Télédétection, 2005, vol. 4, n°4, p. 373-380
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

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

UNE CLASSIFICATION DIRIGÉE FONDÉE SUR LES SPECTRES DE TEXTURE : APPLICATION À L'ÉTUDE DES PAYSAGES DE LA MONTAGNE DE LURE (ALPES, FRANCE)

A. LAFITTE OLANO[1], Y. AUDA[1*], V. TRICHON[1], J. MAJEROWICZ[2], L. SIMON[3] et B. TAMRU[2]

[1] *CESBIO-LADYBIO, Centre de télédétection. BPI 2801, 31401 Toulouse cedex 9, France*

[2] *Laboratoire Rhodanien de Géomorphologie, Faculté G.H.H.A.T, Université Lyon 2, 5 avenue Pierre-Mendès France, 69676 Bron cedex, France.*

[3] *Centre de Biogéographie-Écologie, URA 1514 CNRS, ENS Fontenay-St. Cloud, Le Parc, 92211 Saint-Cloud cedex, France.*

Courriel (*) : Yves.Auda@cict.fr

(soumis : 26 octobre 2004 ; révisé : 1er mars 2005 ; accepté 16 mars 2005)

La montagne de Lure (Alpes, France) présente une diversité de paysages résultant de facteurs environnementaux et anthropiques. Pour analyser cette mosaïque de parcelles, une classification dirigée, fondée sur les spectres de texture, a été intégrée sous le Système d'Information Géographique GRASS et appliquée à une photographie aérienne (IGN, 1/25 000) du site.

Les tests statistiques (coefficient de Tschuprow,…) montrent l'efficacité de cette méthode dont le calcul ne prend en compte que la texture tandis que les données spectrales sont ignorées.

L'interprétation thématique est cohérente avec la connaissance de terrain. Les confusions observées s'expliquent par des ressemblances physionomiques entre différentes formations végétales (densité, structure en mosaïque, …). Ces confusions plus prononcées que dans une classification spectrale, loin de remettre en cause l'analyse de texture, permettent au contraire de souligner les similarités structurales de certaines formations. Cette approche renoue ainsi avec les méthodes de photo-interprétation.

Une étape ultérieure consistera en la combinaison de classifications texturale et spectrale pour s'approcher des performances du photo-interprète.

Mots-clefs : paysage ; spectre de texture ; classification dirigée ; photo-interprétation ; très haute résolution spatiale ; GRASS.

SUPERVISED CLASSIFICATION USING THE TEXTURE SPECTRUM : LANDSCAPE STUDY OF LURE MOUNTAIN (ALPS, FRANCE)

Lure Mountain (Alps, France) shows a great diversity of landscapes due to environmental and human factors. To describe this mosaic of parcels, an IGN (1/25 000) aerial photography was analyzed using a textural supervised classification. The algorithm was implemented in a geographical information system (GIS), GRASS.

Statistical tests (Tschuprow coefficient,…) show the efficiency of the method which uses textural data only. Spectral data are ignored.

Thematic interpretation agrees with surveys. Observed confusions are explained by structural similarities between plant formations (density, mosaic pattern,…). These confusions, which are more important than for spectral classification, bring to the fore structural characteristics of plant formations. This approach renews with the photo-interpretation method. A next step will be to combine textural classification with spectral classification to approach the efficiency of the photo-interpreter.

Keywords : landscape ; texture spectrum ; supervised classification ; photo-interpretation ; very high spatial resolution

1. PROBLÉMATIQUE

Localisée dans la partie méridionale des Alpes sud-occidentales, la montagne de Lure présente une diversité de milieux liée à sa position de marge méditerranéenne. Cette situation crée une grande richesse floristique et biogéographique qui se reflète au travers de la mosaïque de paysages végétaux (Rameau, 1992). Cette diversité n'est pas simplement le résultat d'une transition bioclimatique car elle résulte également d'une divergence d'évolution entre les deux versants depuis plus d'un siècle. À l'homogénéité de la forêt domaniale du versant nord, constituée lors du grand mouvement R.T.M. (Restauration des Terrains de Montagne), s'opposent les mosaïques de parcelles du versant sud qui appartiennent soit à des communes soit à des propriétaires privés, et qui furent, jusqu'au milieu du XXe siècle, le lieu d'une intense mise en valeur.

