

PARTIE V

Méthodologie d'extraction des données cartographiques

23

Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire

MARC BINARD et BÉNÉDICTE COLLETTE

Service universitaire de recherches fondamentales et appliquées en cartographie et en études spatiales (SURFACES), Département de géographie, Université de Liège, 7, place du 20-Août, 4000 Liège, Belgique; téléphone : (32) (41) 665313; télécopie : (32) (41) 665693

Résumé

La technique classique, permettant de supprimer à la fois le pointillisme caractéristique des classifications ainsi que la présence de mixels au contact de deux affectations, consiste à faire passer un filtre majoritaire. Cette homogénéisation présente cependant l'inconvénient de supprimer certains pixels des classes faiblement représentées telles que celles du réseau routier et de l'habitat dispersé par exemple. Le recours aux méthodes de morphologie mathématique offre l'avantage d'obtenir cette généralisation en contrôlant le contexte dans lequel un pixel, d'une affectation donnée, est remplacé par un pixel appartenant à une autre affectation. Cette opération est réalisée grâce à la création d'un masque sur les affectations à filtrer. Différentes possibilités d'étendre ce masque sont présentées. La substitution ne s'opère que lorsqu'un pixel de la classe à filtrer est localisé sur le masque étendu. L'ordre des substitutions ainsi que le nombre de dilatations et d'érosions doivent être examinés sur une zone échantillon de l'image avant d'appliquer cette méthode automatiquement. Ces procédures conduisent à une généralisation cartographique aboutissant au zonage habituellement utilisé par les aménageurs. Ce traitement facilite la vectorisation qui est nécessaire pour introduire la classification dans un SIG vectoriel. Des applications présentent certaines des étapes du traitement en post-classification de la spatio-carte du Grand-Duché de Luxembourg.

1. Introduction

Suite à la grande variation des réflectances enregistrées par les capteurs haute résolution des satellites, les classifications obtenues sans tenir compte de la texture présentent un mitage de certaines grandes affectations ainsi que la persistance de mixels non ou mal classés au contact de deux affectations.

Le mitage se présente sous forme d'impuretés constituées d'un ou de plusieurs pixels au sein d'une plage massive. Il est révélateur de conditions édaphiques particulières (humidité du sol, affleurement lithologique, etc.) ou de phénomènes catastrophiques (chablis dans les bois, verse dans les cultures, maladies des végétaux, etc.).

Par contre, les mixels correspondent au sol à une portion de territoire présentant plusieurs affectations. Ils enregistrent une réponse spectrale moyenne qui n'est caractéristique d'aucune des affectations présentes.

Une généralisation cartographique est nécessaire tant pour l'utilisation par l'aménageur que pour la vectorisation conduisant à une exportation de la classification dans un SIG basé vecteur. La technique classique permettant de supprimer ces inclusions et ces mixels, consiste à faire passer un filtre majoritaire. Cette homogénéisation présente cependant l'inconvénient d'affaiblir les classes faiblement représentées telles que celles du réseau routier et de l'habitat dispersé par exemple. L'objet de cette communication est de proposer une méthode précisant le contexte exact dans lequel la classe d'un pixel est susceptible d'être substituée à une autre (DURANT et FLOUZAT, 1984).

2. Étude contextuelle

2.1. Classe à filtrer

Une binarisation de la classification est créée en attribuant la valeur 1 à la classe aux dépens de laquelle une substitution doit être effectuée tandis que toutes les autres classes se voient affecter la valeur 0. Ce masque est facilement obtenu en utilisant une table de couleurs adéquate. En effet, pour chaque pixel, cette dernière utilisée comme une table de transcodage, permet de lire dans le fichier d'entrée la valeur de la classification et d'écrire la valeur 0 ou 1 dans le fichier de sortie.

2.2. Classe de fond

La classe de fond est formée par des pixels appartenant à la ou aux classes au sein ou aux frontières desquelles une substitution est désirée. Un masque est constitué d'une image binaire qui regroupe toutes les classes de fond sous la valeur 1 alors que les autres classes ont la valeur 0.

2.3. Extension du masque de la classe de fond

2.3.1. Morphologie mathématique

L'érosion et la dilatation, qui sont les deux fonctions élémentaires de la morphologie mathématique (COSTER et CHERMANT, 1989), sont disponibles dans la version actuelle

de la plupart des logiciels de traitements d'images à condition d'utiliser uniquement une fenêtre carrée comme élément structurant. En effet, l'érosion consiste dans ce cas précis à créer une nouvelle image dont la valeur de chaque pixel, correspond dans l'image initiale, au minimum de la fenêtre d'étude centrée sur lui. De même, la dilatation en chaque point correspond au maximum de la fenêtre d'étude dans l'image initiale (MARION, 1987).

Les érosions et les dilatations peuvent être calculées sur des images en niveaux de gris ou sur des images binaires (masques) comme dans la présente étude (COLLETTE, 1990). Les possibilités d'utilisation de ces deux opérateurs sont nombreuses puisqu'à la fois, le nombre d'érosions et de dilatations, l'ordre dans lequel ils sont utilisés (ouverture ou fermeture) ainsi que la taille de la fenêtre de chaque opérateur (élément structurant) peuvent varier.

Dans ce qui suit, nous n'étudierons que la succession d'une dilatation par une érosion (fermeture) pour différentes tailles de fenêtres carrées. L'utilisation des deux opérateurs dans cet ordre rend le masque plus massif et permet de trouver les pixels contextuellement proches de la classe de fond.

Nous allons étudier successivement les modifications de ce masque en premier lieu le long de son périmètre extérieur et en second lieu dans les inclusions qu'il contient.

2.3.2. Modification de la frontière extérieure du masque

Dans un premier temps observons le déplacement de la limite dans la partie nord-ouest du masque (fig. 1a) en appliquant une fermeture dont la taille de la fenêtre est la même pour la dilatation que pour l'érosion. Cette procédure présente l'avantage de ne pas déplacer la frontière aux extrémités du masque tout en comblant les rentrants. Pour l'exemple de la figure 1, une fenêtre de (3 x 3), de (5 x 5), de (7 x 7) comble respectivement les rentrants sur 6, 13 et 18 pixels (fig. 1b, 1c, 1d).

Si on souhaite définir une frange régulière le long du masque pour délimiter par exemple la zone où sont localisés les mixels, on peut procéder de deux manières : soit appliquer uniquement une dilatation au masque, soit utiliser une fermeture dont la taille de la fenêtre est plus grande pour la dilatation que pour l'érosion.

La simple dilatation par une fenêtre (3 x 3) ou (5 x 5) permet de définir une franche respectivement d'au moins 1 pixel ou au moins 2 pixels (fig. 2b et 3b) avec un premier lissage non négligeable de la limite. Un lissage plus important peut être obtenu par la succession d'une dilatation (5 x 5) par une érosion (3 x 3) (fig. 2c) et par une dilatation (7 x 7) suivie d'une érosion (3 x 3) (fig. 3c). En augmentant la taille de la fenêtre, on comble de plus en plus les rentrants (fig. 2d et 3d).

2.3.3. Étude des inclusions au sein du masque

L'étude des modifications de la limite du masque vers le centre des inclusions permet de constater qu'appliquer une fermeture (dilatation + érosion) lorsque le masque a la valeur 1, revient à appliquer une ouverture (érosion + dilatation) lorsque 1 est attribué à l'inclusion.

Une fermeture dont la taille de la fenêtre est la même pour la dilatation que pour l'érosion permet dans le cas de la figure 4, de diminuer le nombre de pixels de l'inclusion de 3, de 20 et de 42 pixels pour les fenêtres respectives (3 x 3), (5 x 5) et (7 x 7) (fig. 4 b, c et d).

Si on souhaite diminuer la taille d'une inclusion d'une manière régulière à sa périphérie, on peut appliquer une simple dilatation (fig. 4f et 4j) ou une fermeture dont la taille de la fenêtre de la dilatation est plus grande que celle de l'érosion. Cette dernière procédure conduit à rendre les inclusions plus massives (fig. 4g, h et j) où même à supprimer l'inclusion (fig. 4i).

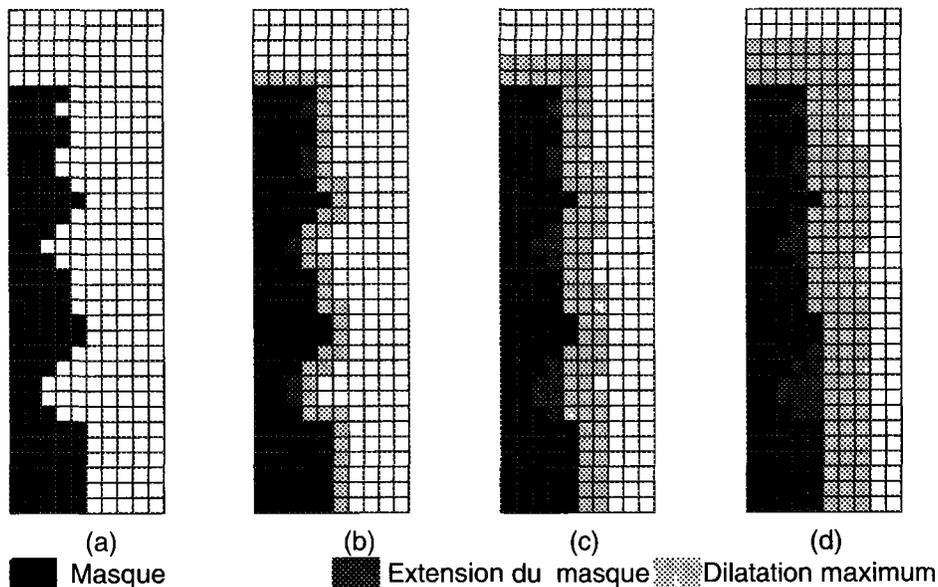


Figure 1. Comblement des rentrants d'un masque par une dilatation (D) suivie d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3) + E(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(5 \times 5)$; d) $D(7 \times 7) + E(7 \times 7)$

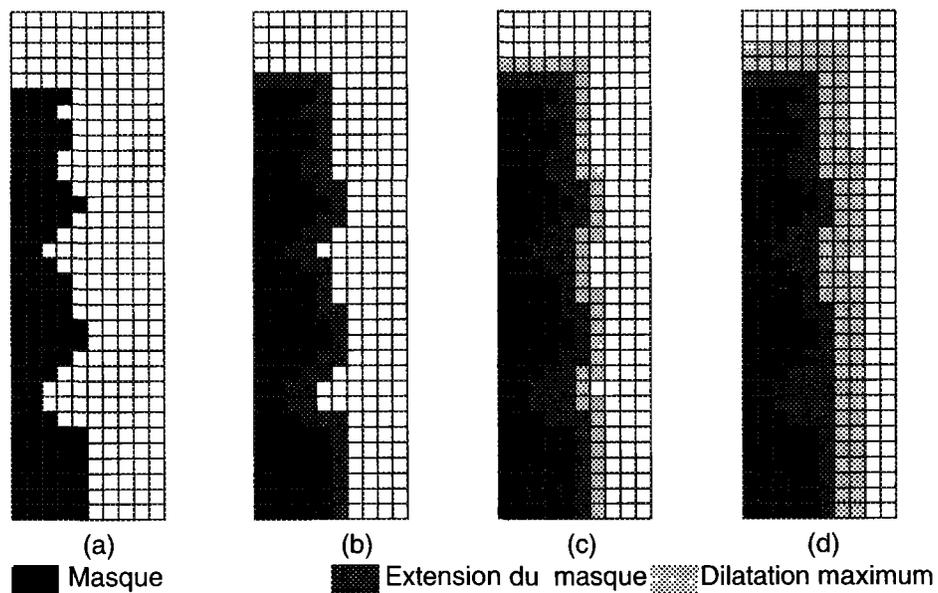


Figure 2. Extension d'un masque sur une frange d'au moins un pixel par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(3 \times 3)$; d) $D(7 \times 7) + E(5 \times 5)$

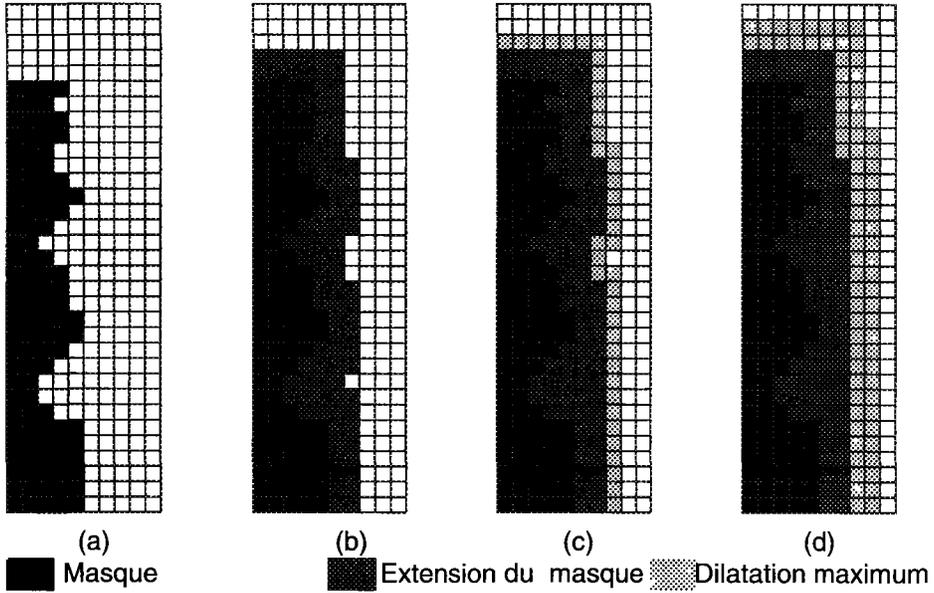


Figure 3. Extension d'un masque sur une frange d'au moins deux pixels par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) D(5x5); c) D(7x7) + E(3x3); d) D(9x9) + E(5x5)

2.4. Substitutions

La multiplication du masque de la classe à filtrer (cf. 2.1) par celui de la classe de fond étendu (cf. 2.3) donne un nouveau masque groupant uniquement les pixels de la classe à filtrer localisés sur la partie contextuellement élargie et connue de la classe de fond. La dernière étape, avant de superposer ce masque à la classification initiale, consiste à le multiplier par le numéro de la classe en faveur de laquelle on souhaite faire la substitution. Généralement, c'est le numéro de la classe de fond mais cela pourrait être différent si on désire, par exemple, remplacer tous les pixels de culture localisés à proximité de l'habitat par des pixels d'herbages.

3. Applications

Deux exemples d'applications de filtre contextuel vont illustrer ce qui précède. Le premier concerne le filtrage d'éléments faiblement représentés au sein d'une classe massive tandis que le deuxième concerne le filtrage d'une classe également faiblement représentée mais à la frontière de deux affectations. Dans un dernier temps, la liste des différentes étapes ayant conduit au filtrage de la carte pilote du Grand-Duché de Luxembourg sera présentée.

3.1. Suppression de la classe «inculte» au sein des feuillus

Les images satellitaires de la forêt grand-ducale montrent un aspect hétérogène pour les feuillus, visible également sur photos aériennes. Cette hétérogénéité résulte de variation des

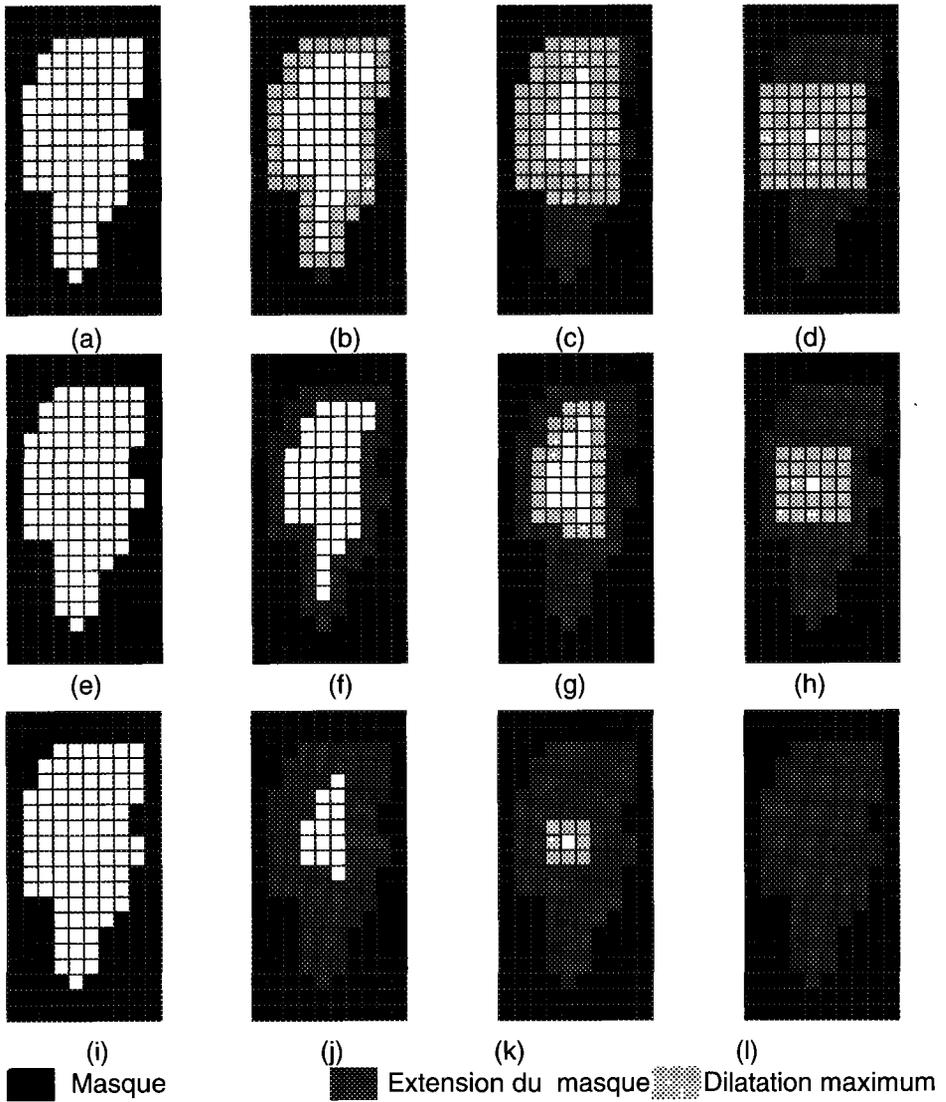


Figure 4. Extension d'un masque vers une inclusion par une dilatation (D) suivie éventuellement d'une érosion (E); a) situation initiale; b) $D(3 \times 3) + E(3 \times 3)$; c) $D(5 \times 5) + E(5 \times 5)$; d) $D(7 \times 7) + E(7 \times 7)$; e) situation initiale; f) $D(3 \times 3)$; g) $D(5 \times 5) + E(3 \times 3)$; h) $D(7 \times 7) + E(5 \times 5)$; i) situation initiale; j) $D(5 \times 5)$; k) $D(7 \times 7) + E(3 \times 3)$; l) $D(9 \times 9) + E(5 \times 5)$

conditions édaphiques, de la présence de clairières, de coupes à blanc plus ou moins récentes ainsi que de chablis. Ces différentes réalités ont été regroupées lors de la classification en une classe nommée «inculte». Un zonage, proche de celui habituellement utilisé par les aménagés, est obtenu en remplaçant les incultes localisés au sein des feuillus par les feuillus eux-mêmes. Pour déterminer ce contexte, le masque des feuillus est étendu par une fermeture (dilatation $(3 \times 3) + \text{érosion } (3 \times 3)$). La figure 5 visualise les pixels situés sur ce masque, à savoir : en

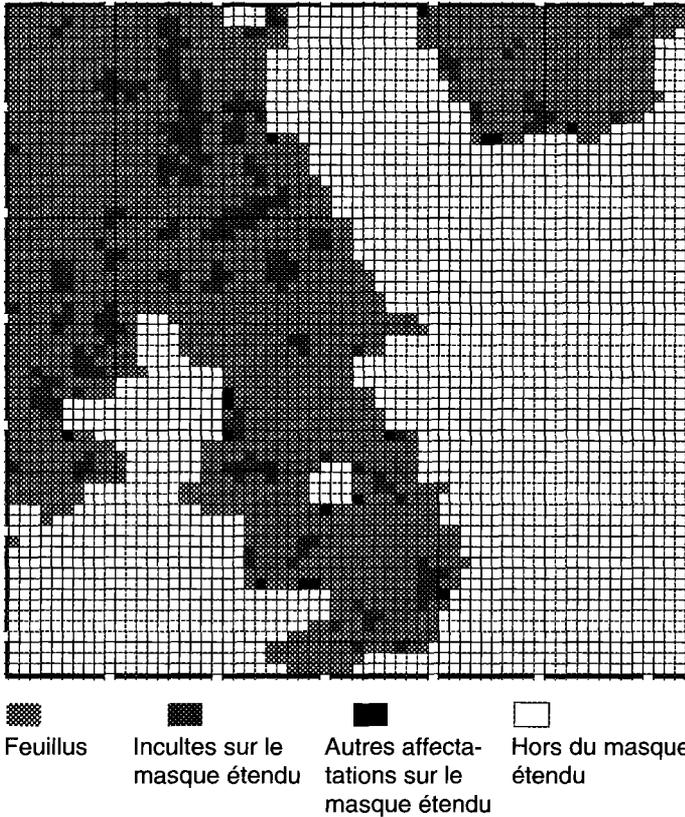


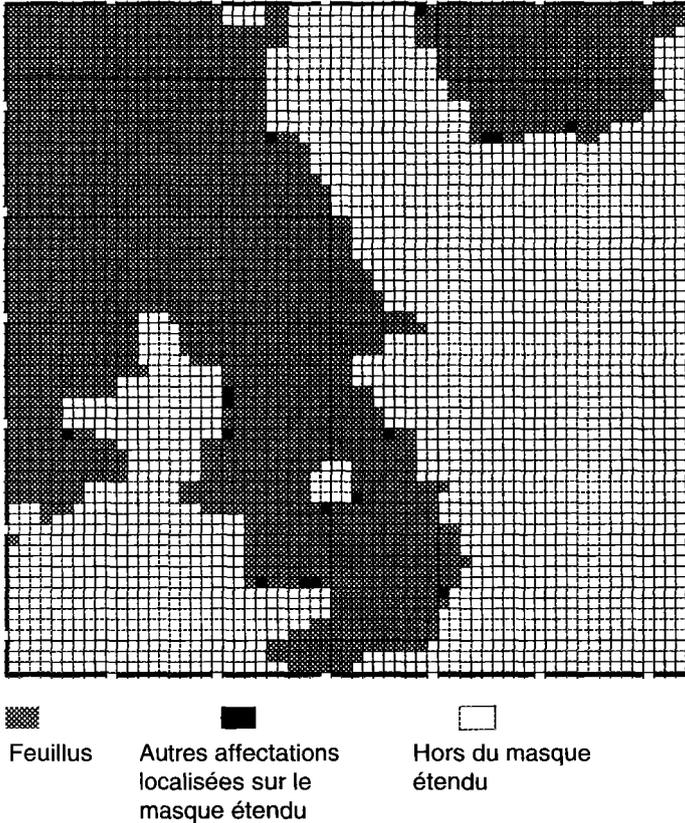
Figure 5. Affectations localisées sur le masque des feuillus étendu par une fermeture (3x3)

gris clair la classe des feuillus eux-mêmes, en gris foncé les incultes et en noir les autres affectations. Ces dernières vont être préservées (fig. 6) lors de la substitution des incultes, situés sur le masque, par des feuillus (en $(x,y)=(6, 41); (21, 37); (21, 38)$, etc.). De plus, la frontière ne subit aucun déplacement si ce n'est dans quelques rentrants (en $(5, 38); (5, 39); (21, 40); (23, 52); (23, 53)$ etc.).

Un filtre modal (3 x 3) déplacerait la frontière des feuillus et créerait des entités massives de pixels appartenant à la classe inculte. Ce serait notamment le cas pour la bande nord-sud d'incultes située entre les points de coordonnées (16, 2) et (17, 17) (fig. 5).

3.2. Suppression des mixels aux limites d'une classe sous-représentée

Les mixels, qui ne sont caractéristiques d'aucune des deux classes qu'ils couvrent au sol, sont souvent regroupés dans une classe nommée «pixels non classés». Si une des deux classes est sous-représentée, ici les cultures par rapport aux herbages, on peut faire le choix de remplacer les pixels non classés situés à proximité de la frontière des cultures par la classe des cultures (fig. 7). Comme dans l'exemple précédent, les autres classes ne sont pas affectées par ces substitutions (fig. 8) (par exemple les pixels $(6, 26); (7, 26); (7, 27)$). Il est à noter que les pixels non classés au sein des cultures sont eux aussi remplacés par des cultures.



3.3. Étapes conduisant au filtrage de la spatio-carte du Grand-Duché de Luxembourg

Le tableau I résume les différentes opérations appliquées à l'image. L'ordre dans lequel, on applique les différents filtrages a de l'importance. Par exemple, le premier filtrage modifie la classe de fond (ici, les feuillus) utilisée par le deuxième filtrage.

La première étape permet de remplacer, au sein des herbages, les pixels erronément classés en feuillus. En effet, sur le terrain, on observe peu de petites parcelles de feuillus parmi les herbages. La spatio-carte étant destinée à des aménageurs ne souhaitant pas discerner de petites zones d'herbages au sein des forêts, ces dernières ont été substituées (tab. I, ligne 2) par la classe feuillus qui était sous représentée par rapport à la vérité-terrain. De même, l'habitat dispersé localisé au sein ou le long des forêts (situation rare au Grand-Duché de Luxembourg) est remplacé par des cultures (tab. I, ligne 3). Ces cultures, ainsi que celles plus massives situées dans les forêts, sont remplacées par des incultes (tab I, ligne 4) car il n'existe presque pas de culture au sein des forêts. La dernière étape permet de substituer les pixels de cultures, dans et à proximité des villages par des pixels d'herbages. En effet, une auréole d'herbage est généralement observée autour des villages.

