Télédétection, 2001, Vol. 2, n°1, p 47 - 63
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2001 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *GB Science Publisher*
Imprimé en France

Généralisation sélective en mode image d'une classification satellitale

VINCENT SIMONNEAUX*

Institut de Recherche pour le Développement (I.R.D.), B.P. 434,1004 El Menzah, Tunisie

(*soumis le 3 septembre 1999 ; révisé le 17 janvier 2000 ; accepté le 5 juin 2000*)

La généralisation d'une image satellitale classée consiste globalement à lisser les contours des plages et à en éliminer les petites. On adapte ainsi le niveau de détail de la représentation à la précision réelle du document ainsi qu'à l'échelle de de sortie souhaitée, tout en facilitant une éventuelle vectorisation de l'image. Nous passons en revue les différentes techniques de généralisation en mode image rencontrées dans la littérature. L'image classée utilisée montre que toutes les classes ne présentent pas les mêmes besoins de généralisation. Les traitements effectués font principalement appel à des filtrages de l'image et à des opérateurs adaptés de la morphologie mathématique. L'originalité principale de notre démarche réside dans la spécificité du traitement effectué pour chaque classe en fonction de ses caractéristiques. Par exemple, une classe thématiquement importante comme l'eau, délimitée avec une bonne justesse mais peu étendue spatialement, verra son étendue peu modifiée et très légèrement exagérée par rapport aux autres classes. Une autre originalité de notre démarche est de proposer une méthode d'agrégation de classes fortement imbriquées et difficiles à généraliser indépendamment. Ainsi, les cultures, en partie itinérantes et disséminées dans la montagne, sont extraites puis agrégées pour former une image comportant trois niveaux de densité de cultures, qui est ensuite combinée aux autres classes. Enfin, le reste de la classification est généralisé globalement, d'abord par lissage des contours des plages, puis par élimination des petites plages subsistantes. On retiendra de ce travail différentes méthodes et outils qu'il est possible d'enchaîner et paramétrer, en fonction de ses besoins.

Mots-clefs : généralisation ; classification ; agrégation ; morphologie mathématique .

Selective Raster Mode Generalisation of a Remote Sensing Classification

The generalisation of a classified satellite image roughly consists in smoothing the boundaries of the patches and eliminating the too small ones. This process allows adjusting the level of detail of the spatial representation to the actual accuracy of the document as well as to the desired output scale. It also simplifies the possible vectorization of the image, for example for input and further processing in a vector based GIS. We first review the different techniques encountered in the literature for raster generalisation. Then, we present the Landsat TM image classification over Vietnam taken here as example, and show that the different classes it contains do not need the same kind of generalisation. The different processing we suggest for the image relies mainly on image filtering and mathematical morphology operators, the latter being slightly redefined to suit the particularities of « class image « processing, as opposed to binary or grey level images.

The main originality of this work relies on the specific processing applied to some classes related to their specific characteristics. For example, the « water » class, although not widespread over the image, has a high thematic importance and is also accurately delimited thanks to a good spectral discrimination. This class will have its spatial extent little modified, only slightly exaggerated by removing the small gaps in its patches. An other important feature of the proposed methodology is the aggregation of highly scattered or interspersed classes which would otherwise be very difficult to generalise without inducing biases. For example, the crops, a part of which is scattered in the mountains, are extracted and an image of density in three classes is derived. This density image is then combined with the other classes, adding them information about the average crop density around them. Finally, once the particular classes have been treated, the rest of the classification is generalised globally in two passes, the first for patch boundary smoothing, the second for small polygons removal. These two tasks are done separately because smoothing alone doesn't allow the removal of all the small patches. From this example, we have to retain different methods and elementary tools, that may be linked together to meet the specific needs of any classification generalisation. All this processing should be available from any well designed Image Processing software, especially using their macro language. Nevertheless, some problems still remain that widely open the field for further investigations.

Keywords : Generalisation ; Classification ; Aggregation ; Mathematical Morphology..

* Téléphone : 216 1750 009 ; télécopieur : 216 1750 254 ; CÉ : vincent.simonneaux@ird.fr

1. INTRODUCTION

Les bases de données géographiques informatisées permettent le stockage de l'intégralité des informations disponibles, sans limitations liées aux considérations d'échelle des documents. Ces bases sont ainsi sans échelle réelle, mais ce n'est pas le cas des documents finaux qui en seront issus. Or il est en général impossible de se contenter d'une simple mise à l'échelle de toute l'information contenue dans la base pour réaliser la sortie papier correspondante : on risque de produire un document illisible car trop complexe ou trop chargé. La **généralisation** est le terme consacré pour définir l'opération consistant à simplifier l'information disponible en fonction de l'échelle. Des articles de synthèse permettent de connaître l'état de l'art dans ce domaine (Lagrange et Ruas, 1993 ; Muller, 1991 ; Rigaux, 1994).

La couche d'information que nous traitons est une classification de l'occupation du sol obtenue par traitement numérique d'images satellitales. Le document présente un aspect « pointilliste » qui, même si l'on tient compte d'erreurs résiduelles toujours présentes, est bien le reflet d'une réalité complexe et d'une spatialisation dispersée (figure 1). Dans le contexte d'un SIG, on aura intérêt à stocker l'intégralité de cette information sans chercher *a priori* de généralisation. Ces données sont en effet satisfaisantes pour la plupart des opérations d'analyse qui sont indifférentes à l'aspect visuel de l'information (ex : statistiques d'occupation du sol par unité administrative).

En revanche, dans l'optique d'une représentation visuelle, sur papier ou à l'écran, une simple mise à l'échelle de l'image classée originale va fournir un document non satisfaisant du point de vue de la sémiologie graphique traditionnelle (Muller, 1991).

Celle-ci impose en effet de représenter des plages de taille suffisante pour aboutir à ce que l'on nomme parfois des cartes choroplèthes (nous désignons par plage tout polygone connexe de l'image appartenant à une même classe). Remarquons cependant que pour un œil exercé, la visualisation de classifications brutes non généralisées est acceptable, et parfois plus satisfaisante car elle rend mieux compte des imbrications entre classes, donc de la réalité.

Au-delà de l'aspect de visualisation, la généralisation d'une classification procure d'autres avantages. Elle permet dans une certaine mesure de réduire l'imprécision liée au classement de chaque pixel en corrigeant sa classe en fonction de son voisinage (Muller, 1991). Elle introduit de la sorte la composante de cohérence spatiale qui fait défaut à la plupart des algorithmes de classification. Ceux-ci ne considèrent en effet pour le classement que la signature spectrale du pixel à l'exclusion de celles des pixels de son voisinage immédiat. À défaut de réduire systématiquement les erreurs, la généralisation supprime l'illusion de précision que peut donner à l'œil non averti l'aspect dispersé des classes.

La généralisation permet enfin, d'un point de vue purement opératoire, de faciliter la vectorisation ultérieure de l'image. Notons que cette opération ne devrait pas être nécessaire en théorie mais qu'elle l'est souvent en pratique car les SIG ne réalisent pas avec toute l'aisance souhaitable la gestion simultanée de ces deux formats. On obtient alors des contours vectoriels nettement moins complexes qu'avec une image brute, ce qui réduit d'autant le volume des données et les temps de traitement et d'affichage.

2. ÉTAT DE L'ART

La généralisation au sens large peut se décomposer en différentes tâches. Une première étape consiste éventuellement à réduire le nombre de classes représentées en les groupant afin que les plages résultantes soient plus compactes et de surface importante : c'est la **généralisation thématique**. Cette opération n'affecte pas les caractéristiques spatiales des classes et est donc en général insuffisante.

On réalise par la suite une **généralisation spatiale** qui affecte non plus la définition des classes mais leur répartition spatiale. Elle consiste d'une part à simplifier les contours des plages (**lissage**), et d'autre part à supprimer celles qui ont des surfaces trop petites. Cette suppression des petites plages peut consister simplement à les faire disparaître lorsqu'elles sont isolées (**élimination**). On perd alors la trace de leur existence, elles sont considérées comme des artefacts. Une autre possibilité, lorsque plusieurs petites plages d'une même classe sont voisines, est de les regrouper dans des plages plus étendues (**agrégation**). On garde ici une trace de leur existence, à défaut d'une localisation précise.

On distingue deux grandes familles de méthodes de généralisation liées le plus souvent au format initial des données à généraliser, vectoriel ou en mode image (dit *raster* en anglais). Cette distinction est donc d'abord opératoire et les objectifs restent les mêmes, mais il reste néanmoins que ces différentes techniques s'adressent en général à des informations de nature différente.

Les méthodes vectorielles concernent par exemple les cartes topographiques, structurées en différents types d'objets (lignes, points, polygones). Nous n'aborderons pas ici ce type de traitement. Pour connaître l'état de l'art dans ce domaine, on pourra consulter les articles de synthèse de Bader et Weibel (1997) et Lagrange et Ruas (1993). Les méthodes en mode image concernent naturellement plus les produits issus de traitement d'images satellitales,

comme les classifications. L'information de base a une topologie plus simple puisqu'il s'agit le plus souvent uniquement de polygones. Chacune de ces familles de méthodes présente ses avantages, selon le type d'information à généraliser et l'objectif poursuivi (Muller, 1991). Les méthodes vectorielles permettent de mieux prendre en compte la notion d'objet (par exemple un polygone, représentant une parcelle, elle-même voisine d'autres parcelles), alors que le mode image s'intéresse aux valeurs rencontrées en chaque point de l'espace, indépendamment de niveaux supérieurs d'organisation spatiale comme le parcellaire ou de toute information topologique en général.

