

LES SPATIOCARTES D'OCCUPATION DU SOL

Marc BINARD

I. INTRODUCTION

Les spatiocartes d'occupation du sol sont dérivées de la classification d'une ou plusieurs images satellite selon une nomenclature conventionnelle des affectations du sol. En importance, elles constituent sans doute le second type de spatiocartes le plus couramment produit, après les spatiocartes en composition colorée. Vis-à-vis de ces dernières, les spatiocartes d'occupation du sol relèvent cependant d'une toute autre logique et procèdent d'une méthodologie très différente. La composition colorée est conçue pour laisser au lecteur le soin d'interpréter l'image en fonction de ses propres centres d'intérêt, et les techniques sélectionnées pour son élaboration doivent précisément favoriser la reconnaissance et l'identification visuelle d'un maximum de détails. La spatiocarte d'occupation du sol, par contre, répond à un objectif précis et déterminé a priori. Tout, depuis la sélection des images sources jusqu'à la sélection des couleurs, en passant par le choix de l'échelle et la fixation de la nomenclature, est dicté par une thématique unique. Les méthodes de classification, elles-mêmes, ne sont pas indépendantes de l'objectif poursuivi.

Le but de ce chapitre n'est pourtant pas de discourir sur les multiples algorithmes de classification des images. Une très volumineuse littérature, en constante évolution, y est consacrée (Atkinson & Lewis, 2000, Chin-Teng et al., 2000 ; Simpson et al., 2000). Les méthodes les plus traditionnelles, relevant de l'interprétation d'images assistée par ordinateur, co-existent avec les méthodes les plus récentes, telles les classifications par réseaux de neurones ou les classifications bayésiennes. L'utilisation de l'une ou l'autre méthode, voire de plusieurs en chaîne, se justifie à l'occasion de tel ou tel cas de figure mais elles n'interfèrent guère sur la préoccupation présente qui consiste à transformer une image classée en une carte.

On conçoit dès lors que les traitements dont il sera question se situent en aval du processus de classification proprement dit. Quelques considérations seront pourtant émises sur les préalables de la classification et sur la nature et la qualité de l'image classée, dans la mesure où elles peuvent orienter l'élaboration de la spatiocarte. Par contre, les divers traitements relevant de la rédaction cartographique,

communs à toute spatiocarte quelle qu'en soit la facture, sont réservés à un chapitre ultérieur. De même, quelques opérations complexes, susceptibles d'intervenir dans la réalisation de certaines spatiocartes de l'occupation du sol, mais exigeant un bagage méthodologique important, sont développées dans des chapitres spécifiques auxquels nous renverrons le moment venu.

II. LES TRAITEMENTS PRÉALABLES À LA CLASSIFICATION

A. Le choix des images et l'échelle des spatiocartes

La classification d'une image s'inscrit dans une thématique qui s'exprime dans un milieu particulier et, idéalement, à une échelle précise. À titre d'exemples, on peut imaginer la classification des espaces forestiers à l'échelle d'un continent ou sous-continent, celle de l'espace agricole à l'échelle d'un pays ou d'un finage, ou encore celle de l'espace urbanisé à l'échelle d'une ville ou d'une conurbation. Il est clair que le choix des images sources, tant en ce qui concerne leur résolution spectrale que leur résolution spatiale, est dicté par cette thématique.

La résolution spatiale des images soumises à la procédure de classification a une incidence immédiate sur l'échelle des documents cartographiques susceptibles d'utiliser les résultats de la classification. Outre l'impact direct de la résolution spatiale sur la qualité des corrections géométriques du document, dont il a été question dans un chapitre précédent, il faut se souvenir que l'identification des modes d'occupation du sol est rarement résolue à l'échelle du pixel. La signature spectrale accordée à un pixel est largement dépendante des affectations prévalant dans les pixels voisins, au point que l'assignation d'un mode d'occupation du sol à un pixel isolé est souvent sujette à caution. Au contraire, la qualité sémantique d'une classification n'est assurée qu'à travers des plages de pixels contigus, dont la superficie et la forme ne sont pas sans importance. Or, il a été rappelé dès le premier chapitre que les qualités sémantiques et géométriques sont intimement liées. Il résulte de ces considérations que la classification agit, vis-à-vis de l'échelle, comme un processus de généralisation : la spatiocarte élaborée sur base de la classification n'est exploitable qu'à une échelle inférieure à celle théoriquement accessible à la résolution spatiale de l'image.

En d'autres termes, une réduction d'échelle s'impose pour que l'image classée puisse atteindre les critères de qualité géométrique attendus d'une carte. Le coefficient de réduction n'est pas constant. Il diffère selon la nature et le taux de couverture des affectations présentes, et bien sûr selon la résolution spatiale des images sources. Dans bien des cas cependant, il faut s'attendre à devoir réduire l'échelle d'un facteur deux au moment de réaliser la spatiocarte d'occupation du sol.

B. Les corrections géométriques

L'influence de la résolution spatiale des images et des méthodes de corrections mises en oeuvre, sur la qualité géométrique finale d'une spatiocarte a été largement discutée précédemment. Ces réflexions restent bien entendu d'application lorsqu'il s'agit d'effectuer une classification de l'image. On peut d'ailleurs ajouter que la disponibilité d'un modèle numérique de terrain, nécessaire lorsqu'une orthorectification est appliquée, peut contribuer à l'amélioration radiométrique de l'image et favoriser ainsi les résultats de la classification. La littérature est riche d'exemples où la rectification de la radiométrie par suppression des ombres propres ou des ombres portées par le relief a conduit à une augmentation significative de la qualité de la classification (Justice et al., 1981 ; Tahiri, 1991).

Accessoirement, on notera que l'on a pu suggérer d'effectuer la correction géométrique de l'image après, et non avant, la mise en oeuvre de la classification. Cette pratique avait un avantage principal : celui de réduire le temps de calcul, parfois considérable, requis par la correction géométrique puisqu'elle n'était appliquée que sur l'image classée, plutôt que sur chacun des canaux participant à la classification. Les capacités informatiques actuelles permettent d'oublier ce palliatif. L'absence de correction géométrique avant la classification évite également toute perturbation de la radiométrie née d'un rééchantillonnage inadéquat. La technique du plus proche voisin est cependant exempte de cet inconvénient, mais il reste vrai que la classification d'une image corrigée dont on ne connaît pas l'historique des traitements est hasardeuse. Quoi qu'il en soit, le fait de disposer a priori d'une image corrigée géométriquement offre de multiples avantages, parmi lesquels celui d'exploiter une information géoréférencée avant et durant les étapes de la classification : fusion d'images, délimitation des sites d'entraînement et de validation, élaboration de masques, etc.

C. La fusion d'images

La fusion d'images est devenue une technique extrêmement courante dans toute une série de domaines d'application de la télédétection. Elle permet de travailler d'une façon cohérente avec des images multisources et mutidates et d'exploiter en synergie

des résolutions spatiales et radiométriques diverses. Les algorithmes de fusion sont nombreux et ils présentent des avantages propres qui seront décrits dans un chapitre ultérieur.

Lorsqu'elle est pratiquée en amont d'une classification, la fusion a pour objectif, soit l'amélioration de la résolution spatiale, soit l'enrichissement de la radiométrie par injection d'une information de texture. Plus rarement, la fusion peut servir à réduire la charge du processus de classification en réduisant le nombre de canaux ou pseudo-canaux à traiter. La question n'est cependant pas totalement réglée, dans la mesure où il est difficile de mesurer le gain apporté par les images fusionnées au terme de la classification (Raptis et al., 1998). Les algorithmes de classification s'accommodent en effet d'un grand nombre de canaux. Pourvu qu'ils soient tous rééchantillonnés sur la base d'un canal à haute résolution spatiale présent parmi le jeu de données, l'amélioration de résolution et l'injection de texture transparaissent souvent dans l'image classée sans qu'il ne soit nécessaire de procéder à une fusion d'images préalable.

