAP flou tel que décrit en section 3.1, fait

passer les exemples un à un, et pour chaque exemple une mise à jour de l'architecture et/ou des poids est réalisée. Entre le passage d'un exemple se situant en début de la base et la fin de l'apprentissage le réseau sera fortement modifié si les paramètres sont mal choisis, cette modification influe négativement sur le degré d'apprentissage des premiers exemples.

La solution que nous préconisons dans cet article est de faire passer la base d'apprentissage autant de fois que l'erreur fixée n'est pas atteinte ou que l'architecture reste en évolution et cela sans se soucier des huit paramètres en les fixant une seule fois.

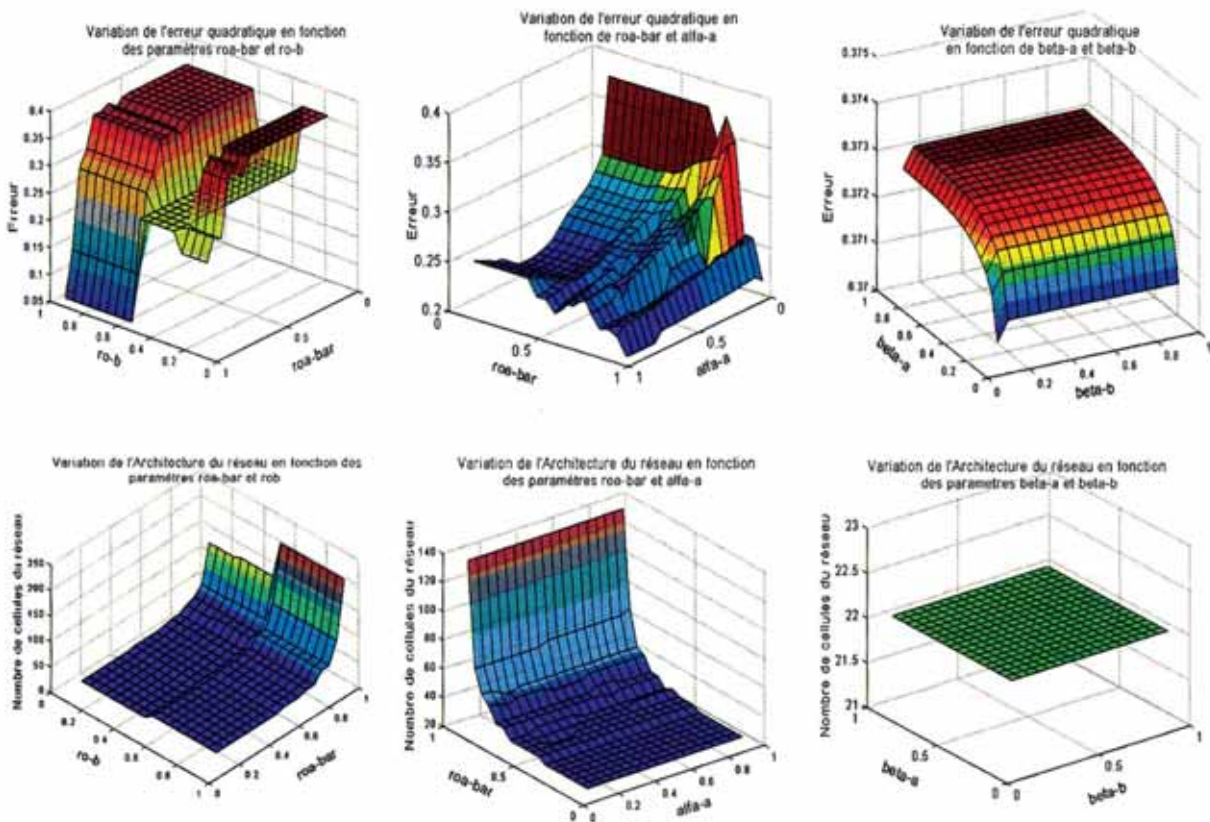


Fig. 3 Etude de l'influence de deux paramètres sur le taux d'apprentissage et sur le nombre de cellules du réseau.

L'étude menée sur la même base mais en la faisant passer plusieurs fois montre (figure 4) que l'erreur décroît après chaque passage. Nous avons fixé les facteurs de vigilance et d'apprentissage à de fortes valeurs égales à 0,95, par contre les facteurs de

comparaison sont choisis faibles (égaux à 10^{-4}). La stabilité architecturale est atteinte au bout de la sixième (6^{ème}) itération, alors que l'erreur quadratique moyenne qui est de l'ordre de $3,04 \cdot 10^{-10}$ n'est atteinte qu'à la neuvième (9^{ème}) itération.

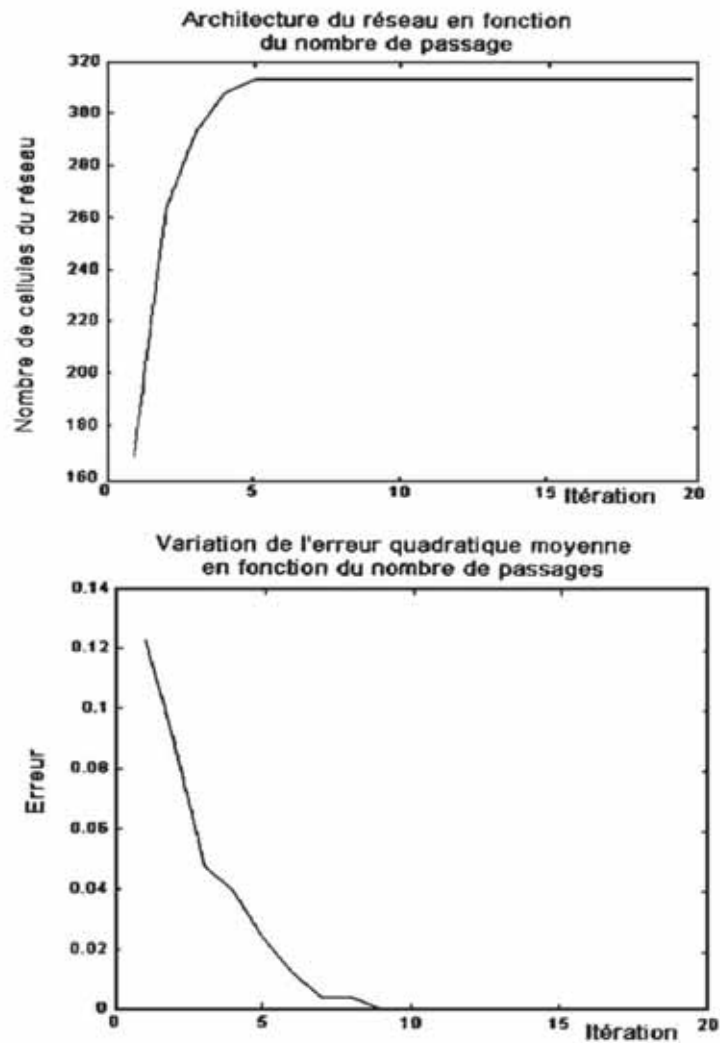


Fig. 4 Evolution de l'erreur quadratique moyenne et de l'architecture du réseau en fonction du nombre de passages.

4. Le réseau PMC à apprentissage rapide

Dans le réseau perceptron multi couches (PMC) (figure 5) à apprentissage par rétro propagation du gradient (RPG) [Zhou00, Rumelhart86], le gradient donne la direction vers laquelle il faut se déplacer pour trouver le minimum de l'erreur, mais ne donne en aucun cas le pas avec lequel on doit modifier les poids du réseau pour faire diminuer au plus vite cette erreur [Baldi95], en effet ce pas est un coefficient fixe ou adaptatif (variant pour chaque itération). L'algorithme de Levenberg-Marquardt [Hagan94, Baldi95, Wilamowski01] permet de déterminer ce pas en utilisant la dérivée seconde de l'expression de l'erreur quadratique moyenne.

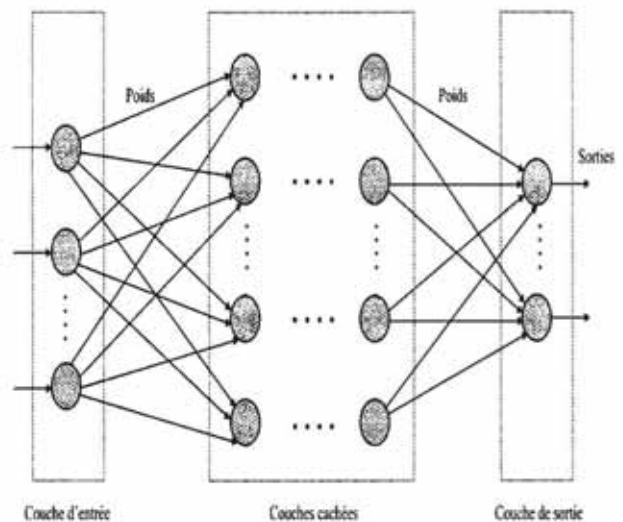


Fig. 5 Réseau perceptron multi couches PMC.

Cette erreur quadratique s'exprime par:

$$F(w) = \left\langle (g(a, w) - b)^2 \right\rangle \quad (6)$$

Où $\langle \rangle$ est la moyenne calculée sur l'ensemble des couples (a,b) et g une fonction de deux vecteurs a et w.

L'idée consiste en la détermination du nouveau vecteur poids W_{t+1} en fonction de l'actuel W_t , telle que la valeur de $F(W_{t+1})$ se rapproche le plus d'un minimum local de la fonction F. Pour cela, on calcule une approximation quadratique de F à partir d'une approximation linéaire de g autour du point w_t . En déterminant le point W pour lequel le gradient de l'approximation quadratique de F s'annule, on obtient:

$$w = w_t - H^{-1} d \quad (7)$$

Avec:

$$d = \left\langle (g(a, w_t) - b) \nabla g(a, w_t) \right\rangle \quad (8)$$

$$H = \left\langle \nabla g(a, w_t) \nabla g(a, w_t)^T \right\rangle \quad (9)$$

L'équation 7 pourrait servir dans la détermination de W_{t+1} à partir de W_t à la condition que g soit proche d'une droite autour de W_t .

L'utilisation de cette approche quadratique dans la région où g est quasi linéaire et une descente du gradient, dans le cas contraire elle représente le concept de Levenberg. Sa formulation est:

$$w_{t+1} = w_t - (H + \lambda I)^{-1} d \quad (10)$$

Effectivement, lorsque λ est faible, cette équation est équivalente à l'équation 7, et s'il est grand elle est équivalente à :

$$w_{t+1} = w_t - \frac{1}{\lambda} d = w_t - \frac{1}{2\lambda} \nabla F(a, w_t) \quad (11)$$

L'équation 11 est une descente du gradient. En pratique on procède comme suit:

$$F(w) = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K (d_{kp} - o_{kp})^2 \quad (12)$$

Où $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ est le vecteur poids du réseau entre les deux couches considérées, d_{kp} est la valeur désirée du k^{ème} nœud de la couche extérieure pour le p^{ème} exemple, O_{kp} est la valeur actuelle

ou celle obtenue par le réseau au nœud k pour l'exemple p ; P est le nombre d'exemples, et K le nombre de nœuds de la couche extérieure.

L'équation 6 peut s'écrire en fonction du vecteur d'erreur cumulative E comme suit:

$$F(w) = E^T E \quad (13)$$

Où $E = [e_{11} \dots e_{K1} e_{12} \dots e_{K2} \dots e_{1p} \dots e_{Kp}]^T$, $e_{pk} = d_{pk} - o_{pk}$,
 $k = 1, \dots, K$ et $p = 1, \dots, P$.

Les poids sont mis à jour comme suit:

$$w_{t+1} = w_t - (J_t^T J_t + \lambda I_t)^{-1} J_t^T E_t \quad (14)$$

Où J est la matrice Jacobien, W_{t+1} sont les nouveaux poids, W_t sont les anciens poids et I est la matrice identité.

Il est évident que ce procédé est particulièrement intéressant pour faire converger le réseau de neurones en un nombre d'itérations moindre, mais il est clair aussi que chaque itération nécessite plus de calcul du fait de l'inversion de la matrice.

5. Résultats

En plus de la modification du réseau de neurones ARTMAP flou, le but de ce papier est d'évaluer les performances du ARTMAP flou modifié. Nous avons donc effectué une comparaison avec un réseau PMC à apprentissage rapide utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Les deux réseaux étant à apprentissage supervisé, ils ont été entraînés sur une base de 252 exemples représentant quatre classes (la classe 1 pour l'eau, la classe 2 pour le bois, la classe 3 pour le bâtis et la classe 4 pour la terre nue ou agricole), l'erreur quadratique moyenne à atteindre lors de l'apprentissage étant de 10^{-3} .

Le réseau PMC choisi pour cette application est un réseau à une couche d'entrée de 3 cellules (chaque cellule reçoit un pixel fuzzifié d'une bande), une couche cachée à 9 cellules, et une couche de sortie à quatre cellules (exprimant les quatre classes).

Le réseau ARTMAP flou étant à architecture évolutive pendant la phase d'apprentissage, seuls les nombres de cellules des couches FO du ARTa et du ARTb sont fixés à six (les trois entrées fuzzifiées et leurs compléments à un) et à huit (les quatre classes fuzzifiées et leurs compléments à un) respectivement.

L'erreur fixée est atteinte par le réseau ARTMAP flou modifié après 9 itérations (figure 4), et au bout de 87 itérations pour le PMC choisi (figure 6), et en un temps de 4,69 fois plus important que le temps mis par le réseau ARTMAP flou modifié (3,375 s / 0,719 s).

Il est à remarqué qu'une erreur plus faible que celle fixée a été impossible à obtenir avec le PMC à apprentissage rapide par l'algorithme de Levenberg-Marquardt, ceci est dû au fait que dans cet algorithme une inversion de matrice doit être réalisée, et que pour cette exigence cette matrice devient singulière (impossible à inverser). A l'inverse avec l'ARTMAP flou modifié, une erreur quadratique moyenne de $3,04 \cdot 10^{-10}$ a pu être atteinte. Les deux classifieurs ont été contrôlés sur une base de contrôle de 217 points. Les résultats sont illustrés par la figure 7.

On constate que pour la classe 1, les deux classifieurs ont donné des résultats identiques avec un bon classement de tous les points, quant aux autres classes l'ARTMAP flou modifié présente de meilleurs résultats. En effet on a recensé 17 points mal classés pour l'ARTMAP flou modifié et 20 pour le PMC, ce qui donne un taux de bon classement de 92,17 % pour l'ARTMAP flou modifié et de 90,78 % pour le PMC à apprentissage rapide.

La généralisation de ces deux réseaux à l'image SPOT XS de la baie d'Alger de 1500x1000 points s'est faite en un temps égale à 205,734 s pour le ARTMAP flou modifié, et en 8031,70 s pour le PMC à apprentissage rapide, soit un rapport de 39 en faveur du ARTMAP flou modifié. Les résultats des classifications sont illustrés par la figure 8.

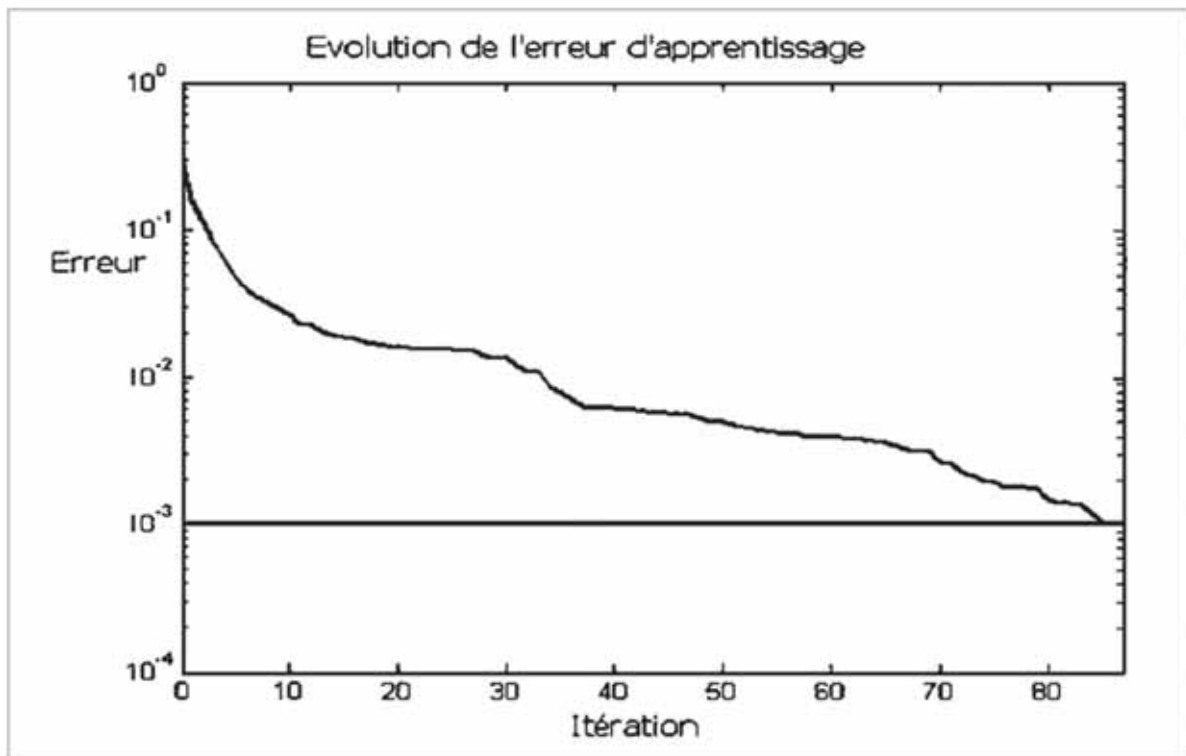


Fig. 6 Courbe de l'erreur quadratique moyenne du réseau PMC à apprentissage rapide.