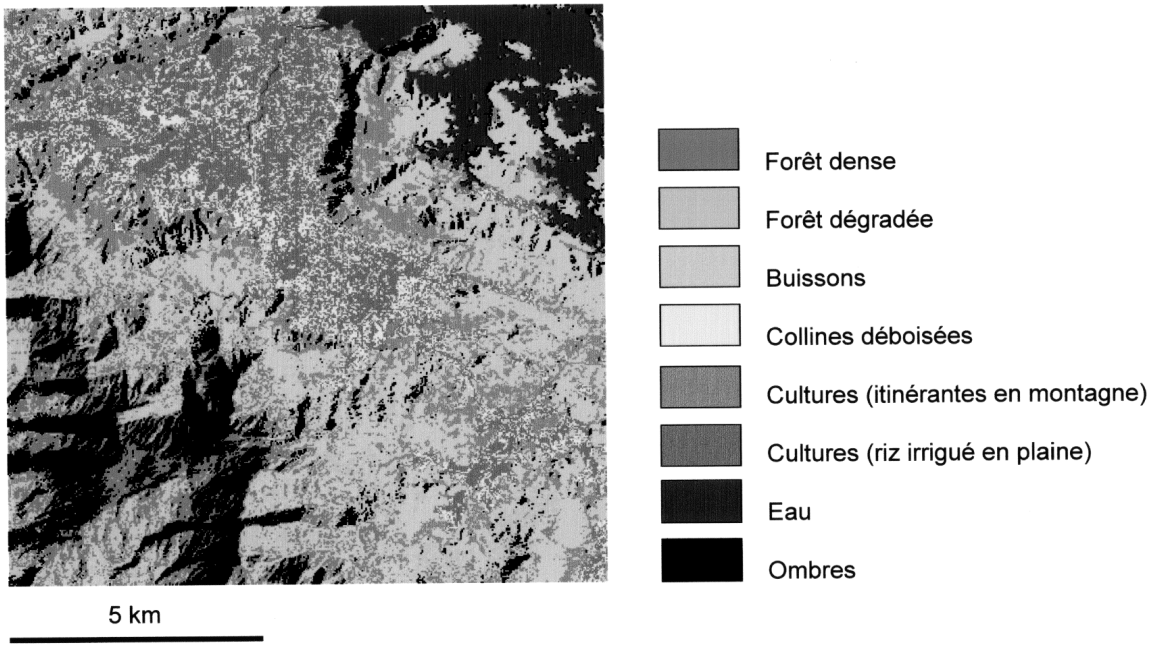


FIGURE 1 Extrait 1 : la classification initiale. *Subset 1 : the initial classification.* (voir image couleur IX à la fin de la revue)

Certaines méthodes de classification d'images satellitales réalisent d'emblée une généralisation en prenant en compte le voisinage spatial du pixel pour décider de son affectation à une classe. Le cas le plus simple prend simplement en compte ce voisinage dans les canaux radiométriques, ce qui revient plus ou moins à réaliser un lissage préalable de l'image. Le résultat en terme de généralisation est faible. D'autres méthodes réalisent des classifications en deux étapes (Le Men 1982 ; Girard *et al.*, 1990 ; Rogala, 1982 ; Robbez-Masson, 1994). Une première classification par des méthodes classiques, c'est à dire uniquement spectrales, comme par exemple les nuées dynamiques, permet de mettre en évidence des classes élémentaires ayant en général une signification très physique (sol nu, végétation, etc.). Dans une deuxième étape, on fait l'hypothèse que les classes finales thématiquement intéressantes sont définies comme des associations spatiales des classes élémentaires précédentes (par un vecteur de pourcentages de ces dernières). Pratiquement on examine le voisinage (à définir) de chaque pixel, et on l'affecte à la classe finale dont la composition se rapproche le plus de celle du voisinage dans la classification élémentaire. Si cette opération est réalisée avec un voisinage assez grand, il en résulte une réduction très importante de la dispersion des classes qui pouvait affecter la classification initiale. Cependant, on observe tout de même des petites plages et surtout l'apparition de « liserés » artificiellement créés à la frontière entre certaines classes. La plupart des méthodes de généralisation décrites dans les publications concernent l'image classée résultante et non le processus de classification lui-même. Très fréquemment, la classification est généralisée par un simple lissage majoritaire itéré, éventuellement jusqu'à stabilité de l'image. Cette technique doit sont succès à sa simplicité de mise en œuvre car ces opérateurs sont disponibles dans tout logiciel de traitement d'images. Les principaux défauts de cette méthode sont de laisser subsister des petites plages, de déformer de manière importante le contour des plages, et de traiter indifféremment toutes les classes. D'autres méthodes plus efficaces appliquent aux plages de l'image une série de contractions (érosions) suivies de dilatations (Le Men, 1982 ; Cixiang, 1994). Ce traitement permet d'une part de lisser les contours

des plages, et d'autre part d'éliminer simultanément des petites plages (selon un critère d'épaisseur minimale qui dépend du taux d'érosion appliqué).

Les vides résultant de l'élimination des petites plages sont comblés par les différentes classes adjacentes par des dilatations progressives de celles-ci. L'élimination des plages jugées « trop petites » peut également être réalisée par calcul de leur surface et mise à 0 en dessous d'un seuil choisi. Là aussi, le comblement des plages vides résultantes est effectué le plus souvent par remplissage au plus proche voisin, l'affectation intégrale à une seule des classes connexes étant plus rare car plus complexe.

Lorsque plusieurs petites plages d'une même classe sont voisines, il existe des alternatives à leur élimination pure et simple. Fuller et Brown (1996) proposent leur regroupement au sein de plages plus vastes affectées à la même classe, ou encore l'agrégation des mosaïques de petites plages de classes différentes en plages plus étendues correspondant à de nouvelles classes composites, dans l'esprit de celles créées par les méthodes de classification en deux étapes évoquées plus haut.

Enfin, adoptant une démarche très différente, Goffredo (1995) propose une procédure de généralisation basée sur l'hypothèse forte de détection *a priori* de polygones à partir des canaux radiométriques par des algorithmes de segmentation spatiale. Une fois ces polygones identifiés, l'image est classée de manière classique « au pixel », puis l'intérieur de chaque polygone subit par différentes méthodes une homogénéisation à l'issue de laquelle certains polygones pourront être soit scindés en plusieurs parties, soit fusionnés.

La démarche de généralisation que nous proposons réalise une synthèse de plusieurs des méthodes susmentionnées, en s'efforçant de séparer les étapes afin de mieux contrôler le processus.

L'originalité principale de notre approche est de proposer des traitements spécifiques pour les différentes classes d'occupation du sol rencontrées. Ainsi, on tient compte, même si ce n'est que de manière partielle, des particularités de chacune d'elles, notamment en ce qui concerne leurs relations spatiales et le respect de leur intégrité topologique (Lee, 1997).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Données tests : classification de l'occupation du sol dans les hautes terres du Viêt-nam

L'image classée est considérée ici comme une donnée acquise. Elle a été obtenue par classification numérique non supervisée d'une image TM de Landsat réalisée séparément sur deux strates, « plaine » et « montagne », afin d'améliorer la discrimination. Les classes automatiques obtenues ont été interprétées à partir d'observations de terrain. Nous ne pouvons évaluer précisément la justesse de cette classification du fait de l'accessibilité très limitée du terrain et de la difficulté à y retourner. La distinction entre zones cultivées et végétation naturelle est *a priori* très bonne, du fait d'une bonne discrimination spectrale, mais moins bonne pour les différentes formes de végétation naturelle dont les signatures spectrales sont souvent confondues. Quoi qu'il en soit, le travail présenté ici est indépendant de la justesse de la classification initiale puisque nous nous intéressons uniquement à la méthodologie de généralisation. L'utilisateur devra simplement être conscient que la justesse de la classification initiale conditionne nécessairement celle du résultat.

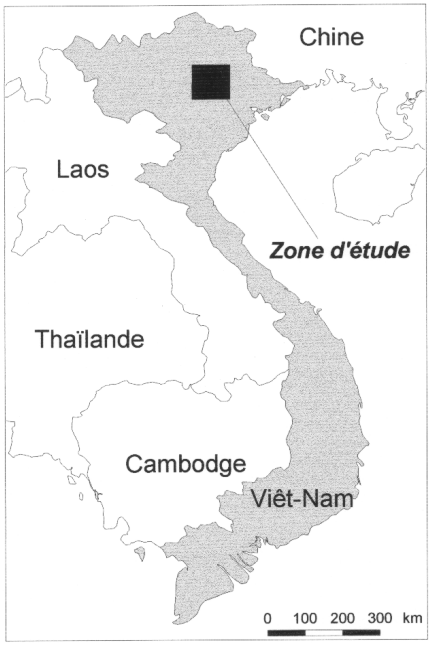


FIGURE 2 Localisation de la zone d'étude.
Location of the study area

Quelques explications sur les différents types d'occupation du sol rencontrés permettront de mieux comprendre l'intérêt des traitements spécifiques qu'ils vont subir. Nous sommes au Viêt-nam à 100 km au nord de Ha Noï (figure 2). Sur la figure 3, on présente la classification initiale sur l'ensemble de la zone étudiée, ainsi que la localisation des extraits utilisés pour illustrer les différents traitements. Le sud de la province étudiée est constitué par une plaine occupée essentiellement par du riz irrigué. L'habitat est groupé en villages, chaque maison étant associée à un jardin arboré, ce qui donne un

aspect très « végétalisé » aux villages. Le nord de la province est montagneux (figure 4). Les pentes sont couvertes d'une végétation naturelle allant de la forêt dense aux buissons, en passant par toute une série de formes intermédiaires de forêt dégradée. Des vallées étroites à fond plat séparent les montagnes, elles sont occupées principalement par du riz irrigué. Les flancs des montagnes sont parsemés localement de zones défrichées cultivées en sec (riz, maïs, manioc). C'est le fameux « raï », ou culture récurrente sur brûlis, encore largement pratiquée dans cette région. Enfin, entre la plaine et les montagnes s'étend une zone intermédiaire de collines pour la plupart défrichées et occupées par des plantations d'eucalyptus, de thé, ou des cultures en sec. Les zones basses entre les collines sont ici également occupées par du riz irrigué.