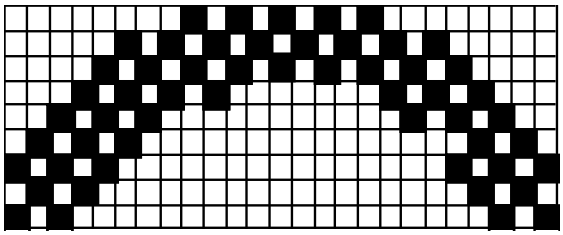
Pour suivre la dynamique de ce paysage, une méthode de cartographie fine est mise en œuvre. Elle repose sur une classification fondée sur les spectres de texture. Elle a été intégrée sous le système d'information géographique (SIG) GRASS[1].

L'image traitée est une photographie aérienne IGN 1/25 0000 de 1993 numérisée à 400 dpi, ce qui correspond à une résolution de l'ordre du mètre (1,5 m au centre de l'image). Cette résolution métrique s'est avérée indispensable à plusieurs titres : pour la description des strates dominantes caractérisées par des ouvertures limitées (chablis, arbres dépérissant), pour la localisation de la limite supérieure de la forêt marquée par une dispersion des individus, et pour la délimitation des sols gélifractés qui présentent des alternances de bancs fins et de bancs grossiers. On mentionnera également l'intérêt de cette résolution métrique pour distinguer les plantations de la reconquête arborée spontanée. Comme toutes deux sont composées de conifères, leur distinction ne peut reposer que sur des critères géométriques liés à l'agencement des houppiers, plus régulier dans les plantations.

L'analyse des paysages à partir de photographies aériennes et très récemment l'avènement des capteurs satellitaires à très haute résolution spatiale, nous conduisent à renouer avec les méthodes traditionnelles de la photo-interprétation. En effet, la photo-interprétation est riche en méthodologies concernant l'analyse des milieux naturels. Très tôt, des auteurs se sont interrogés sur le choix des dates d'acquisition (Goguey, 1966), sur les analyses sans connaissances thématiques préalables (Guy, 1966 ; Chevallier, 1966) et sur les possibilités d'automatisation (Oprescu, 1966). Plus récemment, d'autres auteurs se sont penchés sur le traitement des images à très haute résolution spatiale (Franklin *et al.*, 2000 ; Couteron, 2002). Il est remarquable que les tech-niques employées en très haute résolution spatiale sont très proches de celles utilisées en photographie aérienne. En particulier, la prise en compte de la texture est souvent prépondérante.

La texture est une notion assez difficile à cerner car elle est appréhendée différemment par les auteurs comme le souligne Haralick (1979) « Despite its importance and ubiquity in image data, a formal approach or precise definition of texture does not exist ». Néanmoins, toutes les définitions, quelque soit l'approche retenue (Bariou, 1978 ; Laporte, 1983 ; Lake, 1991 ; Rouleau, 1991 ; Béguin et Pumain, 1994 ; Haese-Coat *et al.*, 1993-1994) s'accordent pour identifier la texture comme un agencement de pixels à une grande échelle, souvent appelé motif. À une échelle plus petite, l'arrangement spatial des motifs construit la structure.

Pour fixer les idées, observons une image fictive où l'agencement textural forme une structure d'arc de cercle.



Le motif répété est sur ce schéma très simple mais il pourrait être plus compliqué, comprendre plus de deux pixels et prendre d'autres valeurs que noir ou blanc. De petites variations de niveau de gris modifient peu la texture qui est une caractéristique assez stable de l'image. Cette propriété est intéressante lors de l'étude d'un couvert végétal qui change de couleur au cours des saisons mais dont la texture apparaît quasiment invariante au cours du temps.

2. MÉTHODE

Weszka *et al.* (1976) et Haralick (1979) décrivent plusieurs méthodes d'analyse d'image fondées sur la texture. Plus récemment, Ndi *et al.* (2002) présentent une synthèse très complète de l'ensemble de ces méthodes.

méthode fondée sur le spectre de texture (Wang and He, 1990) appartient selon la classification des méthodes de texture adoptée par Haese-Coat *et al.* (1993-94) aux « méthodes utilisant les caractéristiques spatiales ». Nous l'avons choisie pour sa simplicité de mise en oeuvre et pour ses propriétés. Haese-Coat *et al.* (op. cit.) indiquent que ces méthodes « caractérisent assez bien le grain, le contraste et les orientations qui existent dans la texture. Elles mettent également en évidence les périodicités.». Ce sont ces aspects que nous avons décidés d'explorer lors de nos travaux.