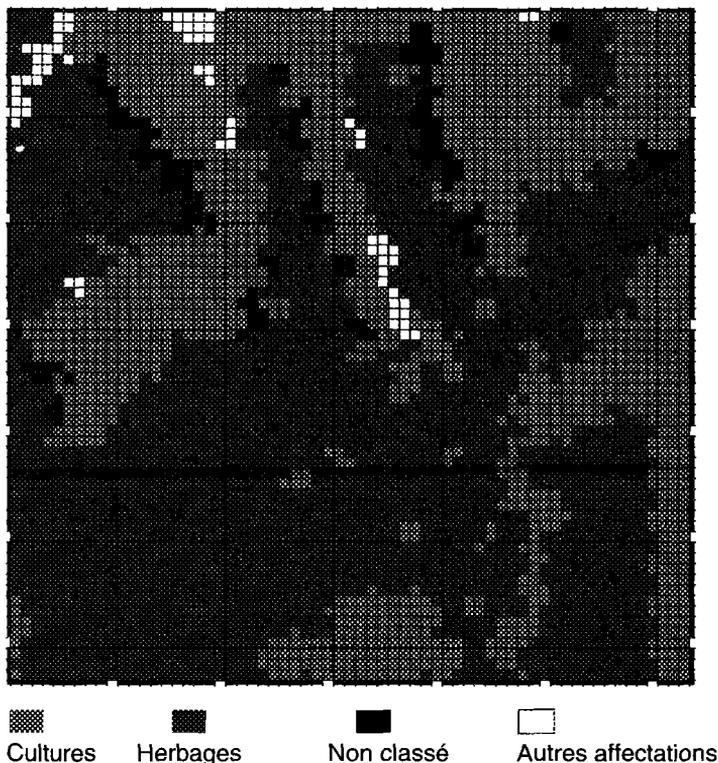


Figure 7. Situation avant filtrage des mixels (pixels non classés)

4. Conclusions

Le filtre contextuel permet de contrôler les substitutions beaucoup mieux que le filtre modal quant à leurs localisations et à leurs natures. Les inclusions sont filtrées de manière draconienne alors que les seuls légers déplacements de la frontière extérieure s'observent dans les rentrants de la classe de fond.

De plus, la morphologie mathématique permet également de déterminer la largeur d'une frange le long de la frontière d'une classe de fond, pour laquelle une substitution est demandée. La nature de la substitution est contrôlée à chaque étape.

Il ne faut pas perdre de vue que l'utilisation du filtre contextuel demande beaucoup plus de temps machine que le filtre modal et qu'il nécessite une bonne connaissance des réalités de terrain régissant les relations entre les différentes classes.

5. Remerciements

L'étude a été effectuée dans le cadre du «Programme de recherche scientifique dans le domaine de la télédétection spatiale» (TELSAT/II/6), pour le compte de l'État belge.

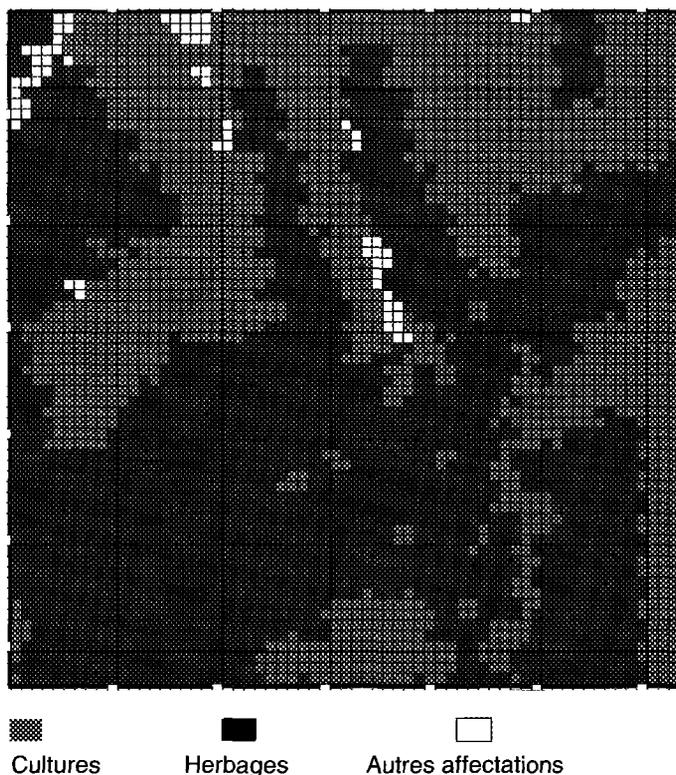


Figure 8. Filtrage des non classés sur le masque des herbages étendu par une dilatation (7x7)

Tableau I. Liste des opérations conduisant au filtrage contextuel de la carte pilote du Grand-Duché de Luxembourg.

N°	Dilatation	Érosion	Classe de fond	Classe à filtrer	Classe de remplacement	Remarques
1	(3x3)	(3x3)	Herbages	Feuillus	Herbages	Filtrage des feuillus dans les herbages ou dans les reentrants des herbages
2	(3x3)	(3x3)	Conifères, feuillus	Herbages	Feuillus	Filtrage des herbages localisés dans les forêts ou dans les reentrants des forêts
3	(5x5)	(3x3)	Conifères, feuillus	Habitat peu dense	Cultures	Remplacement de l'habitat peu dense par des cultures lorsqu'il est localisé dans les forêts ou sur une frange d'au moins un pixel le long des forêts
4	(7x7)	(7x7)	Conifères, feuillus	Cultures	Incultes	Remplacement des cultures même massives par des incultes dans les forêts et dans les reentrants des forêts
5	(9x9)	(7x7)	Habitat dense, habitat peu dense	Cultures	Herbages	Remplacement des cultures par les herbages dans les villages et le long des villages sur une frange d'au moins un pixel

6. Références

- COLLETTE, B. 1990. Segmentation d'image par propagation sur les érodés ultimes (Application à l'imagerie satellitaire). Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie, télédétection et cartographie, n° 179-180, p. 21-33.
- COSTER, M. et CHERMANT J. L., 1989. Précis d'analyse d'images. Presses du CNRS, Paris, 560 p.
- DURANT, M. A. et FLOUZAT, G. 1984. Amélioration des classifications spectrales des périmètres rizicoles de Segou (Mali) par analyse de la texture des images de simulations SPOT. Rapport du Centre d'étude spatiale des rayonnements (CESR), Toulouse, n° 84-1136, 90 p.
- MARION, A. 1987. Introduction aux techniques de traitements d'images. Eyrolles, Paris, 278 p.

24

Cartographie thématique et structurelle des substrats récifaux et lagunaires peu profonds par la télédétection satellitaire à haute résolution

OLIVIER YVES DE VEL* et WILLIAM BOUR**

**Department of Computer Science, James Cook University, Townsville QLD 4811,
Australie; courrier électronique : olivier@curacoa.cs.jcu.edu.au*

***Laboratoire de traitement d'images calédonien (Latical), ORSTOM, B.P. A5, Nouméa,
Nouvelle-Calédonie*

Résumé

La présente étude est fondée sur l'analyse d'une image multibande HRV de SPOT et a pour but d'obtenir une cartographie thématique et structurelle des substrats récifaux et lagunaires peu profonds sur le littoral de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. Cette étude a conduit, d'une part, à mettre au point une méthode de transformation des variables de base (XS1 et XS2) permettant une décorrélation de l'information acquise sous l'eau, d'autre part, à proposer des modèles de la nature et de la structure des fonds de l'environnement récifal. Cette transformation permet une classification des principaux composants de l'écosystème corallien et une caractérisation de la bathymétrie de ces composants. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques. Les fonds meubles et fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Un gradient du rapport entre la densité de coraux vivants et coraux morts a été observé. Ceci a permis d'obtenir une carte thématique de la distribution du corail vivant et des débris coralliens sur la barrière récifale et parmi les pâtés coralliens situés dans la région lagunaire. L'utilisation de néo-canaux dits de texture a mis en évidence la morphologie du substrat corallien. Plusieurs images de texture ont été obtenues selon l'indice pigmentaire

(XS1)ⁿ/(XS2) utilisé dans la valeur numérique d'origine. Ces images fournissent une information sur la structure des fonds meubles et durs du récif et du lagon peu profond, telle que la morphologie des chenaux du platier récifal et du système d'éperons et de sillons.

1. Introduction

L'importance de l'ensemble du milieu corallien ne se limite pas seulement à la place qu'il occupe dans la chaîne alimentaire et au fonctionnement de l'écosystème d'un récif corallien. Il contribue également à une zone d'intérêt économique pour les habitants du littoral à travers l'exploitation de plusieurs ressources exportables telles que les trochas (*Trochus Niloticus*), pour la boutonnerie de luxe et la joaillerie, et les produits parapharmaceutiques issus directement du massif corallien comme, par exemple, la crème solaire. Cette ressource renouvelable présentant un intérêt économique certain dans les îles dotées d'une formation corallienne, il est nécessaire d'en évaluer régulièrement le potentiel exploitable.

Le littoral de la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie est séparé du domaine océanique par une succession de récifs barrières isolant un vaste lagon dépassant 1500 km en longueur et dont la largeur peut atteindre 40 km. Comme la plupart des îles océaniques, la Nouvelle-Calédonie exploite et cherche à mieux connaître les ressources benthiques présentes dans ce vaste ensemble corallien.

Les formations récifales du lagon ont créé une grande variété de biotopes, généralement colonisés par un ensemble d'espèces (animales ou végétales) qui leur est inféodé. Il est donc indispensable, pour l'évaluation d'une ressource biologique donnée, de connaître la surface occupée par le milieu corallien et d'obtenir une cartographie bionomique de ce milieu. C'est grâce à la photographie aérienne, l'une des premières formes de la télédétection, et à d'autres méthodes classiques telles que des observations effectuées en plongée sous-marine, selon un plan d'échantillonnage adapté au milieu étudié, que la cartographie du massif corallien a pu être réalisée avec précision sur certains sites (BOUR *et al.*, 1986). Bien que la photographie aérienne soit efficace pour des zones de quelques hectares, il en est autrement pour des zones couvrant plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Ou bien le plan d'échantillonnage sur le terrain devient gigantesque et l'on se heurte à toutes sortes de difficultés techniques et financières ou alors l'interpolation et l'extrapolation des résultats entachent les estimations des surfaces (et donc des biomasses) d'erreurs non négligeables. Un problème de cette ordre se présente pour l'évaluation du milieu corallien en Nouvelle-Calédonie et dans d'autres régions du Pacifique-Sud, telles que la Grande barrière récifale de l'Australie. Les moyens modernes de télédétection (satellites Landsat et SPOT) apportent dans ce domaine des progrès décisifs. Les données du satellite SPOT, en raison de sa haute résolution au sol et des possibilités d'acquisitions répétitives d'une même scène par visées latérales (bien que limitées en régions tropicales ceci dû à la présence de nuages), se prêtent bien à l'observation des milieux littoraux caractérisés par une forte variabilité spatiale et temporelle.

L'objectif de cette étude est de dresser une cartographie thématique et structurale détaillée des substrats récifaux et lagunaires peu profonds utilisant des images numériques HRV de SPOT à haute résolution. La région d'analyse et d'observation consiste en la partie méridionale du récif Tétémbia en Nouvelle-Calédonie.

2. Matériel et méthodologie

2.1. Bases méthodologiques de l'étude

Les travaux de recherche en matière de télédétection et de milieux coralliens peu profonds et en eau claire sont relativement nombreux et touchent principalement aux aspects bathymétriques (LYZENGA, 1978 et 1981; JUPP, 1988) et à ceux de la cartographie des types de fonds (BENMOUSSA *et al.*, 1989; BOUR *et al.*, 1986). Certaines méthodologies de travail ont permis de développer des algorithmes de traitement très simples, basés sur l'utilisation du ratio de deux bandes spectrales, afin de produire des cartes thématiques : 1) bathymétriques et 2) de la nature des fonds (indice de boue, granulométrie, etc.) (JUPP, 1985; LEMAIRE *et al.*, 1987). C'est à partir de ces travaux et sur la base de ceux que nous avons menés en parallèle sur des sujets équivalents (BOUR *et al.*, 1986) qu'a pu être développée notre étude.

2.2. Région d'intérêt et matériel

La région d'intérêt se trouve dans l'ensemble du récif et du lagon Tétémbia qui fait partie d'une succession de récifs barrières comprenant le littoral de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. Le lagon de la Nouvelle-Calédonie s'étend sur une région de 1500 km de longueur et 40 km de largeur. La zone d'investigation de la présente étude se situe dans la partie nord du passage de Uitoé du récif de Tétémbia, à 22°10'S et 166°05'E (fig. 1). Cette zone consiste en un récif externe renfermant un vieux récif réticulé avec un lagon submergé. La largeur du lagon est d'environ 1 km et sa profondeur de 2 à environ 10 mètres (marée basse). Plusieurs champs de constructions coralliennes (pâtés coralliens non affleurants) se trouvent dans le lagon.

Les données utilisées sont, d'une part, des enquêtes de vérification de terrain effectuées avec des mesures ponctuelles (observations et photographies) et des transects sous-marins (avec caméra de vidéo); d'autre part, une image HRV en mode XS acquise en août 1986. Des trois canaux de départ, XS1, XS2 et XS3, seuls les deux premiers sont utilisables, le troisième ne pénétrant pas dans l'eau (absorption de l'infrarouge proche). Les canaux XS1 et XS2, dont les longueurs d'ondes verte (XS1) et rouge (XS2) pénètrent plus ou moins profondément dans l'eau, sont utilisés ensemble pour différencier les faciès sous-marins entre 0 et 5 m de profondeur, selon le niveau de turbidité de l'eau. Au delà de 5 m, seul XS1 permet de discriminer les types de fonds.

En raison de la corrélation relativement importante des deux canaux XS1 et XS2 (coefficient de corrélation $r_{XS1, XS2} = 0,51$ pour un total de 31 200 pixels), une analyse en composantes principales voit le premier axe principal emporter un large pourcentage (86,1%) de la variance totale, ce qui n'est pas favorable à une classification thématique (fig. 24-2, voir cahier couleur). La structure en «boomerang» de l'histogramme bidimensionnel construit à partir des canaux XS1 et XS2 montre qu'une représentation en coordonnées polaires ρ - θ dans le plan de l'histogramme bidimensionnel permet de mieux répartir l'information que la représentation en coordonnées cartésiennes et d'améliorer la discrimination des thèmes récifaux. Cette représentation permet une classification des principaux composants de l'écosystème corallien et une caractérisation de la bathymétrie de ces composants.

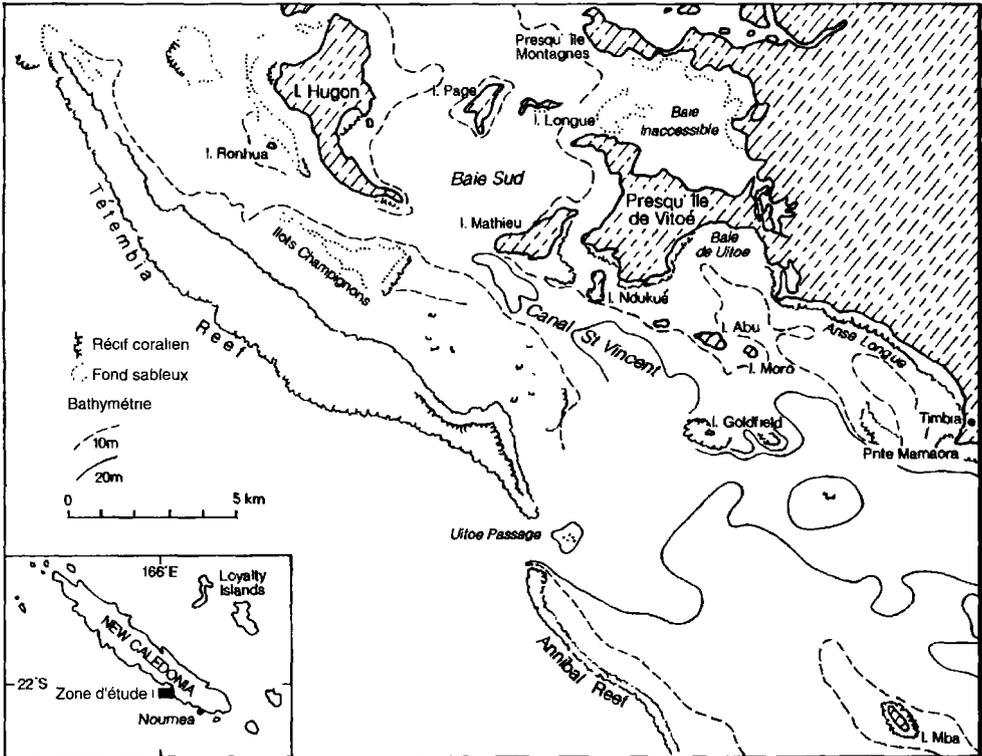


Figure 1. Carte de situation

On a créé deux néo-canaux ρ^* et θ^* , en combinant les deux images d'origine :

$$\rho^* = \text{hypot}(XS1, XS2)$$

$$\theta^* = \text{atan}^{-1}(XS2/XS1)$$

où la fonction «hypot» est donnée par :

$$\text{hypot} = ((XS1)^2 + (XS2)^2)^{1/2}$$

Le coefficient de corrélation r_{ρ^*, θ^*} pour la même région d'intérêt n'est plus que -0,33, avec la première composante principale emportant maintenant 79,4% de la variance totale. La transformation optimale obtenue par essais répétitifs, afin de produire la meilleure discrimination des composants récifaux, est (fig. 24-3, voir cahier couleur) :

$$\rho = (XS1^2 + XS2^2)^{1/2}$$

$$\theta = \text{atan}^{-1}((XS2-10)/(XS1-22))^{0,75}$$

Afin de pouvoir : 1) séparer les substrats récifaux et lagunaires qui sont caractérisés par des signatures spectrales similaires et 2) mettre en évidence les hétérogénéités locales et fournir une information sur la morphologie des fonds du lagon et du substrat corallien, un néo-canal

dit de texture a été créé. Celui-ci est obtenu par le remplacement en chaque point de l'image de la valeur numérique d'origine par le résultat du calcul d'un écart-type local dans une fenêtre 3 X 3 autour du pixel considéré (JUPP, 1985). C'est-à-dire, pour un pixel p_{ij} :

$$\tau_{ij} = \frac{1}{8} \left(\sum_{n,m} |p_{ij} - p_{nm}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

où $\max\{|i - n|, |j - m|\} = 1 \quad \forall n, m = 1, 2, \dots, 8$

Deux néo-canaux de texture ont été utilisés pour deux types d'indice pigmentaire (BENMOUSSA *et al.*, 1989) :

$\tau_{(1)}^2 = \text{variance de } (XS1/XS2)$

$\tau_{(2)}^2 = \text{variance de } (XS1^2/XS2)$

Les trois canaux, ρ , θ et $\tau_{(2)}$, traités par analyse en composantes principales (fig. 24-4, voir cahier couleur) permettent de mettre en évidence les faciès peu profonds. Comparé à l'indice pigmentaire $\tau_{(1)}$, $\tau_{(2)}$ accentue les hétérogénéités du récif, tout particulièrement autour des pâtés coralliens du lagon et des rainures du récif lagunaire.

Une carte thématique est obtenue à partir d'une classification «inverse» suivie d'une classification par maximum de vraisemblance (maximum likelihood estimate MLE). La classification dite «inverse» utilise les données obtenues à partir des vérifications de terrain dans l'espace de l'image et reprojette ces valeurs dans l'histogramme bidimensionnel ρ - θ . Tous les pixels ayant une luminance similaire dans les deux canaux XS1-XS2 seront aussi projetés dans le même ensemble dans l'espace ρ - θ . Les autres pixels n'ayant pas été classifiés par cette technique sont classifiés durant la phase MLE suivante.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyse structurale du récif

La combinaison colorée entre les trois canaux ρ , θ et $\tau_{(2)}$ (ou $\tau_{(1)}$) permet de mettre en évidence :

- la morphologie de la pente et des éperons et sillons du platier du récif lagunaire, et
- les chenaux de houle et sillons du platier récifal externe.

Certains détails, concernant les zones de bathymétrie intermédiaire, ont aussi été identifiés, tels que :

- les hétérogénéités de fond du lagon dues à l'hydrodynamisme,
- le périmètre des pâtés coralliens.

3.2. Analyse des thèmes

Une carte thématique, issue du traitement des histogrammes bidimensionnels, a été réalisée. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques (fig. 24-5, voir cahier couleur, et tab. I). Les fonds meubles et les fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Les figures 24-6 et 24-7 (voir cahier couleur) présentent les résultats plus détaillés.

Tableau I. Modèle de classification thématique pour Tétémbia

Numéro du thème	Description générale du thème
9 et 10	Débris coralliens lagunaires
5 et 6	<i>Favidae</i> et <i>Porites</i> sur platier récifal
1 et 13	<i>Acropora</i> s dans chenaux de houle
11 et 12	<i>Acropora</i> s et <i>Tubinaria</i> profonds
3 et 4	Interface corail-fond meuble
7 et 14	Platier récifal et débris coralliens
15 et 16	Lagon peu profond (5-10 m)
17 et 18	Lagon profond (>10 m)
19	Bordure externe du récif barrière
2	Sable peu profond
8	Sable profond

3.2.1. Thèmes généraux

Les thèmes généraux suivants ont été identifiés :

- La morphologie des fonds durs peu immergés est similaire à celle du platier externe et à celle du récif lagunaire réticulé (thèmes 1, 5, 6 et 13). Ces fonds sont caractérisés par de grandes dalles couvertes de débris et parsemées de taches de coraux *Favidae* et *Porites*. Des vérifications sur le terrain et l'utilisation de cartes aériennes suscitent l'observation que certaines de ces dalles consistent en chenaux de houle alignés avec le rayon de courbure du récif externe et sont remplies de coraux branchus (*Acroporas*).

- Des coraux vivants ont été identifiés sur les dalles du platier externe (thèmes 1, 5, 6 et 13), ainsi que sur la pente interne du récif externe, sur le fond de certaines sections du récif réticulé, et autour du périmètre des pâtés coralliens (thèmes 11 et 12). Ces coraux vivants sont principalement du type *Favidae* et *Porites* pour les faibles profondeurs (moins de 3-4 m) et des *Acroporas* pour fonds de bathymétrie plus élevés. Un gradient du rapport entre la densité de coraux vivants et coraux morts le long de l'axe θ a été observé (thèmes 8 à 13 et 1, correspondant à un gradient positif).

- Les débris de coraux morts (thèmes 9 et 10) ont été correctement identifiés autour de la base de la pente interne du récif externe, autour du périmètre des pâtés coralliens et sur le côté nord du récif réticulé. Le passage des cyclones est responsable de la densité élevée des débris coralliens.

- Les fonds meubles sont séparés en deux thèmes (2 et 8). Ils sont constitués de sable très blanc, sans herbier, légèrement criblés de taches d'*Acropora*. Le thème 2 correspond à une faible bathymétrie (0 à 10 m), tandis que le thème 8 s'identifie avec des fonds meubles plus profonds (plus de 10 m).

3.2.2. Thèmes fonds durs

Les thèmes fonds durs ont été séparés en trois catégories confrontées à la vérité-terrain :

- Le platier externe et le récif lagunaire réticulé sont couverts de coraux *Favidae* et *Porites* (thèmes 5 et 6) et des débris coralliens. Ces coraux vivants sont aussi présents sur les plates-formes submergées des pâtés coralliens.

- Les coraux vivants sont également représentés par les thèmes 11 et 12 en bordure de la partie méridionale du récif lagunaire et le long de la pente interne du récif externe. Les coraux *Acropora* se trouvent en faibles profondeurs (< 2 m) et les *Tubinaria* au-delà de 2 mètres. Les eaux peu profondes des chenaux de houle du platier récifal sont parsemées de coraux branchus (thèmes 1 et 13).

- Une interface entre le corail et les fonds meubles a été identifiée (thèmes 3 et 4).

4. Conclusions et perspectives

Le traitement, effectué à partir de données HRV, a permis d'obtenir des cartes structurales et thématiques des substrats récifaux et lagunaires peu profonds.

Le traitement a permis une bonne discrimination des différents milieux. Onze thèmes sont discriminés dont huit bionomiques. Les fonds meubles et fonds durs ainsi que les coraux vivants et morts sont identifiés. Un gradient du rapport entre la densité des coraux vivants et coraux morts a été observé. Ceci a permis d'obtenir une carte thématique de la distribution du corail vivant et des débris coralliens sur la barrière récifale et parmi les pâtés coralliens situés dans la région lagunaire. L'utilisation de néo-canaux dits de texture a mis en évidence la morphologie du substrat corallien. Plusieurs images de texture ont été obtenues selon l'indice pigmentaire XS1⁰/XS2 (pour n=1, 2). Ces images fournissent une information sur la structure des fonds meubles et durs du récif et du lagon peu profond, telle que la morphologie des chenaux du platier récifal et du système d'éperons et de sillons. La cartographie structurale et thématique, combinée avec l'acquisition répétitive des données satellitaires, permettent d'évaluer la distribution spatiale et temporelle des principaux composants de l'écosystème corallien.

Les futures perspectives se concentreront sur l'applicabilité des techniques développées au-delà du récif Tétémbia, tout particulièrement sur l'ensemble du récif de la Nouvelle-Calédonie, ainsi que dans les autres îles du Pacifique-Sud.

Aussi, grâce à la répétitivité des images HRV, il sera possible d'effectuer des études temporelles de l'évolution du domaine corallien comme, par exemple, l'estimation des dommages liés aux catastrophes naturelles (cyclones, pollution, etc.).

5. Références

- BEN MOUSSA, H., VIOLLIER, M. et BELSHER, T. 1989. Télédétection des algues macrophytes de l'archipel de Molène (France) : Radiométrie de terrain et application aux données du satellite SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, p. 53-69.
- BOUR, W., LOUBERSAC, L. and RUAL, P. 1986. Thematic mapping of reefs by processing of simulated SPOT satellite data : Application to the Trochus Niloticus biotope on Tétémbia Reef (New Caledonia). *Marine Ecology - Progress Series*, vol. 34, p. 243-249.
- JUPP, D. L. 1985. The Brian Handbook, CSIRO Division of Water resources. *Natural Resources Series*, n° 3, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia.
- JUPP, D. L. 1988. Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. *Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone*, Gold Coast, Australia.