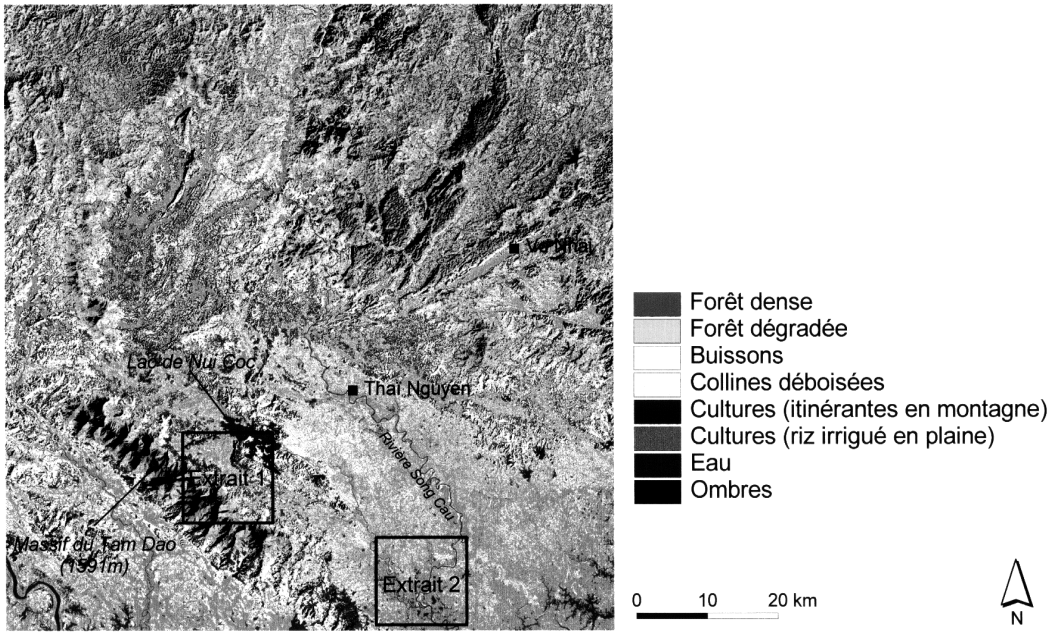


FIGURE 3 La classification initiale : localisation des extraits utilisés pour les traitements spécifiques. *The initial classification : location of the extracts used for specific class treatments.* (voir image couleur X à la fin de la revue)

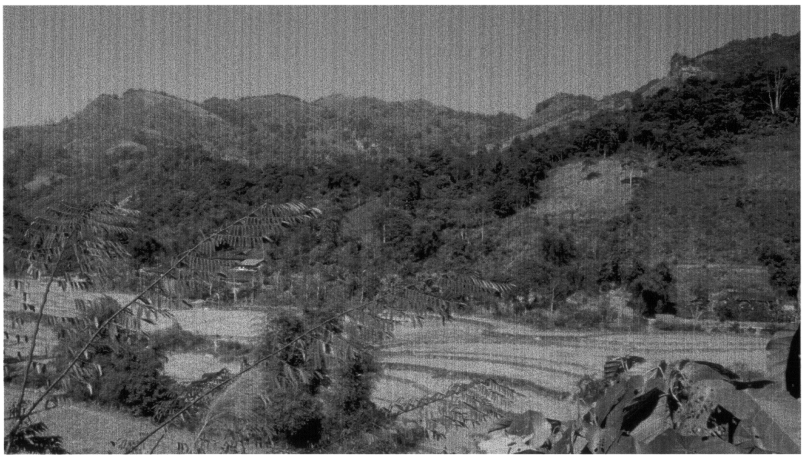


FIGURE 4 Aspect du paysage : au premier plan, le riz irrigué, puis, sur les pentes la végétation naturelle plus ou moins dégradée et défrichée. Au fond, des sommets occupés par le « raï ». *Aspects of the landscape : in the foreground, the irrigated rice, then, on the slopes, the natural vegetation. In the background, some tops of hills occupied by the « raï ».* (voir image couleur XI à la fin de la revue)

3.2. Principe de la généralisation effectuée : outils utilisés

Nous avons d'abord procédé à une généralisation thématique de la classification aboutissant à la légende présentée au tableau 1. Les cultures de plaine (riz irrigué) et de montagne (le raï) sont regroupées afin de simplifier les traitements. Ce regroupement permet notamment de conserver une cohérence spatiale au niveau du contact plaine/montagne. En effet, très souvent, les cultures en sec sont abondantes sur les bas des versants, au contact du riz irrigué de plaine. Une fois la généralisation achevée, ces deux catégories de cultures seront à nouveau distinguées sur les cartes finales, en se basant sur la stratification plaine/montagne (obtenue manuellement à partir d'une composition colorée de l'image, en l'absence de modèle numérique de terrain). Dès la classification initiale, étant donnée la mauvaise discrimination spectrale entre ces types de cultures, c'est la topographie qui avait permis de les distinguer.

Un extrait de l'image classée de départ est présenté figure 1. Sa localisation correspond à l'extrait 1 de la figure 3. Nous l'utiliserons pour illustrer les différentes étapes du processus, sauf le traitement de la classe eau pour laquelle l'extrait 2 est plus démonstratif.

TABLEAU 1 La classification numérique initiale.
The initial digital classification

Classe	Description
1	Cultures irriguées de vallées + cultures en sec de montagne (« raï »)
8	Buissons
12	Forêt dégradée (intermédiaire forêt - buissons)
14	Forêt
7	Collines dénudées (souvent plantées d'eucalyptus)
10	Eau
9	Ombres

La classe ombres est traitée séparément. On ne conserve que les zones d'ombre vraiment compactes pour lesquelles aucune estimation raisonnable de l'occupation sous jacente n'est possible.

Par contre, les petites ombres sont éliminées et remplacées par les classes voisines. Par ailleurs, certaines ombres présentes sur les reliefs accentués (massif du Tam Dao) participent à l'effet visuel de relief, donc à la lisibilité de la carte. Il est donc souhaitable, dans la mesure du possible, de ne pas trop déformer ces ombres.

La classe eau a une importance particulière, en terme de repère sur le terrain et de ressource agricole. Elle se présente le plus souvent sous forme de petites plages correspondant aux nombreux étangs qui parsèment la région, ou sous forme de plages étroites et allongées lorsqu'il s'agit de portions de rivières. Sa délimitation spatiale est excellente étant donné sa très bonne discrimination spectrale parmi les autres classes pour la zone considérée. Les plages d'eau risquent de disparaître trop ou d'être excessivement déformées si on ne prend pas de précautions particulières. Cette classe sera donc aussi traitée séparément.

Enfin, les cultures ont une importance particulière sur les images étudiées, notamment en montagne, où leur abondance peut être reliée au degré de pression sur l'environnement. Elles constituent de plus très souvent des plages de petite taille très dispersées dans le paysage. Toute généralisation spatiale, même faible, risque d'en supprimer la majeure partie. Afin de conserver une information sur ces cultures, nous allons créer une image spécifique des cultures comportant trois classes, l'une représentant les zones où les cultures constituent l'essentiel de l'occupation du sol (« Cultures denses »), une autre où elles sont seulement présentes sans être majoritaires (« Cultures présentes ») et une troisième où elles ne sont pratiquement pas présentes (« Pas de cultures »). Ce nouveau canal « cultures » sera alors combiné à la classification (Simonneaux, 1995).

Les autres classes de l'image seront généralisées globalement.

La notion de « petite plage » intervient fréquemment dans les processus de généralisation. C'est une notion relative qui dépend notamment de l'échelle à laquelle on se place. On peut la définir en se basant par exemple sur la loi du quart, traditionnelle en cartographie, en vertu de laquelle la plage minimale acceptable est de 2,5 * 2,5 mm. Cette règle n'est pas absolue et chacun est libre de choisir un seuil qu'il jugera plus pertinent. Alternativement, une petite plage peut se définir par rapport à son épaisseur, ce qui inclut des plages très allongées qui ne seraient pas considérées comme petites selon leur surface. Dans ce cas, la tradition cartographique nous dit qu'une plage ne peut avoir moins de 2 mm d'épaisseur.

Les traitements effectués sur chacune des classes ou groupes de classes sont des enchaînements d'opérateurs élémentaires de traitement d'image, dont beaucoup sont issus de la morphologie mathématique (Coster et Chermant, 1989). Nous proposons un codage des différents opérateurs utilisés (tableau 2, figures 5 et 6), afin de faciliter la description des traitements. Ils utilisent un voisinage n*n, c'est-à-dire un carré de n pixels de côté centré sur le pixel traité. Ces voisinages étant carrés, deux érosions ou dilatations avec un voisinage 3*3 sont équivalentes à une érosion ou dilatation avec un voisinage 5*5. L'avantage du voisinage 3*3 est d'opérer plus progressivement et donc de permettre des réglages plus fins. Il serait possible d'opérer encore plus progressivement en utilisant un voisinage comprenant seulement les quatre pixels partageant un côté avec le pixel central (voisinage « en

croix »). Enfin, bien que nous n'en ayons pas utilisé, des voisinages permettent de simuler le cercle (par exemple un carré 5*5 sans les coins). Cette alternative à l'avantage de mieux respecter l'idée de distance au pixel central, et génère des contours plus doux dans l'image résultante. Les différentes étapes d'une séquence de traitement sont comprises entre accolades et séparées par des virgules. La notion de dilatation et d'érosion est classique pour les images binaires ou en niveaux de gris, mais ces opérateurs ne peuvent s'appliquer directement aux images de classification. Nous redéfinissons donc ces termes (tableau 2). La plupart des opérateurs utilisés sont hélas rarement disponibles tels quels dans les logiciels commerciaux de traitement d'images. Il est donc nécessaire de les créer, soit à partir du macro langage de programmation associé au logiciel si celui-ci est suffisamment performant soit en utilisant un langage standard.

4. RÉSULTATS

Les opérateurs choisis pour les traitements ont été retenus parce qu'ils répondaient aux objectifs de généralisation fixés pour chacune des classes. Ces objectifs sont définis empiriquement, guidés par la thématique de l'occupation du sol (section 3.2). Les solutions proposées ne sont donc probablement pas les seules possibles, mais elles répondent correctement aux problèmes posés. Nous avons mentionné dans certains cas des alternatives possibles qui pourront être testées.

Le choix du paramétrage des divers opérateurs, notamment le nombre d'itérations et la forme des éléments structurants est par contre plus délicat à réaliser. Pour l'heure, les choix ont souvent été effectués de manière empirique. Bien souvent il n'existe pas de solution idéale : chaque paramétrage donne un résultat, ni meilleur ni pire qu'un autre, qu'il convient dans la mesure du possible de quantifier. Ainsi en est-il de l'agrégation des classes de densité de cultures, pour chacune desquelles nous calculons le pourcentage résultant de cultures issues de la classification initiale. L'esprit de ce travail n'est donc pas de fournir des solutions « clefs en main » à tous les problèmes de généralisation, mais simplement de fournir des outils pour cela, présentés au travers d'exemples d'utilisation.