Nous avons par conséquent intégré sous le SIG GRASS[2] la méthode fondée sur les spectres de

[1] GRASS est un SIG gérant des informations vectorielles et matricielles. Il intègre un grand nombre d'analyses adaptées aux images satellitales. C'est un logiciel libre sous licence « GNU Public License » téléchargeable à l'adresse http://grass.itc.it

[2] La classification fondée sur les spectres de texture s'effectue en deux étapes :
1) numérisation des zones d'entraînement à l'aide des modules existants sous GRASS (v.digit suivi de v.to.rast), 2) classification par le module i.classtextur développé par nos soins. La syntaxe de ce module est la suivante :
i.classtextur trainingmap=string group=string subgroup=string classfile=string prec=integer wind=integer
paramètres

texture proposée par Wang et He (1990). Le mode de calcul d'un spectre prend en compte des relations locales de voisinage pour les pixels compris à l'intérieur d'une zone. Pour chacun des huit voisins d'un pixel donné est calculé un entier e_i compris entre 0 et 2, par la relation :

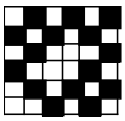
$$e_i = \begin{cases} 0 \text{ si } p_i < p_0 - \Delta \\ 1 \text{ si } p_0 - \Delta \leq p_i \leq p_0 + \Delta \\ 2 \text{ si } p_i > p_0 + \Delta \end{cases}$$

Δ est une petite constante entière introduite par Wang (1994) pour tenir compte de la variabilité inhérente à toute mesure.

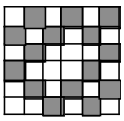
Puis ces huit entiers e_i sont codés par un nouvel entier compris entre 0 et 6 560 par la formule :

$$m = \sum_{i=1}^{8} 3^{\,i-1} \cdot e_i$$

Cet entier qui caractérise l'environnement du pixel n'est pas calculable pour les pixels qui bordent la zone car ceux-ci possèdent moins de huit voisins. Ensuite, l'histogramme de fréquence des entiers dont l'abscisse varie entre 0 et 6 560 est construit. Il est appelé spectre de texture. Remarquons que, dans le calcul du spectre de texture, la valeur intrinsèque du pixel n'est pas considérée ; seule sa comparaison avec ses voisins importe. Illustrons notre propos par un schéma.



motif A



motif B

Les motifs A et B qui diffèrent par leur niveau de gris donneront cependant le même entier à la condition que Δ soit choisi de manière adéquate. Par conséquent, ils contribueront de la même façon à la construction du spectre. Des zones de nature différente par les seules valeurs des pixels peuvent donc apparaître identiques du point de vue de la texture, ce qui peut entraîner des confusions dans la reconnaissance de thèmes par ailleurs facilement discernables à l'œil nu. Inversement, des zones composées de pixels de valeurs proches peuvent être différenciées sur le critère de la texture.

Dans l'approche utilisée par Wang et He (1990), la reconnaissance des thèmes fait appel à une classification dirigée. Pour chaque classe, un spectre de texture qui sert de référence est calculé pour la zone d'entraînement décrivant la classe. Dans le cas où une classe est décrite par plusieurs zones d'entraînement, le spectre de référence est obtenu par cumul des spectres de texture calculés sur chacune des zones. L'affectation de chaque pixel de l'image à une classe se fait par balayage de l'image par une fenêtre mobile ; le spectre de texture calculé sur la fenêtre mobile est comparé aux spectres de référence de toutes les classes puis la classe retenue est affectée au pixel situé au centre de la fenêtre mobile. Le mode de comparaison des spectres utilisé est extrêmement simple. Les spectres sont comparés deux à deux par la formule

$$\sum_{i=0}^{6560} \left(\frac{n_{1i}}{s_1} - \frac{n_{2i}}{s_2} \right) \text{ avec}$$

n_{1i} nombre d'entiers m du premier spectre qui prennent la valeur i,

n_{2i} nombre d'entiers m du second spectre qui prennent la valeur i,

$$s_1 = \sum_{i=0}^{6560} n_{1i} \quad \text{et } s_2 = \sum_{i=0}^{6560} n_{2i}$$

Ce calcul permet d'observer une différence nulle pour une comparaison effectuée entre un espace de texture homogène et toute sous-zone délimitée à l'intérieur de cet espace. Notons que cet algorithme qui travaille directement sur les spectres conserve toute l'information texturale. Une alternative proposée par Kourgli et Belhadj-Aissa (2000) serait de choisir des paramètres de texture (moyenne, variance, inertie,…). Cette procédure diminue les temps de calculs et l'espace mémoire occupé, mais elle présente l'inconvénient de perdre une partie de l'information. Bin *et al.* (2003) proposent d'autres solutions reposant sur une simplification du spectre de texture au prix d'une légère perte d'information qui reste à évaluer en fonction des données et des objectifs poursuivis. Étant dans une phase exploratoire d'évaluation de la méthode des spectres de texture, nous n'avons pas cherché à diminuer les temps de calculs.