- LEMAIRE, O., LOUBERSAC, L., D'OZOUVILLE, L. et RICHMOND, B. 1987. Évaluation de l'apport de SPOT dans le cadre du programme de prospection des ressources minérales de l'atoll d'Aitutaki (îles Cook); Étude préliminaire de l'impact du passage du cyclone Sally. SPOT 1 : Utilisation des images, bilan, résultats, Paris, Cepadues-Éditions, Toulouse.
- LYZENGA, D. R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, vol. 17, p. 3.
- LYZENGA, D. R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, p. 71-82.

25

Un modèle bayésien de segmentation d'images

VINCENT GRANVILLE, JEAN-PAUL RASSON
et FRANÇOISE ORBAN-FERAUGE

*Laboratoire GEOSATEL, Facultés universitaires Notre-Dame-de-la-Paix,
rue de Bruxelles, 61, 5000 Namur, Belgique; téléphone : (32) 81 72 41 11;
télécopieur : (32) 81 23 03 91*

Résumé

Un modèle probabiliste pour la segmentation d'images est développé dans le cadre du traitement statistique des images numériques. Il constitue une suite logique et intégrée parfaitement les méthodes et théories développées par RASSON (BAUFAYS and RASSON, 1985; RASSON *et al.*, 1991) en classification et analyse discriminante, et dont les outils mathématiques de base sont les processus poissoniens et les enveloppes convexes. Une propriété intéressante du modèle est le fait que conditionnellement à la segmentation, l'image est représentée par un champ markovien (GEMAN, 1988) dont le voisinage d'un pixel est constitué par tous les pixels appartenant au même segment. L'inférence statistique, qui consiste à chercher la meilleure segmentation pour une image fixée (en maximisant la vraisemblance de la segmentation conditionnellement à l'image), repose sur un algorithme de type «recuit simulé» qui fournit un maximum global de la vraisemblance conditionnelle. En pratique, on pourra toutefois se contenter d'un algorithme plus rapide qui fournit un maximum local. L'algorithme de type «recuit simulé» peut également être utilisé pour filtrer une image binaire, effectuer de la classification automatique ou regrouper et scinder des segments. La démonstration de sa convergence est une étude détaillée des chaînes de Markov non stationnaires. La théorie sous-jacente est présentée par exemple par COLLINS *et al.* (1989).

1. Introduction

Dans le cadre du traitement statistique d'images numériques, un modèle bayésien de segmentation est proposé. Dans chaque cas particulier (distribution gaussienne, distribution résultant de l'application d'un processus de Poisson, etc), il doit permettre d'écrire la vraisemblance conditionnelle de toute segmentation et, en la maximisant, de chercher à établir une segmentation optimale. L'algorithme présenté est de type «recuit simulé» et est implémentable sur transcomputers.

2. Modèle

Dans sa version simplifiée, la vraisemblance d'une segmentation y conditionnellement à l'image observée x s'écrit

$$P(y|x) \propto P(y) \cdot \prod_{i=1}^{k(y)} P(x_j, j \in S_i|y)$$

où

S_i représente le segment i ,

$k(y)$ représente le nombre de segments,

x_j représente la signature spectrale du pixel j .

2.1. Théorème

Conditionnellement à la segmentation y , l'image x est modélisée par un champ markovien où le voisinage d'un pixel est constitué des pixels de ce segment. Un tel champ est appelé champ markovien segmenté; il vérifie nécessairement la propriété de factorisation précédente.

Ce modèle a déjà été utilisé par LEE et CRAWFORD (1989). Bien que $P(y)$ puisse être modélisé par une distribution de Gibbs, le cas le plus simple à traiter est celui où $P(y) \propto \alpha^{k(y)}$, $\alpha > 1$. Le paramètre α joue alors un rôle crucial en ce qui concerne le nombre de segments de la segmentation optimale.

Au sein d'un même segment, il est souvent admis que les signatures spectrales sont indépendamment et identiquement distribuées, ce qui signifie que la densité jointe sur un segment i quelconque se factorise en un produit de densités issues d'une même loi :

$$P(x_j, j \in S_i|y) = \prod_{j \in S_i} P(x_j|y)$$

Si on adopte un modèle basé sur l'application du processus stationnaire de Poisson en classification supervisée, la vraisemblance conditionnelle s'écrit finalement :

$$P(y|x) \propto \alpha^{-k(y)} \cdot \prod_{i=1}^{k(y)} \{\lambda(D_i)\}^{-|S_i|}$$

où $l(D_i)$ est la mesure de Lebesgue du domaine de distribution des points du segment S_i dans l'espace des signatures spectrales.

Ce domaine peut être l'enveloppe convexe discrète des points du segment i qui sera en pratique approchée par un hyperrectangle pour des raisons d'économie de temps de calcul.

2.2. Remarque

Certaines contraintes peuvent être imposées, ainsi par exemple $\lambda(D_i) \leq c$, où c est un réel positif quelconque qui représente le volume maximum toléré pour l'enveloppe convexe (dans l'espace des signatures spectrales) des points d'un segment. Dans le cas où x représentera la vérité-terrain, on choisira $c=1$, ce qui se traduit par le fait que chaque segment ne pourra contenir des pixels correspondant à une vérité-terrain différente.

3. Algorithme théorique

Connaissant l'image observée x , on recherche la segmentation y qui maximise la vraisemblance conditionnelle $P(y|x)$. Une solution est fournie par l'algorithme proposé. Ce dernier se distingue des autres algorithmes de «recuit simulé» par le fait que la segmentation courante est modifiée seulement si sa vraisemblance est petite et non pas si la vraisemblance de la segmentation modifiée est grande.

3.1. Algorithme

1) Commencer avec une segmentation initiale y_0 et $t=0$ (par exemple y_0 est la segmentation où chaque pixel constitue un segment à lui seul);

2) À chaque instant $t=1, 2, \dots$, construire la segmentation y_t comme suit :

a) Choisir au hasard un pixel i dans l'image;

b) soit $y_t=y_{t-1}$ avec probabilité $1-\xi_t$;

soit $y_t=y_{t-1}$ avec probabilité ξ_t , excepté que :

si i était à l'intérieur d'un segment, il définit maintenant un nouveau segment à lui tout seul,

si i était situé à la frontière de deux segments (i appartient donc à un de ces deux segments)

alors i est affecté à l'autre des deux segments,

si i était situé à la frontière de plusieurs segments, il est affecté de manière déterministe à un des segments voisins (par exemple, i est affecté au segment voisin dont le numéro est le plus petit).

En choisissant

$$\xi_t = \left\{ q \cdot \frac{P(y_0|x)}{P(y_{t-1}|x)} \right\}^{\phi(t)}$$

où

$\phi(t) = [\log_{\mu} t]$ avec μ entier suffisamment grand pour que l'algorithme converge vers un maximum global de la vraisemblance conditionnelle;

$q = \inf_y P(y|x) / \sup_y P(y|x)$;

on est assuré que la segmentation $y_* = \lim_{t \rightarrow \infty} y_t$ est une segmentation qui maximise globalement $P(y|x)$.

3.2. Remarques

L'expression $1/\phi(t)$ est traditionnellement appelée température du système au temps t . D'autre part, le calcul de $P(y_t|x)$ est simple et rapide si $P(y_{t-1}|x)$ a déjà été calculé. Enfin, quelque soit la segmentation initiale y_0 , l'algorithme converge vers un optimum global.

4. Algorithme pratique

En pratique, on se contente d'un algorithme beaucoup plus rapide, qui fournira un maximum local de $P(y|x)$. Un tel algorithme consiste à partir d'une segmentation initiale où chaque pixel constitue un segment. Chaque segment est ensuite élargi de proche en proche tant que la vraisemblance conditionnelle s'accroît, c'est-à-dire tant que $P(y_t|x) > P(y_{t-1}|x)$. Lorsque celle-ci ne s'accroît plus, on construit le segment suivant. Donc, au lieu de choisir au hasard dans l'image le pixel i de l'étape 2.1., on le choisit parmi la liste des pixels contigus au segment en cours de construction. Une fois l'image balayée entièrement, on opère un regroupement des segments, pour éliminer les segments dont la taille (c'est-à-dire le nombre de pixels) est inférieure à un seuil fixé. Ce regroupement s'opère également de telle sorte à maximiser la vraisemblance conditionnelle.

L'algorithme a été testé dans le cadre de la classification supervisée d'images SPOT multibandes, et sous l'hypothèse d'une distribution résultant d'un processus de Poisson stationnaire dans l'espace spectral. Les enveloppes convexes ont été approximées par des hyperrectangles et un pré-traitement a été utilisé pour réduire le nombre de segments : les niveaux de gris ont été tronqués et l'image réduite d'un facteur deux. La segmentation a été opérée sur l'image réduite et tronquée, uniquement sur les canaux 1 et 2 qui apparaissent à plus d'un titre comme les plus discriminants. Notre segmentation a la particularité de fournir un grand nombre de segments (de l'ordre de 10 000 pour une image 512 x 512) dont beaucoup sont constitués de un ou deux pixels. À ce stade, ou bien on les considère comme «outliers» (ils sont constitués surtout de mixels) et on les laisse tels quels, ou bien on les regroupe avec des segments voisins. La seconde alternative est loin d'être toujours la meilleure.

En partant d'une notion de voisinage entre pixels suffisamment abstraite, il est possible d'obtenir des segments qui sont constitués de parcelles disjointes voire «trouées». Bien que de tels segments n'ont guère de sens pour le géographe, cette façon de procéder permet d'obtenir une segmentation contenant sensiblement moins de segments et offre une meilleure robustesse que la méthode consistant à regrouper de petits segments contigus pour en former de plus gros. On peut encore espérer gagner en robustesse en remplaçant les hyperrectangles par les enveloppes convexes qu'ils sont censés approximer. Mais l'avantage principal de l'algorithme pratique réside surtout en sa rapidité : seulement quelques secondes sont nécessaires pour découper en segments une image 512 x 512 sur un VAX 6220, en travaillant simultanément sur deux canaux. Enfin, c'est probablement aussi la première fois que le modèle de processus poissonien, déjà utilisé avec succès par la même équipe dans le cadre de la classification supervisée, apparaît dans le cadre du problème de segmentation.

Une classification supervisée point par point en sept classes a été effectuée sur une image SPOT 512 x 512 (trois canaux), par la méthode des enveloppes convexes. Les résultats figurent sur le tableau I. Celui-ci représente la matrice de confusion entre l'image classée et la vérité-terrain (connue pour 163 918 pixels). Ensuite, tous les pixels d'un même segment ont été classés suivant la règle de la majorité. L'amélioration apportée par notre segmentation est reflétée sur le tableau II. La classe 0 contient les pixels non classés.

Tableau I. Matrice de confusion entre la classification point par point et la vérité-terrain

	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0	47	13	0	6	2	27	0
2	62	280	50 305	424	981	3 640	3 946	42
3	87	1	201	5 177	125	2 708	222	1
4	282	27	379	180	41 732	2 264	3 237	1 310
5	215	25	814	4152	1 639	33 607	2 087	34
6	4	5	306	31	430	486	1 624	24
7	5	0	0	0	299	5	13	405

Tableau II. Matrice de confusion entre la classification par segments et la vérité-terrain

	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0	37	4	0	10	2	42	0
2	0	94	52 594	312	1 084	3 249	2 346	1
3	4	0	381	4 817	202	2 971	147	0
4	24	24	614	321	43 921	2 489	1923	95
5	0	2	966	2 360	1 892	36 032	1 316	5
6	0	0	293	43	368	575	1 629	2
7	0	0	0	0	421	11	0	295

5. Conclusion

Les meilleures segmentations - celles qui fournissent les meilleures classifications - sont celles qui maximisent la vraisemblance conditionnelle. Dès lors, le quotient de vraisemblance $P(y|x)/P(y'x)$ apparaît comme un critère naturel pour mesurer l'efficacité de deux segmentations y, y' produites par deux algorithmes différents, x désignant la vérité-terrain (lorsque celle-ci est inconnue, x représente l'image source). Notre algorithme pratique de segmentation a été testé avec succès dans le cadre de la classification supervisée d'images SPOT multibandes : notre procédure de détection de segments, bien que simple, fournit des résultats satisfaisants (gain en nombre de points bien classés) en très peu de temps.

6. Références

- BAUFAYS, P. and RASSON, J.-P. 1985. A new geometric discriminant rule. *Computer Statistics Quarterly*, vol. 2, p. 15-30.
- COLLINS *et al.* 1989. *Simulated annealing and optimization : modern algorithms with VLSI, optimal design and missile defense applications.* American Science Press Inc., New York

- GEMAN, D. 1988. Random fields and inverse problems in imaging. *Lecture notes in Mathematics*, vol. 1427, p. 117-196.
- LEE, S. and CRAWFORD M. M. 1989. Statistically based unsupervised hierarchical image segmentation algorithm with a blurring corrector. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Vancouver, vol. 2, p. 630-633.
- RASSON, J.-P. *et al.* 1991. About estimates of measures of the convex hulls of sets of points related to the problem of supervised classification. *Proceedings of the 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Rio de Janeiro.

26

Méthode d'établissement d'une nomenclature par la texture des zones d'une image

ABDELHAMID KHODJA

Laboratoire de télé-analyse et société (LATES), Centre d'analyse et de mathématique sociales (CAMS), École des hautes études en sciences sociales (E.H.E.S.S.), 54, boulevard Raspail, 75006 Paris, France; téléphone : 33-1-49-54-20-36 ou 49-54-21-69; télécopie : 33-1-49-54-21-09

Résumé

Le but de ce travail consiste à établir une nomenclature d'une zone représentant la forêt de Bouconne (France). Nous avons, pour cela, utilisé une image multibande HRV de SPOT et avons procédé comme suit : 1) extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène en utilisant l'histogramme du canal 2; 2) recherche de la discrimination interne de l'entité forêt dans le canal 3, 3) méthode de classification : nous avons réalisé la segmentation de la zone par la «méthode itérative de la variance minimale». Cette dernière consiste à définir un voisinage V pour chaque pixel et un système de voisinages $S_v(V)$ de V . On calcule les moyennes et variances des éléments de $S_v(V)$. La segmentation se fait selon les critères suivants : 1) on affecte au pixel courant a) la radiométrie du pixel appartenant à $S_v(V)$ et dont la variance est minimale ou b) la radiométrie moyenne du voisinage appartenant à $S_v(V)$ et dont la variance est minimale. 2) On regroupe les pixels ayant la même valeur radiométrique. 3) On recommence 1) a) ou b) et 2) selon les exigences thématiques. Nous avons rehaussé l'image segmentée par un opérateur Laplacien pour bien faire apparaître les contours. Les résultats de ce travail sont intéressants et permettent une approche cartographique.

1. Introduction

Notre objectif est d'établir une nomenclature de la forêt de Bouconne (France) par une méthode de segmentation d'images. Il s'agit, en fait, d'utiliser des méthodes statistiques spatiales pour discriminer au mieux les éléments composant une image de télédétection. Notre travail consiste donc à faire un découpage de l'image en sous-images homogènes quant à la radiométrie. C'est-à-dire à partitionner l'image représentant la forêt domaniale de Bouconne en un certain nombre de domaines (homogènes); et où chacun est composé d'une espèce différente. Ceci permet de mieux surveiller et contrôler les peuplements forestiers. Nous allons donc appliquer un algorithme basé sur les paramètres locaux (moyennes et variances) pour une stratification d'une image de télédétection. Cet algorithme permet de regrouper ces objets ou régions dans des classes de caractéristiques ou propriétés identiques (KUNT, 1981). Ce travail s'inscrit dans la recherche de l'approche structurale et texturale des images qui s'appuie d'une part sur l'expérience des photo-interprètes et la formalisation de la vision par ordinateur et d'autre part sur la quantification spatiale.

La forêt domaniale de Bouconne (LATROUS, 1986) et les bois de l'Isle-Jourdain, de Levignac et de Montaigut s'étendent sur 2300 hectares à l'ouest de Toulouse dans le département de la Haute-Garonne et dans celui du Gers. Elle est formée d'une mosaïque de peuplements de physionomie très diversifiée allant de la lande humide à la futaie de feuillus et de résineux. Cette diversité des peuplements est la conséquence tant de l'utilisation abusive de la forêt au cours des siècles passés que des conditions édaphiques. Entre 1880 et 1940, pins maritimes et pins sylvestres sont introduits dans la partie nord, la partie sud est traitée en futaie et le reste en taillis sous futaie, tandis que l'enrésinement se poursuit. Afin de discriminer au mieux ces variations, l'image HRV de SPOT de septembre 1988 est soumise à des procédés de traitements numériques d'images.

2. Segmentation par la méthode de la variance minimale

La segmentation est un processus qui consiste à regrouper des régions possédant une même propriété P . Elle est donc définie par le type de propriété P et par la définition d'un voisinage. C'est-à-dire deux régions $r(i)$ et $r(j)$ sont regroupées pour former un domaine deux fois plus grand, si elles possèdent une même propriété P et si nous pouvons les joindre par une chaîne continue de régions ayant cette propriété P (PONG *et al.*, 1984). Nous supposons qu'un objet est homogène si les pixels qui le constituent sont similaires.

2.1. Propriété de région

On rencontre souvent le groupe de mots «propriété d'une région». Une propriété de région est une fonction qui applique cette région de l'image sur des nombres.

- Longueur, surface, convexité, etc. sont des propriétés géométriques.
- Niveau de gris en un pixel ou niveau de gris moyen d'une région sont des propriétés physiques.
- Valeur moyenne, variance, probabilité conjointe, etc. des niveaux de gris sont des propriétés de texture. (La texture peut être considérée comme une forme périodique perturbée aléatoirement).

Pour déterminer une propriété d'une région, il faut d'abord définir la région et la propriété. Ensuite, il faut exprimer cette propriété sous forme analytique compatible avec un traitement numérique.

2.2. Principe de la segmentation

2.2.1. Phase 1

On suppose qu'une image satellitaire ou une photographie aérienne, $I(i,j)$, $i=1,\dots,m$ et $j=1,\dots,n$; est composée de N régions étiquetées $r(1), r(2), \dots, r(N)$, et $P^k(1), P^k(2), \dots, P^k(N)$ les propriétés correspondantes. On définit un voisinage $V(r)$ de la région r par :

$$V(r) = \{r' / r' \text{ et } r \text{ sont adjacentes}\}. \quad (2.1)$$

Une région est composée par un ou plusieurs pixels et deux régions sont dites adjacentes si elles ont une frontière commune.

Soit X un voisinage et $S_V(X)$ un système de voisinages de X (fig. 1). Nous avons :

$$V(X) = \{X, A, B, C, D, E, F, G, H\}$$

$$V(A) = \{A, B, C, G, H, K, L, M, X\}, \text{ etc.}$$

et

$$S_V(X) = \{V(X), V(A), V(B), V(C), V(D), V(E), V(F), V(G), V(H)\}.$$

On définit la moyenne locale de X par :

$$m(X) = \frac{1}{|X|} \sum_{r(j) \in X} P(j) \quad (2.2)$$

et la variance empirique locale de X par

$$Var(X) = \frac{1}{|X|-1} \sum_{r(j) \in X} (P(j) - m(X))^2 \quad (2.3)$$

où $P(j)$ est le niveau de gris moyen de la région $r(j)$.

	L	M	N	O	P	
	K	B	C	D	Q	
	J	A	X	E	R	
	I	H	G	F	S	
	Y	W	V	U	T	

Figure 1. Systèmes de voisinages $S_V(X)$ d'une région X

Le plus proche voisinage d'une région r , noté $PPV(r)$, est un élément de $S_V(r)$ et dont la variance est minimale.

$$PPV(r)=X' \text{ et } Var(X')=Min(Var(X)), X \in S_V(r) \quad (2.4)$$

Une itération de l'algorithme de segmentation commence par l'ensemble des régions $r(1), r(2), \dots, r(N)$, ayant les propriétés $P^k(1), P^k(2), \dots, P^k(N)$; et on remplace les propriétés de chaque région par une fonction des propriétés du plus proche voisinage. C'est-à-dire :

$$P^{k+1}(n)=f(PPV(r(n))), n=1, \dots, N. \quad (2.5)$$

où, bien sûr, $PPV(r(n))$ dépend de $P^k(n)$. Le processus est répété jusqu'à la convergence ou selon les exigences thématiques. En pratique, l'arrêt du processus dépend plutôt des thèmes et des types de données. Dans la phase 2, les régions adjacentes qui ont la même propriété sont fusionnées pour former un nouvel ensemble de régions. Nous allons donner des détails dans ce qui suit.

2.2.2. Phase 2

Supposons que nous ayons une image $I(i,j)$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$, composée de N régions étiquetées $r(1), \dots, r(N)$. En appliquant le processus de segmentation, on obtient à la $i^{\text{ème}}$ itération des régions étiquetées $r^i(1), \dots, r^i(N_i)$ ($N_i \subseteq N$). Si la segmentation est jugée bonne thématiquement ou si la convergence du processus a lieu, on regroupe les régions ayant les mêmes propriétés. On obtient un ensemble de régions $r^{i+1}(1), \dots, r^{i+1}(N_{i+1})$, avec $N_{i+1} \subseteq N_i \subseteq N$.

2.2.3. Méthodes de remplacement

Nous allons considérer deux méthodes de remplacement. La première consiste à affecter à la région courante, r , à la $(k+1)^{\text{ème}}$ itération, la propriété moyenne de son plus proche voisinage :

$$P^{k+1}(r)=m(X), X=PPV(r). \quad (2.6)$$

La deuxième consiste à affecter à la région courante, r , à la $(k+1)^{\text{ème}}$ itération, la propriété de son plus proche voisinage :

$$P^{k+1}(r)=P(S), S \in PPV(r). \quad (2.7)$$

Les résultats montrent que la première méthode est la plus intéressante dans la mesure où l'on tient compte du nombre total de régions constituant le voisinage puisque l'on prend la moyenne des propriétés des régions du plus proche voisinage. Par contre, s'il s'agit de classes de régions, il est préférable de prendre la deuxième méthode de remplacement. La classification par cette méthode de segmentation est très intéressante, puisqu'elle tient compte de la texture des zones de l'image. Nous illustrons ces deux méthodes par l'exemple suivant.

2.2.4. Exemple

a) Méthode de remplacement par la valeur moyenne du PPV

Nous avons pris une parcelle de la forêt de Bouconne de taille 8×8 pixels (fig. 2). D'après les valeurs radiométriques, nous pouvons constater que structurellement le terrain de 2,50 hectares n'est pas formé de la même espèce. Nous avons appliqué les équations (2.1)-(2.6) pour chaque itération.

À la cinquième itération, nous aboutissons à neuf classes (fig. 3). À la douzième itération, il y a convergence de l'algorithme. Nous avons obtenu une parcelle contenant six espèces

46	46	37	31	31	31	31	31
43	36	35	32	32	32	31	31
31	30	35	33	37	34	30	31
31	30	40	35	39	33	32	20
31	31	30	31	47	39	37	31
31	31	31	32	30	31	42	40
36	32	31	30	31	31	31	30
39	38	35	32	31	30	30	30

Figure 2. Extraction de la forêt de Bouconne (8 X 8 pixels)

32,53	31,27	31,11	31,03	31,00	
30,83	31,26	31,10	31,02	30,98	
	30,89		31,01		
	30,90				30,96
30,91			30,88	30,85	30,25

Figure 3. Résultat après 5 itérations (remplacement par la valeur moyenne du PPV)

32,53	31,00				
30,83	31,00				
30,91	30,91			30,25	

Figure 4. Résultat après 12 itérations (remplacement par la valeur moyenne du PPV)

différentes (fig. 4). En fait, nous avons trois classes, ceci est dû au fait qu'une valeur radiométrique est un nombre entier positif. Nous reconnaissons plus facilement la partie de la forêt composée de feuillus mélangés à des résineux. C'est une zone de forte densité représentée par la valeur 31 sur la figure 4.

b) Méthode de remplacement par la valeur du PPV

Nous reconsidérons la parcelle représentant une exaction de la forêt de Bouconne (fig. 2). Le remplacement se fait par la valeur du plus proche voisinage dont la variance est minimale. Nous avons appliqué les équations (2.1)-(2.5) et (2.7) pour chaque itération.

Après la deuxième itération et après avoir regroupé les pixels voisins ayant la même valeur radiométrique, nous obtenons cinq classes (fig. 5). À la troisième itération, il y a convergence de l'algorithme (fig. 6).

La deuxième méthode converge plus vite que la première; ceci est dû au fait que l'on manipule des valeurs entières (des valeurs radiométriques) tirées directement des pixels du voisinage.