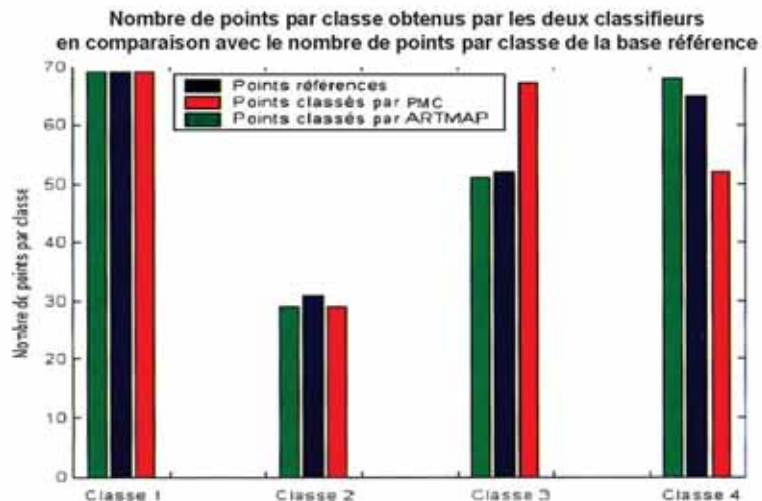


Fig. 7 Comparaison des classifications par l'ARTMAP flou modifié et le réseau PMC à apprentissage rapide par rapport à une base de contrôle.

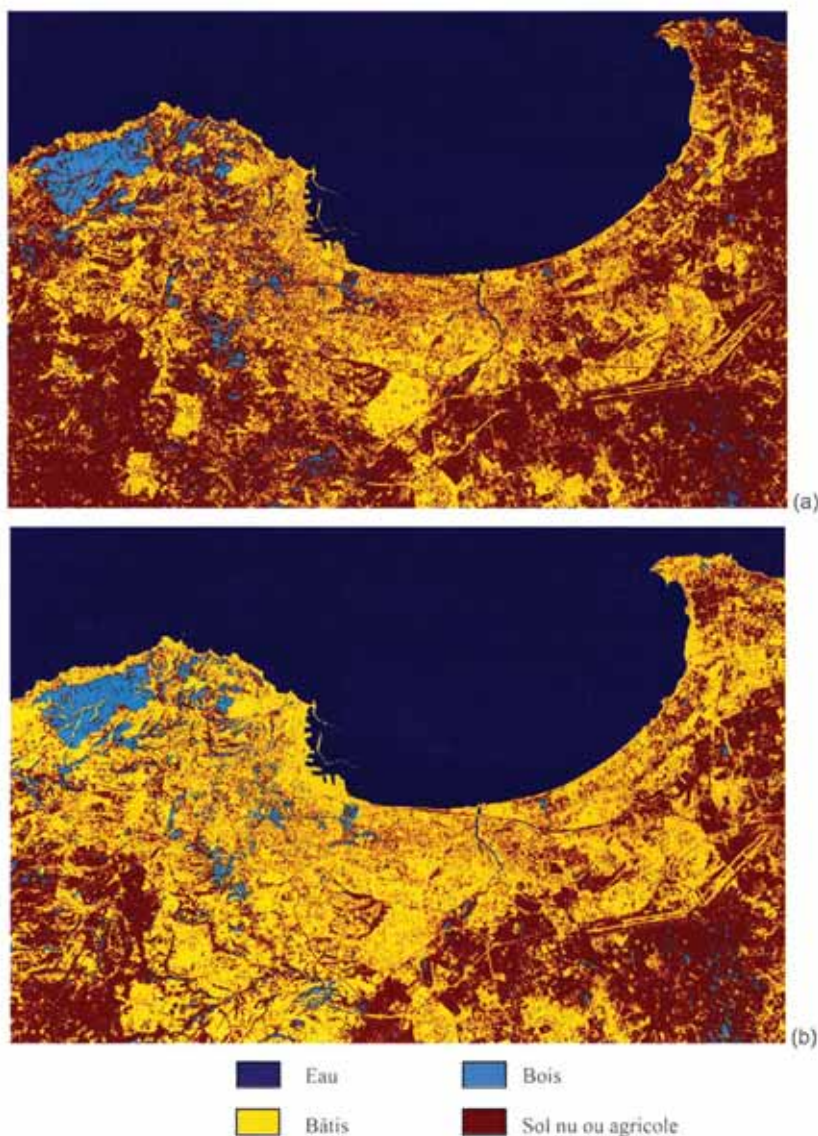


Fig. 8 Résultats de la classification de l'image SPOT XS de la baie d'Alger:
(a) image classée par l'ARTMAP flou modifié, (b) image classée par le réseau PMC à apprentissage rapide.

6. Conclusion

Le réseau ARTMAP flou possède beaucoup trop de paramètres à fixer pour atteindre un taux d'apprentissage raisonnable. La difficulté du choix de ces paramètres est encore plus accentuée par l'existence d'un nombre très important de combinaisons possibles. Une étude consistant à faire varier un ou deux paramètres à la fois en fixant les autres a été réalisée sans qu'elle donne des résultats probants.

De plus, l'algorithme d'apprentissage du réseau ARTMAP flou tel que défini jusqu'à présent, fait passer les exemples un à un, et pour chaque exemple une mise à jour de l'architecture et/ou des poids est réalisée. Entre le passage d'un exemple se situant en début de la base et la fin de l'apprentissage, le réseau sera fortement modifié si les paramètres sont mal choisis, et cette modification influe négativement sur le degré d'apprentissage des premiers exemples.

Ce travail est une contribution à l'amélioration de l'apprentissage du réseau ARTMAP flou, et l'utilisation du réseau ainsi modifié pour classifier une image multi spectrale SPOT XS de la baie d'Alger, ainsi que la comparaison de ses performances avec le classifieur connexionnistes PMC à apprentissage rapide à rétro propagation du gradient utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. L'amélioration proposée s'est montrée très utile par le fait que, d'une part nous nous soucions que peu des paramètres du ARTMAP flou que nous fixons une fois pour toutes aux valeurs indiquées, et d'autre part par le fait que cette technique a permis de réduire considérablement l'erreur d'apprentissage. La comparaison des performances des deux réseaux mis en compétition dans cette étude montre que l'ARTMAP flou modifié s'est montré plus rapide à apprendre et encore plus à généraliser pour les mêmes objectifs assignés. De plus le PMC, à l'inverse du ARTMAP flou, s'est montré incapable d'atteindre une erreur à l'apprentissage plus basse que celle fixée dans cette application.

Références

- Aggarwal R K., Xuan Q. Y., Johns A T., Li F., & Bennett A., 1999. A Novel Approach to Fault Diagnosis in Multicircuit Transmission Lines Using Fuzzy ARTmap Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 10, N° 5.
- Baldi P., 1995 Gradient Descent Learning Algorithm Overview: A General Dynamical Systems Perspective. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 6 N° 1.
- Baraldi A. & Alpaydın E., 2002. Constructive Feedforward ART Clustering Networks-Part I. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 13, N° 3.
- Carpenter G. A., Grossberg S. & Rosen D. B., 1991. Fuzzy ART: An Adaptive Resonance Algorithm for Rapid, stable classification of Analog Patterns. *Proc. International Joint Conference of Neural Networks, IJCNN'91, Seattle, IEEE/INNS Inc.*, pp.II-411-416.
- Carpenter, G. A., Grossberg S., Markuzon N., Reynolds J. H & Rosen D. B., 1992. Fuzzy ARTMAP: A Neural Network Architecture for Incremental Supervised Learning of Analog Multi-dimensional Maps. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 3 N° 5.
- Carpenter G. A., Grossberg S., Markuzon N. & Reynolds J. H., 1995. A Fuzzy ARTMAP Nonparametric Probability Estimator for Nonstationary Pattern Recognition Problems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 6 N° 6.
- Charalampidis D., Kasparis T., & Georgiopoulos M., 2001. Classification of Noisy Signals Using Fuzzy ARTMAP Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 12, N° 5.
- Charalampidis D, Anagnostopoulos G. C., Georgiopoulos M. & Kasparis T., 2002. Fuzzy ART and Fuzzy ARTMAP with adaptively Weighted distances. *Proc. SPIE*, Vol. 4739 pp. 8697.
- Dagher I., Georgiopoulos M., Heileman G. L. & Bebis G., 1999. An Ordering Algorithm for Pattern Presentation in Fuzzy ARTMAP That Tends to Improve Generalization Performance. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 10, N° 4.
- Frank T., Kraiss K. F. & Kuhlen T., 1998. Comparative Analysis of Fuzzy ART and ART-2A Network Clustering Performance. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 9, N° 3.
- Gómez-Sánchez E., Dimitriadis Y. A., Cano-Izquierdo J. M., & López-Coronado J., 2002. μ ARTMAP: Use of Mutual Information for Category Reduction in Fuzzy ARTMAP. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 13, N° 1.
- Hagan M. T. & Menhaj M. B., 1994. Training Feed forward Networks with the Marquardt Algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5 N° 6.
- Tan A. H., 1997. Cascade ARTMAP: Integrating Neural Computation and Symbolic Knowledge Processing. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 8 N° 2.
- Rumelhart D., Hinton G., Williams R. 1986. Learning Internal Representations by Error Propagation. *Parallel Distributed Processing*, Vol. 1, pp. 318-362, Cambridge, MA, MIT Press.
- Wilamowski B. M., Iplikci S., Kaynak O. & Efe M. O., 2001. An Algorithm for fast Convergence in Training Neural Networks IJCNN'01 pp. 1778-1782 Washington C. c Juillet 15-19.
- Zhou Z., Chen S. & Chen Z., 2000. FANNC : A Fast Adaptive Neural Network classifier. *Knowledge and Information Systems*, Vol 2, N° 1, pp.115-129.

Utilisation des Signatures de Texture d'ordre élevé pour une Meilleure Discrimination des Classes d'Occupation du Sol sur une Image Radar à Synthèse d'Ouverture *

Emmanuel Tonyé , Alain Akono , Charly Dzepa et Narcisse Talla Tankam

Laboratoire d'Électronique et de Traitement du Signal (LETS),
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Université de Yaoundé I,
B.P. 8390 Yaoundé, Cameroun. Tél. /Fax : (237)222-4547

Jean-Paul Rudant

Laboratoire des Géomatériaux, Université de Marne-La-Vallée,
Institut Francilien des Géosciences, 5 Boulevard Descartes, Champs-Sur-Marne,
77454 Marne-La-Vallée Cedex, France.
E-mails: tonyee@hotmail.com / aakono@yahoo.com / rudant@univ-mlv.fr

Résumé: Dans ce travail on montre l'avantage des paramètres de texture d'ordre supérieur à 2 pour la discrimination des classes d'occupation du sol sur une image radar à synthèse d'ouverture (RSO). En effet, plusieurs études de classification texturales d'images RSO ont été effectuées jusqu'à maintenant, mais la plupart de ces études utilisent la technique des matrices de co-occurrence de niveaux de gris, qui est elle-même basée sur les paramètres de texture d'ordre 2. Dans cette étude, on mesure les signatures texturales aux ordres 2, 3 et 4 en quatre points distincts représentant quatre classes d'occupation du sol sur une image RSO ERS-1 de la côte Atlantique du Cameroun. Les signatures texturales mesurées sont établies à base de 17 paramètres de texture suffisamment discriminants. Une comparaison des signatures est ensuite effectuée et on constate que les signatures d'ordre supérieur produisent le meilleur taux de discrimination des classes d'occupation du sol.

Mots-clés: vecteur de texture, signature texturale, taux de discrimination, classification texturale, imagerie RSO.

Abstract: In this work, the advantage of textural parameters of order upper than 2 for the discrimination of ground's classes' occupation on a synthetic aperture radar (SAR) image is shown. Indeed, several studies on textural classification of SAR images were made so far, but most of these studies uses the technique of the co-occurrence matrix of levels of grey, which itself is based on textural parameters of order 2. In this study, one measures textural signatures in the orders 2, 3 and 4 in four

different points representing four classes of ground's occupation on a SAR ERS-1 image of the Atlantic coast of Cameroon. The textural signatures measured are established in base of 17 parameters of texture having a good capacity of discrimination. A comparison of the signatures is then made and one notices that signatures of upper order produce the best rate of discrimination of the ground's classes' occupation.

Keywords : vector of texture, textural signature, discrimination's factor, textural classification, SAR imagery.

1. Introduction

Plusieurs études ont déjà été effectuées dans le domaine de la classification par analyse de texture. [ULABY et al. 1986] ont utilisé des paramètres de texture issus de la méthode de co-occurrence pour identifier quatre classes de couverture du sol dans les images radar. [LUCIEER, A. et al. 2005] proposent une méthode de segmentation basée sur des paramètres de texture multi variés pour la reconnaissance des objets sur une image. Les auteurs de cette étude intègrent un opérateur dénommé « Modèle Local Binaire », modélisant la texture, dans une segmentation hiérarchique pour identifier des régions à texture homogène dans une image. Dans [LINDERS, 2000], trois méthodes (la méthode de la logique floue, l'analyse par régression et l'analyse en composantes principales) sont utilisées pour sélectionner des paramètres de texture significatifs pour la discrimination de divers couverts forestiers.

* Article publié dans la revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection n° 179 (2005-3), et repris dans le BSG Avec l'amiable autorisation de l'auteur.

La reconnaissance du couvert forestier est ensuite effectuée par la méthode des réseaux de neurone. Dans [PUISSANT, A. et al. 2005], on examine l'utilité de l'approche texturale pour améliorer la précision de la classification dans un contexte urbain. L'analyse de texture est comparée à la classification multispectrale. Dans cette étude, les paramètres de texture du second ordre de Haralick [HARALICK et al. 1973] sont utilisés. Quatre indices de texture sont testés sur des images à très haute résolution. Les résultats montrent que le paramètre optimal pour l'amélioration de la précision globale de la classification est le paramètre « homogénéité ». [ANYS et HE, 1995] ont évalué la contribution des statistiques du premier ordre dans la classification des images radar multipolarisation en milieu agricole. Plus récemment encore, [Jukka et Aristide, 1998] ont utilisé des statistiques texturales du premier ordre dans la classification de l'occupation du sol en milieu urbain en utilisant des données TM et ERS-1. [FRANKLIN et PEDDLE, 1989] ont utilisé un mélange de données spectrales, topographiques (élévation, pente, aspect, courbure, relief) et des statistiques de co-occurrence du second ordre pour la classification d'images SPOT et radar en milieu boréal. Leurs travaux ont montré que les matrices de co-occurrence du second ordre contiennent une information texturale importante qui améliore la discrimination des classes ayant une hétérogénéité interne et des formes structurales. Les classes homogènes sur le sol sont caractérisées adéquatement par l'information spectrale seule, mais les classes contenant des mélanges de types de végétation ou fortement structurales ont été caractérisées avec plus de précision en utilisant un mélange de texture et de données spectrales. Les méthodes rencontrées dans la littérature consistent généralement à créer des néo-canaux de l'image originale par calcul de différents paramètres de texture de cette image. Les néo-canaux créés sont ensuite combinés entre eux et avec l'image originale, pour la production d'une image classifiée. Dans une autre étude, une analyse de différents estimateurs pour la caractérisation des classes de texture sur une image RSO est effectuée [C.J. OLIVER, 1993]. Dans cette étude, des estimateurs relevant de la méthode du maximum de vraisemblance sont évalués. Il est à noter que cette méthode requiert la connaissance de la forme de la densité de probabilité des données à traiter. Dans l'étude de C.J. Oliver, on considère aussi une description probabiliste des classes de texture selon la loi K et selon le modèle de Weibull, qui sont souvent appliqués pour caractériser des classes sur les images RSO.