L'amélioration de la résolution spatiale susceptible d'être obtenue par fusion d'images est évidemment à mettre au crédit de l'échelle finale des spatiocartes. La fusion exige cependant au préalable une correction géométrique parfaite des différentes images à fusionner. Dans le cas contraire, en effet, les qualités à la fois géométriques et sémantiques de la classification s'en ressentiront, et l'effet inverse sera obtenu vis-à-vis de l'échelle de la spatiocarte.

D. Les masques

Les masques peuvent intervenir dans plusieurs contextes d'utilisation en traitement d'images de télédétection, mais ils ont toujours pour objectif de limiter l'extension spatiale des données ou du phénomène à traiter. Face à une classification d'image, un masque peut être constitué pour deux raisons.

- Pour limiter géographiquement la région de l'image soumise à la classification. Dans ce cas, le masque est généralement construit par rasterisation d'une frontière disponible sous forme vectorielle et géoréférencée dans le même système que l'image.
- Pour limiter thématiquement des portions de l'image soumises à des processus de classification distincts. Dans ce cas, les masques peuvent être construits par sélection des valeurs radiométriques adéquates dans un canal ou pseudo-canal approprié. Des classifications séparées des plans d'eau vis-à-vis des espaces terrestres (séparation sur un canal proche-infrarouge), ou des espaces végétalisés vis-à-vis des espaces minéralisés (séparation sur un

pseudo-canal d'indice de végétation), par exemple, ont recours à un tel découpage.

Le masquage thématique intervenant en amont d'une classification n'a pas de conséquences directes sur l'élaboration de la spatiocarte. Ce n'est qu'au niveau de la combinaison des différents extraits classés séparément qu'il y a lieu d'ordonner de manière cohérente les postes de légende, et les comptes numériques afférents dans l'image classée finale.

Le masquage géographique, par contre, offre des options intéressantes dans la mise en page de la spatiocarte. Il permet de s'affranchir d'un champ principal rectangulaire et de disposer plus harmonieusement les éléments de l'habillage. Étant donné l'importance, dans tous les sens du terme, de la légende d'une spatiocarte d'occupation du sol, le gain d'espace offert par le masque géographique est souvent le bienvenu. On notera cependant que l'on perd du même coup la facilité de positionnement d'amorces coordonnées autour du champ principal. L'application d'un tel masque peut évidemment être effectuée après la classification de l'image, mais une application préalable peut réduire sensiblement le temps requis pour cette classification.

Le masque géographique doit cependant être employé avec prudence. Son usage n'est justifié que si la forme du champ conserve une signification non ambiguë pour le lecteur. Même dans ce cas, la figuration du territoire géographique cernant la région d'intérêt peut s'avérer utile. Pour distinguer la zone d'intérêt, du territoire qui l'entoure, il n'est pas rare de présenter ce dernier en composition colorée. On obtient ainsi une spatiocarte hybride, où la présence simultanée d'une classification de l'occupation du sol et d'une composition colorée soulève quelques difficultés techniques. Cette combinaison relève des traitements postérieurs à la classification et sera abordée à la fin de ce chapitre.

III. LES IMAGES CLASSÉES

A. Nature des images classées

Si l'on s'en réfère à la description des images numériques présentée au début du chapitre précédent, l'image classée est le prototype des images en couleurs indexées.

Les modalités de la classification sont codées sous la forme de nombres entiers, le plus souvent strictement positifs, s'étendant sur quelques dizaines de valeurs au maximum. À chaque nombre correspond une affectation du sol, selon une clé définie par l'opérateur au moment de la classification. L'attribut des pixels de l'image classée est donc toujours de nature qualitative. Néanmoins, la valeur zéro et, éventuellement, une valeur entière négative peuvent être engendrées par

l'algorithme de classification. La valeur nulle est souvent là pour traduire le « fond » d'image, c'est-à-dire la partie de l'image cachée par un masque géographique ou thématique et qui n'a pas été soumise à la classification. Une valeur négative peut être accordée aux pixels de l'image qui ont été rejetés de la classification, tout en appartenant à la région d'intérêt, par ce qu'ils ne répondent à aucun critère statistique de classification (pixels souvent qualifiés de *non classés* au terme de la procédure). L'affectation de valeurs particulières au fond d'image et aux pixels non classés varie cependant selon les procédures programmées, et ces valeurs peuvent toujours être reclassées en entiers positifs a posteriori par l'utilisateur, dans des valeurs situées au-delà de la gamme utilisée par les modalités d'occupation du sol. Les attributs des pixels d'une image classée peuvent par conséquent être aisément sauvegardés sous la forme d'octets.

À l'image indexée correspond une palette de couleurs, et à chaque compte numérique de l'image classée correspond une entrée dans la palette. Les couleurs de la palette sont définies par leurs trois composantes additives et, selon le principe illustré au chapitre précédent, ces couleurs peuvent être choisies arbitrairement par l'utilisateur. Dans le cas d'une image de l'occupation du sol, la gamme des couleurs utilisées est généralement conventionnelle, voire imposée dans le cadre de projets internationaux (par exemple CORINE) ou de plans administratifs régionaux ou locaux. On notera encore qu'étant donné la relativement faible amplitude de valeurs requise pour désigner les modes d'occupation du sol, toutes les entrées de la palette de couleurs ne sont pas utilisées. Cette particularité pourra être mise à profit pour faire figurer, dans la même palette, les couleurs assignées à des surcharges diverses, voire pour construire une palette hybride supportant simultanément la classification et une composition colorée codée sur moins de 8 bits.

La plupart des formats informatiques peuvent stocker la palette des couleurs dans le même fichier que l'image classée en octets. Certains formats développés par des logiciels spécialisés en télédétection offrent en outre la possibilité de sauvegarder un descriptif alphanumérique associé à chaque couleur, de sorte que la totalité de la légende figure dans le même fichier que l'image. Dans la mesure où les pixels de l'image sont codés sous forme d'octets, et que l'agencement spatial des pixels forme des plages relativement étendues de valeurs identiques, les images classées sont candidates à d'excellents taux de compression sans perte, et cela même dans le cas des algorithmes les plus élémentaires de compression d'images.

Si, en termes d'impression, la composition colorée peut être considérée comme une image en demi-teintes, l'image classée de l'occupation du sol correspond à une image de teintes, beaucoup plus

souple à manipuler lors de l'élaboration de la spatiocarte. Les pixels contigus d'affectation identique forment des plages où les couleurs s'étalent en aplats uniformes. Grâce à l'usage de chartes de couleurs normalisées, l'image de teintes permet un contrôle relativement aisé des couleurs à tous les stades de la chaîne graphique, jusqu'à l'impression finale en quadrichromie. En outre, les aplats supportent les surcharges tramées, les ouvertures des écritures et le détourage par vectorisation, au moins à l'endroit des affectations naturelles généralement plus étendues et plus compactes que les affectations anthropiques.

B. Les artéfacts des classifications

Les paragraphes précédents ont discuté des différents avantages offerts par les images classées pour la réalisation de spatiocartes d'occupation du sol. Cependant, ces images ne sont pas exemptes de défauts et elles présentent certaines limites qu'il faut prendre en compte au moment du passage à la carte.