Le choix de la taille de la fenêtre mobile oriente sur le type des éléments structuraux recherchés. Une grande fenêtre découpera l'espace en de grandes unités thématiques homogènes tandis qu'une petite fenêtre conservera plus de détails. Elle révélera plutôt les microstructures tels les éléments de transition entre ensembles thématiques ou des détails de l'occupation du sol qui sont indépendants des thèmes. Plus la taille de la fenêtre mobile choisie est grande, plus les zones limitrophes entre deux thèmes risquent d'être mal classées car la construction de spectres hybrides calculés sur des zones de transition d'une texture à une autre risque de brouiller localement les résultats.

---

training map : image sur laquelle sont portées les zones d'entraînement
group : groupe d'images sur lequel porte la classification
subgroup : sousgroupe contenant les images à analyser
classfile : image résultant de la classification
prec : la constante entière
wind : la taille de la fenêtre mobile.

3. RÉSULTATS

Sur la photographie aérienne IGN sont reportées des zones rectangulaires représentatives des types de végétation relevés lors d'une enquête de terrain (figure 1). Dans la description thématique consignée dans le tableau 1, la physionomie des groupements identifiés est introduite. Ainsi, une formation est caractérisée aussi bien par l'espèce dominante que par des indications qualitatives sur le taux de couverture.