4. 1. Traitement de la classe ombres

Cette classe est extraite et généralisée selon la séquence {N (lE), 1o, 1f, E (50 000) (figure 7). Tout d'abord, un nettoyage par reconstruction permet de ne conserver que les plages significativement compactes, auxquelles peuvent être rattachées des formes plus étroites. Le nettoyage est ici préféré à l'ouverture, pour tenter de préserver la forme des ombres, qui contribuent souvent à la lisibilité du relief. L'ouverture qui suit permet de supprimer les excroissances trop étroites qui subsistaient. Elle reste légère, toujours dans l'idée de tenter de ne pas trop déformer les plages. Ces deux premières étapes éliminent les ombres sur un critère d'épaisseur, les plages étroites étant remplacées ultérieurement par les classes voisines.

TABLEAU 2 Codage des opérateurs de généralisation. *Encoding of the generalization operators*

Code du traitement	Description
Xm(1), xM(1)	Séquence de x filtrages majoritaires
xd, xD	Séquence de x dilatations en mode binaire (figure 5). Opération classique équivalente à un filtrage maximum.
xe, xE	Séquence de x érosions en mode binaire (figure 5). Opération classique équivalente à un filtrage minimum.
xe_c, xE_c	Séquence de x érosions « en mode classification » (figure 6). Nous définissons ainsi le filtrage qui affecte à un pixel la valeur nulle si un des pixels du voisinage est différent de lui.
xd_c, xD_c	Séquence de x dilatations « en mode classification » (figure 6). Nous désignons ainsi le filtrage qui affecte à un pixel nul la valeur majoritaire non nulle de son voisinage. L'affectation se fait au hasard entre les ex-æquo.
Ds	Dilatations successives d'une classification jusqu'à stabilité de l'image
xo, XO	Ouverture de niveau x (figure 5). Équivalent à {xe, xd} (ou {xE, xD}). Concerne uniquement les images binaires.
xf, xF	Fermeture de niveau x (figure 5). Équivalent à {xd, xe} (ou {xD, xE}) Concerne uniquement les images binaires.
N (xe)	Nettoyage par « reconstruction géodésique » (Coster et Chermant, 1989) à partir de l'érodée xe ou xe_c de
N (xe_c)	l'image. Cet opérateur fonctionne aussi bien sur une image binaire que sur une classification. L'opération débute par une érosion des plages au moyen de {xe} ou {xec}. Les plages restantes (« graines ») sont ensuite dilatées progressivement jusqu'à stabilité de l'image, mais à chaque itération, on ne conserve que les pixels « dilatés » dont la valeur est identique à l'image de départ. On obtient ainsi une image où ne subsistent que les plages ayant une épaisseur suffisante, en ayant conservé exactement leur forme (contrairement à ce qui se passerait avec un processus de dilatation simple).
E (x)	Élimination des plages de surface inférieure à x. Les pixels correspondants sont codés à 0.

(1) Les lettres minuscules et majuscules désignent respectivement des voisinages 3*3 et 5*5 du pixel (n*n étant un voisinage carré de côté n).

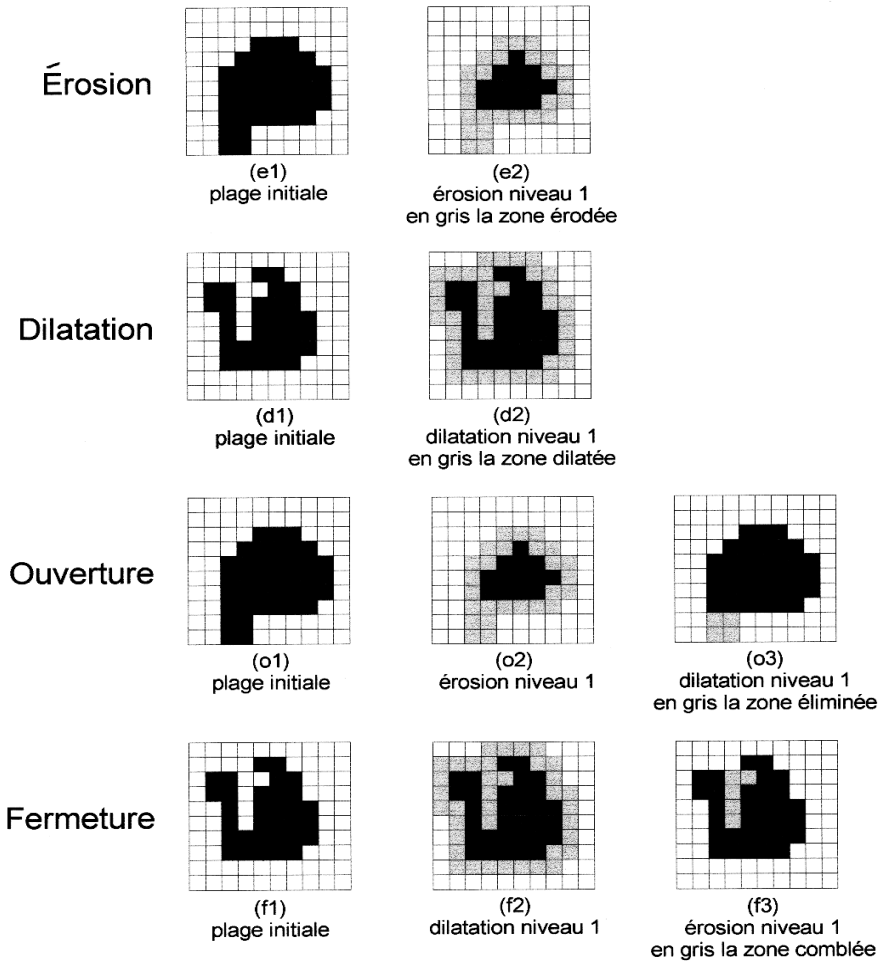


FIGURE 5 Les principaux opérateurs de morphologie mathématique utilisés. *The main morphological operators used*

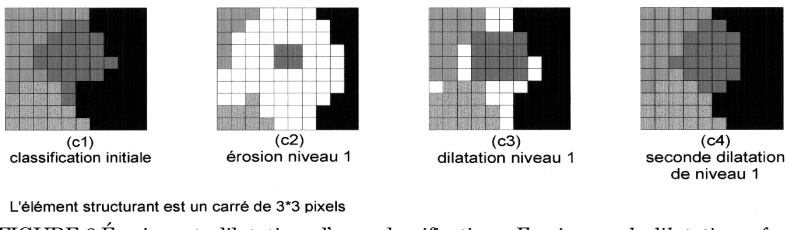


FIGURE 6 Érosion et dilatation d'une classification. *Erosion and dilatation of a classification.* (voir image couleur XII à la fin de la revue)

Les seuils sont choisis empiriquement l'épaisseur minimale des plages initiales conservées étant ici de 150 m (5 pixels), soit un peu en dessous des 200 m préconisés par la loi du quart pour une restitution supposée à l'échelle du 1 : 100 000. Nous avons en effet constaté qu'un seuil plus élevé faisait disparaître des ombres globalement étendues, mais parsemées de quelques pixels d'autres classes qui en altéraient la compacité. Une possibilité, non utilisée ici, pour justifier le paramétrage serait de comparer l'occupation du sol réelle cachée par les ombres à celle de leur voisinage, en fonction de leur épaisseur. On disposerait ainsi d'une relation entre épaisseur et probabilité d'erreur lors du remplacement par les classes voisines, et il serait donc possible de choisir un seuil en connaissance de cause. Ensuite, une fermeture permet de poursuivre le lissage des contours, pour en améliorer l'aspect esthétique, en

supprimant les indentations trop étroites et en bouchant des vides. Enfin, les petites plages restantes, inférieures à 50 000 m², sont éliminées. Ce seuil est choisi arbitrairement en appliquant la loi du quart pour une restitution supposée à l'échelle 1 : 100 000. L'image simplifiée des ombres est alors surimposée à la classification initiale après que l'ancienne classe ombres ait été codée à 0. Il reste alors des zones codées 0 qui correspondent aux ombres initiales non retenues. Ces zones sont comblées par dilatation des classes voisines ({Ds}).

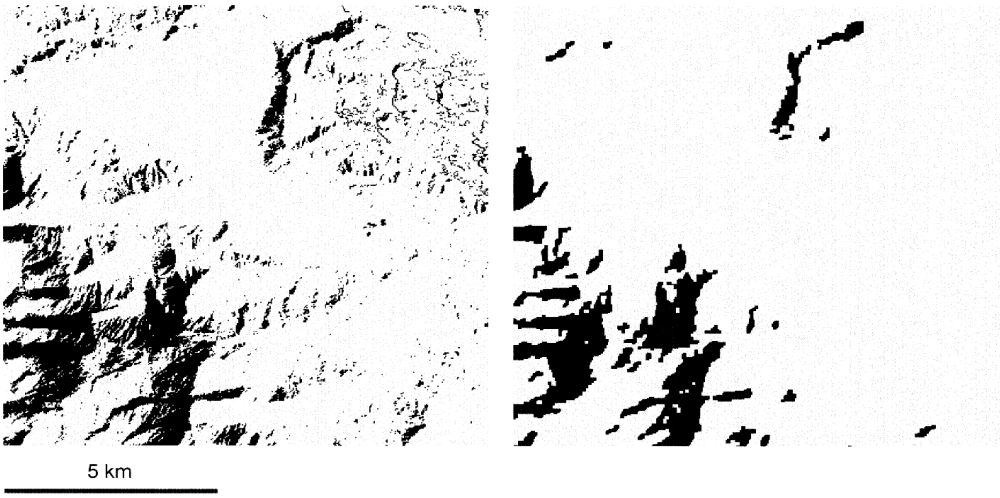


FIGURE 7 Extrait 1 : la classe avant et après généralisation, en noir. *Subset 1 : the shade class before and after generalization, in black*