Au premier rang des défauts, il y a ceux inhérents au processus de classification lui-même. Les affectations peu couvrantes, réparties en pixels isolés ou disposés linéairement, **ont moins de chances d'être correctement identifiées pour les raisons déjà mentionnées de contamination radiométrique par les pixels voisins.** Les pixels couvrant simultanément plusieurs affectations, qualifiés de mixels, présentent des signatures spectrales non significatives, conduisant aussi à des identifications erronées ou à un rejet de la classification. Ils se concentrent le long des bordures des parcelles d'affectation, formant des alignements facilement repérables. Du point de vue sémantique, certains nouveaux algorithmes de classification parviennent à **améliorer la discrimination des affectations, sans jamais atteindre la perfection.** Du point de vue esthétique, il est aussi possible de remédier partiellement à ces problèmes par des techniques dont certaines sont présentées dans la suite du chapitre.

Il est difficile de ne pas évoquer, au niveau des limites de la classification, l'ambiguïté inévitable entre l'occupation du sol, que s'efforce de traduire la radiométrie, et l'usage du sol, auquel tend l'utilisateur de l'image classée. L'aspect fonctionnel de l'usage du sol, souvent requis dans les spatiocartes, n'est restitué qu'au prix d'un amendement parfois considérable en données exogènes.

Enfin, les aplats de couleurs gommant toute perception de texture et de relief au sein des affectations couvrantes. Là où la composition colorée offre un effet textural de type photographique et profite du jeu des ombres portées pour suggérer le relief, l'image classée se contente d'une juxtaposition de plages de coloration uniforme beaucoup moins spectaculaire. Pour restituer partiellement texture ou

relief, il est nécessaire d'intégrer des images appropriées à l'image classée, modifiant ainsi considérablement la facture de la spatiocarte. De telles techniques, utilisant un modèle d'estompage, font l'objet d'un chapitre spécifique.

C. La validation des classifications

L'exactitude sémantique d'une image classée est fonction des taux d'omission et de confusion présents dans l'image. La probabilité d'erreur et l'intervalle de confiance peuvent être calculés pour chaque modalité d'occupation du sol, au départ d'un échantillon de pixels, généralement levé par un sondage systématique non aligné dans l'image classée, confronté à la situation réelle du terrain.

La sincérité de la spatiocarte d'occupation du sol dépend directement de l'exactitude de l'image classée, mais elle est aussi sensible à toutes les opérations effectuées en aval de la classification. Ainsi, les procédures mises en oeuvre pour corriger les erreurs de classification sont souvent d'ordre esthétique : elles gommant les valeurs erratiques visuellement gênantes, sans nécessairement leur substituer des valeurs sémantiquement correctes. Les reports multiples d'éléments de planimétrie (voirie, hydrographie, limites abstraites diverses) cachent les pixels de l'image classée, tout en faisant apparaître une information géographique de qualité distincte à tous points de vue : géométrique, sémantique, généalogique. La réduction d'échelle, à laquelle il est difficile d'échapper au moment de la rédaction de la spatiocarte, introduit une généralisation susceptible de modifier très sensiblement l'exactitude sémantique de l'image classée originale. Enfin, les processus intervenant lors de l'habillage, tels le positionnement et l'ouverture des écritures, et de l'impression sont aussi de nature à réduire la sincérité de la spatiocarte.

Images classées et spatiocartes d'occupation du sol sont donc bien des produits distincts en termes de qualité. Ceci renvoie à la dualité des modèles de données : géographiques d'une part, dont relève l'image classée, et cartographiques d'autre part, dont la spatiocarte constitue un exemple typique.

IV. LES TRAITEMENTS POSTÉRIEURS À LA CLASSIFICATION

A. Les mosaïques

Lorsque l'étendue de la zone d'intérêt déborde le champ d'une seule image, il est nécessaire de construire une mosaïque par assemblage d'images voisines. Dans le cas d'une spatiocarte d'occupation du sol, la construction de la mosaïque apparaît après l'étape de classification des images constitutives.

Les pré-traitements effectués séparément sur les images sont du même type, et en particulier il faut assurer une géoréférence commune à toutes les images. Les méthodes de classification sont, elles aussi, appliquées isolément sur les images car pour chacune d'entre elles, les conditions d'enregistrement sont vraisemblablement différentes (dates, conditions atmosphériques, angles de vue, etc.). Il est par conséquent souhaitable d'initier les classifications supervisées au départ de sites d'entraînement propres à chaque image.

Les images voisines présentent des chevauchements, à l'endroit desquels certaines incohérences d'affectations peuvent apparaître au terme des classifications distinctes. La construction de la mosaïque doit donc procéder par comparaisons et sélections parmi les plages d'affectations présentes dans les zones de recouvrement. **Pour assurer une transition harmonieuse** entre deux images classées voisines, une ligne de suture doit être délimitée en se fondant sur les linéaments naturels ou anthropiques figurant dans la zone de recouvrement. Ces diverses techniques de mosaïque, plus simples à mettre en oeuvre dans le cas des spatiocartes d'occupation du sol que dans celui des compositions colorées, font l'objet d'un chapitre spécifique dans le même ouvrage.

B. Les filtres

Les images résultant des classifications contiennent inévitablement des pixels mal classés ou erratiques, souvent localisés au contact de deux modes d'occupation du sol. La radiométrie moyenne caractérisant ces mixels ne correspond plus à aucune des deux affectations et il en résulte, soit le rejet de ces pixels dans une catégorie non classée, soit une erreur de classification lorsque par hasard leur radiométrie moyenne correspond à une autre affectation identifiée dans l'image. Différentes techniques de filtrage ont été imaginées pour supprimer ce « bruit » dans les images classées.

Le filtre modal ou majoritaire est certainement le plus simple et le plus rapide à appliquer. Son implémentation utilise la technique de la fenêtre de convolution, dont la taille détermine la puissance du lissage effectué. Le principe général consiste à substituer à la valeur du pixel courant, soit celui sur lequel est centrée la fenêtre au moment de l'itération en cours, la valeur la plus fréquente rencontrée dans le voisinage défini par la taille et la forme de la fenêtre. La substitution est d'habitude soumise à une batterie de conditions spécifiant les valeurs et les seuils de fréquences des candidats à la substitution et de leurs remplaçants. Il est cependant difficile d'éviter des substitutions abusives au détriment des catégories de pixels peu représentées, en particulier lorsque ces pixels sont isolés ou en disposition quasi linéaire.

Le filtre contextuel, comme son nom l'indique, permet de définir plus précisément le contexte de substitution et, par là, de mieux maîtriser les remplacements effectués. Il n'effectue les substitutions qu'au profit d'une affectation à la fois, ce qui impose de répéter sa mise en oeuvre autant de fois que nécessaire. Il exige donc plus de temps calcul et aussi une analyse préalable de la logique de substitution. Le filtre contextuel procède en plusieurs étapes qu'il s'agit généralement d'appliquer dans un ordre strict (Binard et Collette, 1993) comme l'illustre l'exemple suivant (Fig. 1).