D'autres méthodes d'extraction de paramètres de texture ont été proposées dans la littérature [RANDEN and HUSOY, 1999 ; REED and HANS Du BUF, 1993]. Pour la plupart de ces méthodes, un seul paramètre de texture est appliqué pour la discrimination des classes. Dans cette étude, qui s'applique à une image issue d'un capteur RSO, on introduit les notions de vecteur de texture et de signature texturale pour la caractérisation des classes d'occupation du sol, et on montre que les paramètres de texture d'ordre supérieur à 2 sont plus efficaces pour la discrimination de ces classes. De plus, la méthode introduite dans cette étude est probabiliste à l'instar des autres, mais son avantage c'est qu'elle est multidimensionnelle, faisant intervenir plusieurs paramètres de texture pour l'amélioration de la discrimination des classes.

2. Site d'étude

Le site d'étude est la côte Atlantique camerounaise (figure 1). Cette région est caractérisée par un couvert forestier dense et particulièrement par plusieurs espèces de mangroves. Elle a déjà fait et elle continue à faire l'objet de plusieurs études intéressantes plusieurs organismes gouvernementaux camerounais. On s'est généralement intéressé à l'étude du couvert forestier et à l'évolution de la ligne de rivage.



Fig. 1 site d'étude.

3. Caractéristiques de l'image utilisée

L'image utilisée dans cette étude est une image RSO du satellite ERS-1, acquise en bande C et en polarisation verticale VV, en 1994 sur la côte Atlantique camerounaise (figure 2). La résolution spatiale de cette image est de 25 m x 25 m.



Fig. 2 image RSO de ERS-1 du site d'étude.

4. Méthodologie

Avant d'aborder la méthodologie proprement dite, procédons d'abord à la définition de quelques notions clé apparaissant dans cette étude. Il s'agit notamment des notions de : vecteur de texture, signature texturale et facteur de discrimination. Il convient aussi de préciser ici que l'image RSO traitée dans cette étude a préalablement subi un filtrage par la méthode de Lee [LEE, 1980], dans le but de réduire le bruit de chatoiement.

4.1 Vecteurs de texture

On appelle ici vecteur de texture un vecteur constitué d'un ensemble de paramètres de texture évalués en un pixel de l'image. On parlera de *vecteur de texture d'ordre n* si les paramètres de texture constituant

ce vecteur ont été évalués à l'ordre n. Ici, la notion d'ordre est relative au nombre de pixels voisins à considérer lors du calcul des paramètres de texture. Le vecteur de texture caractérise un pixel et peut être utilisé pour effectuer la classification texturale d'une image RSO [AKONO et al. 2003a].

4.2 Signatures texturales

On appelle ici signature texturale ou encore signature de texture une courbe représentant les valeurs de plusieurs paramètres de texture évalués en un pixel de l'image. En abscisse de cette courbe, on a des numéros correspondant à divers paramètres de texture et, en ordonnée on a les valeurs de ces paramètres évalués en un pixel de l'image. La notion de signature texturale est semblable à la notion de signature spectrale utilisée pour les images optiques. Une signature texturale caractérise un pixel ou une classe d'occupation du sol sur une image RSO. On parlera de *signature texturale d'ordre n* si les paramètres de texture utilisés pour constituer cette signature ont été évalués à l'ordre n.

4.3 Facteur de discrimination d'une signature texturale

Le facteur de discrimination utilisé ici pour les signatures de texture est simplement l'écart-type des valeurs de cette signature. Sachant que l'écart-type exprime la dispersion des valeurs autour de la moyenne, ce facteur traduit l'aptitude de la signature, texturale à distinguer la classe pour laquelle elle a été évaluée des autres classes. Les valeurs des paramètres de texture, calculées en chaque pixel, sont toutes ramenées dans l'intervalle de valeurs [0, 255]. Le facteur de discrimination est donc évalué sur une même base pour tous les paramètres. Précisons aussi que ce facteur de discrimination est calculé en chaque pixel de l'image. Nous rappelons ci-dessous l'expression de l'écart-type (équation 1). Dans l'équation 1, E_t représente l'écart-type des valeurs de la signature texturale. P_i représente la valeur d'un paramètre de texture. μ est la moyenne et N_p est le nombre de paramètres de texture constituant la signature texturale concernée.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_t = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (P_i - \mu)^2} \\ \mu = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_p} P_i \right)}{N_p} \end{array} \right. \quad (1)$$

4.4 Analyse de texture par la méthode des matrices de co-occurrence

Un ensemble de mesures de texture d'ordre supérieur à 1 été proposé par [HARALICK et al. 1973], basé sur le calcul des matrices de co-occurrence des niveaux de gris. Supposons que $c = (\Delta x, \Delta y, \theta, d)$ soit un vecteur du plan image (x, y) , où Δx et Δy sont des entiers. Alors, pour toute image $f(x, y)$, il est possible de calculer la fréquence d'apparition des paires de niveaux de gris correspondant à des paires de pixels séparés par $c = (\Delta x, \Delta y, \theta, d)$. Le vecteur de séparation $c = (\Delta x, \Delta y, \theta, d)$ est défini par une distance interpixels d et un angle interpixels θ . Si les valeurs de niveaux de gris varient de 0 au plus grand niveau de quantification de l'image (par exemple, $quant_k = 255$), cette fréquence prend la forme d'une matrice P_c . La grandeur $P_c(i, j)$ représente le nombre de fois que la paire de niveaux de gris (i, j) apparaît dans une fenêtre centrée autour d'un pixel de l'image. Δx est la distance entre les deux pixels de niveaux de gris i et j selon l'axe des x (distance horizontale) et Δy est la distance entre les deux pixels de niveaux de gris i et j selon l'axe des y (distance verticale). θ est l'angle entre la droite reliant les deux pixels de niveaux de gris (i, j) et l'axe des x (axe horizontal) dans un repère euclidien. P_c est une matrice carrée d'ordre $quant_k$ dont les indices sont les valeurs de niveaux de gris des pixels de l'image.

Il est communément admis que toute l'information texturale dérivable des matrices de co-occurrence est obtenue pour les angles 0° , 45° , 90° et 135° , avec une distance interpixels égale à 1 ou 2, en x et en y . En règle générale, plus grands sont les éléments diagonaux de la matrice de co-occurrence, plus la texture est homogène dans la zone d'image considérée. La fenêtre utilisée pour le calcul de P_c est un tableau bidimensionnel, généralement de taille impaire, dont les éléments sont les niveaux de gris d'un pixel de l'image et ceux de ses voisins. L'élément central de la fenêtre est le niveau de gris du pixel considéré et les autres éléments sont les niveaux de gris des pixels voisins. Le voisinage considéré correspond à la taille de fenêtre définie. Diverses tailles de fenêtre (3×3 , 5×5 , 7×7 , etc.) peuvent être utilisées pour le calcul de la matrice de co-occurrence. La taille de fenêtre optimale est celle qui produit une meilleure discrimination des classes de texture pour un paramètre donné. Dans cette étude, la fenêtre utilisée pour le calcul des paramètres de texture a été délimitée manuellement.

Après quelques essais, il nous est apparu que la taille de fenêtre 7×7 est convenable pour cette étude. [HARALICK et al. 1973] et d'autres auteurs [PRATT, 1991 ; ANYS et HE, 1995] ont proposé une variété de mesures pour caractériser l'information texturale à partir des matrices de co-occurrence. La signification de quelques unes de ces mesures est présentée sur le tableau 1.

Tableau 1. signification de quelques paramètres de texture.

Paramètre de Texture	Signification
Second Moment Angulaire (Energie)	Ce paramètre a une valeur faible lorsque les $p(i, j)$ ont des valeurs très proches et une grande valeur lorsque certaines valeurs sont grandes et d'autres petites.
Contraste (Inertie)	Ce paramètre a une valeur numérique importante si les $p(i, j)$ sont concentrés hors diagonale.
Corrélation	Ce paramètre a une grande valeur quand les valeurs sont uniformément distribuées dans la matrice de co-occurrence, et une faible valeur dans le cas contraire.
Variance	Ce paramètre mesure la distribution des niveaux de gris autour de la moyenne.
Homogénéité locale	Ce paramètre indique une mesure de l'uniformité des niveaux de gris de l'image.
Moment Diagonal	Ce paramètre mesure la variation locale des niveaux de gris de l'image, mais d'une façon plus lente que celle du contraste.

4.5 Analyse de texture par les paramètres d'ordre supérieur à 2

L'ordre des paramètres de texture peut être étendu à 3, 4, 5 etc. Par exemple, pour l'ordre 3 on étudie la fréquence d'apparition d'un triplet de niveaux de gris au lieu d'une paire de niveaux de gris comme dans le cas des matrices de co-occurrence. Sur le tableau 2, on présente les paramètres de texture utilisés dans cette étude pour l'établissement des vecteurs de texture et des signatures texturales, avec leurs formulations aux ordres 2, 3 et 4. Une méthode d'évaluation rapide des paramètres d'ordre 3 a été développée par les auteurs [AKONO et al. 2003b]. La généralisation de cette méthode à un ordre n quelconque a aussi récemment été établie par les mêmes auteurs [AKONO et al. 2005]. Cette méthode est rappelée dans les lignes qui suivent.

Tableau 2. expressions des paramètres de texture aux ordres 2, 3 et 4.

Différence inverse		Corrélation	
Ordre 2	$F_1 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \frac{p_c(i,j)}{1+ i-j + j-k }$	Ordre 2	$F_7 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \frac{(i-\mu_i)(j-\mu_j)}{\sigma^2} p_c(i,j)$
Ordre 3	$F_1 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \frac{p_c(i,j,k)}{1+ i-j + i-k + j-k }$	Ordre 3	$F_7 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \frac{(i-\mu_i)(j-\mu_j)(k-\mu_k)}{\sigma^2} p_c(i,j,k)$
Ordre 4	$F_1 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} \frac{p_c(i,j,k,l)}{1+ i-j + i-k + i-l + j-k + j-l + k-l }$	Ordre 4	$F_7 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} \left(\frac{(i-\mu_i)(j-\mu_j)(k-\mu_k)(l-\mu_l)}{\sigma^2} \right) \times p_c(i,j,k,l)$
Dissimilarité		Covariance	
Ordre 2	$F_2 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} [i-j] p_c(i,j)$	Ordre 2	$F_8 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} (i-\mu_i)(j-\mu_j) p_c(i,j)$
Ordre 3	$F_2 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} [i-j + i-k + j-k] p_c(i,j,k)$	Ordre 3	$F_8 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} (i-\mu_i)(j-\mu_j)(k-\mu_k) p_c(i,j,k)$
Ordre 4	$F_2 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} [i-j + i-k + i-l + j-k + j-l + k-l] p_c(i,j,k,l)$	Ordre 4	$F_8 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} [(i-\mu_i)(j-\mu_j)(k-\mu_k)(l-\mu_l)] \times p_c(i,j,k,l)$
Entropie		Variance	
Ordre 2	$F_3 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} p_c(i,j) \ln [p_c(i,j)]$	Ordre 2	$F_9 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} (i-\mu_i)^2 p_c(i,j)$
Ordre 3	$F_3 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} p_c(i,j,k) \ln [p_c(i,j,k)]$	Ordre 3	$F_9 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} (i-\mu_i)^2 p_c(i,j,k)$
Ordre 4	$F_3 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} p_c(i,j,k,l) \ln [p_c(i,j,k,l)]$	Ordre 4	$F_9 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} (i-\mu_i)^2 p_c(i,j,k,l)$
Contraste		Probabilité Maximale	
Ordre 2	$F_4 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} [(i-j)^2] p_c(i,j)$	Ordre 2	$F_{10} = \text{Max}_{0 \leq i,j \leq N_x} \{ p_c(i,j) \}$
Ordre 3	$F_4 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} [(i-j)^2 + (i-k)^2 + (j-k)^2] p_c(i,j,k)$	Ordre 3	$F_{10} = \text{Max}_{0 \leq i,j,k \leq N_x} \{ p_c(i,j,k) \}$
Ordre 4	$F_4 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} [(i-j)^2 + (i-k)^2 + (i-l)^2 + (j-k)^2 + (j-l)^2 + (k-l)^2] p_c(i,j,k,l)$	Ordre 4	$F_{10} = \text{Max}_{0 \leq i,j,k,l \leq N_x} \{ p_c(i,j,k,l) \}$
Second Moment Angulaire		Importance des Petits Nombres	
Ordre 2	$F_5 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} [p_c(i,j)]^2$	Ordre 2	$F_{12} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \frac{p_c(i,j)}{(i^2 + j^2)}$
Ordre 3	$F_5 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} [p_c(i,j,k)]^2$	Ordre 3	$F_{12} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \frac{p_c(i,j,k)}{(i^2 + j^2 + k^2)}$
Ordre 4	$F_5 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} [p_c(i,j,k,l)]^2$	Ordre 4	$F_{12} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} \frac{p_c(i,j,k,l)}{(i^2 + j^2 + k^2 + l^2)}$
Moment Différentiel Inverse		Importance des Grands Nombres	
Ordre 2	$F_6 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \frac{p_c(i,j)}{1+(i-j)^2}$	Ordre 2	$F_{13} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} (i^2 + j^2) p_c(i,j)$
Ordre 3	$F_6 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \frac{p_c(i,j,k)}{1+(i-j)^2+(i-k)^2+(j-k)^2}$	Ordre 3	$F_{13} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} (i^2 + j^2 + k^2) p_c(i,j,k)$
Ordre 4	$F_6 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} \frac{p_c(i,j,k,l)}{1+(i-j)^2+(i-k)^2+(i-l)^2+(j-k)^2+(j-l)^2+(k-l)^2}$	Ordre 4	$F_{13} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} (i^2 + j^2 + k^2 + l^2) p_c(i,j,k,l)$

Importance de la Profondeur	
Ordre 2	$F_{14} = \frac{\sum_{i=0}^{N_x} \left(\sum_{j=0}^{N_y} p_C(i,j) \right)^2}{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} p_C(i,j)}$
Ordre 3	$F_{14} = \frac{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \left(\sum_{k=0}^{N_z} p_C(i,j,k) \right)^2}{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} p_C(i,j,k)}$
Ordre 4	$F_{14} = \frac{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \left(\sum_{l=0}^{N_t} p_C(i,j,k,l) \right)}{\sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} p_C(i,j,k,l)}$
Moment Diagonal	
Ordre 2	$F_{15} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \left(\frac{1}{2} (i-j) p_C(i,j) \right)^{\frac{1}{2}}$
Ordre 3	$F_{15} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \left(\frac{1}{2} (i-j + i-k + j-k) p_C(i,j,k) \right)^{\frac{1}{3}}$
Ordre 4	$F_{15} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} \left(\frac{1}{2} (i-j + i-k + i-l + j-k + j-l + k-l) p_C(i,j,k,l) \right)^{\frac{1}{4}}$
Moyenne	
Ordre 2	$F_{16} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} i(p_C(i,j))$
Ordre 3	$F_{16} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} i(p_C(i,j,k))$
Ordre 4	$F_{16} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} i(p_C(i,j,k,l))$
Importance des Classes	
Ordre 2	$F_{17} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} (i+j-4F_{16})^2 p_C(i,j)$
Ordre 3	$F_{17} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} (i+j+k-4F_{16})^3 p_C(i,j,k)$
Ordre 4	$F_{17} = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} \sum_{k=0}^{N_z} \sum_{l=0}^{N_t} (i+j+k+l-4F_{16})^4 p_C(i,j,k,l)$
Somme des Moyennes	
Ordre 2	$F_{20} = \sum_{i=3}^{3N_x} i(p_{i,i,i}(i))$
Ordre 3	$F_{20} = \sum_{i=3}^{3N_x} i(p_{i,i,i,i}(i))$
Ordre 4	$F_{20} = \sum_{i=4}^{4N_x} i(p_{i,i,i,i,i}(i))$

4.5.1 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. A 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. A 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.

4.5.2 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.

Nous généralisons donc en disant qu'à partir du pixel $f_n(a,b,d_1,d_2,\dots,d_n)$, on peut atteindre le pixel $f_{n1}(a,b,d_1,d_2,\dots,d_n,d_{n+1})$ (resp. le pixel $f_{n2}(a,b,d_1,d_2,\dots,d_n,d_{n+1})$) en respectant la règle de connexion $r_{2n-1}(d_n, \theta_n)$ (resp. la règle de connexion $r_{2n}(d_n, \theta_n+180^\circ)$), tout en respectant aussi les conditions $C_{2n-1} \dots C_{2n+1,2}$ pour chaque valeur de n ($n = 1,2,3, \dots$).