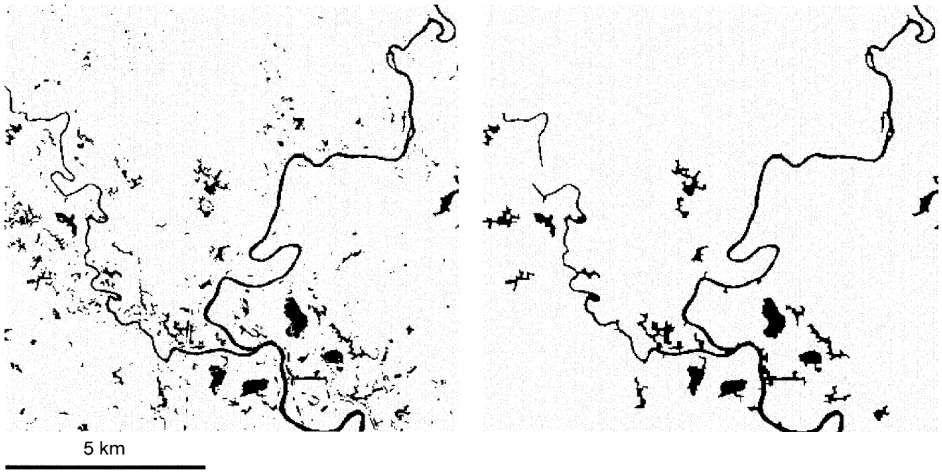


FIGURE 8 Extrait 2 : la classe eau avant et après généralisation, en noir. *Subset 2 : the water before and after generalization, in black*

4.2 Traitement de la classe eau

La classe est extraite, puis généralisée selon la séquence ({1f,E (50 000)}). Le résultat est présenté sur la figure 8, il correspond à l'extrait 2 de la figure 3, qui montre beaucoup mieux l'effet du traitement que l'extrait 1.

La fermeture de niveau 1 permet de « consolider le trait » en bouchant les petites lacunes. Ce traitement se rapproche de la notion d'exagération (Jaakkola, 1997 ; Bader et Weibel, 1997) dans la mesure où on augmente artificiellement la surface de la classe. Ici, cependant, l'exagération n'est pas systématique et ne concerne que des « lacunes » dans les plages. On améliore ainsi la visibilité de la classe, tout en préservant autant que possible sa forme et sa topologie linéaire (Lee, 1997). Le choix de l'intensité de la fermeture résulte d'un compromis entre la volonté de renforcer les rivières, et le souci de ne pas trop remplir de méandres et de ne pas trop agréger de mares. On remarquera que malgré la faiblesse de la

fermeture effectuée, un méandre est tout de même bouché. Ensuite, nous souhaitons éliminer les plages trop petites. On ne peut réaliser ici la moindre ouverture sans faire disparaître de nombreuses portions de rivières étroites mais néanmoins intéressantes car bien utiles à la lisibilité de la carte. Suivant la loi du quart, on élimine donc les petites plages de surface inférieure à 50 000 m² conservant ainsi les plages étroites mais allongées. Il serait envisageable d'abaisser ce seuil étant donné la précision de localisation et l'importance thématique de ce thème. Sur la figure 8, on montre que cette élimination des petites plages supprime tout de même des petits tronçons de rivières non connectés, ce qui nuit à la cohérence du résultat. Une solution possible pour préserver l'aspect des cours d'eau serait alors de n'éliminer les petites plages qu'au-dessus d'une certaine compacité (définie par exemple par le rapport surface/périmètre). Une autre voie possible serait de tester l'extraction du squelette de la classe eau, et l'utiliser, après sélection des tronçons suffisamment longs, pour reconstituer les cours d'eau dans leur épaisseur par reconstruction morphologique. Enfin, comme pour les ombres, le résultat est surimposé à la classification initiale après que l'ancienne classe eau a été codée à 0. Les zones codées 0 correspondant aux petites plages d'eau éliminées sont comblées par dilatation des classes voisines ({Ds}).

4.3. Traitement de la classe cultures

La donnée de base est ici l'image binaire issue de l'extraction de la classe cultures résultante du regroupement des cultures de plaine et de montagne (classe 1 du tableau 1). Notre objectif est de délimiter des classes de densité de cultures ayant des contours suffisamment simples. L'idée qui vient à l'esprit pour réaliser cette tâche est d'appliquer un filtrage calculant la densité des cultures sur un voisinage donné, puis de classer ces densités en quelques catégories. Le problème de cette solution est que les contours ainsi obtenus sont encore trop complexes et qu'une généralisation est toujours nécessaire. Nous choisissons donc plutôt de faire appel aux opérateurs d'agrégation morphologique, solution relativement courante (Bo Su *et al*., 1997 ; Lay et Weber *in* Muller, 1991 ; Schylberg *in* Lagrange et Ruas, 1993). Ces méthodes donnent des résultats sensiblement différents. Ainsi, lorsqu'une fermeture morphologique agrège une petite plage de cultures à une plage voisine plus importante, la nouvelle plage résultante va jusqu'à la petite plage, mais pas au delà, alors qu'un filtrage densité délimiterait une zone de rayon constant autour de cette petite plage. Les plages agrégées résultantes de la fermeture ressemblent donc à l'enveloppe convexe des petites plages agrégées. Ici, cette différence n'est pas nécessairement gênante et nous l'acceptons. En effet les cultures dispersées étant globalement réparties en densité décroissante à partir des vallées, on peut faire l'hypothèse d'une pression anthropique plus importante dans l'espace compris entre la vallée et les parcelles de cultures éloignées, qu'au-delà de ces dernières. Une solution pour éviter ce problème serait de traiter séparément les cultures de vallées et les cultures de montagne, les secondes bénéficiant d'un filtrage de densité. Dans un souci de simplification, nous avons choisi de traiter globalement ces deux types de cultures pour ne les séparer qu'à la fin en se basant sur la stratification plaine/montagne. Cette distinction finale est importante, car il s'agit de deux systèmes de cultures distincts, pratiqués en général par des ethnies différentes.

Nous proposons deux séquences de traitement permettant d'obtenir les taux d'agrégation désirés. Ces séquences acceptent un paramétrage à de nombreux niveaux, on pourrait donc envisager de les utiliser pour d'autres classes et d'autres densités.

La classe cultures denses est obtenue par la séquence {N (1E), 1f, 1m, E (50 000)}. Un premier nettoyage morphologique permet de ne garder que les plages suffisamment denses. Pour le choix du paramétrage, l'idée est de trouver le meilleur compromis entre la suppression des plages de cultures dispersées en montagne, et la conservation des cultures de vallées. Ces dernières sont en effet parfois parsemées par erreur de pixels de classes différentes qui en affectent la compacité, ce qui risque de les faire disparaître. Ensuite, une fermeture permet de simplifier ces plages en les rendant plus compactes. Le niveau de fermeture est dicté par l'épaisseur maximale des zones autres que cultures que l'on tolère à l'intérieur des plages de cultures denses. On pourrait assister ce choix en calculant le pourcentage de cultures dans la classe dense en fonction du niveau de fermeture. La fermeture conserve les excroissances laissées par la reconstruction, et nous ne cherchons pas à les éliminer. Nous considérons en effet qu'elles sont partie intégrante de la classe cultures denses. Notamment il s'agit très souvent de petites vallées étroites affluentes des vallées principales. Ensuite, le lissage majoritaire a pour but de lisser les contours qui présentent quelques irrégularités inesthétiques. Enfin, on élimine les plages dont la surface est inférieure à 50 000 m² conservant ainsi des plages étroites mais dont la surface est significative, car elles correspondent aux vallées étroites cultivées. La classe de densité résultante contient 74 % de cultures en moyenne sur l'ensemble de l'image (tableau 4).

TABLEAU 4 Composition des classes généralisées en fonction des classes initiales.
Composition of generalized classes versus initial classes.

Classes initiales	1 Riz irrigué (vallées)	11 Raï	7 Collines défrichées	8 Buissons	12 Forêt dégradée	14 Forêt dense	9 Ombres	10 Eau	% correct
Classes généralisées									
20 Riz irrigués	74	0	13	11	0	0	1	1	74
11 Raï	1	64	1	19	7	2	6	1	70
14 Forêt dense	0	1	0	8	24	47	21	0	68
12 Forêt dégradée	0	1	0	21	44	25	8	0	52
8 Buissons	0	2	0	67	13	17	2	0	69
54 Forêt dense + cultures	0	4	0	12	23	39	22	0	65
52 Forêt dégradée + cultures	0	9	0	23	38	18	12	0	59
48 Buissons + cultures	2	14	2	61	10	7	4	0	79
47 Collines + cultures	17	1	61	21	0	0	0	0	78
9 Ombres	0	0	0	0	1	3	96	0	96
10 Eau	8	1	0	0	0	0	1	90	0

En gris, les associations attendues

Elle correspond aux zones de cultures permanentes, essentiellement du riz irrigué en vallées, mais également des zones de raï dense en bas des versants.

La classe cultures présentes est obtenue par la séquence {5F, 20,-N (6E)}. La phase principale est une fermeture importante, qui agrège les plages dispersées, et dont l'intensité conditionne la densité de la classe finale. Le choix de l'intensité de la fermeture est effectué empiriquement par l'observation visuelle du résultat. Il s'agit d'englober suffisamment de cultures dispersées, tout en évitant que la classe ne s'étende trop, pour obtenir une segmentation équilibrée de l'espace géographique. Dans notre exemple, un critère supplémentaire a guidé notre choix. Les cultures dites dispersées ne sont pas réparties avec des densités quelconques, on distingue des zones où des cultures dispersées sont présentes, et des zones où elles ne le sont pas ou peu. Nous nous sommes efforcés de choisir un paramétrage qui permet de différencier ces deux classes approximatives de densité, imitant en cela la démarche probable d'un photo-interprète qui désirerait rendre compte du phénomène de dispersion des cultures de manière synthétique.