- La définition du contexte thématique de la substitution : les pixels dont les affectations définissent le milieu au sein duquel s'établit la substitution sont rassemblés dans un masque binaire.
Exemple : construction d'un masque binaire par regroupement de tous les pixels classés dans toutes les catégories bâties (Fig. 1 B).
- La définition du contexte spatial de la substitution : il s'agit d'appliquer successivement une dilatation et une érosion au masque binaire construit à l'étape précédente. Dilatation et érosion sont combinées dans une opération qualifiée de fermeture morphologique.
Exemple : création du masque étendu du bâti (Fig. 1 C).
- La sélection des affectations à modifier au sein du masque : tous les pixels dont les affectations sont jugées erratiques au sein du milieu défini aux étapes précédentes, sont rassemblés dans un masque binaire.
Exemple : création d'un masque binaire par regroupement de tous les pixels classés dans les catégories de cultures et herbages (Fig. 1 D).
- L'identification des pixels à modifier : les pixels erratiques sont isolés par la multiplication, pixel par pixel, des masques construits lors des deux étapes précédentes. Ces pixels apparaissent dans le masque binaire résultant avec une valeur unitaire.
Exemple : multiplication du masque étendu du bâti par le masque binaire des cultures et herbages.
- La substitution par la valeur souhaitée : le masque précédent est multiplié par un scalaire, soit la valeur correspondant à l'affectation de substitution.
Exemple : multiplication des valeurs de chaque pixel du masque précédent par la valeur correspondant à la catégorie des pelouses (Fig. 1 E).
- L'incrustation des substitutions dans l'image classée originale : opération logique de superposition entre l'image prioritaire construite à l'étape précédente et l'image secondaire constituée par l'image classée originale.

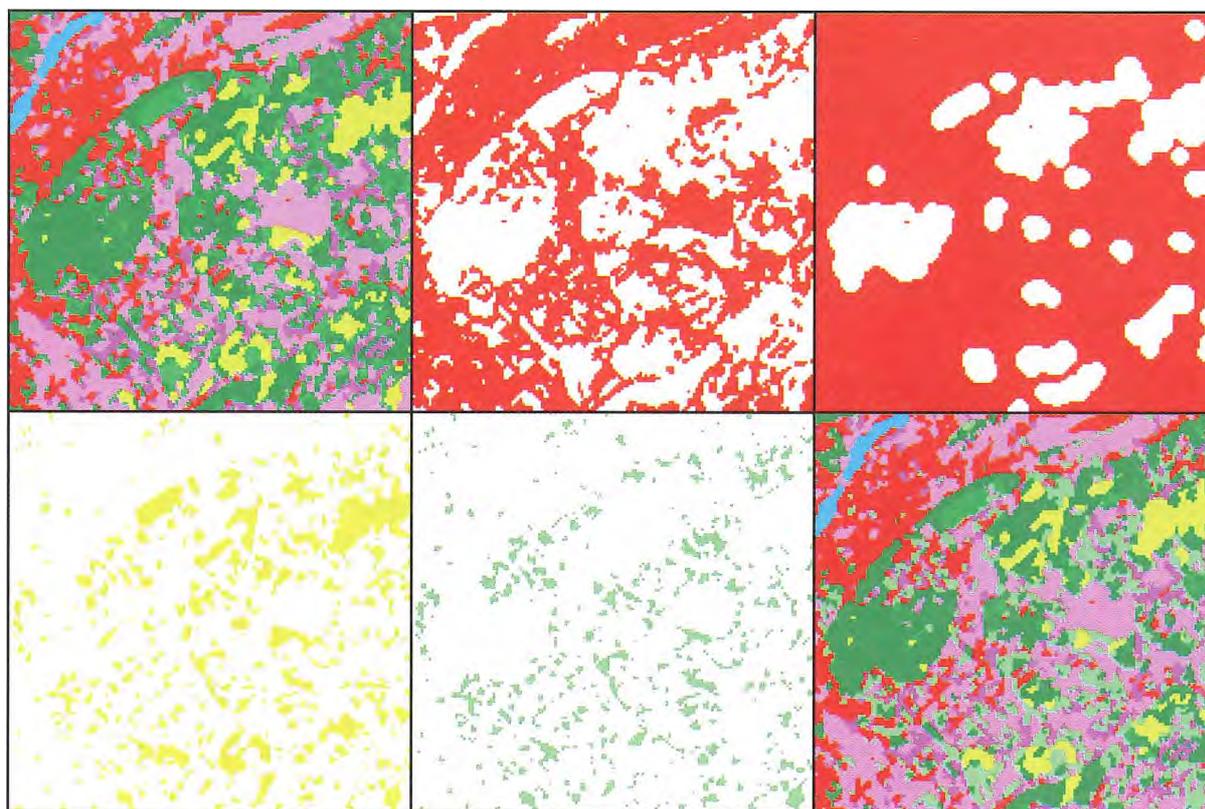


Figure 1. Exemple de filtrage contextuel visant à remplacer les pixels de culture et d'herbage localisés en milieu bâti, par des pixels de pelouse

De haut en bas et de gauche à droite : A. Classification originale. B. Masque du bâti. C. Masque étendu du bâti. D. Masque des herbages et des cultures. E. Pixels reclassés en pelouse. F. Classification corrigée.

Résultat : substitution des cultures et herbages par des pelouses au sein du milieu bâti dans l'image classée (Fig. 1 F).

Il faut noter que l'opération de fermeture morphologique exploite le principe des fenêtres de convolution, ce qui implique le choix d'une taille adéquate pour les érosions et dilatations et offre un paramètre supplémentaire dans l'application du filtrage.

B. La généralisation des images classées

La généralisation est une opération cartographique qui reconstitue les traits essentiels d'une réalité en procédant par sélection, schématisation et harmonisation. Elle est indispensable lors de toute réduction significative de l'échelle d'une carte, mais ses modalités d'application dépendent tant du rapport d'échelle que du thème et de la fonction de la carte (Donnay, 1995).

Le procédé numérique correspondant à une réduction d'échelle d'un document en mode image, peut être assimilé en première approximation à un sondage systématique dans l'image originale. Du point de vue géométrique, cela signifie que l'image généralisée contient moins de lignes et de colonnes que l'image

originale, tout en couvrant un champ identique. En d'autres termes encore, l'image généralisée présente une résolution spatiale plus grossière que l'image originale : à chaque pixel de la première correspondent plusieurs pixels de la seconde. La réduction d'échelle ne s'effectue cependant pas nécessairement selon un facteur entier, ce qui implique le choix d'une stratégie de rééchantillonnage afin de déterminer les valeurs affectées aux pixels de l'image généralisée.

Les attributs des pixels d'une image classée relèvent d'une échelle qualitative. Il n'est donc pas question d'effectuer une moyenne des valeurs des pixels de l'image originale pour fixer les valeurs des pixels plus grossiers qui s'y superposent dans l'image généralisée. Le paramètre statistique compatible avec l'échelle de mesure des attributs est le mode et par conséquent c'est la valeur originale la plus fréquente, c'est-à-dire couvrant la plus grande surface, au sein du pixel généralisé qui sera affectée à ce dernier (Fig. 2).

L'opération de rééchantillonnage a donc le même effet que le filtre majoritaire discuté à la section précédente, si ce n'est qu'elle porte sur des images de résolutions distinctes en entrée et en sortie. Si le rapport entre la résolution originale et la résolution des pixels généralisés n'est pas entier, il faut s'y ramener en

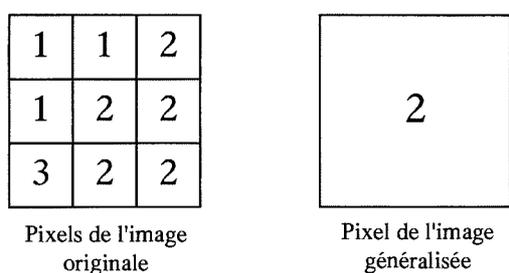


Figure 2. Rééchantillonnage modal

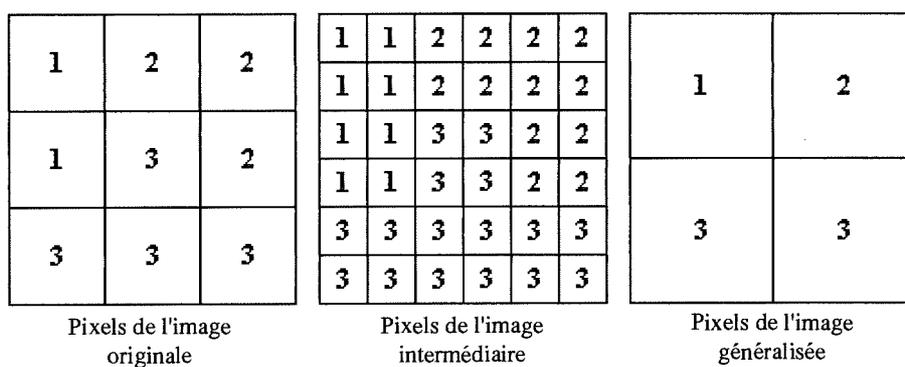


Figure 3. Rééchantillonnage modal avec création d'une image intermédiaire.