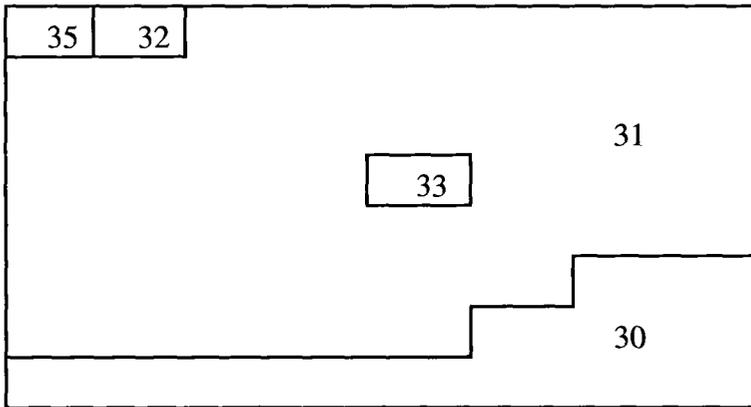


Figure 5. Résultat après 2 itérations (remplacement par la valeur du PPV)

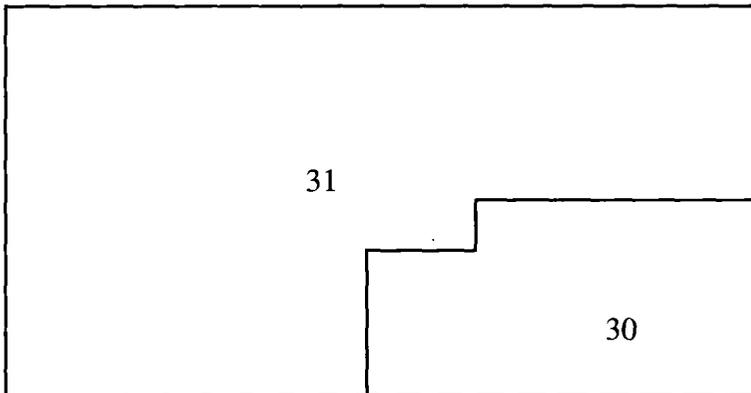


Figure 6. Résultat après 3 itérations (remplacement par la valeur du PPV)

2.2.5. Traitement

a) Application de l'algorithme à la forêt de Bouconne

Nous avons utilisé une image multibande HRV de septembre 1988 représentant la forêt de Bouconne (KHODJA, 1992). La figure 26-7 (voir cahier couleur) représente le canal 2 de HRV affiché en pseudo-couleurs. Après avoir vérifié que les canaux 1 et 2 sont très fortement corrélés, nous avons retenu les canaux 2 et 3 pour notre traitement. N'oublions pas que les images que nous utilisons sont de septembre. Nous devons souligner que notre traitement ne se limite pas à la forêt de Bouconne proprement dite, mais aussi autour de cette dernière (la périphérie qui contient des espaces non forêt, habitations et autre type de forêt).

Nous avons procédé comme suit :

1) Extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène en utilisant l'histogramme du canal 2.

2) Recherche de la discrimination interne de l'entité forêt dans le canal 3.

3) Segmentation : nous avons appliqué l'algorithme de la segmentation par la méthode de remplacement par la valeur moyenne du PPV.

4) Pour bien faire apparaître les contours, nous avons jugé utile d'appliquer un opérateur linéaire pour rehausser l'image segmentée. Ceci nous a permis d'accentuer le zonage.

Remarquons qu'à cette période le canal 3 peut nous conduire à des confusions quant à la radiométrie compte tenu du fonctionnement de l'écosystème forestier. C'est donc la raison pour laquelle le canal 2 lui a été préféré pour le traitement.

b) Application du Laplacien à l'image segmentée

L'image rehaussée est obtenue par la différence de l'image originale et de son Laplacien.

Soit L un opérateur Laplacien défini par la matrice L(2,2)

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

on applique le Laplacien, L, à une image I(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, en utilisant le produit de convolution bidimensionnel de l'image I(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, avec la matrice L. On obtient l'image J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, par différence de I(i,j) et de Y(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, :

$$Y = L ** I \quad (2.8)$$

$$Y(i,j) = \sum_k \sum_l L(k,l) I(i-k, j-l) \quad (2.9)$$

où L(k,l) est le Laplacien numérique; et ** désigne le produit de convolution. Nous avons :

$$Y(i,j) = I(i+1,j) + I(i,j+1) - 4I(i,j) + I(i,j-1) + I(i-1,j) \quad (2.10)$$

Y(i,j) est l'image obtenue par le Laplacien.

L'image rehaussée J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, est obtenue par la différence de l'image originale et de son Laplacien :

$$J(i,j) = I(i,j) - Y(i,j); \quad i=1, \dots, m \text{ et } j=1, \dots, n. \quad (2.11)$$

L'image J(i,j), i=1, ..., m et j=1, ..., n, présente beaucoup plus de contraste, ce qui permet de bien voir apparaître les contours.

3. Résultats

Première itération : nous remarquons un regroupement des pixels ayant la même radiométrie. Troisième itération : (fig. 26-8, voir cahier couleur) les routes départementales commencent à disparaître de la scène en raison d'un autre regroupement des pixels. Cinquième itération (fig. 26-9, voir cahier couleur) : les routes départementales sont complètement effacées. Nous avons appliqué le Laplacien à cette image pour créer les contours des zones homogènes (fig. 26-10, voir cahier couleur). Dixième itération : après la segmentation, nous avons fait une extraction du massif forestier de l'ensemble de la scène et avons mis en évidence les contours. Nous pouvons déjà remarquer les différentes classes qui se forment (fig. 26-11, voir cahier couleur). Nous avons fait d'autres itérations et avons remarqué que les éléments fins de la forêt disparaissent. Par comparaison aux autres figures précédentes, nous pouvons arrêter le processus et établir une nomenclature.

Nous pouvons observer :

1) Dans le canal 2 le contour de la forêt apparaît nettement mieux, nous distinguons une association de trois classes éclatées et spatialement imbriquées et les différentes coupes sont bien délimitées.

2) Dans le canal 3 le contour du massif forestier s'estompe au profit des grands ensembles structurant la forêt : un ensemble de résineux (sud de l'image), un autre dominant de feuillus (nord) mélangés à des résineux et aux landes.

3) Il nous a semblé plus judicieux de faire d'abord une extraction du massif forestier en utilisant l'histogramme du canal 2, et ensuite nous avons appliqué l'algorithme de segmentation. Sur les résultats obtenus après trois itérations (fig. 26-12, voir cahier couleur), les routes départementales sont bien visibles et les différentes coupes sont bien délimitées.

En conséquence, le thématicien pourra utiliser le canal 2 pour définir les contours de l'espace forestier qu'il pourra projeter ensuite dans le canal 3. Ce dernier permet de saisir la structure interne de la forêt.

4. Discussion

Cet algorithme de segmentation est basé sur le principe des paramètres locaux (moyennes et variances) et aussi sur les itérations successives. Aux premières itérations, nous remarquons les regroupements autour des pics de fréquences accentuant les discontinuités dans les distributions. Ce sont les zones de faibles occurrences statistiques qui vont autoriser le partage des images aboutissant à définir les classes présentant une certaine logique interne de répartition spatiale (NAIZOT, 1992).

Cette méthode a permis de supprimer les lignages, de dégager des zones homogènes tout en gardant la distinction (séparation) entre les milieux composant la forêt. On aboutit à une classification des éléments et enfin en appliquant un opérateur Laplacien on aboutit à une approche cartographique de la scène représentant toute l'image. Ces méthodes sont essentielles pour l'extraction de données cartographiques (routes, îlots, etc.) à partir d'images; elles nous ont permis, en fait, de faire apparaître des aspects très intéressants de l'organisation spatiale et la définition de contours précis et de structures hétérogènes pour le milieu forestier. Ces procédures fourniront des résultats plus ou moins facilement interprétables par rapport à la notion visuelle de texture que nous tirons de leurs observations, néanmoins ils traduiront tous l'existence de niveaux de gris différents, la distribution spatiale de ces régions, la fréquence

de leurs apparitions, etc. Nous devons préciser que cette méthode de reconnaissance et de classification des éléments composant une image de télédétection dépend de l'objectif du thématicien.

5. Conclusion

Cette méthode de segmentation est très intéressante dans la mesure où l'on tient compte de la texture des images (stries, marbrures, etc.). Le principe de zonage ou stratification repose sur le découpage de l'image en sous-images homogènes quant à la radiométrie. Il serait intéressant d'appliquer la même méthode à une autre date car toute donnée de télédétection est un instantané qui ne fournit d'information que sur les objets existant au moment de la saisie. Ainsi pour chaque date de prise de données, existe une nomenclature dépendant des cycles naturels.

6. Références

- KHODJA, A. 1992. Statistique spatiale et applications aux images de télédétection. Thèse de doctorat de mathématiques appliquées de l'École des hautes études en sciences sociales, Paris, 261 p.
- LATROUS. A. 1986. Essai de topographie des unités homogènes de la forêt de Bouconne par télédétection spatiale. Mémoire de D.E.S.S., Paris.
- KUNT, M. 1981. Traitement numérique des signaux. Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, Paris, 402 p.
- NAIZOT, T. 1992. Étude des écosystèmes littoraux de la baie de Paranagua (Brésil), Applications à la télédétection. Thèse de doctorat de géographie de l'École des hautes études en sciences sociales, Paris.
- PONG, T.C., SHAPIRO, L.G., WATSON, L.T., and HARALICK. R. 1984. Experiment in segmentation using a facet model region grower. Computer vision, graphics and image processing, n° 25, p. 1-23.

27

Le problème de l'échelle et de l'agrégation spatiale en télédétection

DANIELLE J. MARCEAU*, PHILIP J. HOWARTH*
et DENIS J. GRATTON**

**Département de géographie, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1; téléphone : (519) 885-1211, poste 3404; télécopieur : (519) 888-6768*

***INRS-Eau, 2800, rue Einstein, bureau 105, case postale 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1V 4C7; téléphone : (418) 654-2585; télécopieur : (418) 654-2600*

Résumé

L'objectif de cette étude est de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'inconsistance des résultats de classification automatisée d'images de télédétection est liée au problème d'échelle et d'agrégation reconnu dans plusieurs recherches impliquant des données de type spatial. Des données acquises par le capteur aéroporté MEIS-II au-dessus d'une région forestière ont été ré-échantillonnées à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m. Trois schémas de classification, correspondant à trois niveaux d'agrégation successive, ont été définis. L'effet d'échelle et d'agrégation a été mesuré à l'aide de cinq statistiques descriptives (le test Wald-Wolfowitz, la moyenne, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement) calculées sur des transects de l'image représentant chaque classe, à chacune des résolutions spatiales. De plus, une classification multibande des images à chaque résolution spatiale a été effectuée en vue d'obtenir les trois schémas de classification précédemment définis. Les résultats révèlent que les valeurs des statistiques, à l'exception de la moyenne, de même que l'exactitude de classification de chaque type de couvert et d'utilisation du sol sont grandement affectées par le changement d'échelle et d'agrégation des données. Il importe donc de développer une nouvelle approche en télédétection qui tienne compte des caractéristiques spatiales intrinsèques des objets géographiques à l'étude.

1. Introduction

Avec l'avènement des images numériques satellitaires et aéroportées, la télédétection représente une source exceptionnelle de données géographiques et offre une alternative des plus prometteuses pour la production et la mise à jour de cartes thématiques à partir de méthodes d'analyse automatisées. Cependant, en dépit du développement de capteurs à fine résolution spatiale et du raffinement des algorithmes de classification durant la dernière décennie (LANDGREBE, 1980; WHARTON, 1982; LEE *et al.*, 1987; TON *et al.*, 1991; GONG *et al.*, 1992), il existe une inconsistance chronique dans les résultats de classification qui conduit à une fiabilité peu élevée des cartes produites selon les normes d'exactitude et de précision exigées par la plupart des utilisateurs potentiels. Par exemple, en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance sur des images MSS, LATTY et HOFFER (1981) ont obtenu 23% d'exactitude de classification des peuplements mixtes, 32% dans le cas des zones arbustives, 88% pour des zones de coupe et 100% dans le cas de pâturages. Lors d'une classification multibande d'images SPOT, FRANKLIN et WILSON (1991) ont obtenu 13% d'exactitude pour des zones arbustives, 42% dans le cas de peuplements mixtes, 45% pour la toundra alpine, 81% pour des lacs et rivières, 92% pour des peuplements de conifères et 99% pour des tourbières. En conséquence, après 20 ans de recherche et de développement dans le domaine de la classification automatisée d'images de télédétection, les cartes produites par les méthodes traditionnelles de relevés de terrain et de photogrammétrie demeurent les documents standard dans la grande majorité des applications scientifiques.

L'hypothèse soulevée dans le cadre de cette étude pour expliquer l'inconsistance des résultats de classification automatisée est que les modèles d'acquisition et de classification couramment utilisés en télédétection ne tiennent pas compte des effets d'échelle et d'agrégation spatiale inhérents à tout processus d'échantillonnage et d'analyse de données à caractère spatial. Lorsqu'une grille d'échantillonnage est appliquée sur une région, comme c'est le cas lors de l'acquisition d'images numériques de télédétection, celle-ci se trouve arbitrairement découpée en un certain nombre de zones, de forme et de dimension fixes, à l'intérieur desquelles une mesure, supposée représentative de chaque zone, est acquise. Deux questions fondamentales se posent alors : quel est le nombre ainsi que la composition interne des zones qui représentent le plus adéquatement possible les entités géographiques d'intérêt qui composent la région à l'étude? Ces deux composantes correspondent respectivement à l'échelle et à l'agrégation spatiale. Devant l'absence de méthodes éprouvées pour estimer *a priori* ces deux variables, dans la plupart des cas, elles sont choisies en fonction des contraintes techniques particulières de l'étude en supposant qu'elles sont indépendantes des données ainsi recueillies de même que des résultats de leur analyse subséquente (OPENSHAW, 1984a).

Or, plusieurs recherches impliquant des données de type spatial, particulièrement dans le domaine de la géographie sociale et économique, révèlent que les résultats d'analyses statistiques peuvent être considérablement modifiés en changeant l'échelle et l'agrégation des données utilisées, soit au moment de leur acquisition ou lors de manipulations subséquentes. Une des premières illustrations du problème d'échelle est fournie par YULE et KENDALL (1950) dans une étude visant à montrer la corrélation entre des champs de blé et de pommes de terre en Angleterre. Ils obtiennent un coefficient de corrélation variant de 0,22 à 0,99 simplement en modifiant le nombre de zones représentant le secteur d'étude, d'abord divisé en 48 comtés progressivement combinés en 24, 12, 6 et 3 zones.

L'effet d'agrégation se manifeste lorsque des critères différents sont utilisés pour combiner des données spatiales afin de produire un nombre donné de zones. Afin de mesurer cet impact, OPENSHAW (1981) a appliqué différents critères, tels que égale surface, égale population,

égale densité, entropie spatiale et homogénéité intra-zone, pour partitionner l'État d'Iowa et mesurer le coefficient de corrélation entre le pourcentage de votes pour des candidats républicains et le pourcentage de la population âgée de plus de 60 ans. En formant six zones, les coefficients de corrélation obtenus varient entre 0,03 et 0,90 selon le critère de partition utilisé.

Des études semblables impliquant des analyses statistiques différentes, telles que l'analyse factorielle (OPENSHAW, 1984b) et la régression multiple (DUDLEY, 1991) corroborent la même conclusion : les résultats d'analyse basés sur des données spatiales arbitrairement définies par une grille d'échantillonnage modifiable à volonté peuvent être aléatoires et dépendent étroitement des unités spatiales utilisées. Puisque les images numériques de télédétection peuvent être définies comme un cas particulier d'acquisition de données spatiales arbitrairement délimitées par la résolution spatiale du capteur, une méthode expérimentale a donc été développée afin de vérifier si les effets d'échelle et d'agrégation ont des répercussions significatives sur le contenu des images spectrales et sur les résultats de classification.

2. Schéma expérimental

Les données utilisées, provenant du capteur aéroporté MEIS-II (Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner), ont été acquises au-dessus d'une portion d'environ 9 km² de la forêt expérimentale de Petawawa, en Ontario, centrée à 45°58'N, 77°25'O (MARCEAU *et al.*, 1992). Trois bandes spectrales présentant la meilleure qualité radiométrique ont été retenues, soit celle du vert (586,6 à 599,4 nm), du rouge lointain (703,3 à 719,0 nm) et du proche-IR (862,0 à 890,0 nm). Afin d'illustrer le changement d'échelle, ces images, d'une résolution spatiale originale de 3,7 m, ont été géométriquement corrigées et ré-échantillonnées à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m à l'aide de l'algorithme d'interpolation de la convolution cubique disponible sur le système d'analyse d'images ARIES-III de Dipix. Trois schémas de classification, correspondant à trois niveaux d'agrégation successive, ont été définis à l'aide de données de référence provenant d'une carte forestière numérisée à l'échelle du 1:25 000 (tab. I).

L'effet d'échelle et d'agrégation spatiale a d'abord été évalué en calculant cinq statistiques descriptives sur des transects de niveaux de gris des images spectrales représentant chaque classe des trois niveaux d'agrégation, à chacune des quatre résolutions spatiales (tab. II). La première statistique est le test Wald-Wolfowitz, un test non paramétrique servant à mesurer la tendance au regroupement dans une séquence spatiale ordonnée de données. Une valeur

Tableau I. Schéma de classification correspondant à trois niveaux d'agrégation spatiale

Niveau I	Niveau II	Niveau III
Zones non-forestières	Zones non-forestières	Zones inondées Herbes et arbustes Plantations
Forêt naturelle	Feuillus Conifères Forêt mixte	Bouleaux (<i>Betula</i>) Érables (<i>Acer</i>) Peupliers (<i>Populus</i>) Épinettes (<i>Picea</i>) Pins (<i>Pinus</i>)

élevée traduit une tendance des données au regroupement spatial alors qu'une valeur faible signifie que les données fluctuent aléatoirement au-dessus et au-dessous d'une valeur centrale, en ce cas-ci la médiane (CONOVER, 1980). Les autres statistiques servent à caractériser la distribution de fréquences et sont : la moyenne, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement.

Le second effet d'échelle et d'agrégation, résultant de combinaisons subséquentes des données à des fins d'analyse, est mesuré en effectuant une classification multibande des images à chacune des résolutions spatiales afin de générer les trois schémas de classification précédemment définis. Pour chacune des classifications, le critère choisi pour modifier la partition des données spectrales est la variance des pixels d'entraînement. Une méthode automatisée de sélection de pixels d'entraînement, basée sur des distances inter-centiles calculées sur chacune des bandes spectrales, a été développée afin de contrôler la variance des pixels représentant chacune des classes désirées (MARCEAU *et al.*, 1992; MARCEAU, 1992). Une distance inter-centile faible correspond à une variance peu élevée des pixels d'entraînement et réciproquement. Le classifieur utilisé est l'algorithme du maximum de vraisemblance. L'exactitude des classifications est mesurée par le coefficient de Kappa (FLEISS *et al.*, 1969) calculé sur des matrices de confusion générées à l'aide de pixels tests échantillonnés au hasard et de façon stratifiée sur la carte de référence numérisée. Ce coefficient tient compte de toutes les cellules de la matrice de confusion et élimine le pourcentage de bonne classification dû au hasard. Certains chercheurs ont suggéré qu'il soit adopté par la communauté scientifique en télédétection comme une mesure standard d'exactitude de classification (ROSENFELD and FITZPATRICK-LINS, 1986).

3. Présentation des résultats

Afin de limiter l'espace requis pour la présentation des résultats, seuls les exemples les plus représentatifs sont illustrés dans le présent article. Une description exhaustive, incluant les résultats du test d'hypothèse de différence significative appliqué aux coefficients de Kappa, se trouve dans MARCEAU (1992).

Tableau II. Nombre de pixels contenus dans les transects pour le calcul des statistiques

Rés. spatiale (m)	Plantation	Arbustes	Zone inondée	Pin (<i>Pinus</i>)	Épinette (<i>Picea</i>)	Peuplier (<i>Populus</i>)	Bouleau (<i>Betula</i>)	Érable (<i>Acer</i>)
5	660	425	70	816	276	353	230	206
10	323	210	39	407	143	176	118	100
20	162	104	22	201	73	90	58	50
30	106	56	15	129	52	61	38	34

Rés. spatiale (m)	Conifères	Feuillus	Forêt mixte	Zones non-forestières	Forêt naturelle
5	306	381	977	655	886
10	158	185	487	324	444
20	80	94	247	170	226
30	47	65	159	100	148

3.1. Impact du changement d'échelle et d'agrégation sur le contenu des données spectrales

À l'exception de la moyenne qui ne varie pas de façon significative (tab. III), les quatre autres statistiques sont grandement affectées par le changement d'échelle et d'agrégation des données spectrales. La valeur Z du test Wald-Wolfowitz tend à décroître lorsque la résolution spatiale décroît de 5 m à 30 m. L'effet est plus prononcé lorsque les types de couvert et d'utilisation du sol sont progressivement agrégés (fig. 1). Ainsi, pour la classe «*épinettes (Picea)*», au niveau d'agrégation III, la valeur Z obtenue pour la bande du proche-IR décroît de 9,1 (5 m) à 1,4 (30 m). Dans le cas de la classe «*conifères*», au niveau d'agrégation II, la valeur Z est de 10,9 à 5 m et diminue à 0,7 à 30 m. Au niveau d'agrégation I, pour la classe «*forêt naturelle*», la valeur varie de 19,0 (5 m) à 4,3 (30 m). Ces résultats traduisent une tendance des pixels adjacents à former des nuages de points à différentes positions sur l'image lorsque la résolution spatiale est fine. Au fur et à mesure que la résolution spatiale décroît, le détail spectral est progressivement agrégé et les valeurs de gris s'uniformisent sur l'ensemble du transect de l'image représentatif de chaque classe.

Tableau III. Valeurs de moyenne obtenues pour les niveaux d'agrégation II et I

Classes	Résolution spatiale (m)	Vert	Rouge lointain	Proche infrarouge
Conifères (Niveau II)	5	96,9	67,3	54,0
	10	95,8	66,7	51,5
	20	97,6	67,7	55,1
	30	97,2	67,3	53,3
Forêt mixte (Niveau II)	5	96,7	66,9	54,6
	10	97,8	67,0	55,4
	20	97,2	67,0	55,7
	30	97,6	67,0	55,0
Feuillus (Niveau II)	5	96,9	67,2	65,9
	10	96,6	67,2	66,3
	20	96,9	67,4	66,7
	30	95,1	66,2	63,2
Zones non-for. (Niveau I)	5	107,3	70,2	46,3
	10	109,7	71,3	46,7
	20	110,9	71,7	48,0
	30	112,1	72,3	50,3
Forêt naturelle (Niveau I)	5	97,4	67,3	56,8
	10	98,3	67,3	57,7
	20	98,3	67,6	58,7
	30	98,0	66,9	57,1

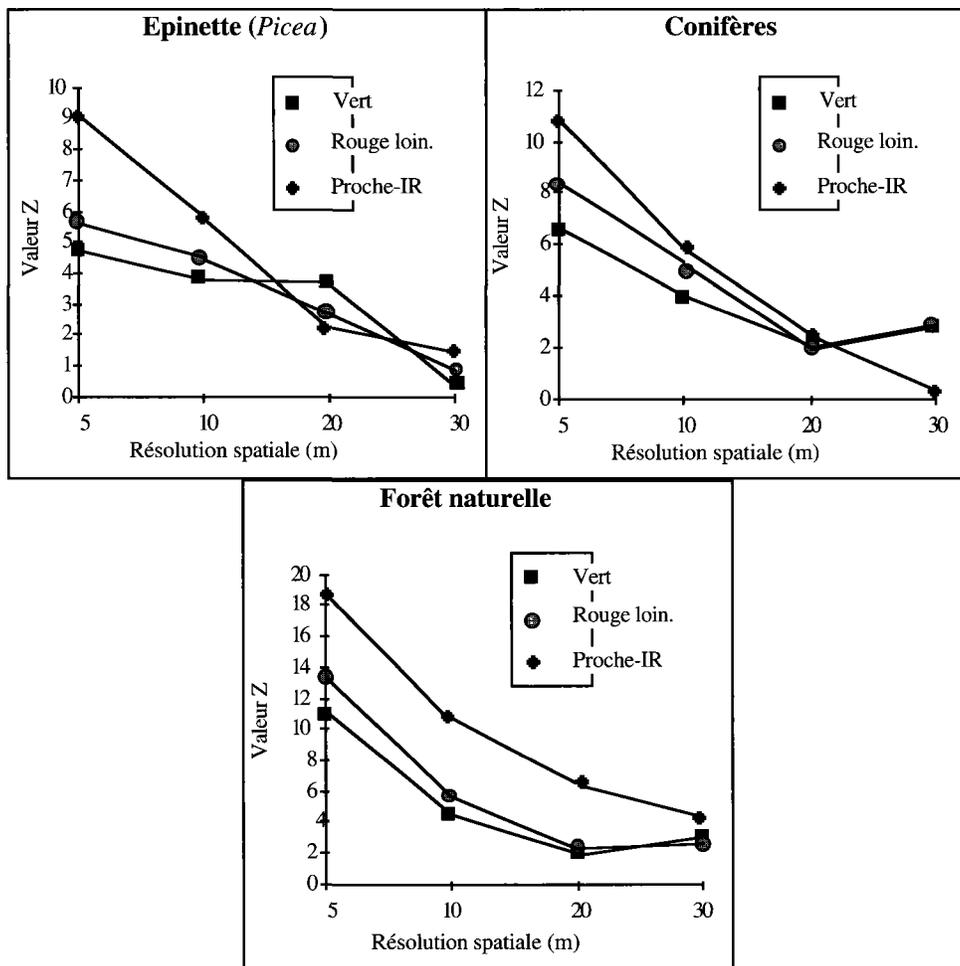


Figure 1. Résultats du test Wald-Wolfowitz pour les niveaux d'agrégation III, II et I

La variance est grandement affectée par le changement d'échelle et d'agrégation des classes, l'impact du premier apparaissant plus marqué que celui du second (fig. 2). Au niveau d'agrégation III, pour la bande du proche-IR, dans le cas de la classe «érables (*Acer*)», la variance décroît de 146,4 à 5 m à 52,8 à 30 m (un écart de 93,6). Pour la classe «feuillus», au niveau d'agrégation II, la variance décroît de 105,0 à 5 m à 69,3 à 30 m (un écart de 35,7). Au niveau d'agrégation I, pour la classe «forêt naturelle», la variance décroît de 150,3 à 5 m à 121,9 à 30 m (une différence de 28,4). Pour certaines classes, particulièrement dans la bande spectrale du vert, la variance ne décroît pas linéairement avec la résolution spatiale. Ce comportement est dû à l'utilisation de l'algorithme de la convolution cubique pour le ré-échantillonnage spatial des images. Il s'agit d'un algorithme d'interpolation qui ne produit pas une agrégation linéaire de la valeur des pixels et qui peut entraîner une fluctuation de la variance en fonction de la résolution spatiale.