Plusieurs autres critères sont envisageables pour aboutir à un choix raisonné du niveau d'agrégation, voire du nombre de classes de densité qu'il est souhaitable de créer. Nous évoquons ici simplement ces possibilités, dont l'étude détaillée dépasse le cadre de cet article. Ainsi, repartant du constat que la densité des cultures est souvent répartie en grandes tendances, il serait envisageable de calculer la courbe de répartition de la surface de la classe cultures présentes en fonction du paramétrage, et de choisir les seuils en fonction des changements d'allure éventuels de cette courbe. Il est également possible de se fixer un objectif de densité de cultures à l'intérieur de la classe, par exemple en vertu de considérations écologiques ou économiques, et d'adapter les niveaux d'agrégation en conséquence. Enfin, suivant les mêmes considérations thématiques, on peut décider d'une distance maximale entre deux plages de cultures, en dessous de laquelle on souhaite les voir s'agréger au sein d'une classe synthétique. Cette distance est directement liée au niveau de fermeture et à la taille de l'élément structurant (elle est de 600 m pour le réglage choisi). Une fois la fermeture réalisée, les opérations ultérieures ont essentiellement pour but d'améliorer l'aspect visuel du résultat. L'ouverture élimine les plages isolées qui n'ont pas été capturées par la fermeture, et supprime simultanément les excroissances trop étroites. Il est en effet inutile, voire trompeur, de laisser trop de détails dans le contour d'une classe qui a par définition des contours approximatifs. Le seuil a été choisi de manière empirique par comparaison visuelle de plusieurs réglages, afin de supprimer toutes les petites plages de cultures isolées. Le nettoyage final, appliqué au complémentaire de la classe (signe -), permet de supprimer les vides pseudos circulaires qui subsistent à l'intérieur des plages. Ceux-ci résultent de la phase de fermeture et leur forme n'est pas significative (problème développé à la section 4.4.). La classe résultante contient 11 % de cultures en

moyenne sur l'ensemble de l'image. D'un point de vue thématique, cette classe correspond aux zones où le « raï » est pratiqué assez régulièrement.

Les deux classes précédentes sont alors réunies en une image synthétique de densité en trois niveaux (figure 9). Après un codage adapté (Cultures denses = 40, Cultures présentes = 20, Pas de cultures = 0), elle est ajoutée à la classification initiale. On obtient ainsi des valeurs de pixels dont chacune correspond à une seule combinaison des valeurs de départ (tableau 3). Par exemple, la classe 48 est la somme de la classe 40 (cultures denses) et de la classe 8 (buissons). L'image somme est ensuite simplifiée par recodage en fonction des classes souhaitées (figure 10). On fait ainsi apparaître des classes correspondant à un couvert naturel, mais avec mention de la présence significative de cultures (raï) dans celles-ci (classes 27, 28, 32, 34).

TABLEAU 3 Combinaison de la classification et de l'image de densité des cultures. *Combination of the classification with the crops density image*

Classe initiale	Classe de densité des cultures	Combinaison (somme)	Classe finale
1	0 (absentes)	1	**20**
7	0	7	**7**
8	0	8	**8**
9	0	9	**9**
10	0	10	**10**
12	0	12	**12**
14	0	14	**14**
1	20 (présentes)	21	**20**
7	20	27	**27**
8	20	28	**28**
9	20	29	**9**
10	20	30	**10**
12	20	32	**32**
14	20	34	**34**
1	40 (denses)	41	**40**
7	40	47	**40**
8	40	48	**40**
9	40	49	**9**
10	40	50	**10**
12	40	52	**40**
14	40	54	**40**

Description des classes finales :

7	Collines dénudées (eucalyptus)
8	Buissons (souvent des bambous)
9	Ombres
10	Eau
12	Forêt dense
14	Forêt dégradée (densité intermédiaire entre buissons et forêt)
20	Cultures dispersées (principalement le raï)
27	Collines dénudées + cultures
28	Buissons + cultures
32	Forêt dégradée + cultures
34	Forêt dense + cultures
40	Cultures denses (riz irrigué + raï dense en bas des pentes)

4.4. Généralisation finale

L'image obtenue à ce stade comporte toujours des détails excessifs car seules les classes ayant subi un traitement spécifique ont un contour simplifié. Il s'agit maintenant d'étendre la généralisation aux classes restantes pour parvenir à un lissage de leurs contours et à l'élimination des petites plages. Ce type de généralisation est fréquemment recherché par une série de lissages majoritaires {xM}. Le problème de ce type de généralisation est qu'il provoque souvent des déformations incontrôlées de la forme des contours, mais surtout, il ne permet pas de faire disparaître des petites plages qui prennent une forme circulaire et restent stables malgré les lissages successifs. Nous avons donc choisi une méthode en deux temps, à base d'érosions et de dilatations.

Premièrement les contours des plages sont lissés au moyen de la séquence {4M, $1E_c$, Ds}. Il s'agit globalement d'une érosion des plages suivie d'une dilatation (Le Men, 1982 ; Cixiang, 1994). La séquence préalable de filtrages majoritaires a pour but de générer des plages de compacité suffisante pour ne pas disparaître massivement en laissant des lacunes importantes lors des érosions. En effet, une classification est souvent constituée localement par de nombreuses petites plages adjacentes. Celles-ci peuvent disparaître en masse sous l'effet des érosions et créer des lacunes de taille nettement supérieure à la taille limite admise pour les petites parcelles, occasionnant localement un déficit d'information important. Nous avons donc décidé du nombre de lissages à appliquer par visualisation de l'image résultante des érosions ultérieures, en s'assurant qu'il n'y avait pas formation de grosses lacunes. Ensuite, le nombre d'érosions est proportionnel à l'intensité souhaitée du lissage, évalué visuellement. Les dilatations suivantes sont effectuées jusqu'à la disparition de tous les pixels nuls.

Dans un deuxième temps, nous éliminons les petites plages qui subsistent. L'étape de lissage des contours permet déjà de supprimer des petites plages, celles dont il ne reste aucun pixel à l'issue des érosions effectuées. Celles à qui il ne reste qu'un seul pixel vont subsister, mais à l'issue des dilatations elles vont prendre une forme pseudo-circulaire (ici d'environ 5 pixels de diamètre, soit 150 m) souvent très différente de leur forme initiale. De plus, la conséquence de cette déformation est qu'un pourcentage important de la surface de ces petites plages ne correspond plus à la réalité. Il est donc préférable de les supprimer. Nous utilisons la séquence de traitement {N ($3e_c$), Ds}. Il s'agit d'un nettoyage par reconstruction qui permet de conserver la

forme des plages restantes, obtenue lors de la phase précédente de lissage du contour. L'élimination des petites plages est donc effectuée en fonction de leur épaisseur et non de leur surface, ce qui correspond assez bien à la notion de lisibilité. Les plages d'épaisseur inférieure ou égale à 6 pixels, soit 180 m, sont éliminées. Nous sommes ainsi en accord avec la loi du quart, qui énonce que l'épaisseur minimale d'une plage est 2 mm, soit 200 m à l'échelle de 1 : 100 000. Ici, cependant cette seule loi ne devrait pas suffire à justifier notre choix, nous devrions également tenir compte de l'erreur induite par la généralisation pour ces petites plages.

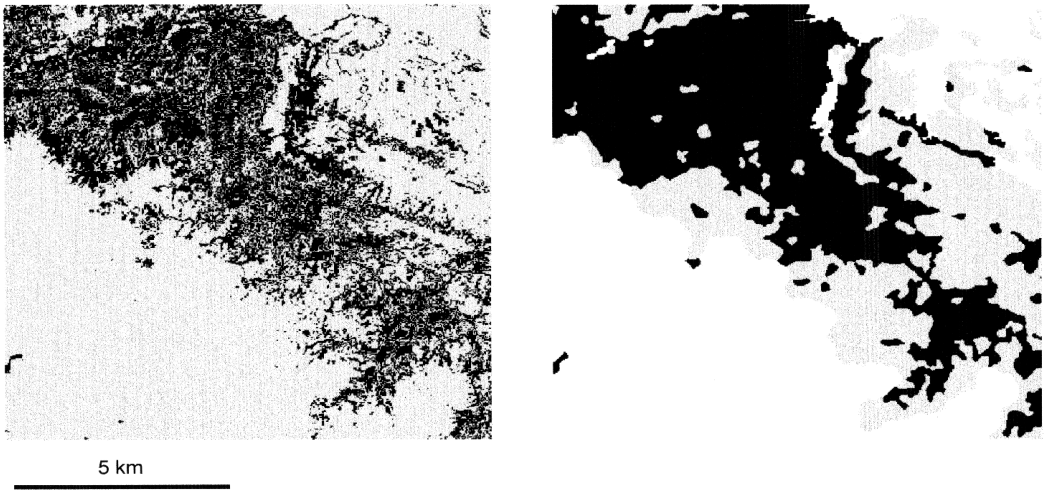


FIGURE 9 Extrait 1 : la classe cultures avant et après généralisation. Cultures denses en noir, cultures présentes en gris, pas de cultures en blanc. *Subset 1 : the crop class before and after generalization. Dense crops in black, crops present in grey, no crops in white*

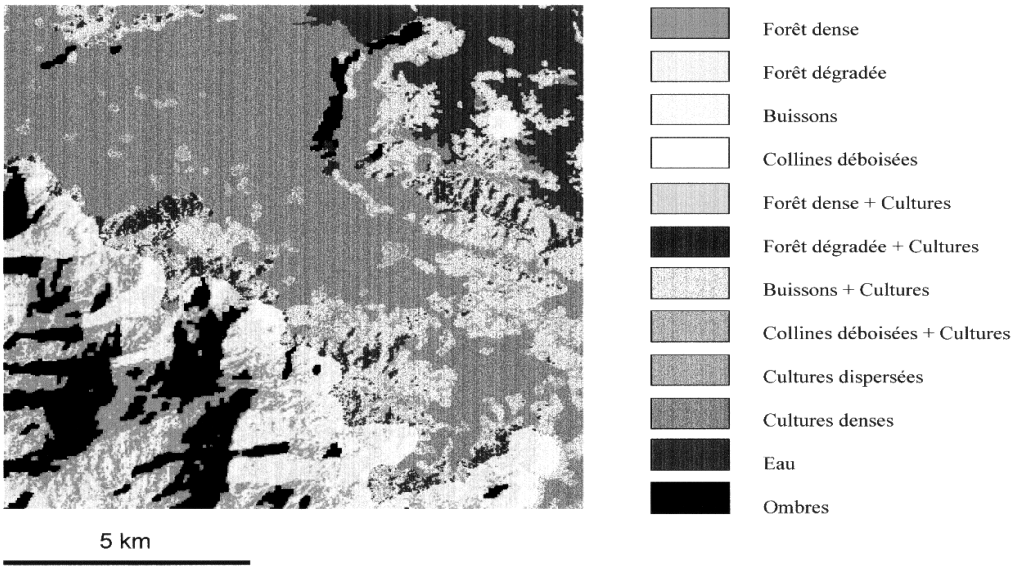


FIGURE 10 Extrait 1 : combinaison de la classification initiale et des 3 classes prétraitées avant généralisation finale. *Subset 1 : combination of the initial classification with 3 preprocessed classes before final generalization.* (voir image couleur XIIII à la fin de la revue)