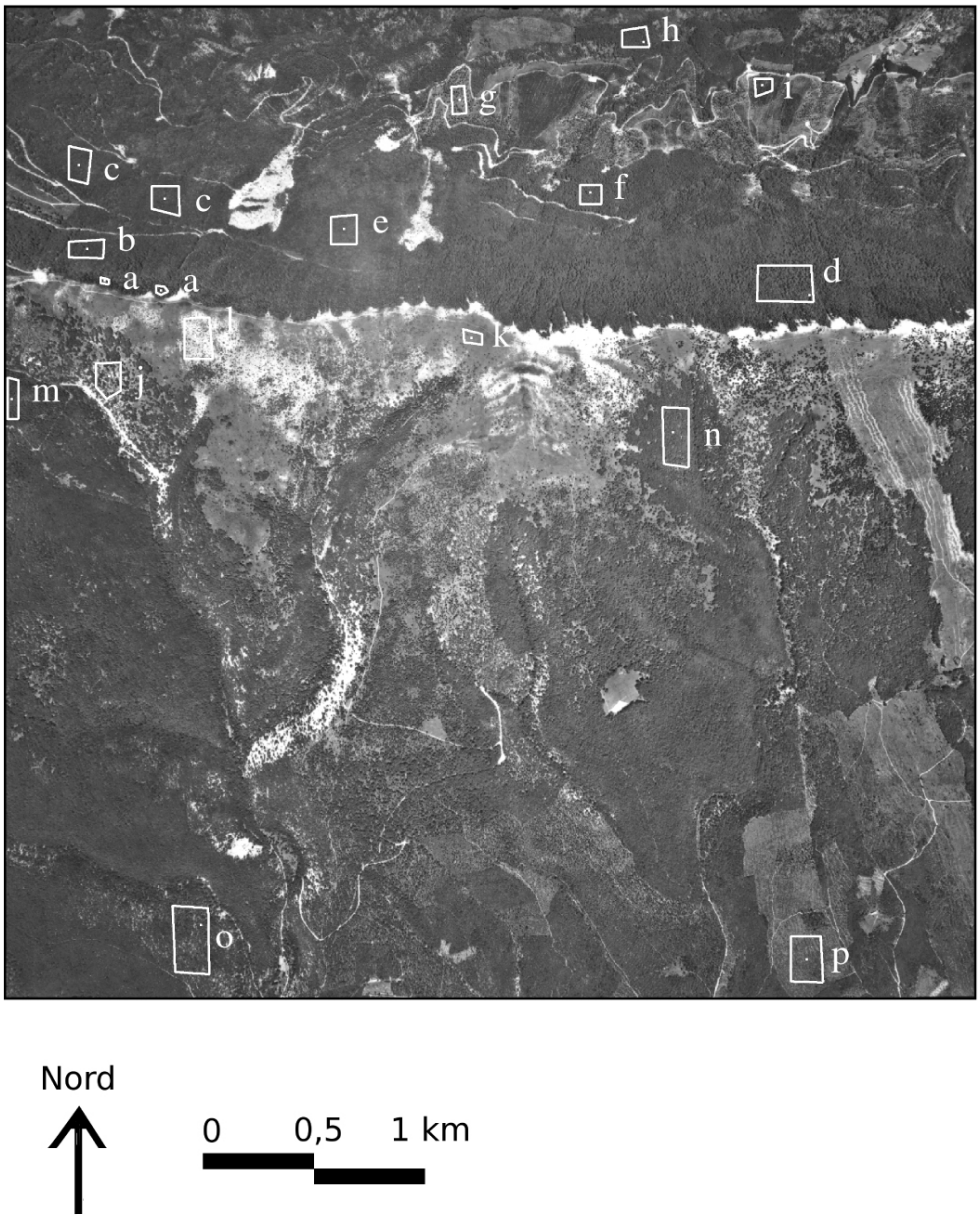


FIGURE 1 Photographie aérienne panchromatique de la montagne de Lure (Alpes de Hautes Provence) prise par l'IGN en 1993 puis numérisée par nos soins à 400 dpi. Le fichier résultant est une image en niveaux de gris codée sur 8 bits qui comporte 3 450 pixels de hauteur et 3 374 pixels de largeur. Les lettres (a,b, ... p) assurent la correspondance entre les descriptions des thèmes et les zones d'entraînement délimitées par des cadres sur l'image. L'image n'étant pas géoréférencée, l'échelle indiquée n'est valide qu'au centre de l'image. *Aerial photography of Lure Mountain (Alps, France) acquired in 1973 and scanned at 400 dpi. Size of the scanned image is 3 450 (high) by 3 375 (wide). Letters (a, b, …, p) refer to thematic description and training areas outlined on the image. Since the image is not georeferenced, the scale is only valid in the centre of the image.*

TABLEAU 1 Les zones d'entraînement et leurs thèmes associés. *Training areas and themes.*

Zone	Code	Thème
1 à 3	a	Sapinière pure dense et âgée
4	b	Hêtraie-sapinière dense et âgée
5 à 6	c	Futaie de hêtres adultes dense de versant nord
7	d	Hêtraie dégradée ouverte de versant nord
8	e	Futaie dense de petits hêtres sur souche
9	f	Futaie dense de mélèzes
10	g	Futaie ouverte de pins noirs
11	h	Futaie dense de pins noirs
12	i	Coupe forestière dans peuplements de pins noirs
13	j	Hêtraie claire sur éboulis
14	k	Pelouse très faiblement piquetée d'arbres
15	l	Sol nu faiblement colonisé
16	m	Hêtraie-sapinière assez dense sur versant sud
17	n	Hêtraie dense de versant sud
18	o	Hêtraie-chênaie moyennement dense de versant sud
19	p	Coupe forestière dans hêtraie de versant sud

À partir des 16 classes reconnues sur les 19 relevés, une classification dirigée fondée sur les spectres de texture est réalisée. La petite taille de la fenêtre mobile retenue, égale à 9 pixels de côté, devrait permettre de discerner des éléments relativement fins. Quelques tests effectués sur des parties de l'image ont permis de choisir la constante Δ égale à 3.

Sur la figure 2 se dessinent les grandes formations végétales attestées par les observations de terrain et les images Landsat TM (Simon et Tamru, 1998). Toute la cohérence spatiale de l'analyse se révèle ainsi par un examen des résultats à une échelle beaucoup plus petite que celle où sont effectués les calculs.

La matrice de confusion (tableau 2) complète ces premières observations visuelles.

TABLEAU 2 Matrice de confusion de la classification dirigée basée sur les spectres de texture. Les lignes correspondent aux dix-neuf zones d'entraînement. La signification des colonnes est la suivante : la première colonne identifie la zone d'entraînement, la deuxième colonne indique le thème caractérisé par la zone d'entraînement, la troisième colonne comptabilise le nombre de pixels contenus à l'intérieur de la zone d'entraînement, les seize colonnes suivantes correspondent à la distribution du pourcentage de pixels attribués par l'analyse de texture à chacun des thèmes. Ce pourcentage est calculé à l'intérieur de chaque zone d'entraînement (ligne). *Confusion matrix of the textural supervised classification. Rows correspond to the 19 training areas. Columns correspond to training area (column 1), theme (column 2), number of pixels (column 3), and percentage of pixels computed by row (columns 4 to 19).*