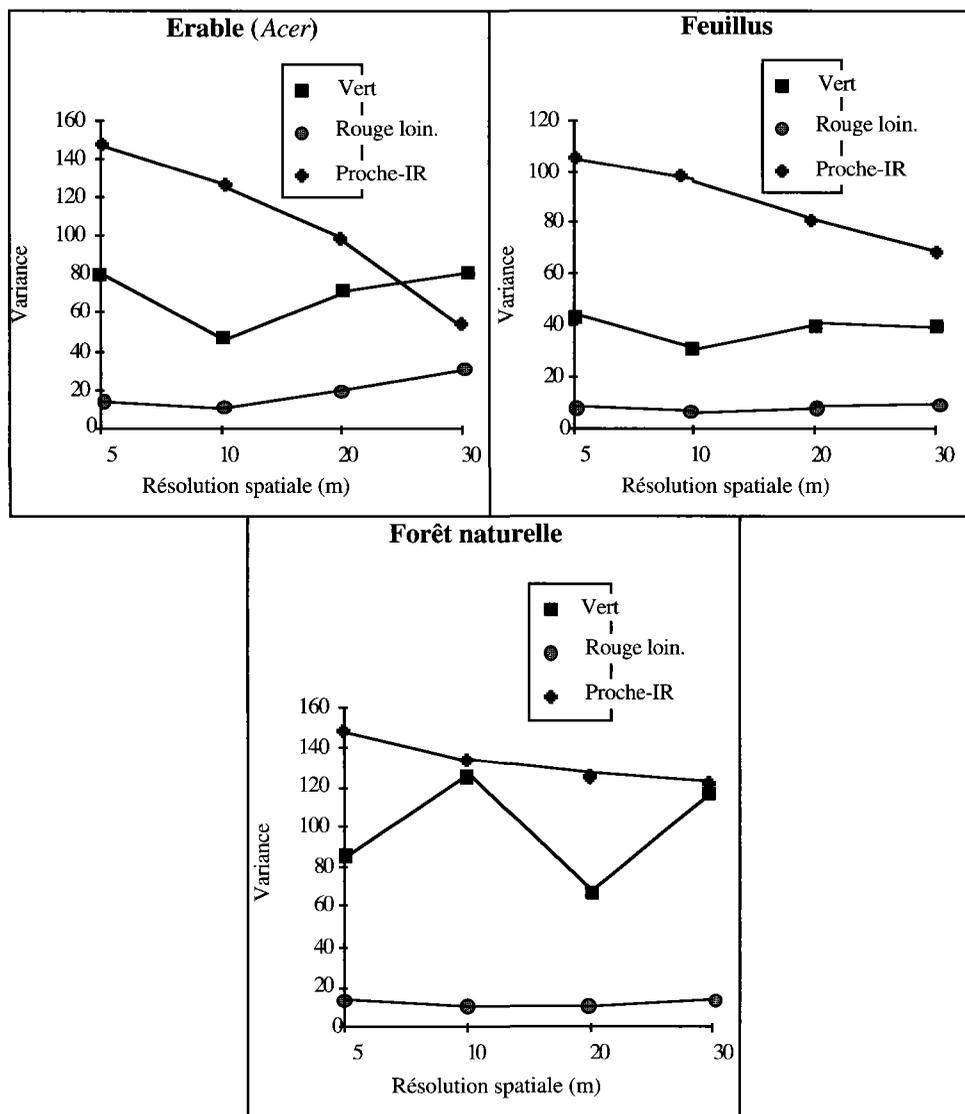


Figure 2. Valeurs de variance obtenues pour les niveaux d'agrégation III, II et I

Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement varient aussi considérablement en fonction de la résolution spatiale et du niveau d'agrégation (tab. IV). Un exemple est fourni par la classe «conifères» pour la bande du rouge lointain. La valeur d'asymétrie est négative à 5 m (-0,22) et positive à 30 m (1,73); la valeur d'aplatissement est faiblement négative à 5 m (-0,17) et fortement positive à 30 m (6,17). De tels changements vont à l'encontre de la prémisse de normalité de la plupart des algorithmes paramétriques de classification, incluant le maximum de vraisemblance, ce qui peut donc affecter la performance de l'algorithme.

Tableau IV. Valeurs d'asymétrie et d'aplatissement obtenues pour les niveaux d'agrégation II et I

Classes	Rés. spatiale (m)	Asymétrie			Aplatissement		
		Vert	Rouge lointain	Proche IR	Vert	Rouge lointain	Proche IR
Conifères (Niveau II)	5	-0,06	-0,22	0,42	0,06	-0,17	-0,57
	10	0,14	0,33	0,69	-0,06	0,42	0,18
	20	0,20	0,25	0,52	0,47	-0,39	0,13
	30	0,27	1,73	0,33	-0,27	6,17	-0,86
Forêt mixte (Niveau II)	5	2,26	1,29	0,27	13,15	4,41	-0,46
	10	4,58	0,96	0,28	35,28	2,52	-0,37
	20	1,20	0,56	0,29	3,96	0,82	-0,16
	30	2,34	0,46	0,09	8,96	0,17	-0,50
Feuillus (Niveau II)	5	-0,32	-0,20	-0,35	0,65	0,13	-0,06
	10	0,21	0,22	0,06	0,88	-0,27	0,11
	20	0,57	0,12	-0,35	0,79	0,44	-0,37
	30	0,19	0,46	0,03	0,43	1,16	-0,44
Zones non-for. (Niveau I)	5	2,07	1,32	-0,25	7,08	2,64	-0,44
	10	1,17	1,15	-0,05	2,05	2,20	-0,31
	20	0,77	0,62	-0,07	0,22	0,74	-0,22
	30	1,08	0,83	-0,48	1,72	0,93	-0,05
Forêt naturelle (Niveau I)	5	2,65	1,24	0,12	17,76	5,70	-0,67
	10	5,10	1,12	0,24	40,01	4,42	-0,68
	20	1,50	0,63	0,06	5,82	0,96	-0,42
	30	2,81	1,63	-0,04	11,55	7,84	-0,64

L'ensemble de ces résultats, particulièrement les valeurs de variance, permet d'affirmer que le contenu d'information des images spectrales est considérablement modifié selon l'échelle et l'agrégation des données originales. Cet effet se répercute sur les résultats de classification tel qu'illustré dans la prochaine section.

3.2. Impact du changement d'échelle et d'agrégation sur les résultats de classification multibande

L'impact du changement d'échelle est illustré par le meilleur résultat de classification obtenu par classe à chacune des résolutions spatiales. Au niveau d'agrégation III, quatre tendances sont apparentes (fig. 3). Pour la classe «herbes et arbustes», l'exactitude de la classification décroît avec la résolution spatiale variant de 0,38 à 5 m à 0,09 à 30 m. Les classes «plantations», «pins (*Pinus*)» et «bouleaux (*Betula*)» montrent une tendance opposée : l'exactitude de la classification augmente lorsque la résolution spatiale décroît. Ainsi, dans le premier cas, le coefficient de Kappa varie de 0,14 à 5 m à 0,25 à 30 m. La troisième tendance, illustrée par les classes «épinettes (*Picea*)» et «peupliers (*Populus*)», est une augmentation de

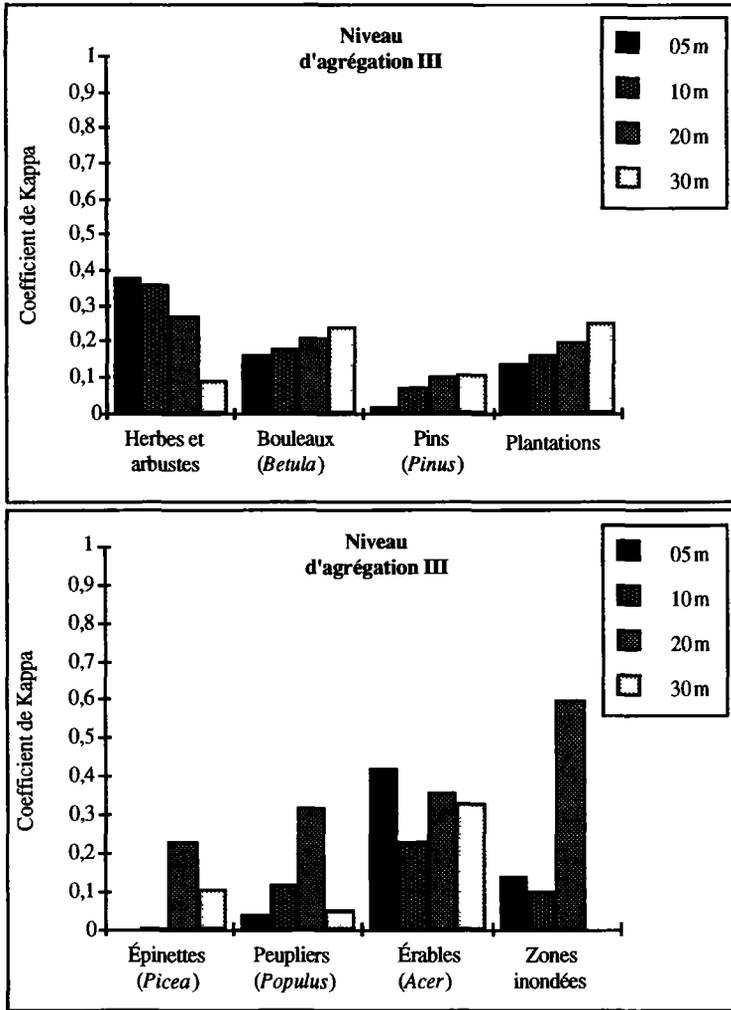


Figure 3. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation III

l'exactitude de la classification en relation avec une décroissance de la résolution jusqu'à 20 m, suivie par une brusque diminution à 30 m. Le coefficient de Kappa obtenu pour cette deuxième classe est de 0,04 à 5 m; il augmente à 0,32 à 20 m et chute à 0,05 à 30 m. Finalement, les classes «érables (Acer)» et «zones inondées» sont grandement affectées par le changement d'échelle, mais ne montrent aucune tendance particulière. Il en est de même pour les classes des niveaux d'agrégation II et I (fig. 4 et 5). Ainsi, dans le cas de la classe «conifères», les résultats varient entre 0,26 (10 m) et 0,11 (30 m). Une observation intéressante concerne la catégorie «zones non forestières» où l'exactitude de la classification est considérablement supérieure lorsque quatre classes sont produites comparativement à deux classes seulement. Par exemple, à 5 m,

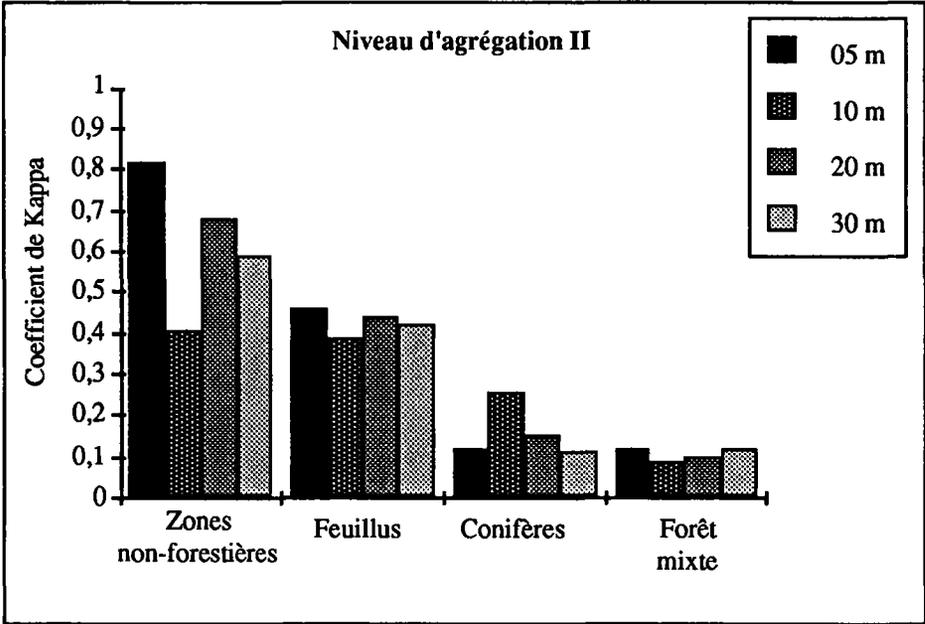


Figure 4. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation II

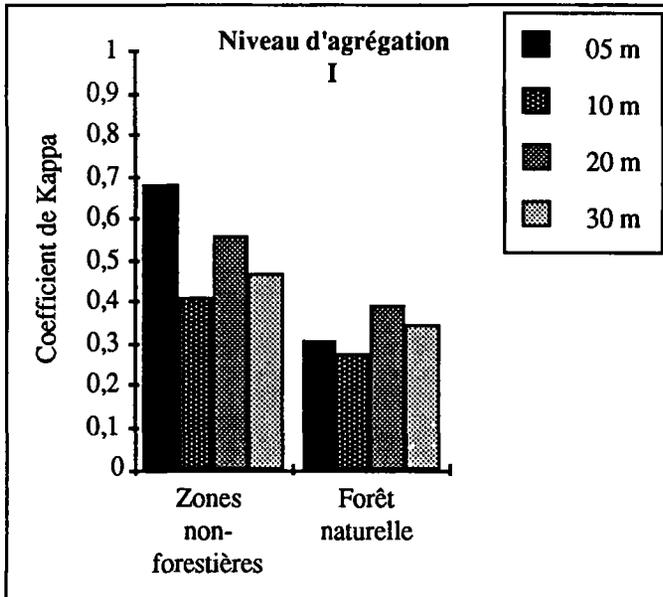


Figure 5. Impact de l'échelle, représentée par la résolution spatiale, sur les résultats de classification obtenus par classe pour le niveau d'agrégation I

le coefficient de Kappa atteint 0,82 au niveau d'agrégation II et diminue à 0,68 au niveau d'agrégation I.

La variance des pixels d'entraînement, représentée par la distance inter-centile et utilisée comme critère de partition des données spectrales lors de la classification, affecte aussi grandement les résultats de classification. Par exemple, au niveau d'agrégation III, à 20 m de résolution spatiale, deux tendances opposées sont manifestes (fig. 6). Pour les classes «zones inondées», «érables (*Acer*)» et «herbes et arbustes», l'exactitude de classification augmente considérablement lorsque la distance inter-centile est faible. Par exemple, dans le premier cas, le coefficient de Kappa varie de 0,07 pour une distance moyenne (0,38/0,62) à 0,61 pour une distance très faible (0,45/0,55). La seconde tendance est une diminution de l'exactitude de classification lorsque la distance inter-centile diminue illustrée par les classes «peupliers (*Populus*)» et «plantations». Dans le premier cas, le meilleur résultat est obtenu avec une distance inter-centile de 0,40/0,60 (0,32), alors que le coefficient de Kappa devient nul avec une distance de 0,42/0,58. Aux niveaux d'agrégation II et I, les résultats de classification varient moins abruptement en fonction de la distance inter-centile, mais plusieurs différences significatives sont manifestes. Par exemple, pour la classe «zones non forestières», le coefficient de Kappa est de 0,82 avec une distance inter-centile de 0,42/0,58 alors qu'il n'est que de 0,36 avec une distance de 0,36/0,64.

Ces résultats démontrent que l'exactitude de classification dépend étroitement de l'échelle et du critère utilisé pour l'agrégation des données spectrales. De plus, il n'existe pas une condition unique permettant d'obtenir la meilleure classification de chaque type de couvert et d'utilisation du sol à l'intérieur d'un schéma de classification. C'est une combinaison particulière de ces variables qui maximise la discrimination de chaque classe en fonction de ses caractéristiques spectrales et spatiales intrinsèques (tab. V).

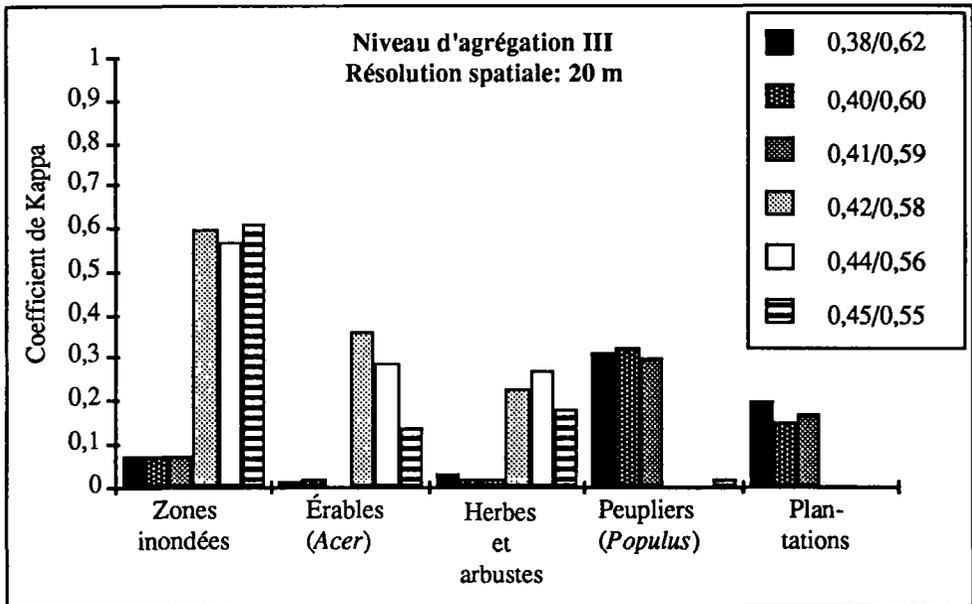


Figure 6. Impact de la variance interne des pixels d'entraînement, représentée par la distance inter-centile, sur les résultats de classification obtenus par classe au niveau d'agrégation III

Tableau V. Conditions pour obtenir l'exactitude de classification la plus élevée pour chacune des classes

Classes	Niveau d'agrég.	Résolution spatiale (m)	Distance inter-centile	Coefficient de Kappa
Zones inondées	III	20	0,45/0,55	0,60
Bouleaux (<i>Betula</i>)	III	30	0,36/0,64	0,24
Épinettes (<i>Picea</i>)	III	20	0,38/0,62	0,23
Érables (<i>Acer</i>)	III	5	0,42/0,58	0,42
Herbes et arbustes	III	5	0,42/0,58	0,38
Peupliers (<i>Populus</i>)	III	20	0,40/0,60	0,32
Plantations	III	30	0,43/0,57	0,25
Pins (<i>Pinus</i>)	III	30	0,45/0,55	0,11
Zones non forestières	II	5	0,42/0,58	0,82
Feuillus	II	5	0,44/0,56	0,46
Conifères	II	10	0,41/0,59	0,26
Forêt mixte	II	30	0,44/0,56	0,12
Forêt naturelle	I	20	0,31/0,69	0,39

Il est dès lors possible d'affirmer que l'inconsistance des résultats de classification d'images de télédétection est liée au fait que les concepts d'échelle et d'agrégation inhérents à toutes données de type spatial ne sont pas pris en considération lors de la cueillette et de l'analyse des images spectrales. En conséquence, l'exactitude de classification varie aléatoirement selon la résolution spatiale, le schéma de classification désigné et le critère de classification utilisé.

4. Discussion

Les modèles d'acquisition et de classification couramment utilisés en télédétection accordent très peu d'importance au concept d'espace. Cependant, il devient évident qu'une telle approche n'est pas adéquate puisque les données de télédétection sont recueillies et analysées dans l'espace géographique et que l'information qui peut en être extraite est intrinsèquement liée à l'échelle et au niveau d'agrégation de ces données. En conséquence, il est impératif de développer ce qu'il est convenu d'appeler une théorie spatiale en télédétection.

Développer une théorie spatiale consiste à recueillir et organiser de façon logique des observations concernant les propriétés spatiales permettant de définir les objets géographiques d'intérêt. Différentes études devraient être alors entreprises pour évaluer le contenu des images de télédétection à différentes résolutions en relation avec les caractéristiques spatiales des objets au sol.

Sur le plan méthodologique, puisque l'identification de différents objets géographiques requiert des échelles et des niveaux d'agrégation différents, l'approche conventionnelle en télédétection basée sur l'utilisation d'une résolution spatiale unique pour la classification de l'ensemble des composantes d'une scène devrait être abandonnée. Il est recommandé de développer ou d'améliorer de nouvelles approches de type hiérarchique, à échelles multiples, utilisant des règles de décision logiques combinant de l'information spectrale et spatiale.

5. Conclusion

À la recherche d'une explication théorique au problème de l'inconsistance chronique des résultats de classification automatisée d'images de télédétection, cette étude a démontré que l'échelle et l'agrégation spatiale des données ont un impact considérable sur le contenu des images et leur analyse subséquente en vue de discriminer différentes classes d'objets au sol.

Les valeurs de quatre statistiques descriptives, soit le test Wald-Wolfowitz, la variance, l'asymétrie et l'aplatissement, calculées sur des transects d'images, à 5 m, 10 m, 20 m et 30 m de résolution spatiale, représentant des types de couvert et d'utilisation du sol à trois niveaux d'agrégation sont grandement modifiées par le changement d'échelle et d'agrégation spatiale des données.

Les résultats de classification multibande de chaque classe varient aussi considérablement en fonction de la résolution spatiale des images et de la variance des pixels d'entraînement utilisée comme critère de partition des données spectrales. De plus, il n'existe pas une combinaison unique de ces variables permettant de maximiser l'exactitude de classification de l'ensemble des types de couvert et d'utilisation du sol compris à l'intérieur d'un même schéma de classification. Les résultats dépendent de la relation entre les caractéristiques spatiales des objets au sol à l'étude et de l'échelle et de l'agrégation des données de télédétection utilisées.

En conséquence, il est recommandé de développer une solide théorie spatiale en télédétection permettant de définir les objets géographiques à l'étude en tenant compte de leurs caractéristiques spatiales intrinsèques. Il est de plus suggéré d'améliorer les nouvelles approches d'analyse d'images utilisant des échelles multiples et des règles de décision logiques combinant de l'information spectrale et spatiale.

6. Références

- CONOVER, W. J. 1980. Practical nonparametric statistics. Wiley and Sons, 493 p.
- DUDLEY, G. 1991. Modifiable areal units and human geographical inquiry : an empirical investigation. Master Thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 225 p.
- FLEISS, J. L., COHEN, J. and EVERITT, B. S. 1969. Large sample standard errors of Kappa and weighted Kappa. Psychological Bulletin, vol. 72, n° 5, p. 323-327.
- FRANKLIN, S. E. and WILSON, B. A. 1991. Vegetation mapping and change detection using SPOT MLA and Landsat imagery in Kluane National Park. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 1, p. 2-17.
- GONG, P., MARCEAU, D. J. and HOWARTH, P. J. 1992. A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT HRV data. Remote Sensing of Environment, vol. 40, p. 137-151.
- LANDGREBE, D. A. 1980. The development of a spectral-spatial classifier for earth observational data. Pattern Recognition, vol. 12, p. 165-175.
- LATTY, R. S. and HOFFER, R. M. 1981. Computer-based classification accuracy due to the spatial resolution using per-point versus per-field classification techniques. Symposium of Machine Processing of Remotely Sensed Data, p. 384-392.

- LEE, T., RICHARDS, J. A. and SWAIN, P. H. 1987. Probabilistic and evidential approaches for multisource data analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-25, n° 3, p. 283-293.
- MARCEAU, D. J. 1992. The problem of scale and spatial aggregation in remote sensing : an empirical investigation using forestry data. Unpublished Ph. D. thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 180 p.
- MARCEAU, D. J., HOWARTH, P. J. et GRATTON, D. J. 1992. Étude du contenu spectral et spatial d'images numériques et de l'impact sur la classification automatisée d'un couvert forestier. *in* DUBOIS, J. M. et BLASCO, F. (éd.). *Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux*. Les Presses de l'Université du Québec, p. 365-384.
- OPENSHAW, S. 1981. Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. *L'Espace géographique*, n° 1, p. 15-24.
- OPENSHAW, S. 1984a. The modifiable areal unit problem. *Concepts and techniques in modern geography (CATMOG)*, n° 38, 40 p.
- OPENSHAW, S. 1984b. Ecological fallacies and the analysis of areal census data. *Environment and Planning A*, vol. 16, p. 17-31.
- ROSENFELD, G. H. and FITZPATRICK-LINS, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, n° 2, p. 223-227.
- TON, J., STICKLEN, J. and JAIN, A. K. 1991. Knowledge-based segmentation of Landsat images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, n° 2, p. 222-231.
- WHARTON, S. W. 1982. A contextual classification method for recognizing land use patterns in high resolution remotely sensed data. *Pattern Recognition*, vol. 15, n° 4, p. 317-324.
- YULE, G. U. and KENDALL, M. G. 1950. *An introduction to the theory of statistics*. Griffin, London.

28

Connexion directionnelle de contours

JEAN-FRANÇOIS PARROT* et HIND TAUD**

**Département de géotectonique, Université Paris VI, 4, place Jussieu, 75252 Paris, France, et ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

***Université Paris VI et Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Université Mohammed V, rue Ibn Battouta, Rabat-Agdal, Maroc*

Résumé

La segmentation de contours élimine fréquemment des portions de contour créant des discontinuités plus ou moins importantes que la méthodologie proposée ici peut faire disparaître en connectant les extrémités des éléments de contours selon des critères directionnels. Les contours ainsi reconstitués peuvent être analysés dans leur intégralité par une méthode de reconnaissance de formes, réduisant d'autant le nombre d'éléments traités, ou bien fournir des documents où les traits structuraux ne présentent pas de discontinuités. Un suivi de contour préalable tient compte des croisements et produit des données relatives à la position de tous les pixels constituant chaque élément de contour. Le sens de la direction de chacune des extrémités est calculé en fonction de la position du pixel extrême et de celle d'un pixel voisin. La position relative du pixel voisin dépend de la distance choisie pour définir la direction. L'orientation de toutes les extrémités étant définie, chaque extrémité est jointe aux extrémités voisines comprises dans une distance donnée par un vecteur dont on calcule l'orientation. La connexion est effectuée si l'orientation de l'un de ces vecteurs est voisine de l'orientation de l'extrémité traitée. Les exemples choisis illustrent les possibilités offertes par l'algorithme dans l'étude des structures linéaires, des structures circulaires et des parcellaires.