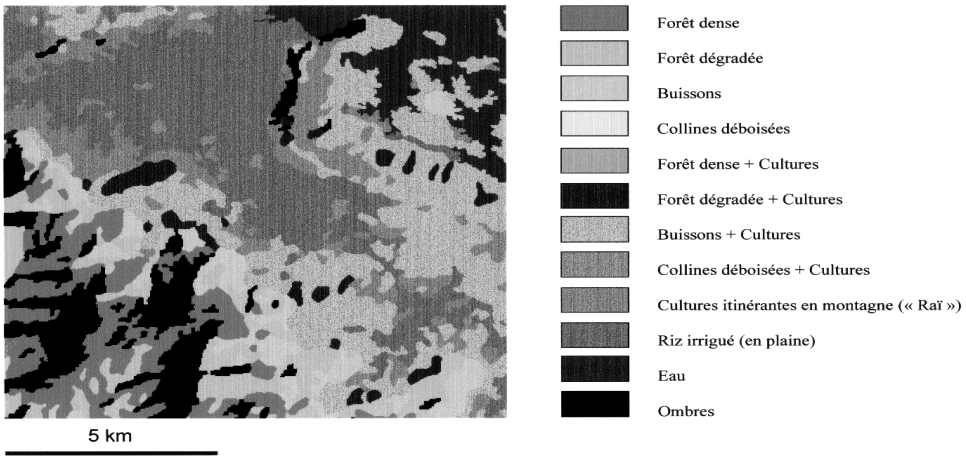


FIGURE 11 Extrait 1 : classification finale. *Subset 1 : final classification* . (voir image couleur XIV à la fin de la revue)

Ainsi, une méthode à explorer pour choisir une taille minimale des plages serait par exemple de calculer la matrice de confusion en fonction de la surface des plages, ou de leur épaisseur, ce qui permettrait de choisir en connaissance de cause le seuil minimal. Le critère d'épaisseur rappelle le classique indice de forme d'un polygone représenté par le rapport Surface/Périmètre (Le Men, 1982), facilement calculé en mode vectoriel, et qui quantifie l'épaisseur relative des plages. Cependant, pour obtenir un critère proche de l'érosion morphologique, il est nécessaire d'appréhender l'épaisseur absolue, et donc de considérer la surface de la plage en même temps que le rapport précédent.

Enfin, suite au nettoyage morphologique, une série de dilatations opèrent un bouchage des vides au plus proche voisin, sans privilégier de classes (l'affectation a lieu au hasard dans le cas d'ex-æquo). Il serait toutefois envisageable d'affecter des ordres de priorité aux classes pour cette opération, en fonction de considérations thématiques. Un tableau croisé des « ressemblances thématiques » entre classes permettrait de fusionner chaque petite plage supprimée avec celle de ses voisines qui lui ressemble le plus.

Cette phase finale de généralisation épargne les classes cultures denses, ombres et eau, qui ont acquis leur forme définitive à l'issue de leur traitement spécifique, à l'exception de quelques petites îles qui pouvaient y subsister (notamment dans les cultures denses), qui sont elles aussi bouchées. La procédure est paramétrable à différents niveaux, ce qui permet de contrôler séparément le degré de simplification du contour et la taille des « petites » plages à éliminer. Une « élimination-lissage » effectuée en une seule séquence d'érosions et dilatations ne perrmettrait pas de supprimer des plages de taille relativement importante tout en lissant faiblement les contours des plages conservées.

Des améliorations de cette phase finale sont possibles. Ainsi, le croisement des classes de densité de cultures avec les classes initiales provoque localement une diminution de la taille moyenne des plages. Cela ne se produisant qu'à la limite entre les plages cultures présentes et cultures absentes, le phénomène reste relativement limité. Nous avons vu que ces petites plages compliquent la phase de généralisation finale, et obligent à appliquer des lissages majoritaires préalables afin d'éviter l'apparition de lacunes trop importantes. Une alternative non testée ici consisterait à ne pas combiner la classe intermédiaire cultures présentes avant la phase finale de généralisation, et à la surimposer seulement à la fin. Elle conserverait de plus l'intégrité de son contour, donc son caractère de « surcharge » améliorant la lisibilité de la carte. Toujours dans le but de réduire le nombre de petites plages avant la généralisation finale, il serait envisageable de supprimer les cultures dispersées qui subsistent après recombinaison (classe finale 20), et de les remplacer par leur voisinage (opérateur Ds). En effet, ces cultures ne sont plus vraiment utiles puisque l'information les concernant a été synthétisée dans les classes de densité. Notons cependant que même sans cette précaution, bien qu'elles ne facilitent pas le traitement, ces petites plages sont quasiment toutes éliminées par la procédure de généralisation finale, étant donnée leur faible surface.

Le résultat final de la généralisation est présenté sur la figure 11. La distinction riz irrigué / raï y a été réintroduite par la prise en compte de la stratification

plaine/montagne. Un organigramme résumant l'ensemble de la procédure est présenté sur la figure 12. Le tableau 4 montre la répartition des classes généralisées en fonction des classes initiales. La répartition observée est globalement satisfaisante, mais on note des confusions importantes entre les différents types de végétations naturelles. Cela n'est pas surprenant étant donné que ces classes sont à l'origine très imbriquées spatialement. Cette confusion est plus importante pour la classe forêt dégradée car elle est intermédiaire, thématiquement : et dans l'espace, entre buissons et forêt dense. Le riz irrigué comporte une proportion non négligeable de collines défrichées et de buissons. Cela s'explique par la présence de riz irrigué entre les collines. Pour les buissons, cette confusion s'explique par le fait que dans la classification initiale, le riz irrigué, en vallées, en partiellement constellé de buissons qui constituent probablement des erreurs dans la classification initiale (ainsi, dans ce cas précis, la généralisation améliore la justesse du résultat). La présence de buissons dans la classe collines + cultures s'explique par la présence effective de buissons dispersés parmi les collines. Enfin, la classe raï comprend elle aussi une forte proportion de buissons, ce qui est logique car ces cultures sont abondantes dans les zones de buissons, en bas des pentes.

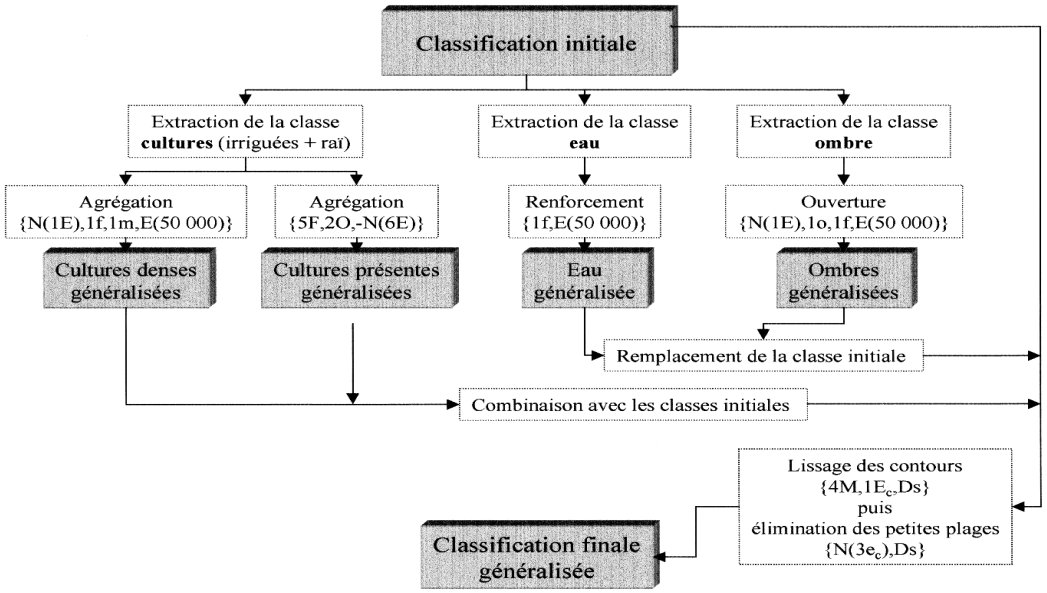


FIGURE 12 Organigramme récapitulatif des traitements effectués. *Flow-chart summarising the treatments applied*

5. DISCUSSION

Lorsqu'on observe une carte, on fait intuitivement l'hypothèse que plus les contours des plages observés sont détaillés (par exemple ici la classe eau), plus leur justesse est bonne. Bien que cette tendance soit souvent vérifiée, cela n'est pas toujours le cas, et ces hypothèses implicites peuvent être trompeuses. Il serait théoriquement souhaitable de préciser dans la légende d'une carte le degré de justesse associé à chaque type de contour, étant entendu qu'il est très souvent variable selon les classes.

Dans notre cas, la classe eau, délimitée avec précision, est faiblement généralisée et présente un contour détaillé, alors que les différentes classes de densité de cultures ont des contours plus simples, traduisant effectivement une limite plus approximative. Une généralisation plus poussée de la classe eau aurait permis obtenir un contour d'un niveau de simplification voisin des autres classes, mais on aurait alors perdu de l'information intéressante.

En résumé, plus une limite est connue avec précision, moins il est nécessaire de la généraliser. Les classes d'une même carte pouvant être connues avec des précisions variables, ce qui est très souvent le cas pour des cartes issues d'images satellitales, deux solutions se présentent. Soit on uniformise la précision des traits par une généralisation forte, en se basant sur la classe la plus approximative, soit on applique une généralisation spécifique aux classes, et il faut alors le mentionner dans la légende pour que le lecteur interprète correctement les différences constatées dans le détail des contours.