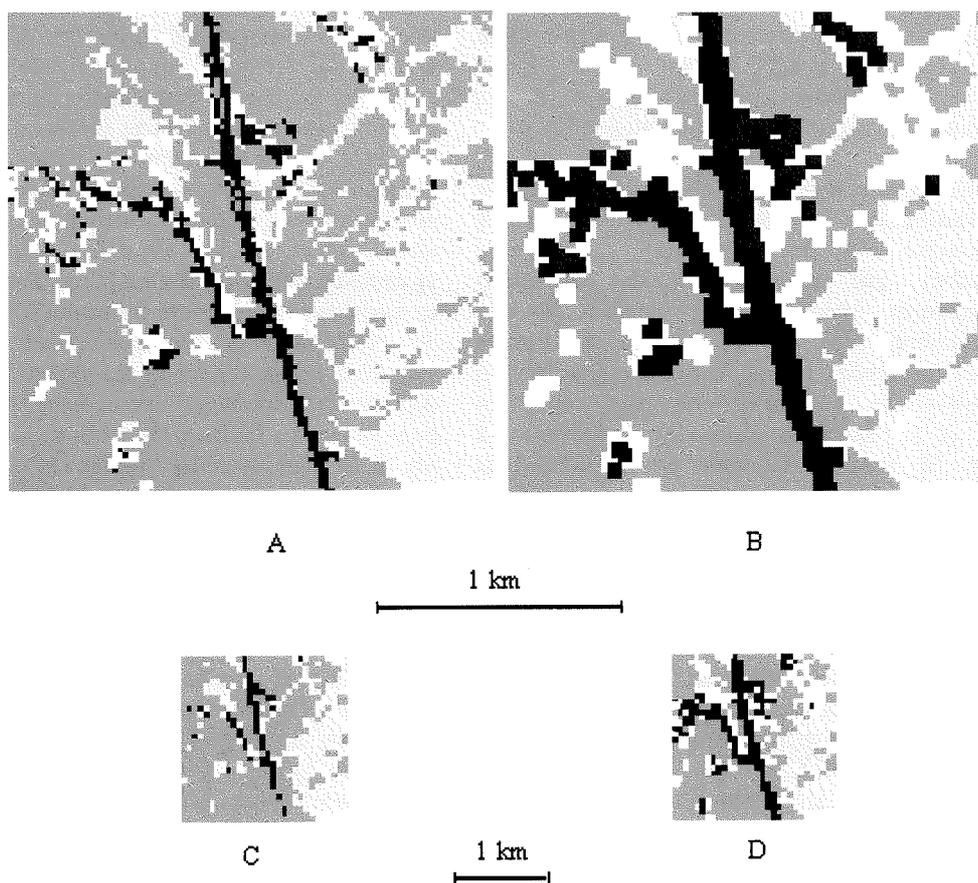


Figure 4. Illustration des mesures conservatoires appliquées sur les affectations peu couvertes avant la généralisation de l'image.
 A. Image classée originale. B. Image (A) après dilatation de l'habitat et de la voirie. C. Généralisation simple de l'image (A). D. Généralisation conservatoire de l'image (B).

construisant une image intermédiaire dont la résolution est un commun multiple des résolutions originale et généralisée. Cette image intermédiaire est obtenue sans difficulté, en multipliant le nombre de lignes et de colonnes de l'image originale par un entier et en recopiant les valeurs des pixels originaux. Le rééchantillonnage modal pourra ainsi être appliqué sur cette image intermédiaire pour créer l'image généralisée (Fig. 3).

L'application immédiate du rééchantillonnage modal risque pourtant d'engendrer les mêmes artefacts que ceux du filtrage majoritaire, à savoir la réduction exagérée des affectations peu couvrantes et l'apparition de solutions de continuité dans les affectations à disposition linéaire. Pour éviter ces excès, il y a lieu d'appliquer un certain nombre de mesures conservatoires vis-à-vis des affectations les plus sensibles avant d'effectuer le rééchantillonnage. Ces mesures correspondent, en fait, à autant d'opérateurs de généralisation adaptés au mode image.

Les affectations sensibles dont la répartition est très morcelée sont soumises à une dilatation, obtenue par convolution d'une fenêtre dont la taille est fonction du changement d'échelle. Il est également possible de travailler plus finement avec une fermeture morphologique utilisant des taux de dilatation et d'érosion distincts. Ces opérateurs donnent un résultat similaire, en mode image, à celui obtenu par les opérateurs d'exagération et d'agrégation de la généralisation cartographique traditionnelle (Fig. 4).

En dernier recours, il peut être nécessaire d'appliquer une reclassification de l'image d'occupation du sol. Elle consiste en une réduction du nombre d'affectations, par regroupement des modalités thématiquement proches. Elle conduit à une augmentation des superficies couvertes pour toutes les catégories fusionnées, les rendant moins sensibles au rééchantillonnage. L'opérateur ne peut cependant préjuger de la répartition spatiale des affectations à reclasser. Si celles-ci ne sont pas contiguës, la reclassification n'assurera pas le rôle conservateur attendu face au rééchantillonnage.

C. La planimétrie reportée

L'image satellite a beau être un document spectaculaire, elle reste déroutante pour le lecteur. En particulier, la spatiocarte d'occupation du sol fait disparaître toute une série d'éléments structurants ce qui rend le repérage difficile. D'une part, les éléments linéaires des réseaux secondaires de l'hydrographie et de la voirie sont trop étroits pour être distingués à la résolution de l'image. D'autre part, comme on l'a déjà signalé, l'usage d'aplats de couleurs gomme toute notion de texture et d'ombres, utiles à la perception du paysage. C'est la raison pour laquelle les spatiocartes, et plus spécialement celles d'occupation du sol, sont

complétées par des informations exogènes diverses, relevant notamment de la planimétrie.

Les éléments de la planimétrie sont issus de bases de données géographiques ou de cartes topographiques numérisées et sont disponibles en mode vectoriel. Ce mode autorise une grande souplesse d'utilisation, en termes de symboles (formes, tailles, couleurs) et de position, et de tels avantages peuvent être mis à profit pour cacher certaines erreurs ou remédier à des limites de l'image d'occupation du sol. Le trait double ou triple d'une route ou d'une autoroute ou l'aplat imposé entre les deux bords d'un fleuve viendront régulariser des tracés souvent perturbés par la présence de mixels dans l'image satellite. La figuration de cours d'eau ou de voies secondaires permettra de relier plans d'eau ou lieux habités isolés aux réseaux principaux. Enfin, des symboles ponctuels ou zonaux sauront introduire la notion d'usage là où la classification de l'image n'avait pu dépasser la nature de l'occupation du sol.