1. Introduction

Les contours extraits à partir de données numériques par des méthodes classiques de segmentation de contours (ROSENFELD and KAK, 1982), sont généralement tronçonnés en éléments disjoints qu'il convient de connecter si l'on désire appréhender un contour dans sa quasi-intégralité.

Les algorithmes de reconstitution font souvent partie intégrante de la segmentation de contours (GONZALES and WINTZ, 1987). Ils sont généralement basés sur l'application de filtres et la combinaison des informations qu'ils fournissent, ou sur l'application de la transformée de Hough, et concernent des images multi-niveaux. Ils reconstituent les contours, mais ils présentent parfois l'inconvénient de laisser subsister des discontinuités qui limitent les possibilités d'analyse qu'offre la reconnaissance de formes.

La méthodologie que nous proposons reconstitue les contours en prenant en compte l'orientation des extrémités des éléments constitutifs d'un même contour. Elle est basée sur un suivi de contour entraînant une caractérisation de chacun des pixels constitutifs de ces éléments et sur un tri des extrémités susceptibles d'être connectées en fonction de critères définis par l'utilisateur.

2. Méthodologie

La méthode comprend : a) suivi et individualisation des différents éléments de contour et calcul de la direction des extrémités de chacun des éléments de contour; b) connexion directionnelle.

Avant de décrire l'algorithme, il convient de définir les termes et les concepts employés.

2.1. Concepts et définition

Un contour C ou un élément C' de ce contour est une courbe formée par une succession de pixels de connectivité 8, le passage d'un pixel à son voisin pouvant se faire selon 8 directions. Les courbes traitées sont formées par des éléments rectilignes de 1 à n pixels dont les extrémités ne se touchent que par leurs coins (fig. 1). Chaque contour C ou élément de contour C' est un ensemble L_s de points successifs P_t formant le contour.

$$L_s = \{ P_t = (x_t, y_t); t = 1, \dots, m \}$$

où x_t, y_t : coordonnées de chaque pixel
et m : nombre total de pixels de la courbe.

Extrémités $Ec(i)$ d'un élément de contour : les éléments du tableau L_s étant mis en ordre, depuis le début jusqu'à la fin de la courbe, les deux extrémités $Ec(i)$ d'un élément de contour C' correspondent respectivement au premier ou au dernier pixel du tableau L_s , à savoir les points P_1 et P_m de ce tableau. Les extrémités $Ec(i)$ rencontrées dans l'ensemble de l'image vont de $i = 1, \dots, q$, q étant le nombre total d'extrémités.

Segments terminaux : il s'agit de segments de courbe de $k+1$ pixels (k étant un entier défini par l'utilisateur), et dont les extrémités respectives sont P_1, P_{1+k} et P_m, P_{m-k} .

Direction $\theta(i)$ des extrémités : en considérant que la fin d'un segment terminal correspond à l'extrémité $Ec(i)$ à partir de laquelle il est défini, l'orientation $\theta(i)$ d'un segment terminal est définie par rapport à la direction des vecteurs $P_{1+k} P_1$ et $P_{m-k} P_m$. En fixant l'origine au nord

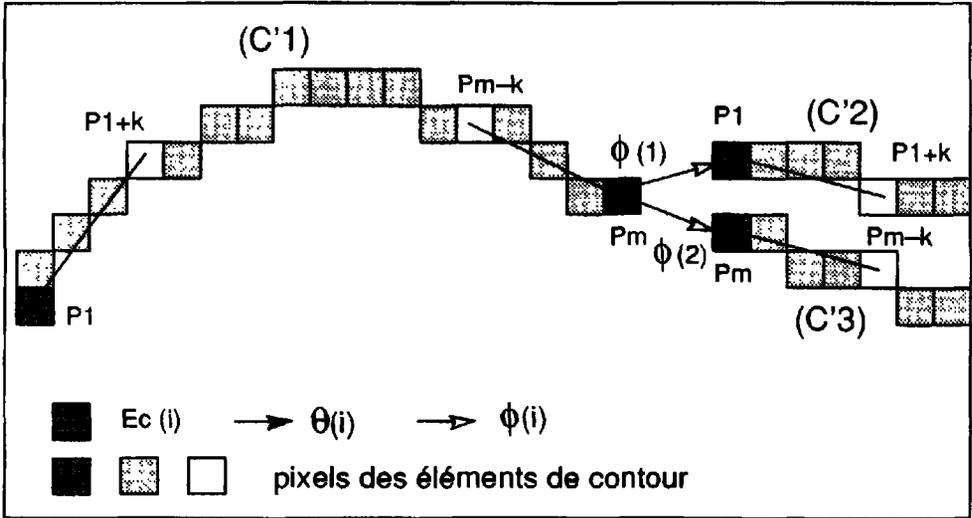


Figure 1. Exemple de connexion d'éléments de contour pour $\beta = 30$, $\lambda = 180$ et $\gamma = 0$; l'angle α défini par $\phi(2)$ étant plus petit que l'angle α défini par $\phi(1)$ entraîne la connexion des éléments (C'1) et (C'3)

de l'image, cette direction est calculée de 0° à 359° , dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre. $\theta(i)$ est calculé à partir de $\text{Arctg}(\Delta y/\Delta x)$, Δx et Δy étant les différences respectives entre les coordonnées de deux extrémités d'un segment terminal $[P_{1+k}, P_1]$ ou $[P_{m-k}, P_m]$.

Direction $\phi(i, j)$: c'est la direction du vecteur joignant une extrémité $E_c(i)$ à une extrémité $E_c(j)$. Le calcul et le référentiel sont identiques à ceux définis pour la direction $\theta(i)$.

Écart angulaire β : c'est une valeur angulaire permettant de définir, pour chaque $E_c(i)$, un intervalle de sélection I_s .

Distance $D(i, j)$: c'est la distance entre deux extrémités $E_c(i)$ et $E_c(j)$ calculée par :

$$D(i, j) = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2}$$

x_i , y_i et x_j , y_j étant les coordonnées respectives de ces deux extrémités.

Distance de sélection D_s : c'est la distance maximale définie par l'utilisateur fixant la limite pour connecter deux extrémités.

2.2. Procédure

Les traitements sont effectués sur une image binaire contenant l'ensemble des éléments de contour obtenus par diverses techniques de segmentation. Les portions de contour sont préalablement ramenées à des courbes de connectivité 8 (PARROT and TAUD, 1992). Des courbes répondant à ce critère peuvent par exemple être obtenues par l'algorithme de squelettisation proposé par O'GORMAN (1990), suivi par une élimination des pixels d'angle droit.

Les courbes sont individualisées une à une et une estimation de la direction de chacune des extrémités est faite, les éléments de courbe étant liés lorsque ces extrémités satisfont les critères requis. L'étape relative à l'individualisation reprend l'algorithme que nous avons développé (TAUD and PARROT, 1992; PARROT and TAUD, 1992) et dont le principe est succinctement rappelé.

2.2.1. Individualisation des contours et calcul de la direction des extrémités

Le suivi de contour par le mouvement d'une fenêtre glissante en codant le passage d'un pixel à l'autre selon 8 directions (FREEMAN, 1970) et l'application d'une décision lors d'un croisement de deux courbes, permettent d'individualiser une à une les courbes binaires rencontrées. Cet algorithme prend en compte aussi bien des courbes fermées que des courbes ouvertes. Par ailleurs, la prise de décision en cas de croisement s'appuie sur des conditions tenant compte des valeurs successives des codes de Freeman avant et après le croisement.

Lorsqu'une courbe est individualisée, les coordonnées des pixels sont provisoirement rapportées sur un tableau L_s à partir duquel sont effectués les calculs relatifs à la direction $\theta(i)$ des extrémités de la courbe (cf. ci-dessus). Notons que si le nombre de pixels d'un élément de contour C' est inférieur au nombre de pixels formant les segments terminaux, c'est-à-dire lorsque m est inférieur à $k+1$, cet élément est éliminé. Ceci présente l'avantage de nettoyer l'image en éliminant les pixels isolés et les petits éléments de contour. Par ailleurs, quand les coordonnées des extrémités $Ec(i)$ (P_1 et P_m) sont identiques, c'est-à-dire lorsque le contour est fermé, le calcul de la direction $\theta(i)$ des extrémités n'est pas effectué pour cet élément.

Les opérations de suivi de contour et les calculs des directions se poursuivent jusqu'à la dernière courbe que comprend l'image traitée.

À la fin de cette étape, on obtient un tableau T renfermant les q éléments retenus associant les positions $P(i)$ des extrémités et leurs orientations $\theta(i)$.

2.2.2. Connexion des extrémités

Les opérations concernant la connexion des extrémités s'appuient sur l'exploitation des données du tableau T , à savoir la position $P(i)$ des extrémités et la valeur en degrés de l'orientation $\theta(i)$ de ces extrémités.

Soit i allant de 1 à $q-1$, et j allant de $i+1$ à q , pour que deux extrémités $Ec(i)$ et $Ec(j)$ soient connectées, trois conditions doivent être remplies :

- condition 1 : $D(i,j) \leq D_s$, la distance $D(i,j)$ joignant deux extrémités doit être inférieure ou égale à la distance de sélection D_s ;

-condition 2 : $|\kappa(i,j) - \lambda| \leq \beta$, $\kappa(i,j)$ est l'angle décrit par les directions $\theta(i)$ et $\theta(j)$ et est calculé de la façon suivante : $\kappa(i,j) = |\theta(i) - \theta(j)|$, si $\kappa(i,j) \geq 180$, alors $\kappa(i,j) = |\kappa(i,j) - 360|$, λ peut prendre les valeurs 0, 90 ou 180 selon les cas à traiter (cf. plus loin);

-condition 3 : $|\alpha(i,j) - \gamma| \leq \beta$, l'angle $\alpha(i,j)$ est décrit par les directions $\theta(i)$ et $\phi(i,j)$, avec $\alpha(i,j) = |\theta(i) - \phi(i,j)|$, si $\alpha(i,j) \geq 180$, alors $\alpha(i,j) = |\alpha(i,j) - 360|$, γ peut prendre les valeurs 0 ou 90, voire d'autres valeurs (cf. plus loin).

Quand l'ensemble des données j a été traité, s'il existe parmi les extrémités $Ec(j)$ plusieurs candidats satisfaisant les trois conditions précédentes, seul est retenu celui dont la valeur $\alpha(i,j)$ est la plus faible. Ces extrémités $Ec(i)$ et $Ec(j)$ sont dans ce cas liées par une droite (fig. 1).

On passe ensuite à l'extrémité $Ec(i)$ suivante.

Cet algorithme général peut connecter différents types de contours. Quand il s'agit de joindre des éléments circulaires ou linéaires, la valeur λ est de 180, ce qui signifie que l'on compare la direction $\theta(i)$ à la direction correspondant au sens opposé de la direction $\theta(j)$, et la valeur γ est égale à 0, ce qui signifie que le vecteur $\phi(i,j)$ doit être plus ou moins dans le prolongement du vecteur $\theta(i)$, à l'écart angulaire β près. Dans le cas plus spécifique des parcellaires, les valeurs λ et γ diffèrent selon les cas de figure rencontrés.

2.3. Parcellaire

La jonction des contours dans le cas d'un parcellaire demande une adaptation spécifique de l'algorithme d'individualisation décrit précédemment, et comporte la prise en compte de plusieurs cas de connexion définis par les valeurs de λ et γ .

Si dans le cas général le suivi de contour prend une décision sur la direction à suivre en cas de croisement, ici le croisement est simplement considéré comme une extrémité de segment non soumise au calcul des paramètres caractéristiques des extrémités. Ainsi seules les «véritables» extrémités sont prises en compte.

On retrouve en fin d'individualisation un tableau T consignnant la position x,y des extrémités et leurs directions respectives.

La phase relative à la connexion des extrémités répertoriées obéit aux conditions suivantes :

- condition 1 : $D(i,j) \leq D_s$
- condition 2 : $|\kappa(i,j) - \lambda| \leq \beta$
- condition 3 : $|\alpha(i,j) - \gamma| \leq \beta$

Notons qu'il existe 5 cas de figure définissant les valeurs respectives de λ et γ pour des rectangles (fig. 2) :

1) connexion de deux extrémités de même sens :

$\lambda = 0$ et $\gamma = 90$, $\phi(i,j)$ étant perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2A);

2) connexion de deux extrémités perpendiculaires : il existe deux cas :

$\lambda = 90$ et $\gamma = 0$ quand $\phi(i,j)$ est dans le prolongement de $\theta(i)$; (fig. 2B);

$\lambda = 90$ et $\gamma = 90$ quand $\phi(i,j)$ est perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2C);

3) connexion de deux extrémités de sens opposé : il existe deux cas :

$\lambda = 180$ et $\gamma = 0$ quand $\phi(i,j)$ est dans le prolongement de $\theta(i)$; (fig. 2D);

$\lambda = 180$ et $\gamma = 90$ quand $\phi(i,j)$ est perpendiculaire à $\theta(i)$; (fig. 2E).

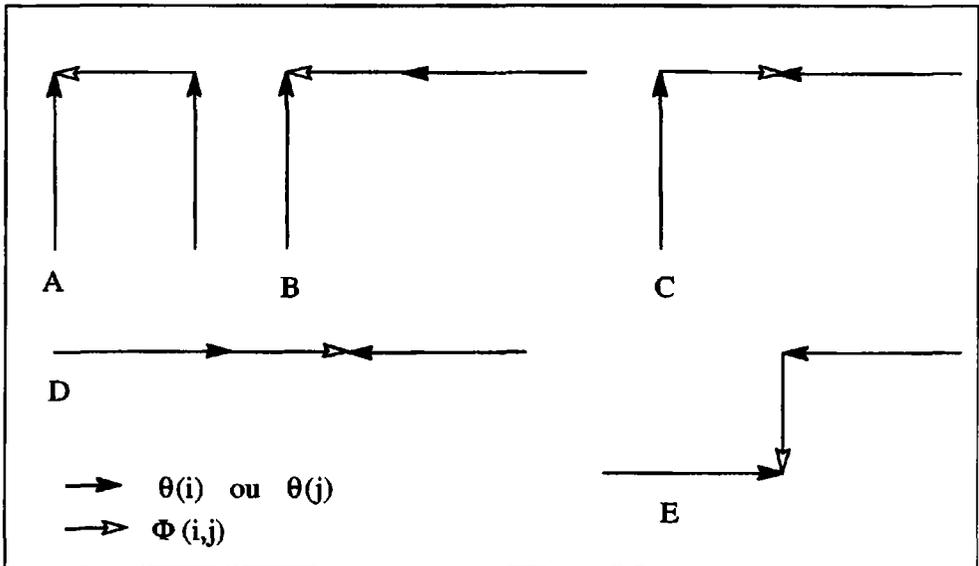


Figure 2. Les cinq cas de figure définissant les valeurs respectives de λ et γ pour des parcellaires rectangles : A) $\lambda = 0$, $\gamma = 90$; B) $\lambda = 90$ et $\gamma = 0$; C) $\lambda = 90$ et $\gamma = 90$; D) $\lambda = 180$ et $\gamma = 0$; E) $\lambda = 180$ et $\gamma = 90$

S'il existe plusieurs extrémités satisfaisant les trois conditions précédentes pour un même cas de figure, seule est retenue celle dont la valeur $\alpha(i,j)$ est la plus faible.

Notons que l'algorithme est applicable à des parallélogrammes en estimant la valeur des deux angles complémentaires qui définissent ces parallélogrammes, la valeur de γ fixée à 90 dans le cas des rectangles, prenant alors successivement la valeur de ces deux angles (par exemple 60 et 120).

3. Exemples de traitements

Les traitements destinés à illustrer les résultats fournis par la méthode ont été appliqués, dans un premier temps, à des images de courbes numérisées représentant des cas théoriques d'éléments de contour à connecter. Trois cas ont été retenus : des éléments de contours circulaires (fig. 3a et 3b), des éléments de contours linéaires (fig. 3c et 3d) et des éléments de contours formant un parcellaire (fig. 3e et 3f). Chaque couple de figures illustre les contours avant et après traitement.

Par ailleurs, la méthode a été également appliquée à des images de contours issues soit de données satellitaires, soit des produits dérivés de modèle numérique de terrain. Ces applications entrent dans le cadre d'étude thématique concernant des thèmes géomorphologiques et structuraux. L'exemple reporté dans cet article (fig. 4a et 4b) est issu d'une étude portant sur l'orientation d'éléments structuraux dans un ensemble dunaire à l'aide d'une technique de reconnaissance de formes (TAUD et PARROT, 1993).

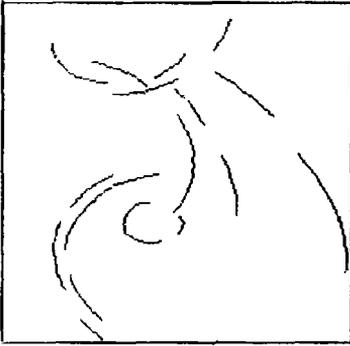
L'algorithme a été développé en Fortran 77 sur Domain HP Apollo, et figure dans le logiciel ADONIS (PARROT et TAUD, 1991). Le temps de calcul dépend du nombre de contours à traiter : à titre d'exemple, pour un traitement en mode graphique, quelques secondes sont nécessaires pour chacune des trois images numérisées de 200 x 200 pixels.

4. Discussion et conclusion

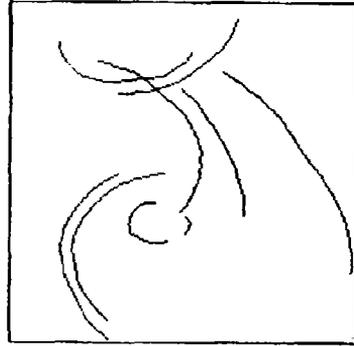
Les premiers résultats obtenus à l'aide de la méthodologie de connexion directionnelle se révèlent satisfaisants. Les éléments de contour sont connectés en fonction d'une distance entre extrémités et d'un écart angulaire entre la direction que présente l'extrémité d'un élément de contour et le vecteur joignant cette extrémité avec celles qui l'entourent. Cette distance D_s dite distance de sélection et la valeur de l'écart angulaire β sont définies par l'utilisateur, ce qui permet de modifier les critères de connexion, voire de réitérer le traitement sur l'image obtenue en modifiant ces critères.

Si cette procédure présente l'avantage de connecter les éléments de contour, en revanche elle s'appuie en partie sur des critères de sélection définis par le thématicien. La recherche d'une procédure non supervisée est envisageable, notamment pour la connexion des éléments circulaires et linéaires. Elle passe notamment par la définition automatique de l'écart angulaire β et du nombre k de pixels définissant la longueur d'un segment terminal.

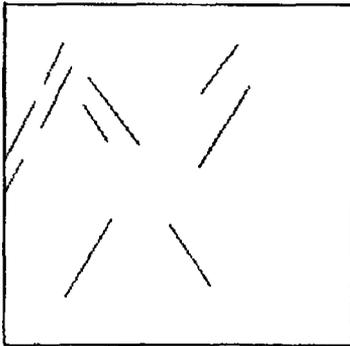
Par ailleurs, pour des contours non linéaires, quand la distance séparant deux extrémités est importante, la connexion par des segments de droite tend à détériorer la forme originale du contour. Il convient alors dans ce cas de diminuer la valeur attribuée à la distance de sélection D_s .



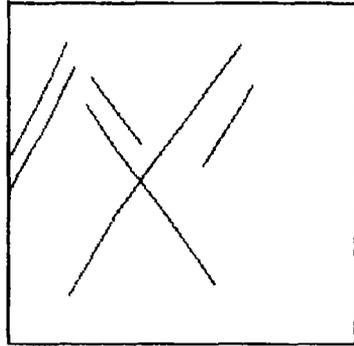
A



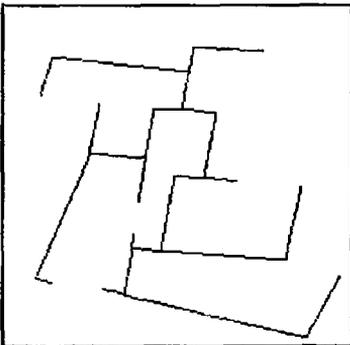
B



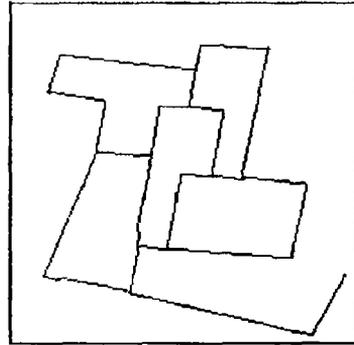
C



D



E



F

Figure 3. Trois exemples de connexion de contours. A et B : contours circulaires; C et D : contours linéaires; E et F : parcelle illustrant tous les cas de figure

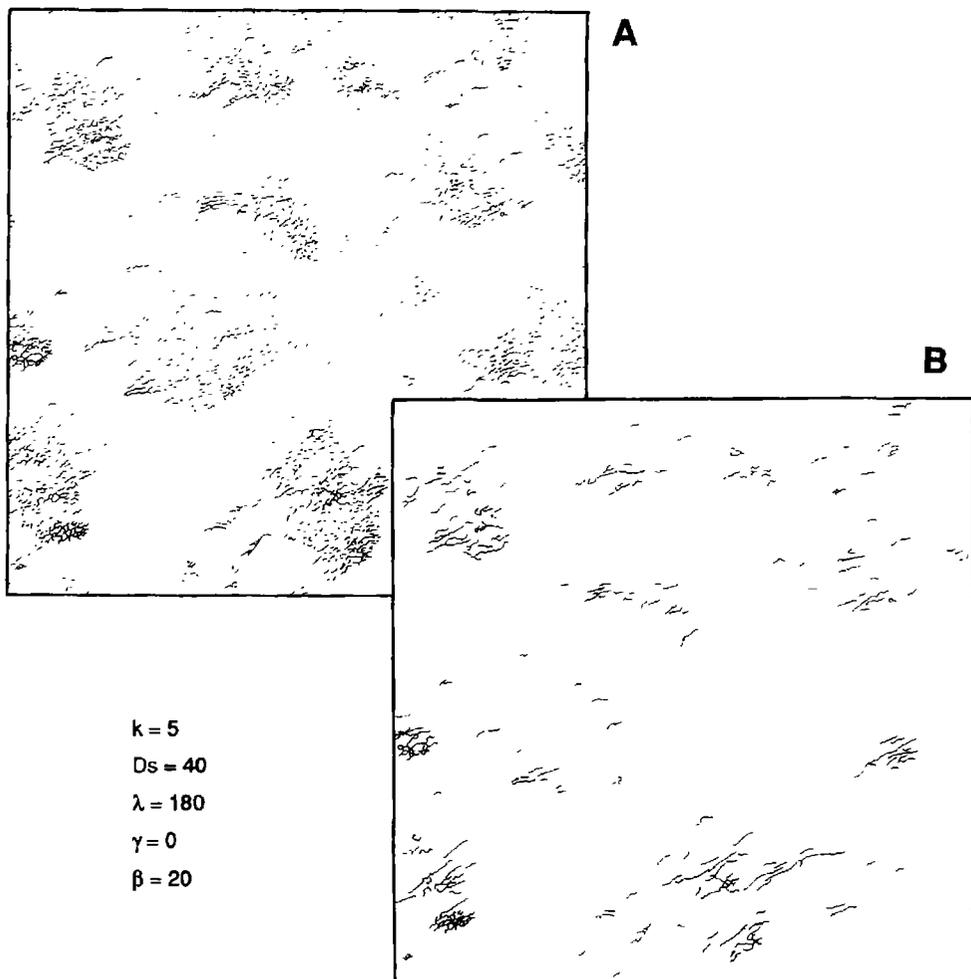


Figure 4. Exemple de connexion sur des contours provenant d'une image SPOT entrant dans le cadre de l'étude structurale du Grand Erg Occidental (tiré de TAUD et PARROT, 1992b)

La connexion directionnelle de contours représente une étape primordiale pour une étude faisant appel à la reconnaissance de formes. Dans le cas des parcellaires, elle ouvre par exemple la possibilité d'étudier statistiquement les surfaces définies par les contours fermés de chaque parcelle.

6. Références

FREEMAN, H. 1970. Boundary encoding and processing. *in* B. S. Lipkin and A. Rosenfeld (Eds.) *Picture processing and psychopictorics*, Academic Press, New York, p. 241-266.

- GONZALES, R. C. and WINTZ, P. 1987. Digital image processing. Addison-Wesley Publishing Compagny, 2nd edition, Reading, Massachussets, 523 p.
- O'GORMAN, L. 1990. K x K thinning. Computer vision, Graphics, and Image processing, n° 51, p. 195-215.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1991. Logiciel ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures). Laboratoire de télédétection, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 62 p.
- PARROT, J.-F. and TAUD, H. 1992. Detection and classification of circular structures on SPOT images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, n° 5.
- ROSENFELD, A. and KAK, C. 1982. Digital picture processing. Academic Press, New-York/London, 2nd edition, 2 vol., 435 + 349 p.
- TAUD, H. and PARROT, J.-F. 1992. Detection of circular structures on satellite images. International Journal of Remote Sensing, vol. 13, n° 2, p. 319-335.
- TAUD, H. et PARROT, J.-F. 1993. Reconnaissance de formes appliquée aux systèmes dunaires. *in* Dubois, J.-M., Cavayas, F. et Lafrance, P. Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Quatrième journées scientifiques du Réseau de télédétection de l'UREF, 21-23 octobre 1991, Montréal, Québec, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec.