Les conditions $C_{2n-1} \dots C_{2n+1,2}$ portent sur les contraintes que doivent respecter a,b,d_1,d_2,\dots,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, pour différentes règles de connexion. Les conditions $C_{2n-1} \dots C_{2n+1,2}$ sont détaillées sur cette figure.

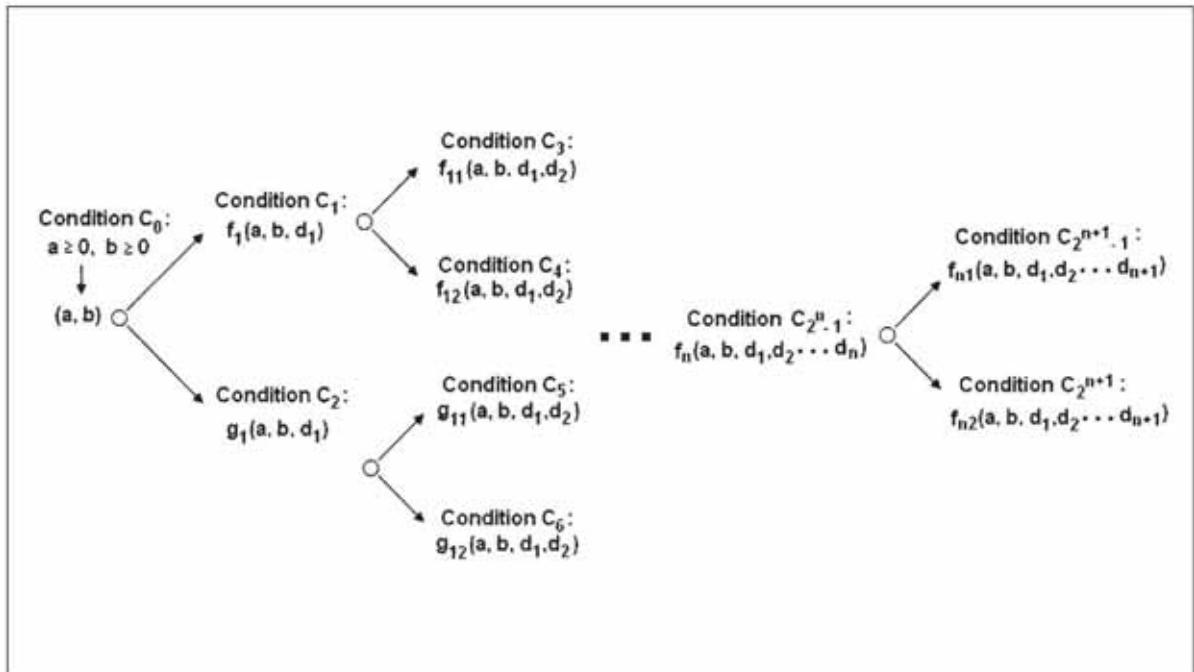


Fig. 3 arbre générique pour le calcul des paramètres de texture.

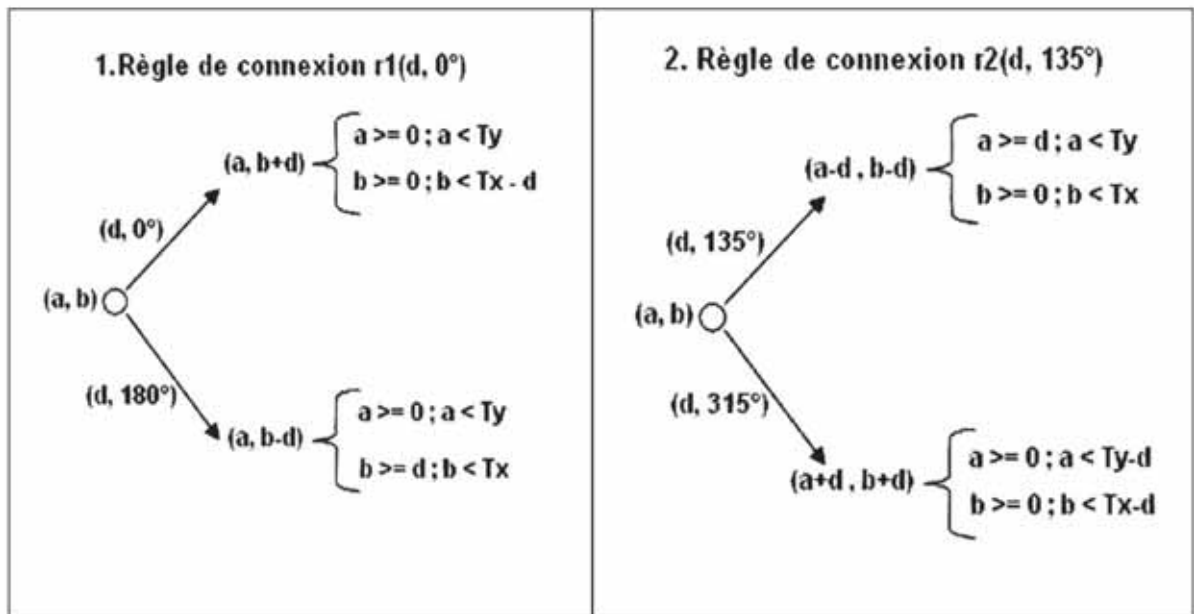


Fig. 4 arbre générique pour le calcul des paramètres de texture d'ordre 2, pour les règles de connexion r1 (d,0°) et r2 (d,135°).

4.5.3 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 :

$$Diss2 = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} |i-j| \times p_c(i,j) \tag{2}$$

Où N_g est le niveau de gris maximal dans la fenêtre de l'image. Comme expliqué à la section 4.3, la grandeur $P_c(i, j)$ représente le nombre de fois que la paire de niveaux de gris (i, j) apparaît dans une fenêtre centrée autour d'un pixel de l'image. Il s'agit d'une paire de niveaux de gris respectant la règle de connexion $R(d, \theta)$, c'est-à-dire que les deux pixels ayant pour niveaux de gris i et j doivent être spatialement distant d'une longueur égale à d , ce qui correspond à $\Delta x = d$ et $\Delta y = d$ (voir section 4.3). De plus, l'angle entre la droite reliant ces deux pixels et l'axe des x (axe horizontal) doit être égal à θ . Le paramètre de texture «dissymétrie» peut encore s'exprimer par l'équation 3 :

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

La nouvelle approche que nous proposons comporte les étapes suivantes :

• **Étape 1 :** Créer un vecteur $DISS[N_g + 1]$ (c'est-à-dire un vecteur de taille $N_g + 1$) à une dimension telle que l'équation 4 soit vérifiée :

$$Diss2 = \sum_{i=0}^{N_g} DISS[i] \tag{4}$$

Cela veut dire que le vecteur $DISS[]$ se calcule par l'équation 5 :

$$DISS[i] = \sum_{j=0}^{N_g} \left(\underbrace{|i-j| + |i-j| + |i-j| + \dots + |i-j|}_{R(i,j) \text{ fois}} \right) \tag{5}$$

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

Étape 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 $R(d, \theta)$.

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) :

$$DISS[i] = |i-NG(a,b)| + |i-NG(f_1(a,b,d_1))| + |i-NG(g_1(a,b,d_1))| \tag{6}$$

$NG(a,b)$, $NG(f_1(a,b,d_1))$ 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.

Étape 4 : Répéter le processus de l'étape 3 pour toutes les entrées j du vecteur $DISS[]$, avec $j = 0, 1, \dots, N_g$. 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.

Étape 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) :

$$Diss2 = \sum_{j=0}^{N_g} DISS[j] \tag{7}$$

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 co-occurrence 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 co-occurrence. De plus, l'évaluation de la matrice de co-occurrence 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.

4.5.4 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 $R(2,45^\circ)$.

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) Par l'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[3], DISS[4] suivant l'équation (7), en respectant la règle de connexion R(2,45°) et les conditions de voisinage $C_{2n-1} \dots C_{2n+1-2}$ avec $n=1$ (ordre 2). On obtient donc les valeurs suivantes:

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

Le paramètre Diss2 est égal à la somme des éléments du vecteur DISS[] selon l'équation 8. On obtient:

$$Diss2 = DISS[0] + DISS[1] + DISS[2] + DISS[3] + DISS[4] = 32$$

b) Par l'approche classique

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

$$Diss2 = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} |i-j| \times P_{ij} \quad , \quad P_{ij} \text{ étant le nombre de fois}$$

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:

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

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 (plusieurs opérations de multiplications) en terme de calculs.

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

Tableau 3. formulations classiques et nouvelles des paramètres de texture d'ordre $n \geq 2$.

Paramètre de texture	Formulation	
Somme	Classique	$M = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} \dots \sum_{k=0}^{N_g} \sum_{u=0}^{n-1} (n-u+1) i_u \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$
	Nouvelle	$M = \sum_{i=0}^{N_g} m[i]$ avec $m[i] = \sum_{u=0}^{n-1} (n-u+1) i_u$
Différence inverse	Classique	$DINV = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} \dots \sum_{k=0}^{N_g} \left(\frac{P_{i_1 i_2 \dots i_n}}{1 + \sum_{u=0}^{n-1} i_u - i_{u+1} } \right)$
	Nouvelle	$DINV = \sum_{i=0}^{N_g} d(i)$ avec $d(i) = \frac{1}{1 + \sum_{u=0}^{n-1} i_u - i_{u+1} }$
Dissimilarité	Classique	$DISS = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} \dots \sum_{k=0}^{N_g} \left(\sum_{u=0}^{n-1} i_u - i_{u+1} \right) \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$
	Nouvelle	$DISS = \sum_{i=0}^{N_g} d_s(i)$ avec $d_s(i) = \sum_{u=0}^{n-1} \sum_{v=u+1}^{n-1} i_u - i_v $
Contraste	Classique	$CONT = \sum_{i=0}^{N_g} \sum_{j=0}^{N_g} \dots \sum_{k=0}^{N_g} \left(\sum_{u=0}^{n-1} (i_u - i_{u+1})^2 \right) \times P_{i_1 i_2 \dots i_n}$
	Nouvelle	$CONT = \sum_{i=0}^{N_g} d_c(i)$ avec $d_c(i) = \sum_{u=0}^{n-1} \sum_{v=u+1}^{n-1} (i_u - i_v)^2$
Remarques: P est le nombre de branches possible reliant des nœuds distincts de l'arbre générique à la profondeur n, à partir du noyau i. 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 $i_1 = i$.		

Sur le tableau 3, 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.

4.6 Classification finale

L'image a finalement été classifiée en tenant compte des signatures texturales de 8 grandes classes d'occupation du sol bien connues dans la zone d'étude (figure 10). Le principe général de la classification utilisée comporte les étapes suivantes:

- Identifier huit classes d'occupation du sol sur l'image;
- Calculer la signature texturale en un point représentatif de chaque classe;
- Calculer la signature texturale de chaque pixel de l'image;
- Comparer la signature texturale de chaque pixel de l'image aux huit signatures des classes identifiées;
- Attribuer à chaque pixel la classe dont la signature texturale est la plus proche de la sienne.

La comparaison entre la signature texturale d'un pixel et celle d'une classe se fait par mesure de la distance euclidienne entre les deux vecteurs de texture correspondants. Des détails de cette méthode de classification peuvent être trouvés dans [AKONO et al., 2003a].

4.7 Présentation des résultats

Quatre classes d'occupation du sol ont été repérées sur l'image ERS-1 (figure 2) en fonction de la connaissance du terrain. Les signatures texturales à divers ordres ont été calculées en chaque pixel représentatif d'une classe. Le calcul a été effectué sur une fenêtre de 7×7 autour de chacun de ces pixels (le choix de cette taille est justifié à la section 4.3). La première classe est une région de mangroves. La deuxième classe est la zone urbaine. La troisième classe représente une végétation marécageuse mélangée parfois aux mangroves, et la quatrième classe est une zone de forêt dense humide. Sur les figures 5, 6, 7 et 8 on présente respectivement les signatures texturales des classes 1, 2, 3 et 4 aux ordres 2, 3 et 4. Les signatures ont été établies à base des 17 paramètres de texture suivants :

- Différence inverse ;
- Dissimilarité ;
- Entropie ;
- Contraste ;
- Second moment angulaire ;
- Moment différentiel inverse ;
- Corrélation ;

- Covariance ;
- Variance ;
- Probabilité maximale ;
- Importance des petits nombres ;
- Importance des grands nombres ;
- Importance de la profondeur ;
- Moment diagonal ;
- Moyenne ;
- Importance de classes (« cluster prominence ») ;
- Somme des moyennes.

Sur la figure 9, on présente l'évolution du facteur de discrimination des signatures texturales des diverses classes en fonction de l'ordre des paramètres de texture.

4.8 Discussion des résultats

Sur les figures 5, 6, 7 et 8, on constate que les signatures texturales des différentes classes reflètent assez bien la réalité du terrain. En effet, pour l'ensemble des zones sélectionnées, le signal rétrodiffusé radar a une valeur élevée. La zone des mangroves (classe 1), par exemple, comporte une grande variété d'espèces. Cette variété a pour conséquence l'augmentation générale de la rugosité de surface de la zone étudiée, ce qui a aussi pour conséquence directe l'augmentation du signal rétrodiffusé radar. Le même phénomène s'observe dans la zone urbaine (classe 2) où on trouve des bâtiments de hauteurs très variées. Dans un tel cas, il y a généralement un phénomène de réflexions doubles et triples du signal radar, associées à des dièdres ou des trièdres, qui augmente l'intensité du signal réfléchi. Ceci se traduit par des points brillants sur l'image. Le fait que le signal rétrodiffusé ait une valeur généralement élevée pour l'ensemble des classes a pour conséquence une augmentation très rapide de la valeur du paramètre de texture «Importance des grands nombres» (paramètre F13 sur le tableau 2). En effet, ce paramètre croît rapidement quand les valeurs de niveaux de gris sont élevées (niveaux élevés à la puissance 2 dans la matrice de co-occurrence). Ceci explique pourquoi on observe un pic significatif à l'abscisse correspondant à ce paramètre (abscisse n° 12) sur les courbes texturales des différentes classes. Par contre, la valeur de la corrélation (paramètre F7 sur le tableau 2) est très faible pour l'ensemble des classes. Ceci est dû au fait que les niveaux de gris ne sont pas distribués uniformément pour les classes étudiées. Ce phénomène est aussi relié à la grande variété des entités se trouvant sur le site d'étude.

Sur la figure 8, on voit que le facteur de discrimination des signatures texturales (équation 1) pour les diverses classes augmente avec l'ordre des paramètres de texture. Pour la classe 2, par exemple, on a un facteur de discrimination de 58 % à l'ordre 2, par rapport au facteur maximal obtenu à l'ordre 4. Pour cette même classe, on a un facteur de 81 % à l'ordre 3 par rapport au facteur maximal obtenu à l'ordre 4.

Ceci montre l'avantage qu'on a à utiliser les signatures texturales d'ordre élevé pour la classification des images RSO. Toutefois, on ne pourrait pas augmenter indéfiniment l'ordre des paramètres de texture car le temps de calcul deviendrait trop long par rapport à la capacité des machines utilisées, malgré les méthodes d'évaluation rapide développées.