Le report des éléments vectoriels sur l'image impose cependant que certaines décisions soient déjà prises quant à l'échelle finale, le format et le support de la spatiocarte. Les éléments vectoriels doivent bien entendu être géoréférencés dans le même système que l'image d'occupation du sol, mais ils doivent aussi être définis à une échelle identique ou légèrement plus grande que l'échelle finale pressentie. Une échelle trop grande du vectoriel imposerait une généralisation préalable, toujours délicate, tandis qu'une échelle plus petite ne permettrait plus une superposition exacte des éléments communs en mode vecteur et en mode image. D'autre part, les dimensions des symboles appliquées aux éléments vectoriels sont définies en unités papier, et non en unités planimétriques du système de référence géographique. Par conséquent, à ce stade de la production, il ne peut être question que de sélectionner et de positionner les éléments vectoriels à reporter sur la spatiocarte et celle-ci doit déjà avoir été soumise à une éventuelle généralisation pour l'amener à l'échelle de publication. Les modalités des différentes variables graphiques ne pourront être définies que lorsque le format, l'échelle et le type de support du document seront définitivement fixés.

Il faut aussi être conscient du fait que la présence simultanée de données vectorielles et images sur un même document influence la qualité de la spatiocarte. La qualité des données vectorielles est fonction du degré de généralisation, de la symbolique utilisée, mais aussi des légers déplacements consentis pour éviter des superpositions imparfaites sur l'image, du fait de sa résolution. L'image fait figurer en projection et à la même échelle certains éléments concrets de la planimétrie, alors que ceux reportés en mode vectoriel, concrets ou abstraits, sont figurés par des symboles à des échelles propres et distinctes. Il est aussi important de vérifier que les données vectorielles et images sont synchrones, à moins que le but de la spatiocarte ne soit

précisément d'identifier les changements diachroniques.

Enfin, le report de plusieurs catégories d'éléments planimétriques s'accompagne de l'augmentation du nombre de couleurs utilisées par la spatiocarte, les vecteurs ne pouvant apparaître dans les couleurs déjà utilisées par les modalités d'occupation du sol. Le plus grand nombre de couleurs ne constitue pas un problème technique, puisque la palette n'est jamais exploitée dans sa totalité par l'image classée. Par contre, cela peut poser un problème de sémiologie graphique car les capacités de différenciation et de reconnaissance des couleurs par l'oeil humain sont limitées.

D. La vectorisation

La conversion de tout ou partie de l'image d'occupation du sol dans le mode vectoriel peut être envisagée pour répondre à différents besoins. D'une part, une conversion complète de l'image classée conduit à l'obtention d'un ensemble de polygones d'affectation, disposant chacun d'un identifiant et entretenant entre eux des relations topologiques de voisinage simple. Sous cette forme, les parcelles d'occupation du sol peuvent être facilement sélectionnées et soumises, avec d'autres variables géographiques, à des traitements variés réservés au mode vectoriel. Parmi ces traitements, on peut relever la mise à jour de cartes topographiques ou thématiques traditionnelles.

La vectorisation partielle de l'image classée peut, quant à elle, s'inscrire dans le processus d'élaboration de la spatiocarte, et tout particulièrement pour résoudre le problème des couleurs évoqué à la section précédente. Une carte d'occupation du sol exploite une

gamme relativement standardisée de couleurs. Or, pourvu que la légende soit assez précise, le nombre de postes dépasse rapidement le nombre de couleurs aisément distinguables, soit une petite dizaine. La cartographie traditionnelle règle ce problème en ayant recours à des trames géométriques et à des poncifs, à la place ou en surcharge des aplats de couleurs. Le même **procédé peut être exploité en spatiocartographie**, à la condition que certaines plages soient converties en mode vectoriel pour permettre l'imposition des graphismes zonaux (Fig. 5). Cette démarche réclame cependant que soient respectées certaines conditions.

Les éléments graphiques des trames ne sont discernables qu'à la condition que les plages qu'ils couvrent aient une superficie suffisante. Cela signifie, tout d'abord, que les affectations qui seront figurées par des graphismes vectoriels couvrent des plages étendues et compactes. Les affectations réparties en petits amas de pixels ou en pixels isolés ou encore les dispositions linéaires de pixels ne sont donc pas candidates à la vectorisation. De plus, il y a avantage à soumettre l'image classée à un filtrage contextuel relativement sévère avant la conversion en mode vecteur, de manière à supprimer le mitage des affectations étendues provoqué par les pixels erratiques.

Les trames formées d'éléments géométriques s'appuient sur le contour des plages vectorielles. Pour assurer une parfaite insertion des limites vectorielles dans l'image qui les entoure, il faut que l'image soumise à la vectorisation soit présentée dans sa résolution finale. Tout rééchantillonnage ultérieur empêcherait en effet la coïncidence des limites vectorielles avec les bords des pixels voisins. De plus, et pour la même raison, le processus de vectorisation

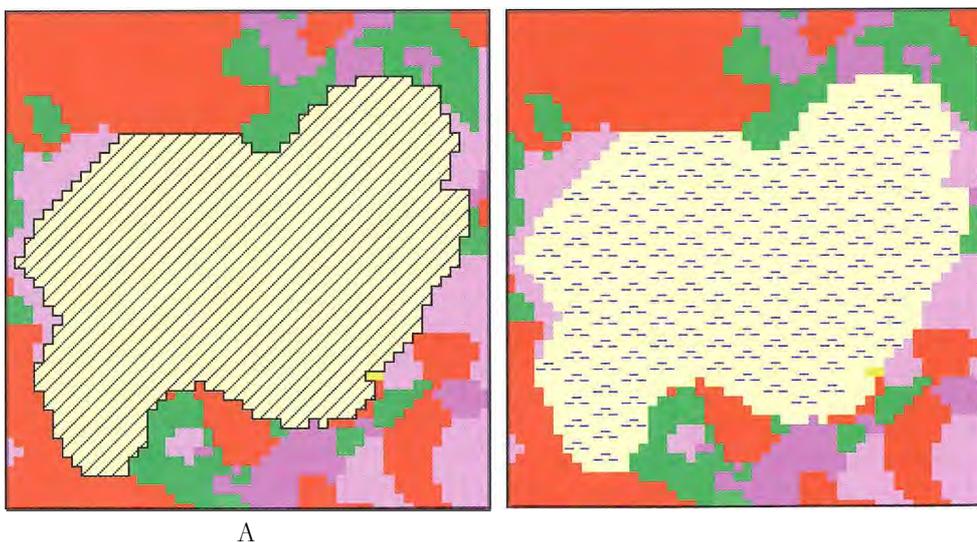


Figure 5. Imposition de graphismes vectoriels en mode zonal

A. Trame géométrique ajustée à la limite image de la plage

B. Trame de poncifs ajustée à la limite vectorielle généralisée de la plage

ne peut réaliser aucun lissage, mais doit forcer les limites vectorielles dans un voisinage 4-connexes, c'est-à-dire sur les verticales et horizontales de la grille de pixels (Fig. 5 A).

Les poncifs, soit les trames formées de pictogrammes répartis de manière régulière, demandent un traitement différencié. Ils apparaissent plus souvent en surcharge des aplats de couleurs et les pictogrammes, quelles que soient leur forme et leur taille, ne doivent pas déborder les limites des plages auxquelles ils se rapportent. Pour garantir cette disposition, on peut procéder de la manière suivante :

- isoler les pixels de l'affectation concernée dans un masque binaire ;
- soumettre ce masque à une érosion utilisant une fenêtre dont la taille est fonction de la dimension des pictogrammes ;
- vectoriser les limites des plages érodées obtenues à l'étape précédente ;
- appliquer une généralisation selon un opérateur vectoriel de simplification géométrique aux contours des plages.