Zone	Thème	Nombre de pixels	Pourcentage de pixels à l'intérieur de chaque zone d'entraînement pour chacun des seize thèmes															
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
1	a	1 800	**43**	8	10	5	6	1	1	4	3	3	2	0	3	2	4	5
2	a	2 460	**52**	2	2	4	3	4	1	4	2	2	9	0	2	0	2	11
3	a	1 085	**52**	11	4	5	2	2	2	2	4	0	2	0	4	2	7	2
4	b	14 812	8	**23**	27	1	9	0	0	14	4	0	4	0	5	0	3	2
5	c	16 000	3	16	**46**	0	14	0	0	11	3	0	3	0	3	0	2	1
6	c	10 080	1	12	**66**	0	9	0	0	7	1	0	1	0	2	0	1	1
7	d	26 268	3	0	0	**34**	1	10	8	1	2	4	3	0	0	16	4	14
8	e	13 875	5	7	12	0	**40**	0	0	11	2	0	13	0	5	1	2	3
9	f	9 240	0	0	0	7	0	**67**	3	1	1	0	1	0	0	10	1	8
10	g	9 316	0	0	0	5	0	3	**52**	0	0	12	1	11	0	8	1	6
11	h	13 689	4	7	10	4	9	4	1	**38**	6	0	4	0	2	2	4	5
12	i	7 905	3	7	11	4	3	5	0	6	**33**	0	3	0	1	13	4	6
13	j	16 836	3	1	3	4	0	1	8	0	1	**51**	1	19	1	3	3	2
14	k	9 603	4	5	5	3	15	1	5	9	2	3	**32**	1	3	2	2	7
15	l	16 430	0	0	1	1	0	2	10	0	0	16	0	**65**	0	4	0	1
16	m	10 556	11	10	11	3	12	1	1	7	2	1	8	1	**20**	1	3	7
17	n	27 136	1	0	0	7	1	14	4	3	3	2	2	2	0	**46**	2	14
18	o	35 416	7	6	10	6	9	3	2	5	4	5	5	1	4	7	**15**	11
19	p	28 500	2	1	1	6	4	9	5	2	3	3	6	1	1	11	4	**40**

La qualité de la classification est estimée par le coefficient de Tschuprow (noté T) qui exprime l'intensité de la liaison entre deux variables qualitatives par un coefficient compris entre 0 et 1.

$$T = \sqrt{\frac{\chi^2}{n * \sqrt{ddl}}}$$

n nombre de pixels total observés
ddl nombre de degrés de liberté
T = 0,38 ou 38 %

Cette valeur est à rapprocher d'une autre statistique, le pourcentage du nombre de pixels bien classés pour l'ensemble des zones d'entraînement. Il vaut pour notre exemple 39 %, ce qui fournit une indication sur la qualité de la classification en accord avec le coefficient de Tschuprow.

Dans une étude comparative d'analyse de texture sur la forêt de Paimpont, Haese-Coat *et al.* (1993-1994) obtiennent des résultats globaux variant de 6,6 % pour la méthode des fractales, à 24,9 % pour les morphologies mathématiques. Nos résultats apparaissent donc numériquement valides et il convient de donner un éclairage thématique sur l'origine des confusions qui nuisent à un meilleur classement.

4. INTERPRÉTATIONS THÉMATIQUES

Pour la représentation graphique de la classification (figure 2), nous avons conservé les résultats bruts sans les faire suivre d'un lissage qui aurait gommé l'aspect moucheté. Nous considérons que cet aspect est une des caractéristiques de cette analyse de texture pratiquée sur ce matériel. En effet, il ne correspond pas à une affectation aléatoire de certains pixels lors de la classification car un agrandissement de l'image montre que les points ne sont pas constitués par des pixels isolés mais par des taches homogènes qui regroupent entre dix et vingt pixels. Les raisons de l'aspect moucheté de l'image ne sont donc pas seulement à rechercher dans le fonctionnement de l'algorithme de texture, mais également dans des caractéristiques du couvert végétal.