Signatures texturales de la classe 1 aux ordres 2, 3 et 4

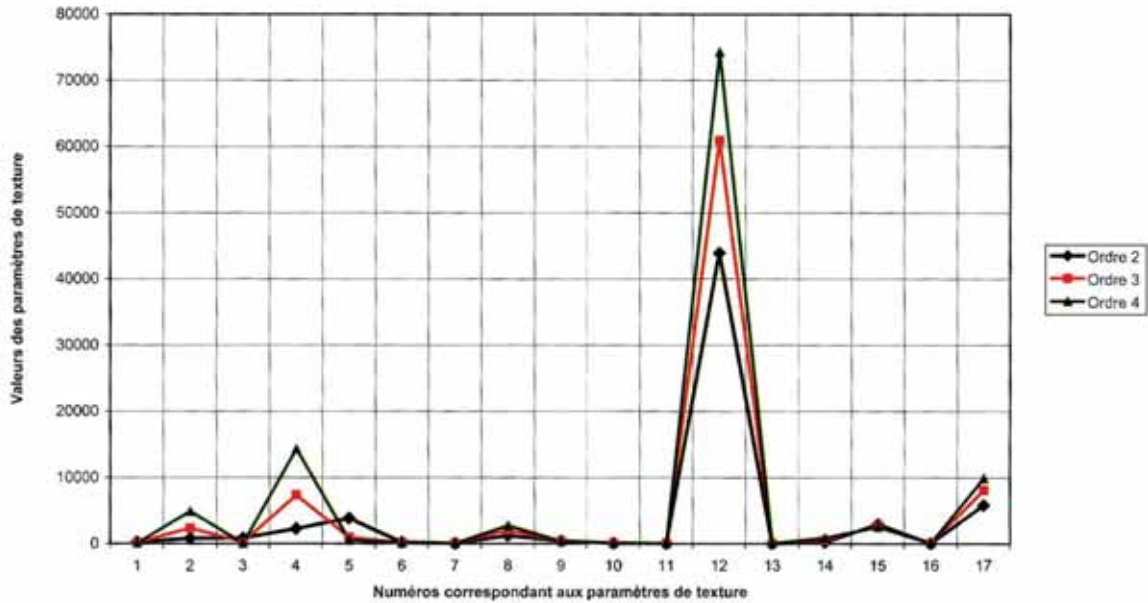


Fig. 5 signatures texturales de la classe 1 aux ordres 2, 3 et 4 .

Signatures texturales de la classe 2 aux ordres 2, 3 et 4

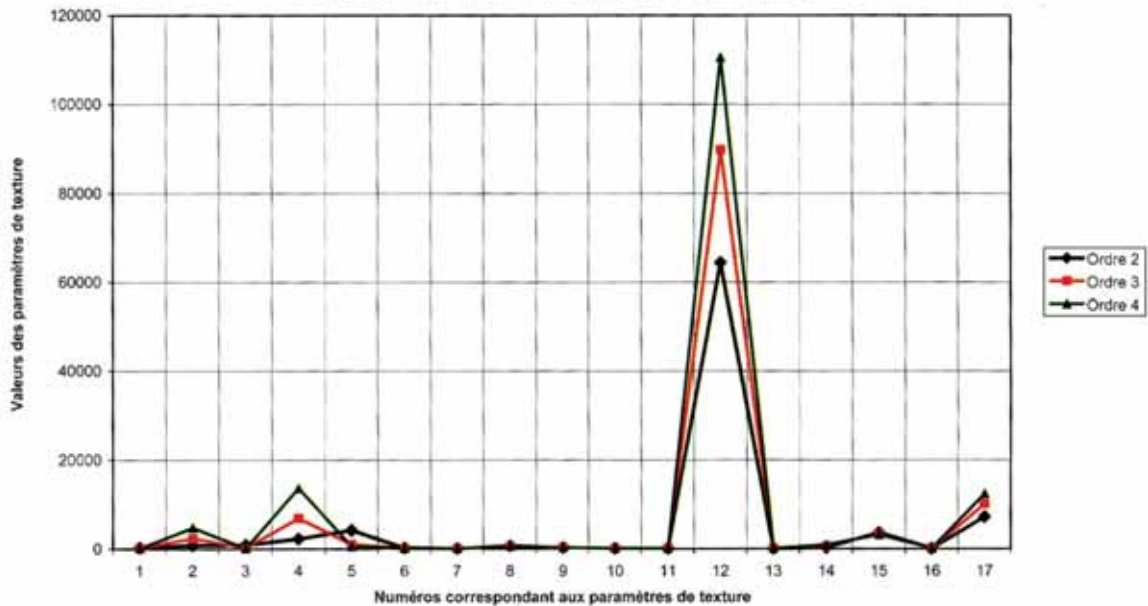


Fig. 6 signatures texturales de la classe 2 aux ordres 2, 3 et 4 .

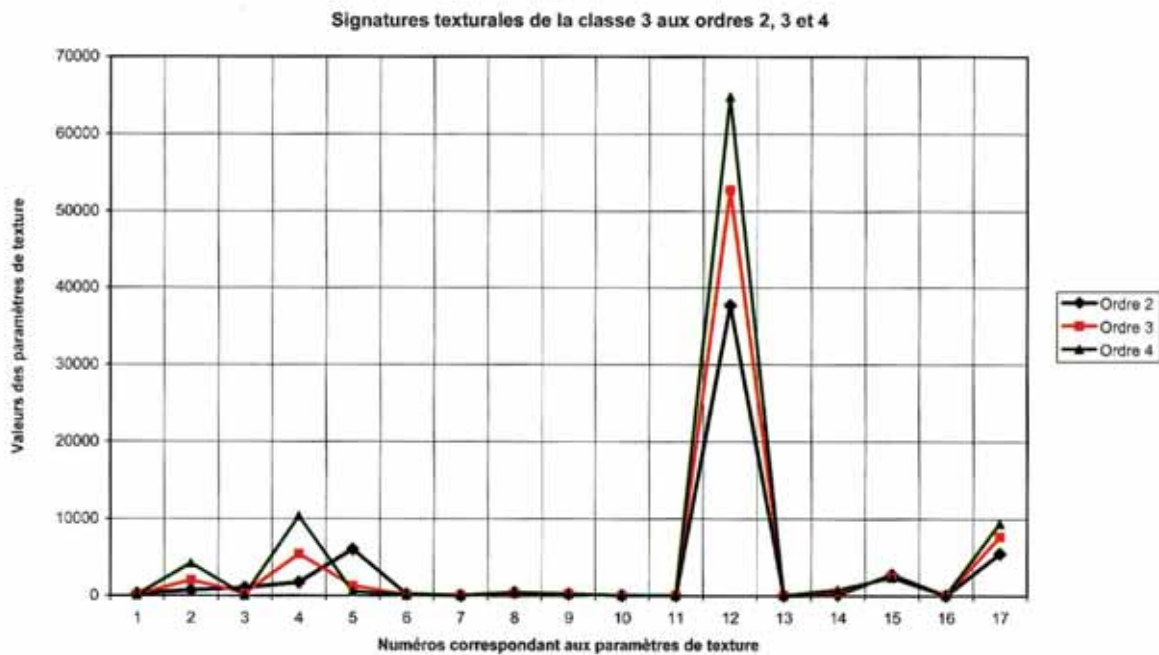


Fig. 7 signatures texturales de la classe 3 aux ordres 2, 3 et 4 .

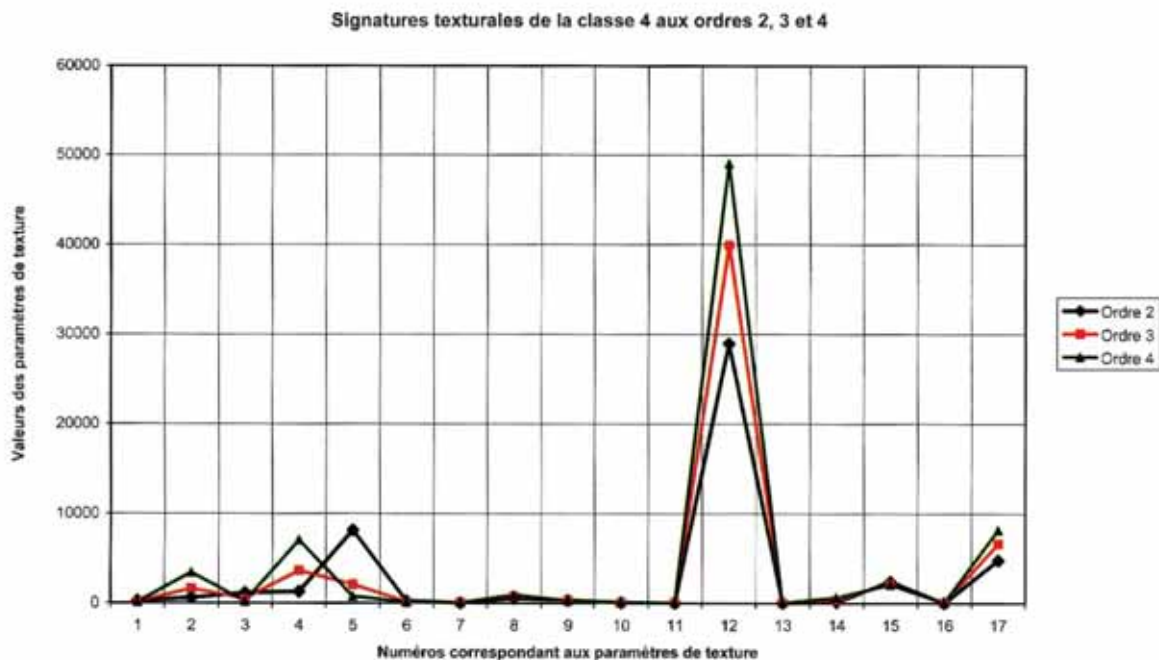


Fig. 8 signatures texturales de la classe 4 aux ordres 2, 3 et 4 .

Facteur de discrimination des signatures texturales en fonction de l'ordre des paramètres de texture

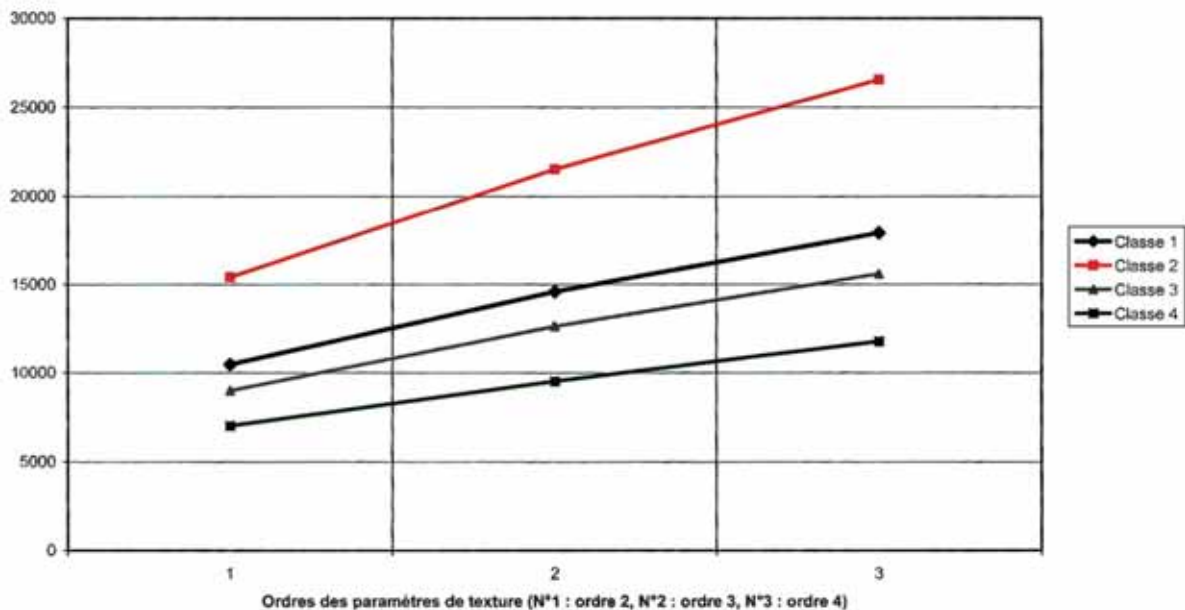


Fig. 9 facteur de discrimination des signatures texturales en fonction de l'ordre des paramètres de texture, pour les 4 classes ciblées.

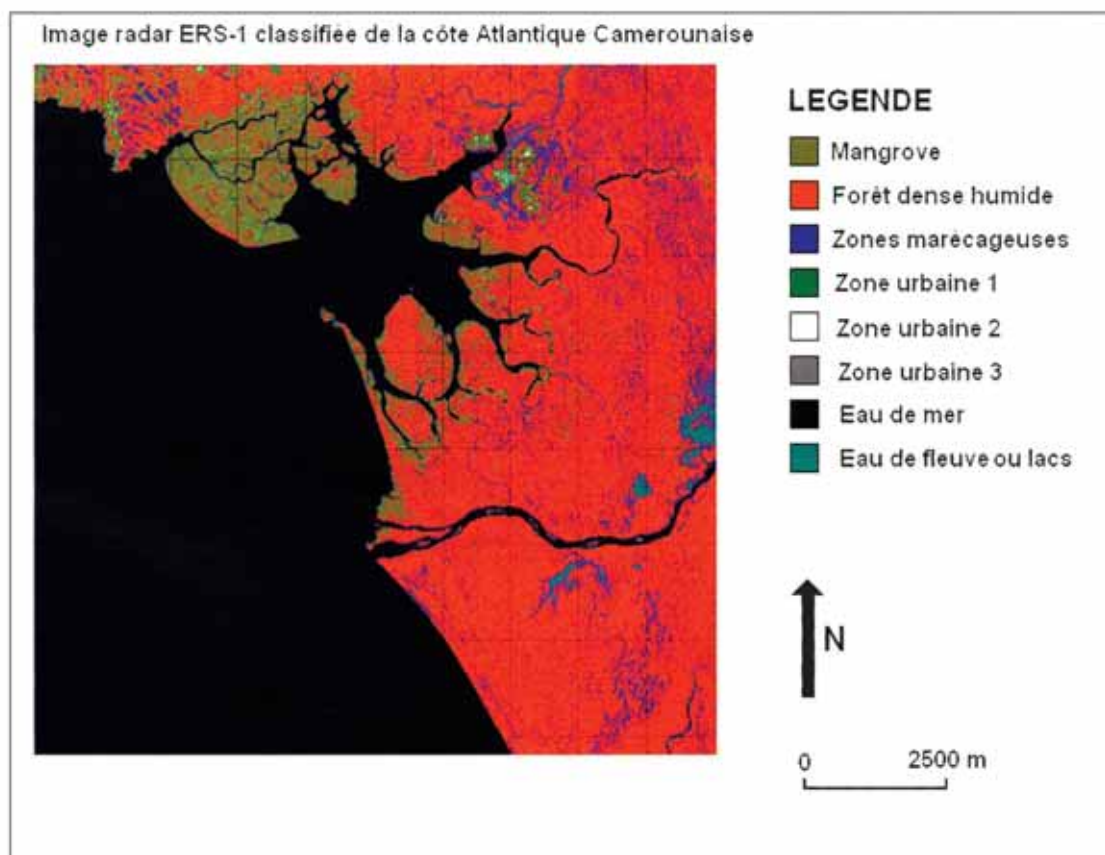


Fig. 10 image classifiée par la méthode des signatures de texture.

5. Conclusion

Le but de cette étude consistait à montrer que les paramètres de texture d'ordre élevé produisent une meilleure discrimination des classes d'occupation du sol sur une image radar à synthèse d'ouverture. Cet objectif a été atteint. Dans ce travail, les notions de signature texturale et vecteur de texture ont aussi été présentées, ainsi que leur importance dans la discrimination des classes. Notons enfin qu'on ne peut indéfiniment augmenter l'ordre des signatures texturales dans le but de rechercher un meilleur facteur de discrimination des classes. Il a été expliqué dans cette étude qu'au-delà d'une certaine valeur, l'ordre des paramètres texturaux dégrade plutôt le facteur de discrimination des signatures de texture. Les principes présentés dans cette étude peuvent être utiles pour une classification texturale précise des images RSO.

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., Talla Tankam, N., Tonyé, E. et Dzepa, C., 2005. Nouvel algorithme d'évaluation des paramètres de texture d'ordre n sur la classification de l'occupation des sols de la région volcanique du Mont Cameroun. En cours de publication dans la revue Télédétection.
- Akono, A., Tonyé, E. et Rudant, J.-P., 2003a. Classification texturale d'une image radar à synthèse d'ouverture dans une région volcanique: le cas de la région du Mont Cameroun. Télédétection, vol. 3, n° 2-3-4, p. 111 - 124.
- Akono, A., Tonyé, E., Ndi Nyoungui, A. et Rudant, J.-P., 2003b. Nouvelle méthodologie d'évaluation des paramètres de texture d'ordre trois. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, n° 9, 10 May, 2003, p. 1957-1967.
- 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.
- Franklin S.E. and Peddle RD., 1989. Spectral texture for improved class discrimination in complex terrain. International Journal of Remote Sensing, Vol. 10 n° 8, p. 1437-1443.
- Haralick, RM., Shanmugan, K. and Dinstein, I., 1973. Textural features for image classification. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, p. 610-621.
- Jukka, H. and Aristide V., 1998. Land cover/land use classification of urban areas: a remote sensing approach. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 12 n° 4, p.475-489.
- Lee, J.S., 1980. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2 (2).
- Linders, J., 2000. Comparison of three different methods to select feature for discriminating forest cover types using SAR imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, n° 10, p. 2089 - 2099.
- Lucieer A., Stein A., Fisher P., 2005. Multivariate texturebased segmentation of remotely sensed imagery for extraction of objects and their uncertainty. International Journal of Remote Sensing, vol. 26, n° 14, p. 2917 - 2936.
- Pratt, W.K., 1991. Digital image processing. Second edition, Wiley, New-York, NY.
- Puissant, A., Hirsch, J., Weber, C., 2005. The utility of texture analysis to improve per-pixel classification for high to very high spatial resolution imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 26, n° 4, p. 733 - 745.
- Randen, T. and Husoy, J.H., 1999. Filtering for Texture Classification: a comparative study. IEEE Transactions PAMI, vol. 21, n° 4, p. 291-310.
- Reed, T.R. and Hans Du Buf, J.M., 1993. A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques. CVGIP: Image Understanding, vol. 57, n° 3, p. 359-372.
- Ulaby, F.T., Kouyate F., Brisco B. and Lee W.T.H., 1986. Texture information in SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 24, n° 2, p. 235-245.