Puisque les poncifs apparaissent en surcharge des aplats de couleurs, les limites de plages vectorielles ne sont pas figurées sur la spatiocarte (Fig. 5 B).

V. LES TRANSFORMATIONS THÉMATIQUES ET SPATIALES DE L'IMAGE CLASSÉE

Par construction, l'image classée fournit une information qualitative spatialement discrète. Elle est cependant la source d'une multitude de transformations, tant spatiales que thématiques, susceptibles de conduire à une gamme très variée de documents cartographiques. Les décrire tous dans le détail sortirait du cadre de cette publication. On se contentera de mentionner les transformations les plus significatives, au développement desquelles, soit dit en passant, Nadasdi a largement contribué (Nadasdi et al., 1991 ; Donnay, 1992 ; Nadasdi 1994 ; Nadasdi et al., 1996 ; Binard et al., 1997).

A. Les transformations thématiques

Au nombre des transformations thématiques, on peut mentionner celle qui conduit à l'obtention d'une spatiocarte densimétrique. La construction n'utilise généralement que quelques modalités d'occupation du sol et réclame une variable quantitative exogène. Le plus souvent, il s'agit de travailler sur les affectations classées en bâti résidentiel et la variable exogène est la population résidente disponible par unité spatiale de recensement. La spatiocarte densimétrique est construite en rapportant, à chaque pixel de bâti, un nombre absolu d'habitants calculé sur base du nombre de pixels bâtis figurant dans l'unité de recensement et, éventuellement, sur base de la densité de bâti lorsque cette distinction apparaît dans l'image classée. Selon

l'échelle et la précision de la classification, les autres modalités d'occupation du sol peuvent le cas échéant intervenir dans la répartition des chiffres de population. Puisque chaque pixel dispose d'une superficie constante, l'image obtenue fournit une information quantitative et spatialement discrète sur la densité nette, d'où l'appellation de carte ou de spatiocarte densimétrique (Fig. 6 C).

D'une façon générale, la variable qualitative d'occupation du sol peut être remplacée, pixel par pixel, par toute autre variable exogène dont les valeurs se déclinent selon les affectations. Un exemple classique mais intéressant est la substitution du mode d'occupation du sol par la valeur foncière. Le coût du terrain par unité de surface varie selon les affectations. Il constitue la variable exogène qui, multipliée par la superficie constante des pixels, est distribuée spatialement selon le canevas de l'image classée de l'occupation du sol. L'image obtenue fournit de nouveau une information quantitative spatialement discrète.

B. Les transformations spatiales

L'image classée, ou la transformée thématique qui en est issue, peut être soumise à un autre type de transformation qui conduit cette fois à l'obtention d'une information quantitative spatialement continue, c'est-à-dire d'un champ.

Une image quantitative spatialement discrète est aisément transformée en une surface continue par l'application d'un filtre passe-bas (moyenne ou moyenne pondérée) utilisant une fenêtre de convolution de grande taille. L'image densimétrique et celle des valeurs foncières citées plus haut se prêtent aisément à cette transformation. Les champs de densité de population ou de valeurs foncières ne se justifient cependant qu'à des échelles relativement petites.

Une transformation spatiale d'un autre ordre consiste à construire un champ de potentiel. La construction d'un tel champ peut reposer tant sur une variable quantitative répartie selon les affectations, l'image densimétrique par exemple, que sur la simple occurrence des modes d'occupation du sol figurant dans l'image classée originale. Le modèle de potentiel utilisé est dérivé de la loi de gravitation universelle et peut aussi être interprété en termes de moments statistiques. L'idée fondamentale est que l'intensité d'interaction entre deux corps est proportionnelle aux masses en présence et inversement proportionnelle à leur éloignement, et son application postule que (Meinke, 1970) :

- il existe nécessairement des interactions entre tous les corps caractérisés par leur masse et par leur position dans l'espace ;

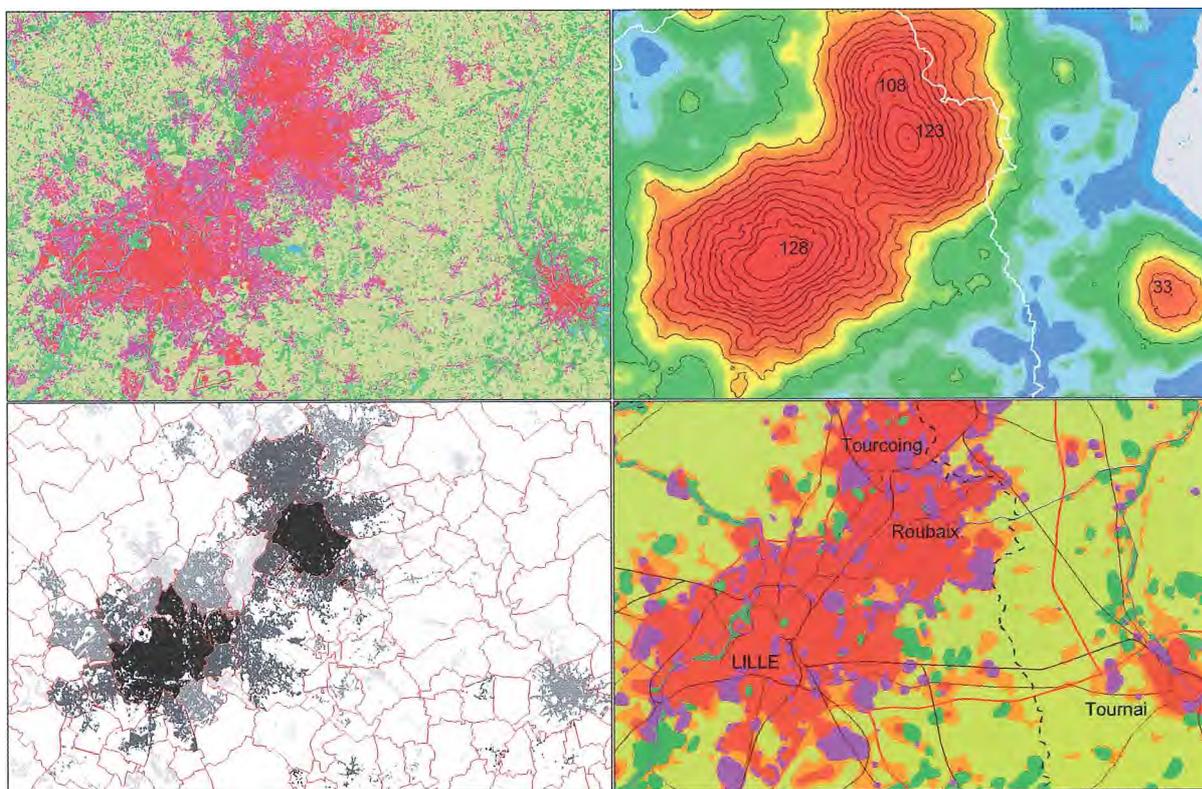


Figure 6. Agglomération transfrontalière de Lille

De gauche à droite et de haut en bas :

A. Classification de l'occupation du sol. B. Potentiel de population. C. Carte densimétrique de population. D. Unité paysagères (d'après Binard et Nadasdi, 1997).