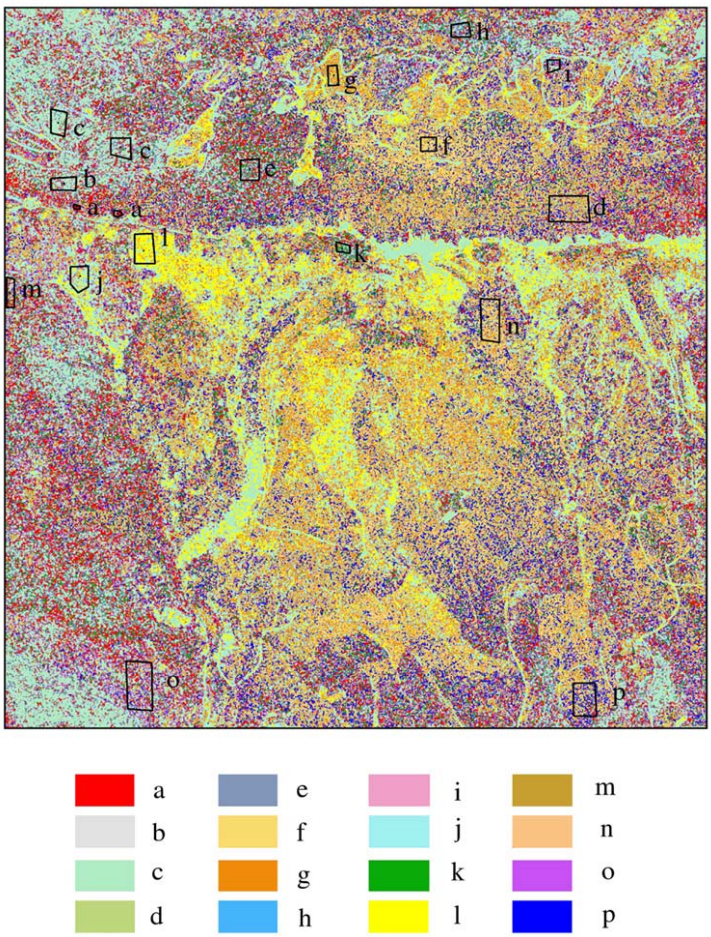


FIGURE 2 Classification d'un paysage, la montagne de Lure (Alpes de Hautes Provence) par une classification dirigée fondée sur les spectres de texture. Les lettres (a,b, ... p) assurent la correspondance entre les descriptions des thèmes et les zones d'entraînement délimitées par des cadres sur l'image. *Textural landscape classification of Lure Mountain (Alps, France). Letters (a, b, …, p) refer to thematic description and training areas outlined on the image.*

Le thème l (sol nu faiblement colonisé) est bien classé (65 %) car sa texture ne peut être que difficilement confondue avec la texture des espaces boisés.

Les confusions observées entre les thèmes s'expliquent souvent par une ressemblance physionomique. N'oublions pas que l'analyse ne prend pas en compte les valeurs individuelles des pixels mais qu'elle enregistre seulement les relations de voisinage entre pixels.

Des confusions entre des thèmes aussi différents que la futaie ouverte de pins noirs (thème g) et la hêtraie claire sur éboulis (thème j) témoignent en réalité de la parenté existant entre ces deux unités caractérisées par un couvert arborescent lâche.

Pour le thème b (hêtraie-sapinière dense et âgée) seulement 23 % des pixels sont bien classés. Les confusions se font avec le thème c (futaie de hêtres adultes dense de versant nord). Cette confusion s'explique car ces deux thèmes correspondant à de futaies denses ont une texture similaire. Le thème c est représenté par deux zones (5 et 6) pour lesquelles les pourcentages de pixels bien classés sont assez différents (46 % et 66 %). L'importance du choix des zones d'entraînement apparaît ici nettement.

De la même manière, les confusions existantes entre hêtraie dégradée ouverte du versant sud (thème d, zone 7) et hêtraie dense de versant sud (thème n, zone 17) ou coupe forestière dans hêtraie de versant sud (thème p, zone 19) s'expliquent aisément par la structure en mosaïque commune à ces hêtraies ouvertes qui juxtaposent des « bouquets » d'arbres serrés et des espaces de pelouses ou de fruticées basses.

Le thème j (hêtraie claire sur éboulis) peut sembler mal classé (20 %). En réalité, les confusions se font entre les différents types de hêtraies. La hêtraie claire sur éboulis comporte en effet des textures proches de l'ensemble des hêtraies (petits bouquets jointifs) et des textures originales (arbres épars sur sol nu).

Ces confusions plus prononcées que dans une classification spectrale, loin de remettre en cause l'analyse de texture menée dans ce travail, permettent donc au contraire de souligner des similarités structurales entre formations.

5. CONCLUSION

La méthodologie acquise sur les photographies aériennes depuis plusieurs décennies constitue une base incontournable pour l'analyse des images satellitales à très haute résolution spatiale. Si les principes des méthodes restent assez proches, le développement des moyens informatiques autorise des approches renouvelées.

La classification fondée sur les spectres de texture est un bon exemple de ce transfert de concepts de la photo-interprétation vers l'analyse automatisée d'images. Cette méthode s'inscrit dans la logique du photo-interprète qui considère la physionomie des formations végétales, traduite par la texture dans les classifications. La classification fondée sur les spectres de texture dans sa version actuellement implantée sous GRASS n'a cependant pas l'efficacité de la photo-interprétation. Ce défaut est, en grande partie, dû à l'absence de prise en compte de la radiométrie par la méthode, alors que le photo-interprète utilise la couleur comme critère d'analyse. La combinaison des classifications texturales et spectrales s'avère donc essentielle pour s'approcher des performances du photo-interprète.

L'automatisation des procédures de photo-interprétation apporte une connaissance sur les mécanismes qui conduisent aux résultats cartographiques : elle révèle les processus d'identification des structures paysagères pris en compte de façon plus ou moins consciente par le photo-interprète. La combinaison des classifications texturale et spectrale pose des problèmes méthodologiques clairement définis par Belhadj-Aissa *et al.* (1997) ou He *et al.* (1994) qui font l'objet de nos recherches.