SPOT5 Pour La Détection D'urbanisation *

Vinciane Lacroix, Mahamadou Idrissa et Arnaud Hincq
École Royale Militaire, Signal and Image Centre, Av. de la Renaissance 30, B-1000 Bruxelles,
Vinciane.Lacroix@elec.rma.ac.be

Hugues Bruynseels, Olivier Swartenbroekx
Institut Géographique National, B-1000 Bruxelles, Belgique, hbr@ngi.be

Résumé: Le but du projet ETATS (Système d'Evaluation du Taux d'Actualisation de données topo-géographiques par Télédétection Spatiale) est d'estimer, à partir d'images SPOT5 et de la base de données (BD) de l'Institut Géographique National belge (IGN), le taux de changement du bâti et du réseau de communication de la Belgique. L'image est tout d'abord co-registree avec les données vectorielles. D'une part, ces dernières sont utilisées pour générer un masque qui représente l'ancien état de la BD. D'autre part, la fusion de deux procédures de classification permet de séparer les zones bâties et le réseau de communication du reste de l'image. Le premier fait usage des filtres de Gabor simplifiés pour extraire des zones de structures et de texture tandis que le second est basé sur l'indice de végétation, et la connaissance du réseau hydrologique. La fusion produit un masque représentant l'état actuel de l'urbanisation dans la zone. La comparaison des deux masques fournit une information grossière sur les zones qui ont subi une urbanisation récente.

Mots-clés: cartographie, détection de changement, détection du bâti, SPOT5.

Abstract: An automatic system to estimate the urbanization changes on the Belgian territory, using SPOT5 images and the National Geographic Institute vectorial database is proposed. The images and the vectorial data are first co-registered.

Then, the vectorial database is projected and dilated to produce a mask representing the old status of the database. On the other hand, a fusion of two classification processes on the images enables to extract the built-up area and the communication network, generating a mask representing the actual state of the urbanization in the zone. The first process uses simplified Gabor filters to extract structures and texture, while the second is based on the vegetation index and the knowledge about hydrography. The comparison between the two masks provides coarse information on the changes.

Keywords : cartography, change detection, built-up area detection, SPOT5.

1. Introduction

La demande d'informations géographiques à jour est sans cesse croissante, résultant de changements très rapides dans beaucoup de régions mais également suite au succès des multiples applications des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans la vie courante. Depuis l'arrivée des senseurs à très haute résolution, les images spatiales sont devenues une excellente source d'information pour acquérir cette connaissance et pour suivre les changements.

En 2006, l'IGN belge souhaiterait planifier la mise à jour de ses données et fournir aux utilisateurs l'information concernant l'état d'actualisation de celles-ci. Le système ETATS permettra à l'IGN de réaliser cette planification afin de concentrer ses efforts dans les zones de changement.

La première tâche consiste donc à choisir un senseur approprié, étant donné les contraintes suivantes :

- le coût d'une couverture de l'entièreté du territoire doit être abordable ;

- celle-ci doit être techniquement possible ;

- la résolution doit être suffisante pour détecter les changements dans le bâti et le réseau de communication. Un test de visibilité [Lacroix04] a montré que des images SPOT5 permettent à un photo-interprète de détecter la majorité des ensembles de bâtiments, ainsi que presque tout le réseau routier en zone ouverte, mais pas les bâtiments individuels.

On trouvera un résumé des méthodes de détection de changement dans [Li02]. La plupart des articles traitent du changement entre des images mais pas des changements entre une BD et une image, problème souvent considéré comme un problème d'extraction de caractéristiques. Dans [Vossemann97], la connaissance est utilisée pour la mise à jour de cartes. L'ancienne position de la route est comparée à l'image par l'analyse du profil d'intensité. Si un changement est observé, une hypothèse de changement est générée. L'introduction de la connaissance au niveau des largeurs de route et des angles de sortie améliore les résultats de l'interprétation, mais beaucoup de changements sont

* Article publié dans la revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection n° 178 (2005-2), et repris dans le BSG Avec l'amiable autorisation de l'auteur.

en fait des fausses alarmes causées par des objets tels les arbres, les voitures et les ombres. Busch [Busch98] a proposé une révision du bâti à partir d'imagerie satellite (SPOT et IRS_1C) et de données SIG. Le bâti est détecté sur base de la densité de bords. Klang [Klang98] a proposé une détection automatique des routes par l'utilisation d'images Landsat, SPOT, IRS_1C, toutes ré-échantillonnées à 10 m de résolution. La base de données vectorielle projetée est mise en correspondance avec des routes détectées. Des statistiques sur ces dernières sont utilisées pour trouver un seuil qui sert à extraire des points de départ de route, d'où un suivi est initialisé. Dans un article invité, Baltsavias [Baltsavias02] fournit un état de l'art sur l'extraction et la révision d'objets utilisant des données géo-spatiales et de la connaissance. Cet article se focalise cependant surtout sur des images aériennes ou des images satellites de 1 m de résolution. Une évaluation de méthodes de détection automatique du réseau routier sur ce même type de données est organisé par le groupe de recherche EuroSDR (voir <http://www.bauv.uni-bwmuenchen.de/institute/inst10/oepe/>). En ce qui concerne la détection d'objets de facture humaine dans les images satellites, des chercheurs [Sakamoto04] ont utilisé l'indice de végétation ainsi que la présence de bords.

2. Stratégie globale du système

La BD est à l'échelle conceptuelle du 1/10 000 pour une utilisation cartographique selon une légende qui respecte les emprises sur le terrain. Pour les thèmes étudiés, il n'y a pas de déplacement cartographique, la précision du pointé photogrammétrique est respectée (de l'ordre du demi mètre) et les écarts standards sont inférieurs à 1 m. Aussi, les changements sont localisés par comparaison du masque généré par la projection de la BD sur l'image avec le résultat d'un classifieur qui permet d'extraire le bâti et le réseau routier, appelé classe «man-made» ou MM. Nous supposons que cette classe se manifeste par la présence de structures et de texture dans l'image panchromatique. Ainsi les changements à l'intérieur de l'ancienne étendue de la BD ou les changements d'attribut tel que la largeur de la route ne seront pas considérés. Par ailleurs, le système devrait détecter comme changement les endroits où la BD indique la présence de route ou de bâti là où il n'y en a pas.

La stratégie est résumée dans la Figure 1. La BD vectorielle de l'IGN et les images SPOT5 constituent les entrées du système.

L'IGN filtre la BD afin de produire des couches vectorielles ne contenant que le bâti, le réseau routier et l'hydrographie. Le réseau routier et le bâti sont utilisés pour produire «l'ancien masque», représentant l'ancienne étendue de la classe MM.

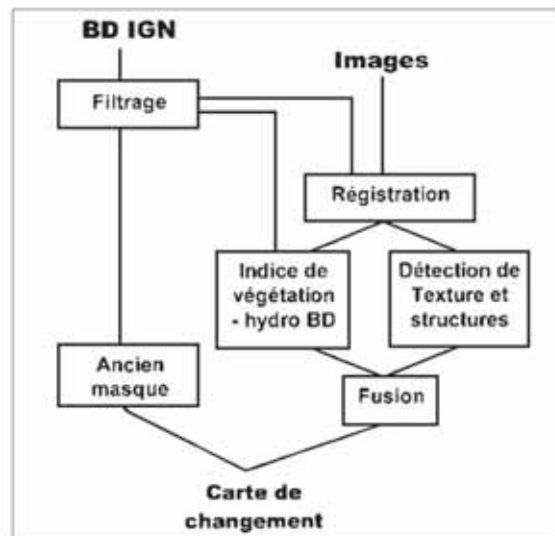


Fig. 1 Stratégie globale du système.

Une procédure de recalage semi-automatique permet de recalculer les images avec la BD vectorielle ; d'une part, l'image panchromatique est analysée par un algorithme de détection de structures et texture. D'autre part, l'indice de végétation (NDVI) calculé à partir des images multi-spectrales fournit une autre séparation en deux classes: végétation et non végétation. La fusion des deux classifieurs (dont on a retiré le réseau hydrographique), est comparée à l'ancien masque pour générer une carte de changement.

3. Recalage des images

Si un modèle numérique d'élévation est disponible, des images orthorectifiées peuvent être produites de telle sorte que les images soient bien positionnées sous les couches vectorielles correspondantes. Comme l'IGN ne dispose pas d'un tel modèle sur l'ensemble de la Belgique, une autre solution est envisagée.

Un ensemble de points d'amer, distribués de manière uniforme, est utilisé pour obtenir g, une fonction de géo-référencement sous la forme d'un polynôme du second ordre. Si l'erreur quadratique moyenne de la BD vectorielle projetée par g-1 est plus grande que 5m (la largeur typique d'une route secondaire),

l'image est découpée en cellules de 1,250 km sur 1,250 km, et les longues lignes claires sont détectées. Plusieurs détecteurs de lignes (« ridge detectors ») existent dans la littérature, en particulier celui de Steger [Steger98] qui est disponible comme logiciel « open-source ». Dans notre application, sur la zone test étudiée, le « Gradient Line Detector » [Lacroix98] permet d'extraire plus de lignes, quoique les résultats soient fort semblables ; ce dernier exploite le fait que le gradient de l'intensité pointe en sens opposé de part et d'autre d'une ligne et plus précisément vers l'extérieur ou l'intérieur suivant qu'il s'agisse d'une ligne foncée ou claire. Ainsi, dans le 8-voisinage de chaque pixel, le maximum du produit vectoriel du gradient de l'intensité des pixels organisés symétriquement par rapport au pixel central est calculé s'ils pointent tous deux dans la direction du point central, comme le montre la figure 2.

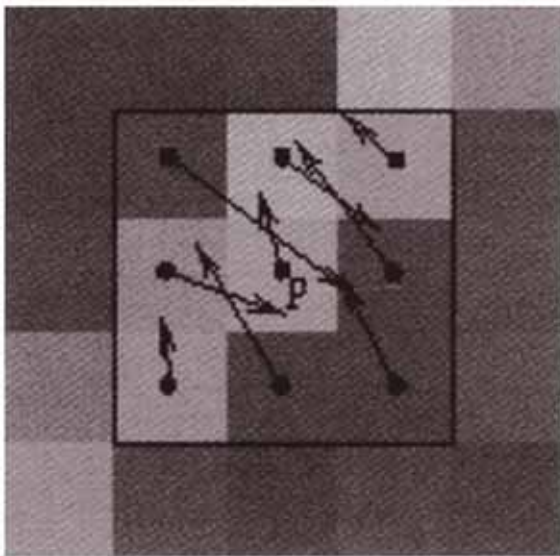


Fig. 2 Le champ du gradient de l'intensité dans le voisinage d'une ligne claire.

Ensuite, une suppression des non-maxima et un suivi de ligne est réalisé, comme dans le cas d'extraction de bords. Seules les longues lignes dans le voisinage de la projection des routes sont considérées comme candidats potentiels à la mise en correspondance.

Pour chaque route, représentée dans la BD par une succession de vecteurs, les meilleurs segments compatibles en termes de distance vecteur projeté et d'orientation sont considérés. Une procédure des moindres carrés est alors utilisée pour calculer la meilleure transformation affine f_i qui place les lignes détectées dans la cellule i sous les vecteurs projetés.

Pour assurer une continuité aux bords des cellules, une moyenne pondérée des transformations affines est calculée sur les pixels dont la distance au bord est inférieure ou égale à 20 pixels. L'image est alors ré-échantillonnée par une interpolation bicubique. Le résultat de ce processus sur une cellule est montré sur la Figure 3. Si l'erreur quadratique moyenne d'une cellule contenant un point d'amer excède 5m, des points supplémentaires sont demandés à l'utilisateur, et une autre fonction locale est calculée. Cette option n'a pas été nécessaire dans les quatre zones test. Enfin, si la cellule manque de route, les transformations des cellules voisines sont utilisées. La procédure s'est avérée satisfaisante sur toutes les zones, y compris sur la zone de Liège, relativement escarpée.

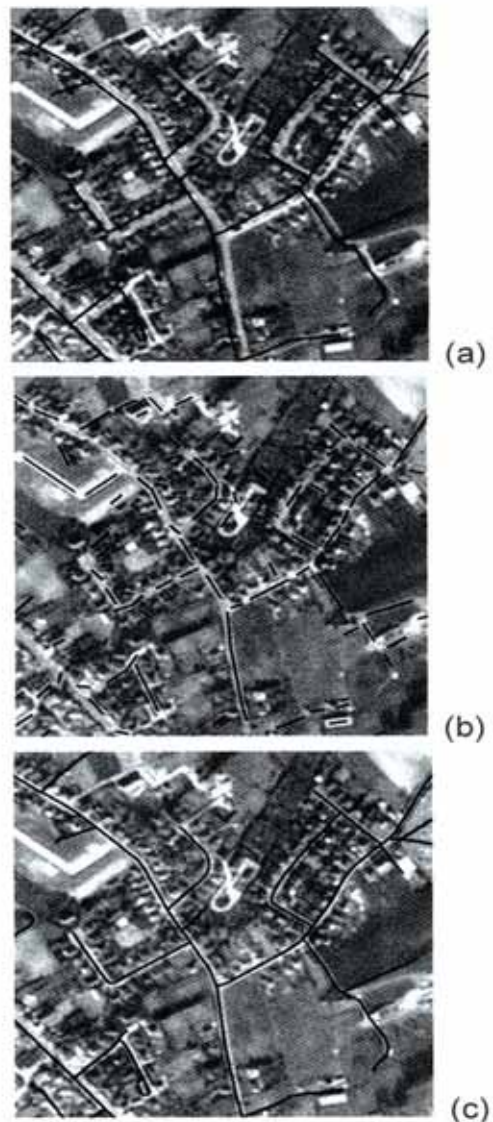


Fig. 3 (a) BD projetée; (b) lignes claires détectées dans le voisinage; (c) données recalées.

4. Détection du bâti et du réseau routier

On recherche un filtre capable de fournir une forte réponse pour la classe MM. A l'échelle de l'étude, les routes, les petits et grands bâtiments formeront respectivement des lignes, des points et des rectangles clairs. Des détecteurs de bords ont déjà été utilisés (notamment dans [Sakamoto04]) pour détecter le bâti. Cependant, ils répondront également aux frontières des champs et forêts introduisant de fausses alertes. De ce point de vue, les détecteurs de lignes devraient être plus performants, mais manqueront quant à eux les larges bâtiments. Les filtres de Gabor par ailleurs pourraient détecter les deux.

4.1 Filtres de Gabor

Les filtres de Gabor réalisent localement une analyse de Fourier. Dans le domaine complexe ils sont définis comme suit:

$$G(x, y, k_x, k_y) = e^{-\frac{((x-X)^2 + (y-Y)^2)}{2\sigma^2}} \cdot e^{j(k_x x + k_y y)}$$

Où x et y représentent les coordonnées spatiales et kx, ky les coordonnées fréquentielles. X et Y définissent la localisation spatiale de la fenêtre gaussienne.