Les paramétrages choisis pour les traitements sont dépendants de la résolution des images

satellitales utilisées, mais il est relativement aisé de transposer les réglages à une image de résolution différente pour obtenir des traitements équivalents en terme de distance sur le terrain. Par exemple, pour un élément structurant carré de taille 3*3, deux dilatations sur une image TM de Landsat (pixel 30 m) sont équivalentes à 3 dilatations sur une image HRV (XS) de SPOT (pixel 20 m). Plus le pixel est petit, et plus les paramétrages pourront être précis. Par exemple, on a constaté que la fermeture minimale effectuée sur la classe eau avait provoqué le remplissage d'un méandre. Ce problème n'aurait peut-être pas eu lieu avec une meilleure résolution, permettant une fermeture plus légère en distance au sol. De plus, des résolutions plus fines autorisent le traitement d'objets de plus petite taille réelle, puisque la surface minimale des plages que l'on peut prendre en compte dépend de leur taille en pixels. Le problème de ces petits objets est que les erreurs relatives sont importantes dès que l'on modifie leur forme.

Il est donc possible d'ajuster le réglage à la résolution de l'image, sans oublier que des variations importantes de résolution des images risquent de modifier la signification des classes, et donc également les procédures de généralisation adaptées. Un autre problème est de choisir l'intensité des divers traitements appliqués. Ce point a été discuté pour la classe cultures présente, où il apparaît que si les choix sont souvent basés sur des critères empiriques, des pistes sont proposées pour les rendre plus objectifs. Mais le fait que les résultats souhaités soient très dépendants de la nature des classes considérées, et de leurs relations dans l'espace, complique cette démarche de rationalisation. Les résultats sont donc variables d'une zone géographique à l'autre, ce qui signifie que même si des outils sont disponibles pour aider l'utilisateur à choisir ses réglages, il ne pourra faire l'économie d'une expertise préalable des caractéristiques spécifiques de l'occupation du sol dans sa zone d'étude.

L'image finale obtenue (figure 11) présente l'aspect d'une carte traditionnelle, elle pourra être facilement vectorisée et introduite dans une base de données SIG. Cette carte a pour vocation première de fournir un document aisément lisible par tous. Étant donné les simplifications réalisées et la dégradation de l'information qui en résulte (voir tableau 4), elle n'est *a priori* pas indiquée pour une étude diachronique, pour laquelle on préférera le document initial.

6. CONCLUSION

L'originalité de la méthode de généralisation proposée ici est d'associer différentes techniques qui sont souvent utilisées isolément. La combinaison de ces approches nous permet de prendre en compte les spécificités des classes rencontrées en leur appliquant des traitements différenciés. La nécessité d'adapter la généralisation aux caractéristiques propres des objets est perçue comme une évidence depuis longtemps et a été récemment remise au goût du jour par une conceptualisation en terme d'objet (Ormsby and Mackaness, 1999).

On retiendra également les possibilités d'adaptation et de paramétrage variable des procédures proposées en fonction de besoins spécifiques, qui font que l'intérêt de ce travail réside dans la présentation d'une « boîte à outils de généralisation » plutôt que de procédures prêtes à l'emploi. Bien que nous ayons mis l'accent sur les opérateurs de morphologie mathématique, d'autres types de traitements géographiques, notamment des traitements plus topologiques, sont possibles. De même, des informations spatialisées exogènes (réseau hydrographique, modèle numérique de terrain, etc.) pourraient assister efficacement le processus en fournissant une structuration *a priori* de l'espace.

Que ce soit pour le choix d'une méthode spécifique ou pour le paramétrage de celle-ci, nous rejoignons l'idée communément admise aujourd'hui que l'intervention de l'utilisateur reste nécessaire aux étapes clés de la généralisation (Joao, 1998). Nous proposons également une solution au problème de représentation des classes dispersées. Un des obstacles majeurs à la création de cartes satisfaisantes est l'hétérogénéité thématique intrinsèque des unités spatiales représentables à une échelle donnée. Certaines unités sont nécessairement composites, c'est-à-dire constituées d'une mosaïque de classes thématiques (ex : forêt dégradée + cultures). Il est difficile de constituer correctement de telles unités par traitement numérique d'images satellitales. Nous prenons en compte cette hétérogénéité en représentant les degrés d'abondance de classes dans des unités composites.

Des problèmes subsistent bien évidemment, notamment en ce qui concerne la propagation et l'accentuation d'erreurs qui existaient dans la classification initiale. On passe d'une représentation de type continue (image « pointilliste ») à une représentation par plages (carte choroplèthe) et cette simplification est très

sensible aux variations de densité des classes initiales.

La généralisation est une discipline dans laquelle l'expertise humaine conserve un rôle important. Il est souvent difficile de décider de manière entièrement raisonnée des choix effectués. Nous manquons de critères objectifs et quantifiés permettant de choisir un réglage ou une procédure plutôt qu'une autre, et également de quantifier le résultat obtenu en terme de précision. Dans cet esprit Le Men (1996) propose une méthode de généralisation dans laquelle des choix de procédures sont effectués selon des critères de'moindre coût. Nous avons pour notre part suggéré, au cours de cette présentation, différentes voies qui devraient permettre d'assister l'utilisateur dans le choix et le paramétrage des procédures.

Enfin, un autre problème de la généralisation numérique est que malgré les précautions prises pour sauvegarder la forme de certaines classes, elle produit des plages cartographiques qui respectent moins les formes du terrain. Le lecteur de la carte perçoit alors moins clairement la morphologie des lieux.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « Bases de données géographiques provinciales pour une meilleure gestion des terres et de l'environnement dans les hautes terres du Viêt-nam », financé par la Communauté économique européenne (DG XII, programme STD3).

Références

Bader, M. and Weibel, R. (1997) Detecting and resolving size and proximity conflicts in the generalization of polygonal maps. *Proceedings of the 18th ICA/ACI International Cartographic Conference,* Stockholm, 23-27 June 1997, Sweden, p. 709-715.

Bo Su, Zhilin Li, Lodwick, G. and Muller, J.-P. (1997) Algebraic models for the aggregation of area features based upon morphological operators. *International Journal of Geographical Information Science, vol. 11,* no 3, p. 233-246.

Cixiang, Z. (1994) Generalization of classified images for GIS. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '94),* 8-12 August 1994, Pasadena, California, p. 601-611.

Coster, M. et Chermant, J.-L. (1989) *Précis d'analyse d'images.* Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris, p. 65-88.

Fuller, R. and Brown, N. (1996) A CORINE map of Great Britain by automated means. Techniques for automated generalization of the Land Cover Map of Great Britain. *International Journal of Geographical Information Science,* vol. 10, no 8, p. 937-953.

Girard, M.-C., Mougenot, B. et Ranaivoson, A. (1990) Présentation d'un modèle d'organisation et d'analyse de la structure des informations spatialisées : OASIS. *Actes des deuxièmes journées de télédétection, Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales,* Bondy, 4-6 décembre 1990, Institut de Recherche Scientifique pour le Développement en coopération (ORSTOM), Paris, p. 341-350.

Goffredo, S. (1995) Knowledge-based system for automatic generalization of satellite-derived thematic maps. *17th International Cartographic Conference,* Barcelona, Spain, 39 September 1995, ICA/ACI (International Cartographic Association), 10 p.

Jaakkola, 0. (1997) Multi-Scale land cover databases by automatic generalization. *Proceedings of the 18th International Cartographic Conférence,* Stockholm, Sweden, 23-27 June 1997, ICA/ACI (International Cartographic Association), p. 709-715.

Joao, E.M. (1998) *Causes and Consequences of Map Generalization.* London School of Economics, Taylor and Francis Editors, London, 265 p.

Lagrange, J.-P. et Ruas, A. (1993) *État de l'art en généralisation.* Édité par l'Institut Géographique National (IGN/DT/SR/COGIT), Paris, 54 p.

Lay, H.G. and Weber, W. (1983) Waldgeneralisierung durch digitale rasterdaten verarbeitung. *Nachrichten aus dem karten und vermessungswesen, vol.* 92, p. 61-71.

Lee, D. (1997) Understanding and Deriving Generalization Rules. *Proceedings of the 18th ICAIACI International Cartographic Conference,* Stockholm, 23-27 June 1997, Sweden, p.1258-1265.

Le Men, H. (1982) Classification des paysages par statistique locale de l'occupation du sol. Méthode de généralisation thématique et cartographique. *Proceedings of the International Symposium of the 7th Commission of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS),* Toulouse, France, 1982, p. 921-928.

Le Men, H. (1996) Généralisation cartographique pour l'occupation du sol : application au passage VI à V2 pour la BD Carto. *Revue Internationale de Géomatique, vol.* 6, no 23, p. 227-248.

Muller, J.-C. (1991) Generalization of spatial database. In Maguire, D., Goodchild, M.F. and Rhind, D. (dir.) *Geographical Information Systems - Volume 1 - Principles and Applications.* Edited by John Wiley (U.S., Canada) and Longman (London), p. 457-475.

Ormsby, D. and Mackaness, W. (1999) The development of phenomenological generalization within an object-oriented paradigrn. *Cartography and Geographic Information Science, vol.* 26, no 1, p. 70-80.

Rigaux, P. (1994) La représentation multiple dans les Systèmes d'information géographique. *Revue internationale de géomatique, vol.* 4, no 2, p. 137-164.

Robbez-Masson, J.-M. (1994) *Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale - Application à la cartographie des pédopaysages.* Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (ENSAM), Montpellier, 161 p.

Rogala, J.-P. (1982) Approche numérique de l'espace agricole. Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon (INAPG), Paris, 224 p.

Schylberg, L. (1992) Cartographic amalgation of area objects. *Proceedings of ISPRS'92,* Washington, août 1992, p. 135138.

Simonneaux, V. (1995) Généralisation d'images satellites classées pour leur intégration à un SIG. *Actes du Colloque Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et SIG,* Ouagadougou, 6-10 février 1995, Association Internationale pour la Science du Sol (AISS/ISSS), 12 p.