6. RÉFÉRENCES

Bariou, R. (1978) Manuel de télédétection, photographies aériennes, images radar, thermographies satellites. Sodipe SA., Paris, 350 p.

Béguin, M. et Pumain, D. (1994) La représentation des données géographiques, Paris, Armand Colin., 192 p.

Belhadj-Aissa, A., Belhadj-Aissa, M. et Smara Y. (1997) Segmentation d'images satellitaires par analyse spectrale et mesures texturales appliquées à des sites urbains algériens. Actes des 6ièmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF, Liège, 2-5 octobre 1995, Télédétection des milieux urbains et périurbains. Éd. AUPELF-UREF, p. 93-101.

Bin Xu, Pen Gong, Edmund Seto and Robert Spear (2003). Comparison of Gray-Level Reduction and different texture spectrum encoding methods for land-use classification using a panchromatic Ikonos image. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 69, n° 5, 529-536.

Chevallier, R. (1966) Problématique de la photo-interprétation. À la recherche d'une logique. IIe Symposium international de photo-interprétation, septembre 1966, Paris, Éd. Technip, Paris.

Couteron, P. (2002) Quantifying change in patterned semi-arid vegetation by Fourier analysis of digitized photographs. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, (17), p. 3407-3425.

Franklin, S. E., Halls, R. J., Moskal, L. M., Maudie, A.J. and M.B. Lavigne (2000) Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. J. Remote Sensing, vol. 21, n° 1, p. 61-79.

Goguey, R. (1966) Recherches sur l'influence des dates et des conditions techniques des prises de vue dans la détection aérienne des indices d'origine

Archéologique. IIe Symposium international de photo-interprétation, septembre 1966, Paris, Éd. Technip, Paris.

Guy, M. (1966) Quelques principes et quelques expériences sur la méthodologie de la photo-interprétation. IIe Symposium international de photo-interprétation, septembre 1966, Paris, Éd. Technip, Paris.

Haese-Coat, V., Ronsin, J. et Wang, D. (1993-1994) La texture et ses différentes approches. Photo-Interprétation, n°1993/4-1994/1-2, p. 17-27.

Haralick, R.M. (1979) Statistical and structural approaches to texture. Proceedings of the IEEE, vol. 67, n° 5, p. 633-648.

He, D., Wang, L., Baulu, T., Morin, D. et Bannari, A. (1994) Classification spectrale et texturale des données d'images SPOT en milieu urbain. Int. J. Remote Sensing, vol. 15, n° 10, p. 2145-2152.

Kourgli, A. et Belhadj-Aissa, A (2000) Nouvel algorithme de calcul des paramètres de texture appliqué à la classification d'images satellitaires. Actes des 8ièmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Lausanne, 22-25 novembre 1999, La Télédétection en Francophonie : Analyse critique et perspectives. Éd. AUF, p 385-394.

Lake, L.A. (1991) Analyses de méthodes texturales appliquées au traitement des images. Essai, Département de Géographie Université de Sherbrooke, 38 p.

Laporte, J.M. (1983) Étude de la texture sur des simulations d'image du satellite SPOT. Thèse de 3ième cycle, Université de Paris VII, Paris, 173 p.

Ndi, Nyoungui A., Tonye, E. and Akono, A. (2002) Evaluation of speckle filtering and texture analysis mehods for land cover classification from SAR images, International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n° 9, p. 1895-1925.

Oprescu, N. (1966) Quelques aspects de la mécanisation et de l'automatisation des processus de photo-interprétation. IIe Symposium international de photo-interprétation, Paris, 1966.

Rameau, J.C. (1992) Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possibles au niveau de la gestion. Revue Forestière Française, vol XLIV, n° 5.

Rey, P. et Izard, M. (1969) Notions pratiques de photo-interprétation. Éditions du CNRS, Paris, 62 p.

Rouleau, B. (1991) Méthodes de la cartographie. Presses du CNRS, Paris, 213 p.

Simon, L. et Tamru, B. (1998) Cartographie biogéographique de paysage en Montagne de Lure. Mappemonde 49, p. 26-31.

Wang, L. and He, D.C. (1990) A new statistical approach for texture analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56, 1, p. 61-66.

Wang, L. (1994) Vector choice in the texture spectrum approach. Int. J. Remote Sensing, vol. 15, n° 18, p. 3823-3829.

Weszka J, Dyer CR and Rosenfeld A. (1976) A comparative study of texture measures for terrain classification. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 6:269-285.