Dans notre système, deux simplifications ont été introduites: la première consiste à utiliser la STFT (Short Time Fourier Transform) qui permet d'utiliser une même taille de fenêtre quelle que soit la fréquence du filtre. La deuxième consiste à remplacer la fenêtre quelle que soit la fréquence du filtre. La deuxième consiste à remplacer la fenêtre gaussienne par une binominale, afin d'éviter les problèmes de coupure de la Gaussienne. Les fonctions de base deviennent :

$$S_{k,l} = W(n, m) \times \sin 2\pi \left(\frac{kn}{N+1} + \frac{lm}{M+1} \right) \text{ et}$$

$$C_{k,l} = W(n, m) \times \cos 2\pi \left(\frac{kn}{N+1} + \frac{lm}{M+1} \right)$$

Où W représente la fenêtre binominale:

$$W^2(n, m) = \frac{1}{2^{(N+M)}} C_N^{\binom{N-n}{2}} C_M^{\binom{M+m}{2}}$$

$$\text{où } C_q^p = \frac{q!}{p!(q-p)!}$$

$$n = -N/2, \dots, N/2; \quad m = -M/2, \dots, M/2;$$

$$k = -K/2, \dots, K/2; \quad l = -L/2, \dots, L/2 \quad \text{et } K \leq N, L \leq M$$

La sélectivité en fréquence spatiale (exprimée en nombre de cycles par pixel) et en orientation (exprimée en radian) est donnée par:

$$\omega = 2\pi \sqrt{\left(\frac{k}{N+1}\right)^2 + \left(\frac{l}{M+1}\right)^2}$$

$$\text{et } \theta = \arctan \frac{k}{l} \frac{M+1}{N+1}$$

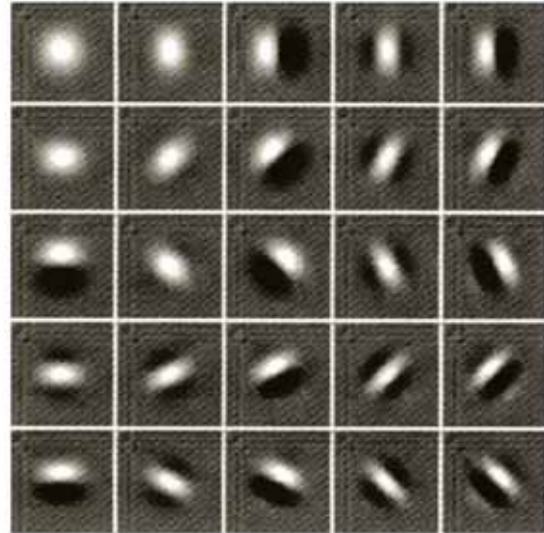


Fig. 4 Filtres de Gabor simplifiés (gris=0, blanc=valeurs positives, noir= valeurs négatives).

Tableau 1. noms des termes en sinus et en cosinus correspondant aux filtres de la Figure 4.

C 0,0	C 0,1	S 0,1	C 0,2	S 0,2
C 1,0	C 1,1	S 1,1	C 1,2	S 1,2
S 1,0	C -1,1	S -1,1	C -1,2	S -1,2
C 2,0	C 2,1	S 2,1	C 2,2	S 2,2
S 2,0	C -2,1	S -2,1	C -2,2	S -2,2



Fig. 5 Partie de l'image SPOT5 panchromatique.

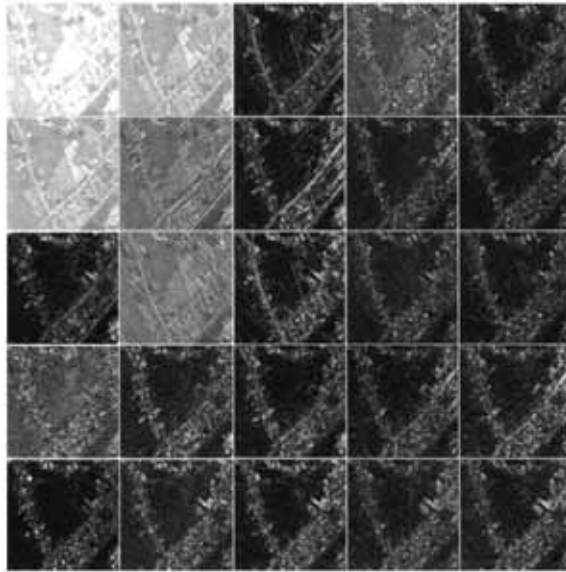


Fig. 6 Images caractéristiques correspondant au filtrage de la partie d'image présentée à la Figure 5.

Un ensemble d'images caractéristiques est obtenu en convoluant l'image I avec chaque filtre, permettant de définir une énergie locale [Kruizinga99] donnée par:

$$E_{k,l}(n,m) = [(C_{k,l} \otimes I)(n,m)]^2 + [(S_{k,l} \otimes I)(n,m)]^2$$

Où \otimes désigne la convolution, k, l , les coordonnées fréquence-direction.

La Figure 6 illustre l'effet de l'application d'un banc de filtres sur la zone présentée à la Figure 5. On peut remarquer un fond gris généré par les filtres cosinus dont la fréquence centrale est basse. Comme la détection ne devrait pas contenir de composante DC, celle-ci devrait être retirée.

La nouvelle formulation de l'énergie qui sera moyennée sur une fenêtre binomiale de la même taille que celle du filtre, devient:

$$E(n,m) = \max_{k,l=-N/2..N/2} \left[((C_{k,l} - DC_{k,l}) \otimes I)(n,m) \right]^2 + [(S_{k,l} \otimes I)(n,m)]^2 \quad (1)$$

4.2 Choix des paramètres du filtre

Une région d'apprentissage sur laquelle la BD est à jour et contenant la plupart des structures de bâti et de routes qu'on peut probablement rencontrer en Belgique, est utilisée pour trouver les meilleurs filtres.

Considérant que l'on prendra $N=M$ et que K et L sont liés à N et M par les relations $K \leq N$ et $L \leq M$, la sélectivité en fréquence et en orientation des filtres ne dépend que de N ; celui-ci est donc le seul paramètre nécessaire pour calculer la mesure de texture de l'équation 1. Le seuil séparant les zones texturées des autres est un autre paramètre à déterminer. Chaque ensemble de filtres $C_{k,l}$ et $S_{k,l}$ correspondant à une taille donnée de fenêtre est d'abord évalué, puis le meilleur seuil séparant les deux classes est recherché.

La sensibilité et la spécificité sont des indices souvent utilisés pour évaluer un classifieur séparant deux classes [Provost97]. Dans ce cas, les deux classes sont respectivement 1 pour la classe MM et 0 pour le reste. Les indices sont basés sur la matrice de confusion réalisée à partir d'une réalité terrain et des résultats de classification, comme montrés dans le tableau 2. Par exemple, «VP» dans cette table est le nombre de pixels qui sont considérés comme appartenant à la classe MM suivant la, réalité terrain et détectés comme tels par le classifieur. La sensibilité s et la spécificité P sont définies comme suit:

$s = VP / (VP + FN)$ et $p = VN / (FP + VN)$ où VP , FP , VN , et FN désignent respectivement les vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs et faux négatifs.

Tableau 2. Matrice de confusion.

Réalité terrain	1	0
Classes détectées		
1	VP	FP
0	FN	VN

Pour chaque ensemble de filtres, il y a un compromis à réaliser: un seuil bas sur l'énergie de texture engendrera beaucoup de fausses alertes (basse spécificité) tout en fournissant une bonne sensibilité et vice versa. La courbe ROC (« Receiver Operating Characteristic ») permet d'analyser l'évolution de ce compromis quand le seuil est modifié. Il consiste à tracer le taux de VP (s) en fonction du taux de FP ($1-p$).

Dans cette représentation, plus une courbe tend vers la fonction en escalier en 0, meilleure elle est. Disposant d'une série de courbes ROC, la méthode idéale consisterait à trouver, pour chaque seuil, c'est-à-dire pour chaque taux de FP , la méthode qui fournit le plus haut taux de VP .

En fait, le point le plus proche du point (0,1) pourrait fournir un bon compromis.

L'aire sous la courbe (AUC) est un autre indice pour sélectionner un classifieur qui serait le meilleur en moyenne. Cependant, le système sera surtout utilisé dans la région supérieure gauche de la courbe, c'est-à-dire en dessous de 20% de fausses alarmes et au dessus de 80% de bonne détection. Aussi, c'est plutôt l'AUC dans cet intervalle qui primera.

Le choix de la taille appropriée du filtre dépend surtout des caractéristiques spatiales des structures à mettre en évidence sur l'image et donc, celui-ci peut se faire sur une image test, pour peu que celle-ci soit représentative des structures que l'on pourra rencontrer sur l'ensemble du territoire. Trois ensembles de paramètres de filtres (N= 5, 7, et 9) ont donc été testés sur une image panchromatique SPOT5 de 5m de résolution sur la région de Sint-Niklaas.

La réalité terrain résulte de la projection des vecteurs de la BD sur l'image, après le processus de recalage défini précédemment, suivi d'une dilatation. L'AUC globale est de 0.92 pour chaque ensemble alors que l'AUC partielle est respectivement de 0.45, 0.52 et 0.54. N=7 a été choisi pour offrir le meilleur compromis entre la performance et la complexité.

Comme base de comparaison dans la Figure 7, nous avons dessiné les courbes ROC des filtres de Laws [Laws80] et de la Digital Cosine Transform (DCT), considérés comme efficaces pour la classification de texture [Randen99], ainsi que le détecteur de lignes déjà mentionné dans le cadre du recalage, l'indice de complexité [Sakamoto04] et le NDVI comme défini plus loin dans le texte. Pour un taux de fausses alertes peu élevé, le détecteur de lignes claires est le meilleur choix tandis que dès que celui-ci atteint les 12%, l'énergie de Gabor devient meilleure.

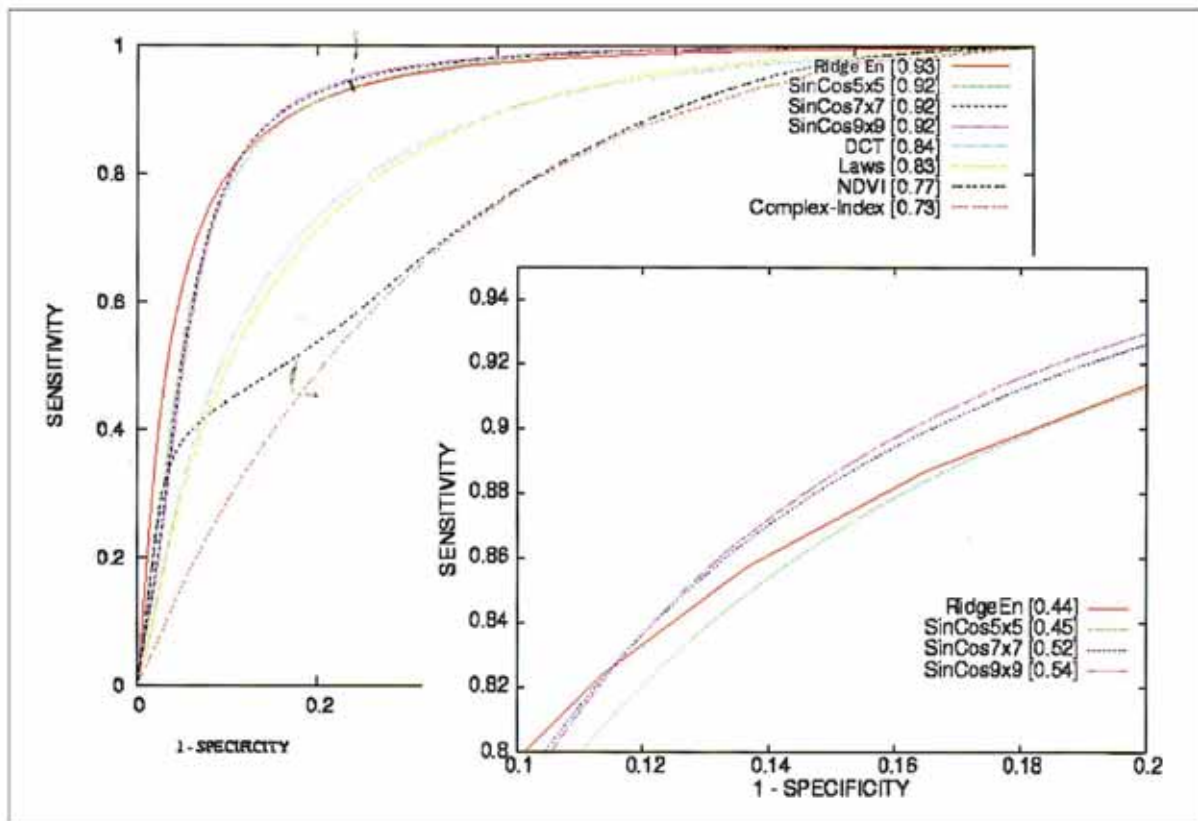


Fig.7 courbes ROC.

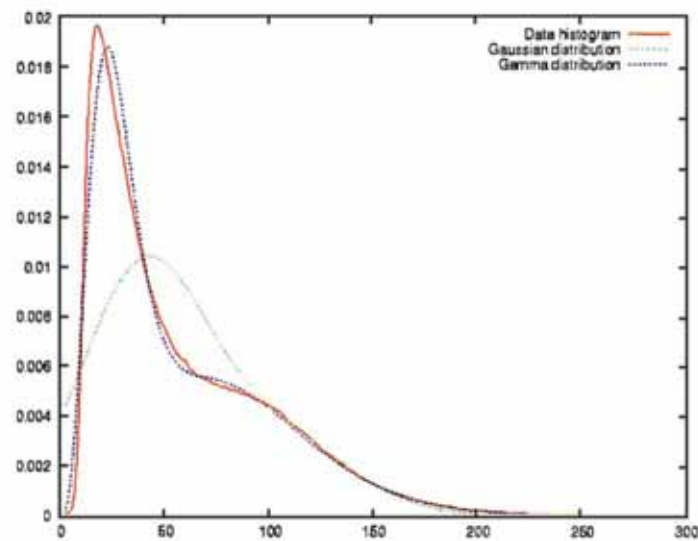


Fig. 8 Approximation de l'histogramme des énergies de texture (en rouge) par une mixture de distributions γ (en bleu), initialisée par une mixture de gaussiennes (en vert).

4.2 Choix du seuil

Comme le choix du seuil d'énergie de texture pourrait dépendre de la radiométrie de l'image, on ne peut décider de celui-ci sur base d'une image test. La méthode ne peut donc pas reposer sur l'analyse ROC. La distribution des valeurs d'énergie peut être modélisée par une mixture de deux distributions γ . Un algorithme itératif destiné à calculer les paramètres de ces distributions demanderait trop de temps de calcul, aussi, une estimation initiale est obtenue en supposant la distribution de deux gaussiennes, dont l'une serait obtenue à partir de la moyenne et de la variance des pixels MM de l'ancien masque de la base de données, et l'autre à partir des pixels restant. Une fois les paramètres des deux distributions γ obtenus, une règle de maximum a posteriori est utilisée pour séparer les deux classes. La Figure 8 montre en rouge l'histogramme des valeurs d'énergie de texture pour la région de SintNiklaas. La mixture des distributions gaussiennes initiales est représentée en vert tandis qu'en bleu, la mixture des distributions γ résultant de l'algorithme itératif montre un bon accord avec l'histogramme.

4.3 Fusion Texture et NDVI

Si seule la mesure de texture est considérée, quelques bâtiments industriels caractérisés par un toit faiblement réfléchissant et relativement homogène pourraient être manqués. L'introduction du NDVI permet d'extraire ces bâtiments. Le NDVI calculé sur des images SPOT5 est défini comme suit:

$$NDVI = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2)$$

Où XS2 et XS3 désignent respectivement les bandes rouge et infrarouge.

Afin d'obtenir deux classes (végétation et non végétation), un algorithme de clustering flou [Gath89] est utilisé.

Comme le réseau hydrographique peut produire de la texture et devrait être classé par le NDVI comme non végétation, la loi de fusion est la suivante: (texture OU non végétation) ET (PAS dans la couche hydrologique de la BD). Ainsi, si un pixel appartient à la classe MM pour l'algorithme de détection de texture ou selon la classification basée sur le NDVI et qu'il n'est pas dans le réseau hydrologique de la BD, alors il est considéré comme appartenant à la classe MM, et sera alors représenté tel quel sur le masque final.

5. Résultats

Une carte de changement de la région de SintNiklaas a été produite. La Figure 9 montre la région considérée, et la Figure 10 la superposition du masque et du classifieur final : les éléments bien détectés sont représentés en vert, les éléments manquants de la BD en rouge ou, si ces derniers sont situés en forêt, en orange, et les zones de changement potentiel en jaune. A cause de l'étendue des filtres, l'énergie de texture a tendance à être plus large que ne l'est la zone réellement texturée. Un filtrage morphologique est donc réalisé sur les zones détectées comme changement potentiel. Par ailleurs, de toutes petites zones de la BD non détectées, résultant vraisemblablement d'un décalage de la BD, sont éliminées par un même type d'opérations morphologiques.

Une analyse de ces résultats montre que pour les éléments manquants:

- . Une zone correspond à un quartier « fantôme » : des bâtiments et des routes étaient prévus dans cette zone mais ne furent jamais construits;
- . Quelques routes secondaires sont manquées;
- . Beaucoup d'entre elles sont situés en forêt, et donc invisibles sous ce couvert.