29

Reconnaissance de formes appliquée aux systèmes dunaires

HIND TAUD* et JEAN-FRANÇOIS PARROT**

**Université Paris VI et Laboratoire d'électronique et de traitement du signal, Université Mohammed V, rue Ibn Battouta, Rabat-Agdal, Maroc*

***Département de géotectonique, Université Paris VI, 4, place Jussieu, 75252 Paris, France, et ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy, France*

Résumé

Les données spectrales d'une sous-image HRV de SPOT centrée sur les massifs de dunes du Grand Erg Occidental (Algérie) ont été soumises à une méthode de reconnaissance automatique de formes, en vue de différencier et de caractériser les éléments constitutifs de ces massifs. Les massifs dunaires de la zone étudiée comprennent essentiellement de grands dômes de sables grossiers recouverts par de petites dunes à sable vif et par des dépressions sub-circulaires provenant de la déflation éolienne. La méthode ADONIS, récemment développée par les auteurs, a été adaptée pour répondre aux problèmes particuliers que présentait la zone d'étude. Cette méthode repose sur une étude de contours obtenus à partir des données spectrales et texturales; elle fournit, pour chacun de ces contours, des paramètres discriminants de «contour» et de «surface». L'analyse automatique de l'ensemble des paramètres discriminants montre que les formes circulaires dues à la déflation éolienne, sont caractérisées par des contours présentant une direction privilégiée de la normale à la corde vers le NNO. Les petites dunes à sable vif recouvrant les dômes dunaires sont orientées OSO-ENE.

1. Introduction

La méthode de reconnaissance automatique de formes ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures) mise au point antérieurement (PARROT et TAUD, 1991 et 1992; TAUD et PARROT, 1991 et 1992) permet de détecter et d'analyser les structures sub-circulaires que comportent les images satellitaires à l'aide de paramètres discriminants. Différents thèmes ont déjà fait l'objet de son utilisation.

En vue de valider la méthode ADONIS par une nouvelle application, la présente étude porte sur une sous-image panchromatique HRV de SPOT centrée sur les massifs de dunes du Grand Erg Occidental (Algérie).

Les éléments d'information non subjectifs que fournit la méthode peuvent apporter à l'étude thématique de ces massifs dunaires des indications sur la forme et la nature des traits structuraux qui les caractérisent.

2. Zone d'étude et principales formations

La sous-image HRV étudiée (fig. 1) se situe dans le NE du Grand Erg Occidental localisé au NO du Sahara (fig. 2a). Cette région décrite par CALLOT (1991), localisée à l'ouest de Gardhia, ne comporte pas d'espaces interdunaires libres de sable et les grandes dunes sont constituées par des sables grossiers formant des dômes circulaires ou elliptiques (fig. 2b). Des dunes vives de sable fin se surimposent sur ces dômes; elles sont de petite dimension et présentent une forme de «sifs» (dune en forme de sabre); parfois jointives, elles constituent un «aklé» (groupement de dunes d'aspect réticulé). Les couloirs interdunaires présentent une couverture sableuse grossière modelée par des creusements dus à la déflation éolienne; ces «chaudrons» circulaires de dimension hectométrique sont nombreux et parfois jointifs; ils présentent une structure dissymétrique : leur versant nord étant toujours plus pentu que le versant sud.

3. Rappels sur la méthode ADONIS

La méthode ADONIS comporte trois étapes : a) une mise en évidence de contours significatifs sur l'image; b) la détection des centres et rayons des éléments sub-circulaires contenus dans ces contours; c) la recherche de paramètres discriminants associés à ces contours, voire à la surface décrite par ces contours.

3.1. Mise en évidence des contours significatifs

L'image des données brutes est traitée par un filtre passe-bas de taille 3 par 3 pixels réitéré jusqu'à la stabilité complète de l'image. Le seuillage des valeurs de l'histogramme de l'image lissée se fait à partir d'un seuil de réflectance variable de valeur N, tel que le nombre de pixels dont les valeurs sont inférieures ou égales à ce seuil corresponde à un pourcentage P du nombre total de pixels que comprend l'image entière. En incrémentant par exemple le pourcentage P de 10 en 10, on obtient 9 images binaires. Ces images binaires sont ensuite soumises à un

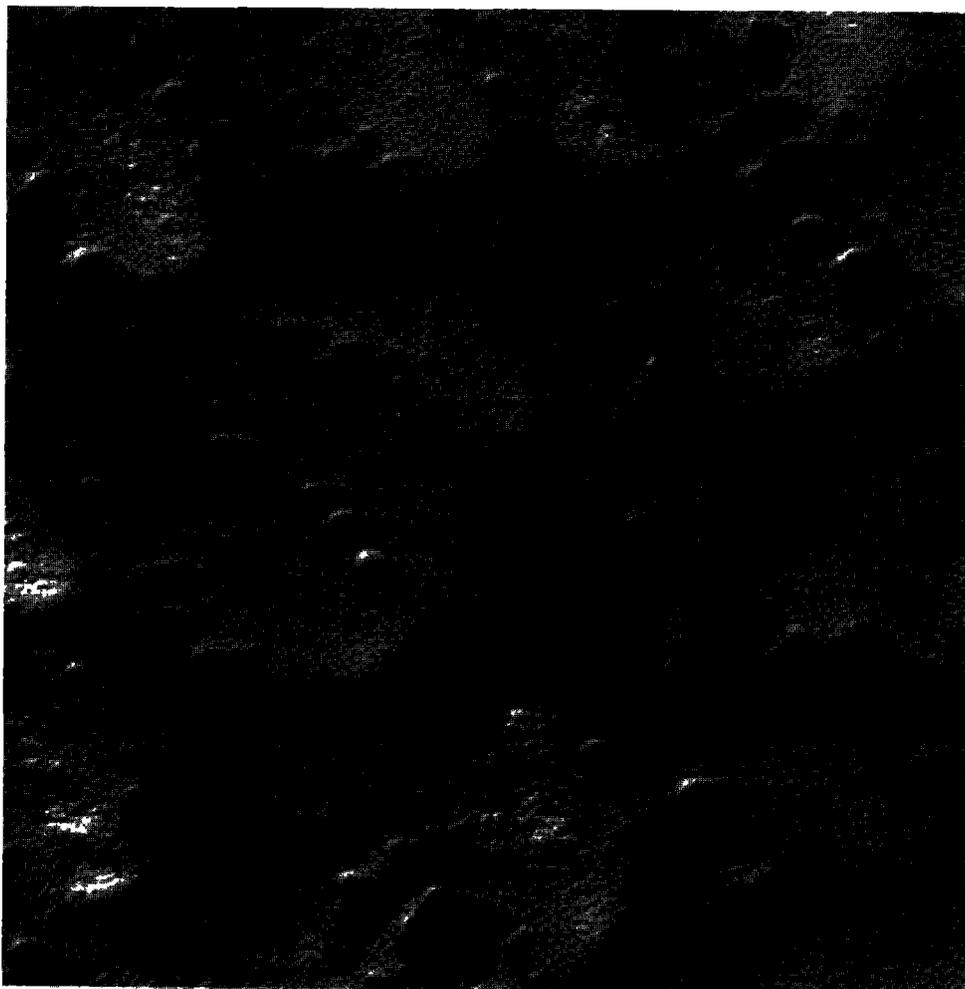
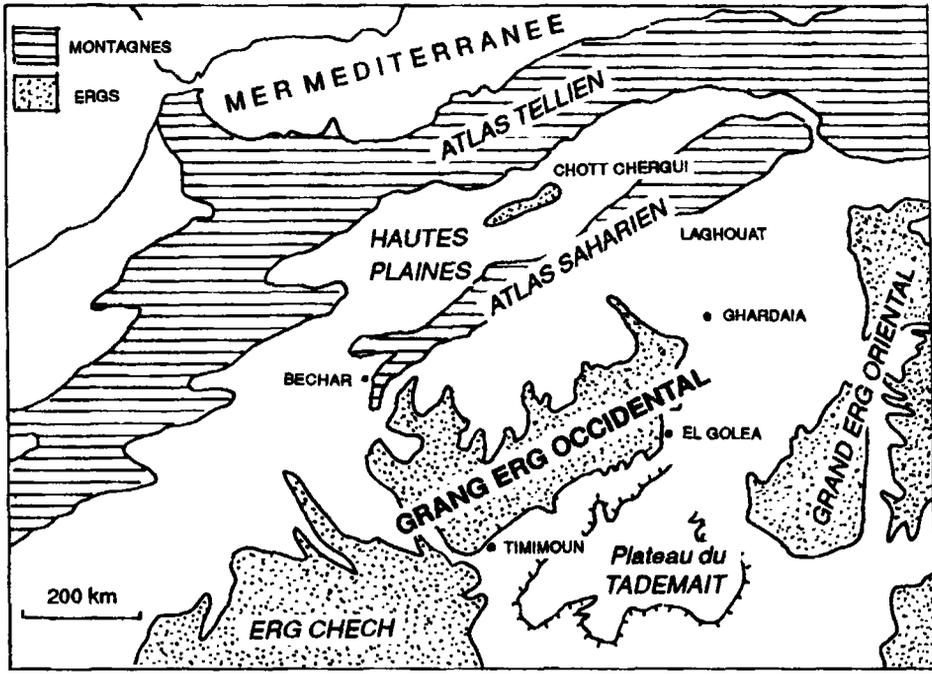


Figure 1. Sous-image panchromatique HRV de SPOT de la région étudiée (800 par 800 pixels)

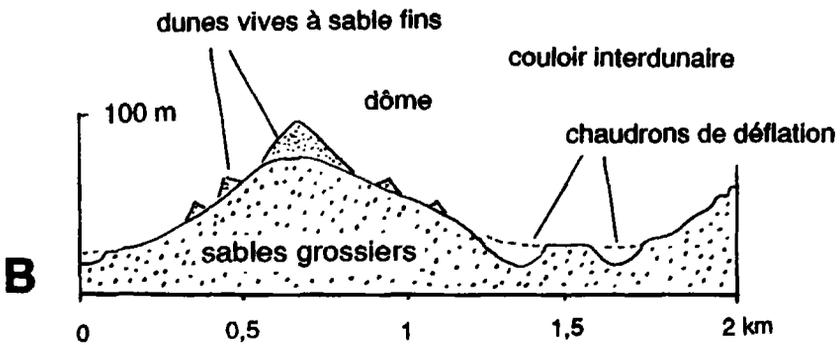
lissage majoritaire (GOLDBERG *et al.* 1975, *in* SCHOWENGERDT, 1983) réitéré jusqu'à stabilité complète de l'image. Enfin, les limites des différentes formes sont tracées en analysant les sauts de valeur entre deux pixels voisins.

3.2. Détection et individualisation des éléments sub-circulaires

C'est sur les contours définis précédemment que s'appliquent les différents stades de traitement que comporte la détection des éléments sub-circulaires. Les contours sont individualisés un à un par un suivi de contour basé sur le code de FREEMAN (1970). L'algorithme développé permet de prendre une décision sur la direction à suivre, lorsqu'un croisement se présente. Chaque contour est segmenté en éléments de contour lorsqu'un changement de direction de courbure aux points critiques du contour est observé.



A



B

Figure 2. Différentes formations dunaires du Grand Erg Occidental (tirée de CALLOT, 1991); a : carte schématique de la région; b : les deux types de formations

La détection des éléments sub-circulaires dans la méthode ADONIS est basée sur une version de la transformée de Hough. On obtient deux valeurs : la position du centre et la valeur du rayon, à partir desquelles est défini le cercle référentiel (CR). Une modification a été apportée dans cet article, entraînant un gain important en temps de calcul. L'approximation des éléments de contour en éléments circulaires est faite à partir de la méthode des moindres carrés (THOMAS and CHAN, 1989).

3.3. Paramètres discriminants

Des paramètres discriminants, décrivant la forme du contour et la nature de la surface inscrite, caractérisent chaque structure. L'analyse de ces paramètres permet de distinguer les différentes familles structurales.

Les paramètres de «surface» définis par les valeurs rencontrées dans les surfaces qu'engendrent les éléments sub-circulaires sur des plans de toute nature (données satellitaires, indices divers, produits dérivés du modèle numérique de terrain, etc.) ne sont pas utilisés dans le cas présent, et seuls les paramètres de «contour» suivants sont pris en compte :

R : rayon du cercle référentiel;

CI : coefficient d'intersection représentant le pourcentage qui définit l'appartenance des pixels du contour au cercle référentiel; plus ce coefficient est élevé, plus le contour décrit un cercle ou une portion de cercle parfait;

CC : le coefficient de corde appréhende la forme du contour qui peut être inférieure ou supérieure au demi-cercle;

DNC : coefficient de symétrie qui rend compte de la symétrie du contour par rapport à la normale à la corde passant par le centre du CR;

DIR : direction de la normale à la corde recoupant la structure détectée;

OCC : nombre de contours ayant des valeurs du rayon et du centre qui, dans un intervalle de confiance, peuvent correspondre à une même structure.

4. Application à la zone d'étude

La mise en évidence des éléments structuraux que comporte une image satellitaire dépend étroitement de la texture rencontrée. Les structures peuvent correspondre soit à des limites entre plages à luminance plus ou moins homogène, soit à des courbes de quelques pixels d'épaisseur pouvant aller, lorsqu'ils sont nombreux, jusqu'à former des plages à luminance hétérogène.

Sur l'image HRV panchromatique étudiée (fig. 1), les «chaudrons» dus à la déflation éolienne présentent des formes sub-circulaires dont les luminances exprimées en comptes numériques sont comprises entre 70 et 80 (pic à 76). Les dômes dunaires servant de substratum aux «sifs» dessinent des formes plus grandes et plus elliptiques de luminance moyenne plus élevée (80 à 110, pic à 104) et sont moins homogènes.

La procédure de mise en évidence des contours décrite dans la méthode ADONIS lisse l'image des données brutes par l'application d'un filtre itératif passe-bas qui rend homogènes les plages correspondant aux dômes dunaires et aux «chaudrons», et fait ainsi disparaître les traits structuraux que définissent les «sifs» recouvrant les dômes (fig. 3a).

La méthode ADONIS peut s'appliquer dans son intégralité à la recherche d'informations structurales sur les contours que décrivent les «chaudrons», voire les dômes dunaires.

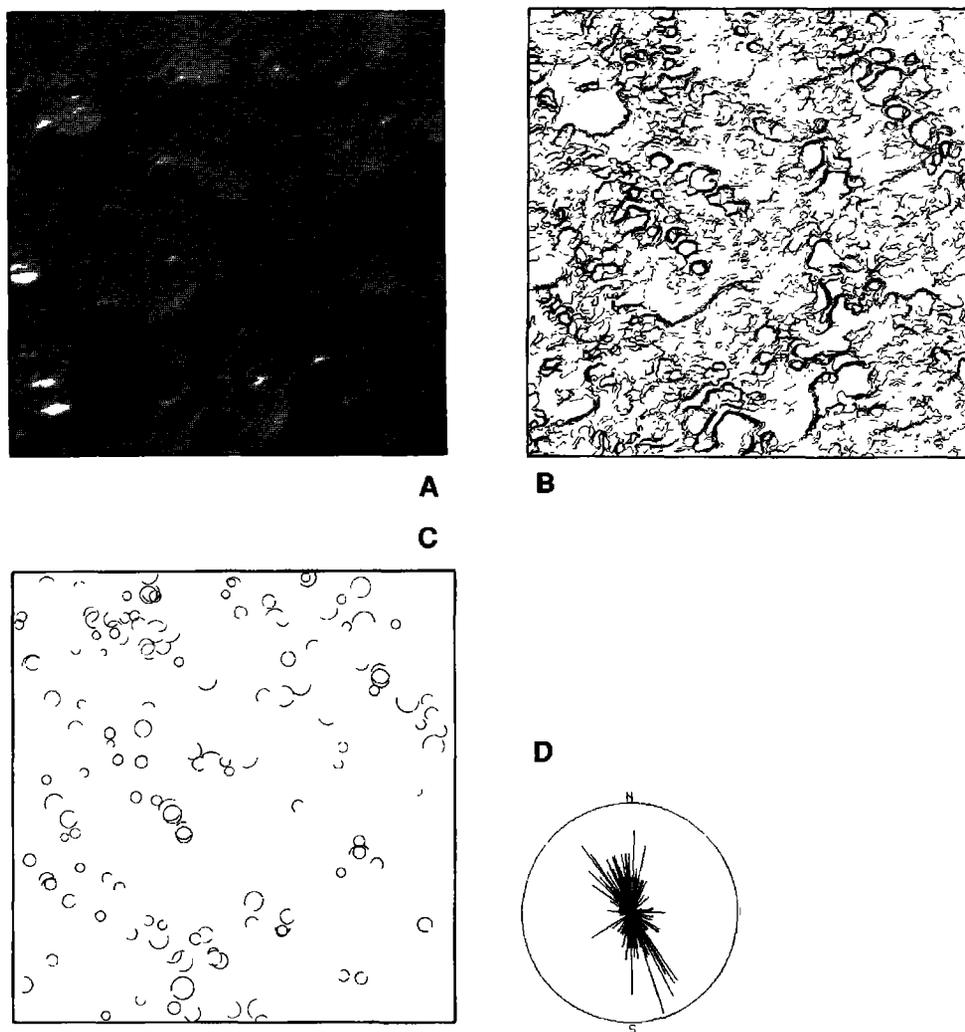


Figure 3. Traitements sur les «chaudrons»; a : résultat de l'itération d'un filtre passe-bas sur l'image; b : ensembles des structures détectées; c : sélection des structures semi-circulaires par les paramètres discriminants; d : rosace des directions des normales à la corde

En revanche, la mise en évidence des contours provenant des «sifs» nécessite un traitement spécifique. L'image est soumise à un opérateur de texture (HARALICK, 1979). L'image résultante est seuillée de manière à faire ressortir les traits structuraux correspondant à ces dunes vives (fig. 4a). L'image binaire est ensuite squelettisée et les éléments de contour obtenus sont connectés selon la méthode proposée par PARROT et TAUD (1993) en vue d'obtenir des contours significatifs (fig. 4b). Les autres étapes de la méthode ADONIS s'appliquent sans modification sur les contours ainsi obtenus.

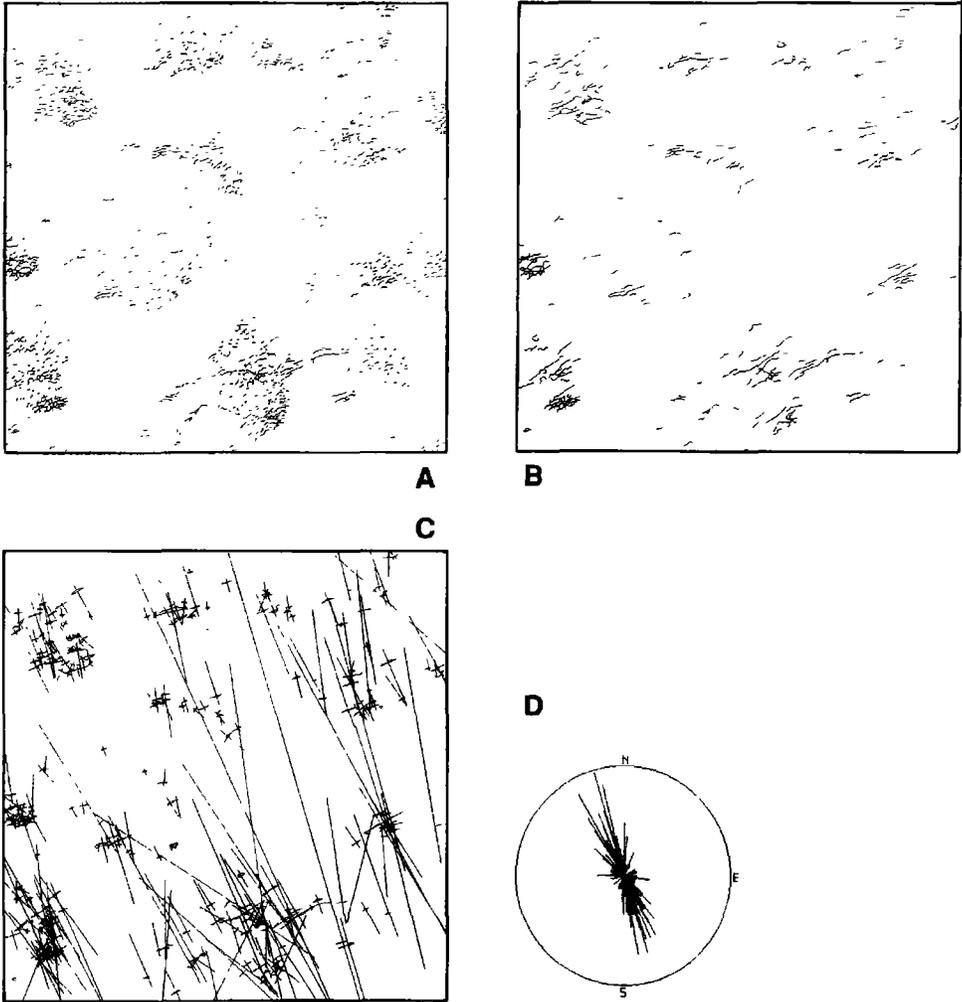


Figure 4. Traitements sur les «sifs»; a : application sur l'image d'un filtre d'Haralik; b : connexion des contours appliquée à l'image 3a; c : application de la méthode ADONIS, visualisation des contours, des cordes et des normales à la corde; d : rosace des directions des normales à la corde

5. Résultats et discussion

L'image des données brutes ayant été soumise à deux traitements différents de mise en évidence des contours, il convient de dissocier les résultats qu'entraîne l'application de la méthode ADONIS aux contours issus de ces traitements.

5.1. Contours des «chaudrons» et des dômes dunaires

Un ensemble de 3193 structures élémentaires est détecté (fig. 3b). Ce nombre relativement élevé provient d'une part du seuillage en 9 images binaires et d'autre part de l'irrégularité des contours scindés en de nombreux éléments par l'algorithme. Les traits structuraux recherchés sont triés, à partir de cet ensemble, à l'aide des paramètres discriminants décrits ci-dessus.

5.1.1. Les «chaudrons»

Les «chaudrons» de déflation ont un rayon compris entre 50 et 200 mètres, soit à l'échelle HRV panchromatique entre 5 et 20 pixels et la forme de la courbe que dessine leur bord est régulière et sub-symétrique. Par ailleurs, la différence de luminance entre les «chaudrons» et leur environnement étant importante, les plages correspondant aux «chaudrons» se maintiennent sans grande modification de forme sur plusieurs des 9 images binaires. On peut ainsi utiliser la notion d'occurrence OCC en fixant l'intervalle de confiance à 5. La recherche des «chaudrons» à partir de leurs contours utilise les paramètres discriminants suivants :

- rayon R : 5-20;
- coefficient d'intersection CI : 20-100;
- coefficient de symétrie DNC : 0-30;
- occurrence OCC : ≥ 3 .

168 structures semi-circulaires répondant aux critères ci-dessus sont détectées (fig. 3c). La rosace des directions des normales à la corde des arcs de cercle (fig. 3d) dessine un axe NNE-SSO présentant une direction privilégiée vers le NNE traduisant la dissymétrie des zones de déflation éolienne.

5.1.2. Les dômes

Les dômes décrivent des structures circulaires de grand rayon ($R \geq 50$). Toutefois, la nature irrégulière de leurs contours avant et après lissage, ne permet pas de détecter des limites continues et représentatives de ces dômes. Les contours ayant un rayon de plus de 50 pixels ne mettent en fait en évidence que les limites des couloirs inter-dunaires.

5.2. Contours provenant des sifs

Pour les sifs, 276 structures sont mises en évidence sur l'image binaire des contours. Ces structures ainsi que les normales à la corde sont reportées sur la figure 4c. Le nombre relativement faible de ces structures s'explique par la difficulté à faire ressortir ces formes, par l'absence de redoublement éventuel des structures consécutif au seuillage en tranches de luminance utilisé dans le cas des chaudrons, et par le nettoyage qu'opère la connexion directionnelle.

Dans ce cas, la rosace des directions de la normale à la corde (fig. 4d) met en relief l'orientation OSO-ENE des sifs, peu de sifs présentant une orientation différente. La direction des normales à la corde est donc similaire à celle qu'indiquent les «chaudrons».

6. Conclusion

La détection automatique des traits structuraux sur une sous-image HRV de 800 par 800 pixels couvrant une partie de la région NE du Grand Erg Occidental, met en évidence l'orientation

privéligiée que présentent les deux différents types de formation rencontrés. Les résultats obtenus soulignent la similitude de ces directions, et apportent au thématicien un élément d'information non supervisé permettant de tracer l'esquisse structurale de la région, voire de définir les facteurs génétiques.

7. Remerciements

Ce travail représente une partie des résultats acquis lors du stage effectué au Laboratoire de géologie géomorphologie structurale et télédétection, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, dans le cadre de la bourse d'excellence de l'UREF attribuée à Hind Taud. Par ailleurs, nous remercions Monsieur Yan Callot qui a bien voulu nous fournir l'image sur laquelle nous avons testé la méthode, en vue d'élargir ultérieurement la région étudiée dans le cadre d'une recherche thématique couvrant l'Erg Occidental et associant Messieurs Y. Callot (Paris VI), A. Simonin (Imagéo) et Madame C. Méring (ORSTOM).

8. Références

- CALLOT, Y. 1991. Histoire d'un massif de dunes, le Grand Erg Occidental (Algérie). *Sécheresse*, n° 2, p. 26-39.
- FREEMAN, H. 1970. Boundary encoding and processing. *in* B. S. Lipkin and A. Rosenfeld (eds.) *Picture processing and Psychopictorics*. Academic Press, New York, p. 241-266.
- HARALICK, R. M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, n° 5, p. 786-804.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1991. Logiciel ADONIS (Automatic Detection Of Numerical Image Structures). Laboratoire de télédétection, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 62 p.
- PARROT, J.-F. and TAUD, H. 1992. Detection and classification of circular structures on SPOT images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 5.
- PARROT, J.-F. et TAUD, H. 1993. Connexion directionnelle de contours. *in* Dubois, J.-M., Cavayas, F. et Lafrance, P. *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Quatrième journées scientifiques du Réseau de télédétection de l'UREF, 21-23 octobre 1991, Montréal, Québec, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec.
- SCHOWENGERDT, R. A. 1983. Techniques for image processing and classification in Remote Sensing. Academic Press, London/New-York, 249 p.
- TAUD, H. et PARROT, J.-F. 1991. Analyse numérique des formes sub-circulaires sur les images satellitaires. *in* Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales, 2^{es} Journées de télédétection, Bondy, Éditions de l'ORSTOM, Collection Colloques et séminaires, Paris, p. 293-329.
- TAUD, H. and PARROT, J.-F. 1992. Detection of circular structures on satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n° 2, p. 319-335.
- THOMAS, S. M. and CHAN, Y. T. 1989. A simple approach for the estimation of circular arc center and its radius. *Computer Vision, Graphics and Images Processing*, n° 45, p. 362-370.