Le système a été également testé et évalué sur 10 zones incluant des paysages sub-urbains et ruraux, sélectionnées sur des images SPOT5 à 5m et 2,5 m de résolution. Dans ce cas, ce n'est pas la détection de changement qui est évaluée, mais plutôt la détection de la classe MM. Les résultats sont comparés aux résultats des tests de visibilité réalisés par un photointerprète expérimenté, qui en cas de doute a utilisé de l'imagerie aérienne datant approximativement du même moment pour établir la vérité terrain. Dans la figure 11 le taux de bonne détection et de fausses alertes pour chaque zone est représenté, à la fois pour le système dans son entièreté et pour le système sans la fusion du NDVI, ainsi que pour un photo-interprète expérimenté.

La figure montre que le nombre d'éléments ratés par le système est du même ordre de grandeur (10%) pour la moitié des expériences, indépendamment du type de paysage ou de la résolution de l'image, tandis qu'il est approximativement de 20% dans les autres cas. Enfin, il n'est pas sûr que le coût des images multi-spectrales soit justifié, car la classification basée sur le NDVI augmente le taux de fausses alertes et ne diminue qu'occasionnellement le nombre d'éléments manqués (région urbaine U4).

De plus, le système ne donne pas des résultats de détection significativement meilleurs sur les zones de résolution plus fine (U3, U4, U5, R3, R4) mais présente par ailleurs plus de fausses alertes. Il se peut cependant que ce soit dû à une mauvaise qualité d'image. D'autres images devraient être testées.

Enfin la zone ne présente pas un relief important, aussi le système devrait-il être utilisé également sur une zone du territoire belge où des dénivellations importantes existent.



Fig. 9 © Partie d'image SPOT5 5m de résolution sur la région de Sint-Niklaas.

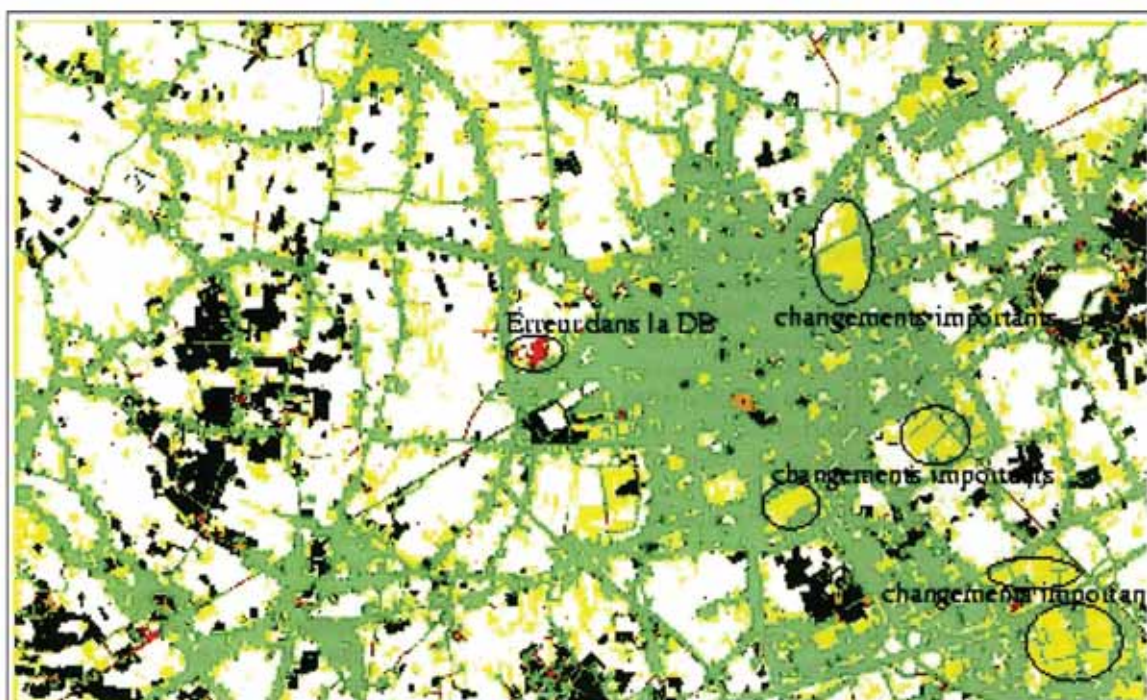


Fig. 10 Carte de changement; vert vif; pas de changement (MM → MM); vert foncé; forêt; rouge; éléments ratés ou erreurs dans la BD (MM → MM); orange; idem mais sous la forêt; jaune: changements ou fausses alertes (non MM → MM) ; blanc; pas de changement (non MM → non MM).

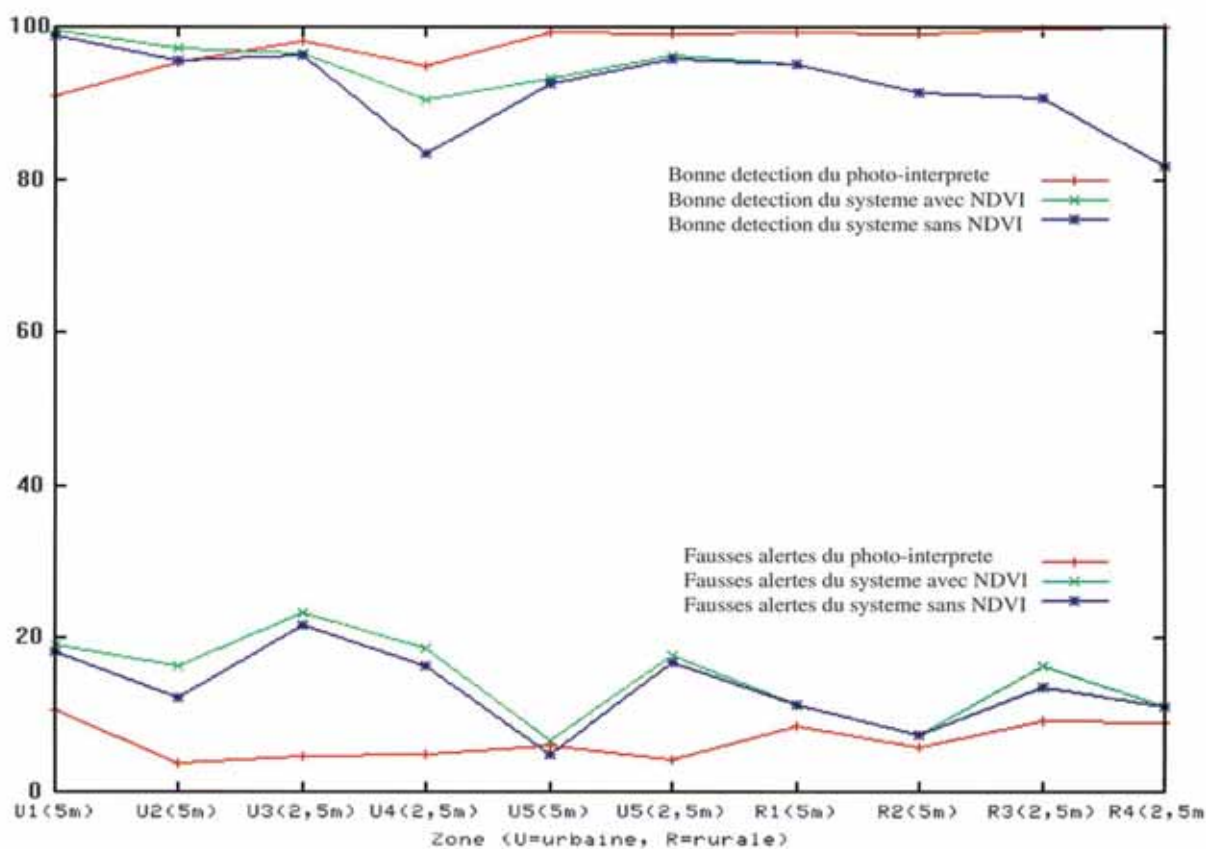


Fig. 11 Taux de détection et de fausses alertes pour les 10 zones analysées (urbaines : Ui, et rurales: Ri) pour le système avec NDVI, sans NDVI et pour un photo interprète expérimenté.

6. Conclusions

L'analyse ROC a été utilisée pour sélectionner une simplification des filtres de Gabor pour détecter le bâti et le réseau routier dans des images SPOT5. Il en résulte un processus qui prend en entrée des images SPOT5 multi spectrales et panchromatique pour produire un masque géoréférencé où la classe d'intérêt est identifiée. Les résultats montrent plus de 90% de bonne détection dans une moitié des expériences et plus de 80% dans l'autre, avec approximativement 20% de fausses alertes. Le masque ainsi produit est comparé à un masque résultant de la projection de données vectorielles correspondant aux mêmes thèmes. Ce système permet donc d'une part, si la prise de vue correspond à la date de la base de données, de vérifier la validité de celle-ci, et d'autre part, si la prise de vue est ultérieure, de détecter les grandes zones de changement. Il va de soi que les zones sous la forêt ne peuvent être analysées, c'est pourquoi il serait utile de disposer d'un algorithme de détection automatique des forêts pour mettre en évidence les zones sur lesquelles le système est incapable d'estimer la présence de routes et de bâti.

Remerciements

Cette étude fait partie du projet ETATS, financé par le programme STEREO de la Politique Scientifique Belge.

Références

- V. Lacroix, A. Hincq, I. Mahamadou, H. Bruynseels, and O. Swartenbroekx, 2004. A visibility test on SPOT5 images, in ISPRS 2004, Commission IV, (Istanbul, Turquie).
- D. Li, H. Sui, and P. Xiao, 2002. Automatic change detection of geo-spatial data from imagery, in Integrated System for Spatial Data Production, Custodian and Decision Support, (Xi'an, China), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS).
- G. Vosselman and M. de Gunst 1997. Updating road maps by contextual reasoning. Proc. 2nd Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Ascona.
- A. Busch, 1998. Revision of built-up areas in a GIS using satellite imagery and GIS data. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Commission IV GIS Between Visions and Applications WG IV/III.2, vol. 32.
- D. Klang, 1998. Automatic detection of changes in road databases using satellite imagery. Proc. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, pp. 293-298.
- E. Baltsavias, 2002. Invited paper, object extraction and revision by image analysis using existing geospatial data and knowledge: State-of-the-art and steps towards operational systems, in Commission VI Mid-Term symposium, vol. XXXIV, Part 2, (Xi'an, China), pp. 13-22, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS).
- M. Sakamoto, et al., 2004. Automatic detection of damage area in Iran earthquake by high-resolution imagery, in Proc. IGARS2004, (Alaska).
- V. Lacroix and M. Acheroy, 1998. Feature extraction using the constrained gradient, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53, pp. 85-94.
- C. Steger, 1998. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI vol 20 n° 2, pp.113-125.
- P. Kruijzinga and N. Petkov, 1999. Nonlinear operator for oriented texture, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 8, pp. 1395-1407.
- K. Laws, 1980. Rapid Texture identification, in Proceeding SPIE Conf. Image Processing for Missile Guidance, vol. 28, pp. 376-380.
- J. Randen, 1999. Filtering for texture classification: A comparative study. IEEE Trans. On Pattern Anal. And Machine Intelligence, vol. 2, pp. 281-310.
- I. Gath and A. Gev, 1989. Unsupervised optimal fuzzy clustering. IEEE Trans. On Pattern Anal. And Machine Intelligence, vol. 11, pp. 773-780.

Pour soumettre un article...

Vous souhaitez proposer un article pour le Bulletin des Sciences Géographiques.

Pour faciliter votre démarche, nous vous adressons quelques recommandations :

- Ce Bulletin est un espace scientifique, consacré aux sciences géographiques.
- **NATURE DES ARTICLES :** Les articles adressés pour publication doivent traiter des sujets se rapportant aux Sciences Géographiques.
Les articles se répartissent en deux rubriques:
 - Recherche - développement
 - Synthèse.

LES ARTICLES DE RECHERCHE - DÉVELOPPEMENT : portent soit sur des travaux ayant une originalité et une contribution novatrice aidant au développement des sciences géographiques, soit sur des réalisations et études concrètes qui pressentent un intérêt dans la maîtrise des concepts des sciences géographiques.

LES ARTICLES DE SYNTHÈSES : ont pour but de faire ressortir, les théories, les méthodes, les techniques ou les procédés liés aux sciences géographiques, avec notamment des cas précis d'application.
- **LANGUES :** Les articles paraissent principalement en Arabe, Français et Anglais.
- **CRITÈRES DE PUBLICATION :** Les articles doivent être fournis sous forme de fichier numérique (WORD,PDF ou PS) ou équivalent, au format A4 en double interlignes, avec une marge de 2,5 cm au maximum sur chacun des quatre côtés.
Chaque communication doit comporter un titre, qui doit être bref et informatif.
LE RESUMÉ : Chaque article doit comporter un résumé en français de 100 à 200 mots de préférence accompagné d'un autre résumé en arabe et en anglais.
- **MOTS CLÉS :** Citer 5 à 6 mots clés.
- **BIBLIOGRAPHIE :** Les références doivent être complètes et présentées dans l'ordre alphabétique des noms d'auteurs. La référence doit mentionner le nom et le prénom de l'auteur suivis de l'année d'édition, du titre de l'ouvrage, de l'éditeur et du lieu d'édition. Toute référence doit être clairement mentionnée dans le texte par le nom et prénom de l'auteur suivie des deux derniers chiffres de l'année de publication.
- **MODALITÉ DE PUBLICATION :** Tout article présenté pour publication, est soumis à l'évaluation de deux membres du comité de lecture, en cas d'avis contraire, il est soumis à un troisième membre. Les articles non retenus ne sont pas retournés, à moins d'une demande de la part de l'auteur.
Un exemplaire sera fourni gratuitement, à chaque auteur; d'autres peuvent être fournis à la demande, dans la limite du stock.
- **DATES DE PARUTION :** Le Bulletin paraît deux fois par an, à la fin du mois d'octobre et du mois d'avril.
- **ENVOI DES MANUSCRITS :** Par mail à inct99@wissal.dz ou par voie postale à l'adresse suivante: Institut National de Cartographie et de Télédétection, **Bulletin des Sciences Géographique, 123, rue de tripoli, Hussein-Dey 16040, BP 430, Alger, Algérie.**



INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE ET DE TELEDETECTION

Crée par ordonnance 211 67 du 17/10/1967 modifiée par les ordonances 84.68 du 23/04/1968 et 73.23 du 05/06/1973 et le décret présidentiel n°98.337 du 29/10/1998.

Siège: 123, rue de Tripoli - BP430 - Hussein Dey - 16040 - Alger

Tél: 213 021 47 00 30 & 021 47 09 20 **Fax:** 213 021 47 00 29 & 021 23 43 81

e-mail: inct99@wissal.dz

Bulletin d'abonnement

- Oui, je souhaite m'abonner au Bulletin des Sciences Géographiques pour une année.**

Tarif d'abonnement pour une année (comprenant deux numéros):

- Etudiant: 70 DA
- Particulier: 80 DA
- Etranger: 15 Euro

Prévoir en sus pour les frais d'expédition:

- Envoi Recommandé: 400 DA
- Pour l'étranger: 10 Euro

Mode de règlement :

Pour l'Algérie :

- Par virement CCP N° 1552.04
- Par virement bancaire : CPA N° 101 401 78505 1
BEA N° Q 22 61 570

Pour l'étranger :

- Par virement bancaire: Banque Deutsche Bank AG Munich
Compte Nr, 85 960 BLZ: 700 700 10

Nom et prénom / raison sociale :.....

Fonction :.....

Adresse complète :.....

N°Tél :..... N°Fax :.....

Date

Signature

**Retourner ce bulletin accompagné du règlement à
Monsieur le Directeur Général de l'Institut National de Cartographie
et de Télédétection**

123, rue de Tripoli- BP 430, Hussein Dey- 16040 Alger.
Tél: 213 021 47 00 30 & 021 47 09 20 Fax: 213 021 47 00 29 & 021 23 43 81
E-mail: inct99@wissal.dz,

ou ANT Vertriebs GmbH Fuerstenrieder Str. 166-81377 Munich R.F.A
Fax: 0049 89 71039 449



Bulletin des Sciences Géographiques

Institut National de Cartographie et de Télédétection

123 rue de Tripoli, BP 430, Hussein Dey - 16040 Alger.

Tél: (213) 021 47 09 20 & 021 47 00 30 - **Fax:** (213) 021 47 00 29 & 021 23 43 81

E-mail: inct99@wissal.dz