30

Apport de l'imagerie satellitaire et d'un modèle numérique de terrain à l'étude géomorphologique de la dépression d'Aubel, Pays de Herve, Belgique

LUC WILLEMS*, JEAN-PAUL DONNAY**, MARC BINARD**, PHILIPPE
TREFOIS*** et ANDRÉ OZER*

**Géomorphologie et géologie du Quaternaire, Université de Liège, 7, place du 20-Août,
4000 Liège, Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-46; télécopieur : (32) 41-66-57-00*

***SURFACES, Université de Liège, 7, place du 20-Août (B. A1-12), 4000 Liège,
Belgique; téléphone : (32) 41-66-54-24; télécopieur : (32) 41-66-56-93*

****Département de géologie et minéralogie, Musée royal de l'Afrique Centrale,
Leuvensesteenweg, 13, 3080 Tervuren, Belgique; téléphone : (32) 2-769-54-53;
télécopieur : (32) 2-767-02-42*

Résumé

À une douzaine de kilomètres à l'est de Liège (Belgique), s'ouvre une dépression subcirculaire d'environ 8 km de diamètre dont la genèse pose toujours une énigme. Le développement des techniques liées aux traitements d'images satellitaires et aux modèles numériques de terrain a permis d'envisager ce phénomène sous un nouvel angle et d'en faire ressortir des éléments jusqu'alors peu apparents par les études géomorphologiques traditionnelles (terrain, photo-interprétation, etc.). Il apparaît ainsi que la dépression d'Aubel semble associée à deux séries de linéaments, l'une parallèle aux failles du graben du Rhin, et l'autre aux fractures hercyniennes.

1. Introduction

Située à une douzaine de kilomètres à l'est de Liège, la dépression d'Aubel s'ouvre au coeur du Pays de Herve (Belgique) (fig. 1). Cette forme d'aspect circulaire de près de 8 kilomètres de diamètre se développe principalement dans des terrains du Crétacé constitués de couches sableuses, argileuses, gréseuses et crayeuses subhorizontales. Dégagés par l'érosion, les terrains paléozoïques sous-jacents, constitués principalement de grès, de psammites et de schistes du Houiller, n'apparaissent qu'au coeur de cette dépression, formant un vaste nez synclinal d'orientation SO-NE. Une barre de grès dévonien borde le bord occidental de ce synclinal et marque l'exutoire de la dépression. Les sables tertiaires datant de la transgression oligocène sont absents à l'intérieur de celle-ci, ce qui semble indiquer une genèse néogène, et ils ne se retrouvent que sur ses pourtours, dans des poches résiduelles.

Morphologiquement, la dépression d'Aubel présente un fond se situant à une altitude moyenne de 220 m (160 m pour son point le plus bas) alors que ses bordures culminent entre 260 et 355 m (Hospice de Beloeil). Bien délimitée au nord et à l'est, la dépression présente des versants dont les pentes sont souvent supérieures à 15% et se développent principalement dans les craies. La bordure méridionale est moins précise dans le paysage. Beaucoup plus découpée, elle présente des pentes souvent plus faibles.

Plusieurs hypothèses ont été envisagées quant à l'origine de cette dépression, à savoir la possibilité d'un impact météoritique, la trace d'un pli diapire ou encore une conjonction de failles (WILLEMS, 1990).

Des dépôts consécutifs à un impact (roches métamorphisées, vitrifiées) ainsi que des perturbations qui en résulteraient dans les différentes roches en place (fractures chaotiques nombreuses) ne se retrouvent pas sur le terrain et ne sont mentionnés par aucun auteur dans la littérature pourtant abondante sur cette région.

L'hypothèse du pli diapire ne présente guère plus d'arguments. Des dépôts tels que l'anhydrite pourraient se localiser sous les terrains houillers, dans les calcaires viséens (comme, par exemple, à Mons Saint-Gishlain, dans l'ouest de la Belgique). Or, ces calcaires ont leur limite d'extension dans la partie orientale de la dépression et ne se retrouvent pas plus à l'ouest.

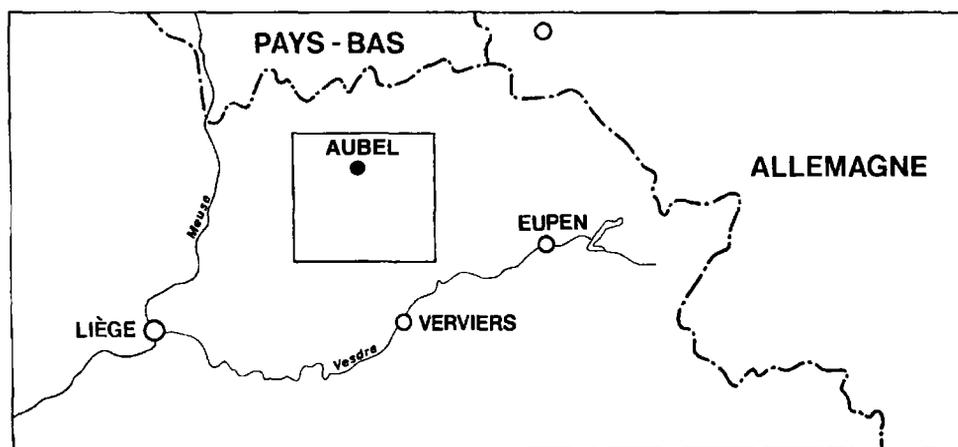


Figure 1. Localisation de la zone étudiée : dépression d'Aubel (Belgique)

À l'heure actuelle, l'inexistence de sondages géologiques bien localisés ainsi que l'absence de dépôts particuliers associés à un éventuel impact posent dès lors un problème face à une approche «traditionnelle» de l'étude géomorphologique.

Les techniques informatiques associées à l'imagerie satellitaire ainsi que celles liées à la création et l'exploitation de modèles numériques de terrain permettent d'apporter un ensemble d'éléments nouveaux à l'étude de formes énigmatiques telles que la dépression d'Aubel. La souplesse relative d'utilisation de ces moyens et les documents qui peuvent en être issus présentent trois avantages.

Le premier réside dans la souplesse de variation des échelles des différents documents, autorisant une vision à la fois globale et précise des faits à observer. L'imagerie satellitaire, dans sa limite de résolution-sol, permet notamment de mettre en évidence de grandes séries de linéaments parcourant l'ensemble du Pays de Herve mais également d'en préciser les tracés dans la dépression.

Le modèle numérique de terrain (M.N.T.), créé à partir d'une numérisation des isohypses, permet quant à lui, de mieux percevoir l'étendue du phénomène étudié et d'en faire ressortir des composantes structurales qui n'apparaissent que très difficilement sur le terrain ainsi que sur la carte topographique de base.

Enfin, le troisième avantage de ce type d'investigation réside surtout dans la perception de phénomènes localisés en zone de couvertures superficielles et végétales importantes, telles qu'on en rencontre souvent dans les régions tempérées, masquant souvent un grand nombre d'informations importantes peu visibles sur le terrain.

2. Matériel et méthodes

L'étude réalisée a comporté, outre une recherche traditionnelle sur le terrain et une étude par photographies aériennes, trois autres phases.

La première a consisté en la création des produits du M.N.T. sous le logiciel «Gipsy» (DONNAY, 1988; DONNAY et BINARD, 1993) pour la zone de la dépression d'Aubel. Pour ce faire, l'utilisation de la carte au 1:25 000 pour la numérisation était la plus appropriée, à la fois pour une question d'échelle du phénomène étudié et aussi pour une question de résolution propre au M.N.T. La saisie par numérisation de deux courbes de niveau trop rapprochées peut être confondue lors du passage à une grille de points. Le M.N.T. est réalisé au départ d'isohypses équidistantes de 10 m ainsi que des courbes de niveau sommitales. Afin de ne pas tronquer les bordures de la zone étudiée, cette numérisation englobe une région un peu plus grande que la dépression. L'application d'une «fenêtre» permet de ne retenir que les informations du territoire examiné (fig. 2).

Un fichier-image est ainsi constitué et peut être manipulé afin d'obtenir toute une série de sous-produits dont les principaux sont : une carte des gradients de pentes, une carte d'orientation des pentes, un estompage du relief, une carte des altitudes et des blocs-diagrammes.

La seconde phase d'étude fut la création de documents à partir de l'image satellitaire. Les données utilisées proviennent des canaux 3, 4, 5, 6 et 7 du «Thematic Mapper» (TM) de Landsat 5.

La troisième et dernière phase consista en la comparaison des documents obtenus par le M.N.T. et ceux réalisés à partir des données satellitaires.

3. Les résultats du M.N.T.

L'image du relief estompé (fig. 3) rend une impression de relief par une source d'éclairage artificiel qui serait placée à 45° au-dessus de l'horizon, au nord-ouest de la zone étudiée.

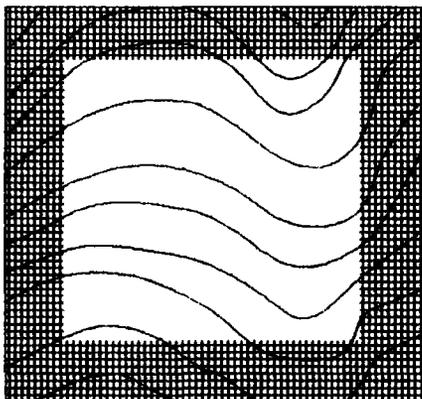


Figure 2. Application d'une fenêtre sur un secteur dont les isohypses sont numérisés; le quadrillage représente la zone numérisée mais n'apparaissant pas dans l'image; les lignes courbes représentent les isohypses



Figure 3. Dépression d'Aubel : modèle numérique de terrain estompé

Ce document permet une meilleure perception de la dépression, soulignant bien ses bordures et faisant apparaître toute une série de linéations principalement NE-SO qui correspondent à une série de vallons peu marqués.

L'image des gradients de pente (fig. 30-4, voir cahier couleur) souligne surtout les bords de la dépression, mettant les versants relativement raides en évidence. Il fait également apparaître l'aspect irrégulier du fond de la cuvette, relativement homogène pour deux tiers mais dont la partie sud-ouest est plus découpée et occupée par une crête secondaire SE-NO.

L'image de l'orientation des pentes (fig. 30-5, voir cahier couleur) révèle des éléments morfo-structuraux peu visibles sur les autres documents et permet une plus nette délimitation de la dépression d'Aubel. Cette dernière apparaît bien fermée tant au nord qu'à l'est mais s'ouvre largement vers l'ouest. De plus, elle se différencie bien par rapport aux régions environnantes. La dépression peut être délimitée en zones présentant des aspects de pente différents : une première située dans la partie orientale (1) et occupée par des linéaments NO-SE, une seconde (2) dans la partie sud-occidentale présentant des linéations SSE-NNO secondaires (vallons) se rattachant à deux linéations NO-SE de plus grande importance (crête secondaire occupant le fond de la dépression). Enfin, la troisième zone (3) occupe la partie nord-ouest et est caractérisée par des orientations NO-SE peu marquées. Au nord-est de la dépression (4) s'observe une quatrième orientation, NNE-SSO, qui correspondrait à la structure condrusienne sous-jacente et qui se marque par l'intermédiaire des vallons secondaires mentionnés précédemment. Séparée nettement par une limite ONO-ESE, la zone méridionale (5) de l'image est également toute différente de l'aspect interne de la dépression : quelques linéaments NNE-SSO se marquent encore, mais en moindre importance et une structure NO-SE apparaît sous-jacente mais atténuée. L'érosion à l'intérieur de la dépression l'aurait peut-être dégagée, la mettant ainsi plus en évidence.

4. L'apport des documents satellitaires

Un des buts de départ pour la constitution de ces documents était la recherche de linéaments difficilement identifiables dans des terrains à couvertures superficielles et végétales importantes.

L'interprétation de l'image issue du canal TM6 (infrarouge thermique) superposée à une carte synthétique des fractures connues nous a permis de poursuivre le tracé de certaines failles qui ne sont connues que très fragmentairement dans cette région. En effet, les différences de température entre adret et ubac sont mises en évidence, et soulignent certains vallons rectilignes malgré la faible résolution satellitaire du canal utilisé (120 m).

Un des principaux résultats est de confirmer que l'ensemble du Pays de Herve est occupé par un réseau de failles NO-SE qui peut être associé au graben du Rhin situé au nord-est du site étudié.

La réalisation d'une composition colorée R.V.B. (rouge, vert, bleu) (fig. 30-6, voir cahier couleur) réalisée à partir des canaux 4, 5 et 7, enregistrant plusieurs gammes d'infrarouge, permet d'affiner l'analyse de la dépression. Ces canaux, fortement influencés par la teneur en eau des sols et la turgescence de la végétation, permettent de déceler d'éventuelles failles et autres cassures.

Les différentes données ont subi une amélioration de contraste par égalisation des histogrammes. Ensuite, à chaque canal a été associée une couleur : le rouge pour le TM4, le vert pour le TM5 et le bleu pour le TM7.

Le document obtenu révèle toute une série de linéaments dont les orientations correspondent à celles observées sur l'image des orientations de pentes, à l'exception de la direction NO-SE. Peut-être faut-il y voir l'influence de la limite de résolution du capteur TM par rapport à la précision du M.N.T. (équidistance de 10 m). Ici se marque déjà la complémentarité des deux catégories de documents. De plus, le territoire couvert par l'image satellitaire permet de suivre ces linéaments sur plusieurs kilomètres, voire une dizaine de kilomètres.

La superposition du bloc-diagramme à la composition colorée (fig. 30-7, voir cahier couleur) permet de voir la correspondance des linéaments repérés sur l'image satellitaire avec la topographie, mettant particulièrement bien en évidence les bords abrupts de la dépression.

Ce type de document présente également un grand intérêt quant aux influences topographiques associées aux types d'affectation du sol que l'on y rencontre et sur l'évolution des paysages. Il suggère que les bords de la dépression sont associés à divers linéaments.

5. Conclusion

À la suite de cette étude, il apparaît que la dépression est caractérisée par toute une série d'orientations linéamentaires largement distinctes de celles rencontrées dans les zones avoisinantes. Si une solution n'a pas été trouvée quant à l'explication de sa genèse, il semble de plus en plus que celle-ci soit liée à tout un système de failles complexes de diverses orientations et d'âges différents. On retrouve un système faillé d'orientation NO-SE associé au Graben du Rhin, d'âge cénozoïque, ainsi qu'un ensemble de failles NE-SO en relation avec la structure condrusienne et d'âge hercynien. L'étude par l'imagerie satellitaire et la création d'un modèle numérique de terrain permet une approche originale du problème; la grande souplesse d'échelle des documents, leur complémentarité dans la résolution au sol et leur superposition admettent des observations supplémentaires à celles obtenues par les démarches traditionnelles dans ce type d'étude géomorphologique ainsi que de replacer un phénomène «local», la dépression d'Aubel, dans son contexte régional, le Pays de Herve.

6. Références

- DONNAY, J.-P. 1988. Constitution d'un modèle numérique de terrain : une approche en mode raster sur micro-ordinateur. Bulletin trimestriel de la Société belge de photogrammétrie-télétection et cartographie, n^{os} 171-172, p. 47-60.
- DONNAY, J.-P. et BINARD, M. 1993. GIPSY : un système d'information géographique orienté images. in DUBOIS, J.-M. M. et BLASCO, F. (réd.). Outils micro-informatiques et télétection de l'évolution des milieux. Troisièmes journées scientifiques du Réseau de télétection de l'UREF, Toulouse, 13-16 novembre 1990, Éditions AUPELF-UREF et Les Presses de l'Université du Québec, p. 281-307
- WILLEMS, L. 1990. L'apport de la télétection à l'étude géomorphologique de la dépression d'Aubel (Pays de Herve). Mémoire en Sciences géographiques, Université de Liège, 93 p.

**Compte rendu de la table ronde
portant sur le thème
« Télédétection et cartographie »**

31

Téledétection et cartographie

GOZE B. BÉNIÉ

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1; téléphone : 819-821-7286; télécopieur : 819-821-7238

1. Introduction

Pour clore ses quatrièmes journées scientifiques, le réseau de télédétection de l'UREF a organisé une table ronde sur le thème «Télédétection et cartographie». À cette occasion, une invitation a été lancée aux divers présidents de session pour faire une brève synthèse des conférences présentées. Je passe sous silence ces synthèses parce que chaque article de ce compte rendu est précédé de son résumé. Ces synthèses ont été suivies d'un débat sur l'intérêt des chercheurs aux aspects cartographiques opérationnels de la télédétection et au transfert de technologie vers l'industrie et les autres utilisateurs. Mais avant de toucher aux points qui ont retenu l'attention des participants, je fais une rapide mise en situation de la cartographie par télédétection pour mieux cerner le problème.

2. Télédétection et cartographie

La télédétection est cette science pluridisciplinaire qui s'intéresse aux traitements analogique ou numérique d'images aérospatiales de la Terre, pour aider à réaliser la gestion des ressources naturelles renouvelables ou non. Ces traitements produisent des résultats de nature variée : des images, des cartes, des statistiques, etc.

En ce qui concerne particulièrement la cartographie par télédétection, elle a démarré par la photo-interprétation des résultats de traitement analogique d'images (transformation d'images rehaussées en photographies). Cette photo-interprétation nécessite une intervention humaine très importante.

Depuis les années 70, pour réduire cette intervention, et par le fait même une bonne part de subjectivité, et accélérer le processus de production, un accent a été mis sur l'automatisation du processus d'interprétation. Cette orientation a eu pour effet le développement de plusieurs méthodes d'analyse d'images (segmentation et classification) allant des plus simples (analyse pixel par pixel) aux plus complexes (analyse basée sur le contexte, système expert), vu la foule de contraintes qui continuent d'attirer l'intérêt des chercheurs.

C'est d'ailleurs dans cet esprit que les conférenciers ont exposé les résultats de leurs travaux de recherche. Ainsi les sujets développés tournaient autour des points suivants :

1) l'influence de la topographie dans le traitement numérique d'images de télédétection et la réduction de ses effets;

2) la cartographie des ressources en eau à partir d'une combinaison des méthodes de télédétection et d'hydrogéologie;

3) le suivi de l'évolution environnementale (désertification, milieux dégradés) par analyse diachronique d'images satellitaires;

4) la cartographie de la végétation (agriculture, forêt, environnement sahélien, dégradation du milieu végétal);

5) le développement de méthodologies d'extraction des données cartographiques.

Pourrait-on pour autant dire que l'interprétation automatisée d'images pour des fins cartographiques a pris le pas sur la photo-interprétation conventionnelle ? Les avis sont partagés comme on le verra plus tard dans la section débat.

Directement reliées à la question précédente, plusieurs autres questions ont été abordées dans le cadre de ce débat, les plus importantes étant :

1) Est-ce que les chercheurs se préoccupent des aspects opérationnels de cette nouvelle démarche cartographique?

2) Si les aspects opérationnels sont négligés au profit des intérêts de la recherche fondamentale, est-ce que ce cheminement suit les objectifs de l'UREF?

3) Si au contraire les chercheurs se préoccupent de l'opérationnalité de leurs méthodes, comment s'y prennent-ils pour faire le transfert des résultats vers les utilisateurs que sont la population, l'industrie privée et les gouvernements?

4) Que devraient faire les États et les organismes internationaux pour faciliter l'utilisation de la télédétection dans le monde et plus particulièrement dans les pays du Sud?

3. Débat

Les propos formulés ci-dessous ne sont pas un procès-verbal des débats, mais plutôt une synthèse des discussions. Les avis sont regroupés sous quelques thèmes qui nous ont paru représentatifs des questions soulevées.

3.1. La photo-interprétation conventionnelle et l'interprétation automatisée

Si la télédétection a démarré par l'interprétation d'images rehaussées, la préoccupation des chercheurs a été depuis les années 80 l'étalonnage des données et l'automatisation de l'extraction des objets de la scène. Aujourd'hui, même si cette tendance existe encore, ceux qui se préoccupent de la mise en pratique des méthodes automatisées se rendent compte rapidement des limites du processus d'automatisation : le manque de précision dans la définition de l'objet et dans l'étalonnage radiométrique. Ces limites sont en partie dues aux

effets atmosphériques difficiles à modéliser, aux problèmes d'échelle liés à la limite de résolution spatiale, aux fenêtres spectrales utilisées, etc. Cette constatation renvoie progressivement les spécialistes vers leur contribution importante au processus d'interprétation si ce n'est pas la photo-interprétation seule qui est adoptée. Les systèmes experts sont fortement suggérés pour améliorer la précision des méthodes automatisées mais le niveau de recherche n'est pas encore suffisant pour prendre le pas sur les approches conventionnelle et semi-automatisée.

3.2. Préoccupation aux aspects opérationnels de la recherche

L'opérationnalité des méthodes développées est un critère fondamental chez la plupart des chercheurs. Cet intérêt est plus prononcé pour la recherche au sein de l'industrie ou en collaboration avec cette dernière. Si elle est si importante, comment se fait-il alors que la plupart des travaux présentés étaient à un stade préliminaire? On pourrait croire que le cadre «universitaire» de l'UREF puisse être la cause de ce phénomène, mais les membres de l'assistance n'en croient rien. En fait, au lieu de répondre directement à la question, les membres de l'assistance se sont plutôt penchés sur les moyens à suivre pour satisfaire ce critère d'opérationnalité. Ainsi, ils ont manifesté le souhait d'avoir une contribution financière plus appréciable de l'industrie et des gouvernements pour parvenir plus rapidement à des résultats opérationnels. Ils ont aussi souhaité que des organismes tels que l'UREF accroissent leur budget d'aide à la recherche et qu'ils associent de plus en plus les utilisateurs aux rencontres scientifiques pour orienter les chercheurs vers leurs préoccupations. De plus, ce concept d'opérationnalité de la recherche deviendrait chose courante si on y mettait un accent particulier lors de la formation des chercheurs.

3.3. Transfert des résultats de recherche et développement vers les utilisateurs

À propos du transfert des résultats de recherche et développement vers les utilisateurs, c'est le même son de cloche que précédemment. Le transfert se ferait normalement si les utilisateurs contribuaient au financement des travaux en collaboration avec les organismes de financement de la recherche comme l'UREF. Encore ici, le transfert se ferait directement ou indirectement si l'on convoitait aux rencontres scientifiques les utilisateurs pour une diffusion plus large des résultats.

3.4. Intervention des États et des organismes internationaux

Il a d'abord été question de certains aspects de l'intervention de l'UREF auprès des chercheurs : les chercheurs ont souhaité l'augmentation des subventions de recherche et la considération, lors des soumissions de proposition, de projet de partenaires «Sud - Sud». Ils ont apprécié à juste titre la création d'une bourse de recherche de l'UREF au niveau doctoral. Une recommandation qui pourrait sortir de ce point est la création par l'UREF d'un programme de subvention «industrie - institution de recherche» dans les axes Nord - Sud ou Sud - Sud.

Ensuite, les chercheurs africains ont soulevé les difficultés rencontrées par le Centre régional de téledétection de Ouagadougou. Une suggestion a été faite sur la contribution de l'UREF à la sensibilisation des pays du Nord à la mise sur pied d'une station de réception d'images en Afrique de l'Ouest, station dont le rayon d'action pourrait s'étendre jusqu'en Afrique centrale. Il faut rappeler que l'Afrique de l'Ouest est actuellement desservie par des

stations aussi lointaines que celle des îles Canaries, à tel point que la disponibilité de certaines images pose d'énormes difficultés.

4. Synthèse

La table ronde, en plus de donner l'occasion aux présidents de session de faire la synthèse des communications présentées durant ces journées, a permis de constater le peu d'utilisations opérationnelles de la télédétection. L'une des causes est le manque de précision des méthodes automatisées d'interprétation d'images de télédétection qui constituent malgré tout un point d'intérêt marquant pour les chercheurs. La télédétection est alors considérée comme un outil parmi tant d'autres à intégrer dans les méthodes conventionnelles comme la photo-interprétation. Une autre cause provient du manque de concertation entre le monde des chercheurs et celui des utilisateurs. Pour ce dernier problème, les chercheurs ont suggéré quelques solutions dont le financement de la recherche par l'industrie, l'organisation de conférences scientifiques conjointes, etc. Le mode de financement de la recherche par l'UREF et le manque de station de réception d'images satellitaires en Afrique de l'Ouest ont aussi fait l'objet de la table ronde.


MARQUIS
Montmagny, Qc
janvier 1994



Créée à l'initiative de l'Université des réseaux d'expression française, la collection *Universités francophones* s'insère, depuis 1988, dans le paysage éditorial international. L'UREF met ainsi à la disposition des étudiants et chercheurs, des ouvrages de haute qualité scientifique.

Rédigés par des équipes à caractère multilatéral, manuels, monographies et actes de colloques abordent des problématiques intéressant l'ensemble du monde francophone. En outre, ils s'adaptent, grâce à une politique de prix particulière, à des différentes réalités économiques : autant de conditions contribuant à la reconnaissance et au succès de la collection.

La télédétection porte en elle les germes d'une révolution dans la façon d'élaborer et d'utiliser les cartes géographiques. Les *Quatrièmes journées scientifiques du « Réseau Télédétection »* de l'UREF ont permis de faire le point sur l'application de la télédétection à la cartographie. Cartographie topographique, nivale et des milieux à fort relief, cartographie des ressources en eau, cartographie des milieux dégradés, cartographie de la végétation, méthodologies d'extraction des données cartographiques, télédétection et cartographie ... soit six rubriques et trente et un textes produits par d'éminents auteurs de disciplines et d'origines géographiques très différentes. Une somme indispensable pour les étudiants comme pour les chercheurs.

Prix Canada : 45 \$ CAN • Prix France : 210 FF • Prix préférenciel UREF : 108 FF



9 782760 507524

ISBN 2-7605-0752-1

59-4530-8