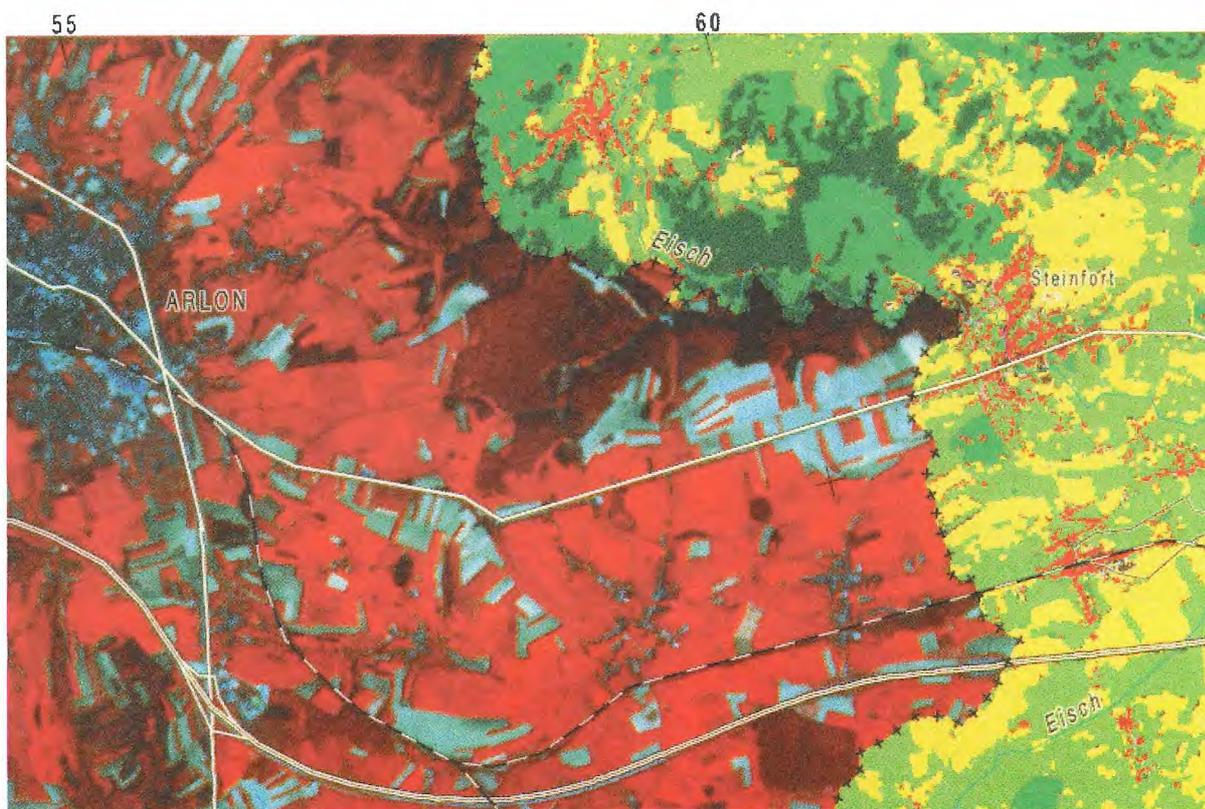


Figure 7. Intégration d'une classification dans une composition colorée (Extrait de SURFACES 1990).

1 km

- la probabilité d'interaction est la même entre toutes les paires de corps;
- l'intensité des interactions est une fonction inverse des distances qui les séparent.

La formule simplifiée du potentiel pour le traitement numérique de l'image est :

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{m_j}{d_{ij}^b} + \frac{m_i}{\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{s}{\pi}}\right)^b}$$

où :

- P_i : potentiel du pixel i
- n : nombre de pixels dans le voisinage de i
- m : masse du pixel
- d_{ij} : distance séparant les pixels i et j
- s : surface constante d'un pixel
- b : constante d'ajustement du modèle

En théorie l'exposant b est fixé à l'unité. Dans la pratique, il est ajusté entre cette valeur unitaire, typique du modèle de potentiel, et la valeur 2, caractéristique du modèle de densité. La masse des pixels, m , prend la valeur de la variable exogène quantitative à l'endroit du pixel, lorsque cette variable existe (le chiffre de population par exemple), ou est laissée à l'unité si le modèle s'applique aux surfaces relatives des affectations. Les valeurs obtenues sont souvent exprimées en pourcent du potentiel maximum observé dans l'image. Comme pour les autres constructions de champs, le modèle de potentiel est implémenté au travers d'une fenêtre de convolution de grande taille.

Le potentiel peut être calculé sur une ou plusieurs affectations simultanément. Le potentiel urbain peut être utilisé seul pour délimiter, par seuillage, les limites d'une agglomération. Par contre, une image synthétique, qualifiée par Nadasdi de *colorama*, est obtenue en visualisant sous forme de composition colorée trois potentiels complémentaires. Parmi les applications les plus intéressantes au modèle, on notera la classification multivariée de plusieurs potentiels calculés sur base d'une même image de l'occupation du sol, afin de mettre en évidence des unités paysagères (Fig 6 D).

VI. L'INTÉGRATION D'UNE CLASSIFICATION DANS UNE COMPOSITION COLORÉE

Le dernier traitement évoqué qui est susceptible d'être appliqué à une image classée lors de l'élaboration de la spatiocarte, consiste à insérer la classification dans une image plus grande et présentée, elle, en composition colorée. Ce montage particulier met en évidence la zone d'intérêt en jouant sur deux niveaux de lecture, analytique pour la partie classée, et

synoptique pour la composition colorée entourant la classification (Fig. 7). En outre, comme on l'a déjà mentionné, cette disposition permet de maintenir un champ de forme rectangulaire, facilitant l'habillage de la spatiocarte, alors que la classification est délimitée par un masque géographique.

Les deux images participant à cette spatiocarte, la classification d'une part et la composition colorée d'autre part, sont préparées séparément selon leurs règles propres. Elles sont évidemment géoréférencées vis-à-vis du même système et présentent la même résolution. La composition colorée obtenue couvre l'ensemble du champ rectangulaire et est constituée d'une image couleurs 24 bits. La classification, par contre, est une image en couleurs indexées sur 8 bits, limitée spatialement au masque géographique. La double transformation requise pour assurer l'intégration des deux images est résumée ci-dessous.

- Ouverture des 3 plans de l'image 24 bits en composition colorée :
 - o inversion du masque géographique binaire : la partie du masque correspondant à la zone classée est mise à zéro, tandis que les autres pixels du masque sont mis à l'unité ;
 - o multiplication de chaque plan de l'image 24 bits par le masque géographique binaire inversé.
- Transformation de l'image classée en une image 24 bits : construction de 3 plans RVB où les valeurs des pixels homologues à ceux de l'image en couleurs indexées correspondent respectivement aux trois composantes lues dans la palette de couleurs.

L'intégration de la classification est réalisée par simple addition d'images, plan par plan, et la spatiocarte finale est sous forme d'une image 24 bits. Toutes les opérations de mosaïque, de filtrage, d'injection de texture ou d'ombrage, et de généralisation, qui sont susceptibles d'affecter l'une ou l'autre des deux images d'origine, auront dû être effectuées avant l'intégration de la classification dans la composition colorée. Par contre, les compléments vectoriels éventuels de planimétrie, ainsi que les écritures, seront sélectionnés et positionnés après l'intégration de manière à garantir une figuration homogène sur l'ensemble du champ rectangulaire.

La méthode présentée ci-dessus peut être amendée de différentes manières. Ainsi, pour accentuer la mise en évidence de la classification au détriment de la composition colorée, il est possible de faire subir à cette dernière, avant l'intégration, soit un filtrage passe-bas, soit une diminution générale de saturation et/ou d'intensité. Le filtrage est appliqué sur chacun des canaux bruts participant à la composition avant de réaliser cette dernière, tandis que la modification de

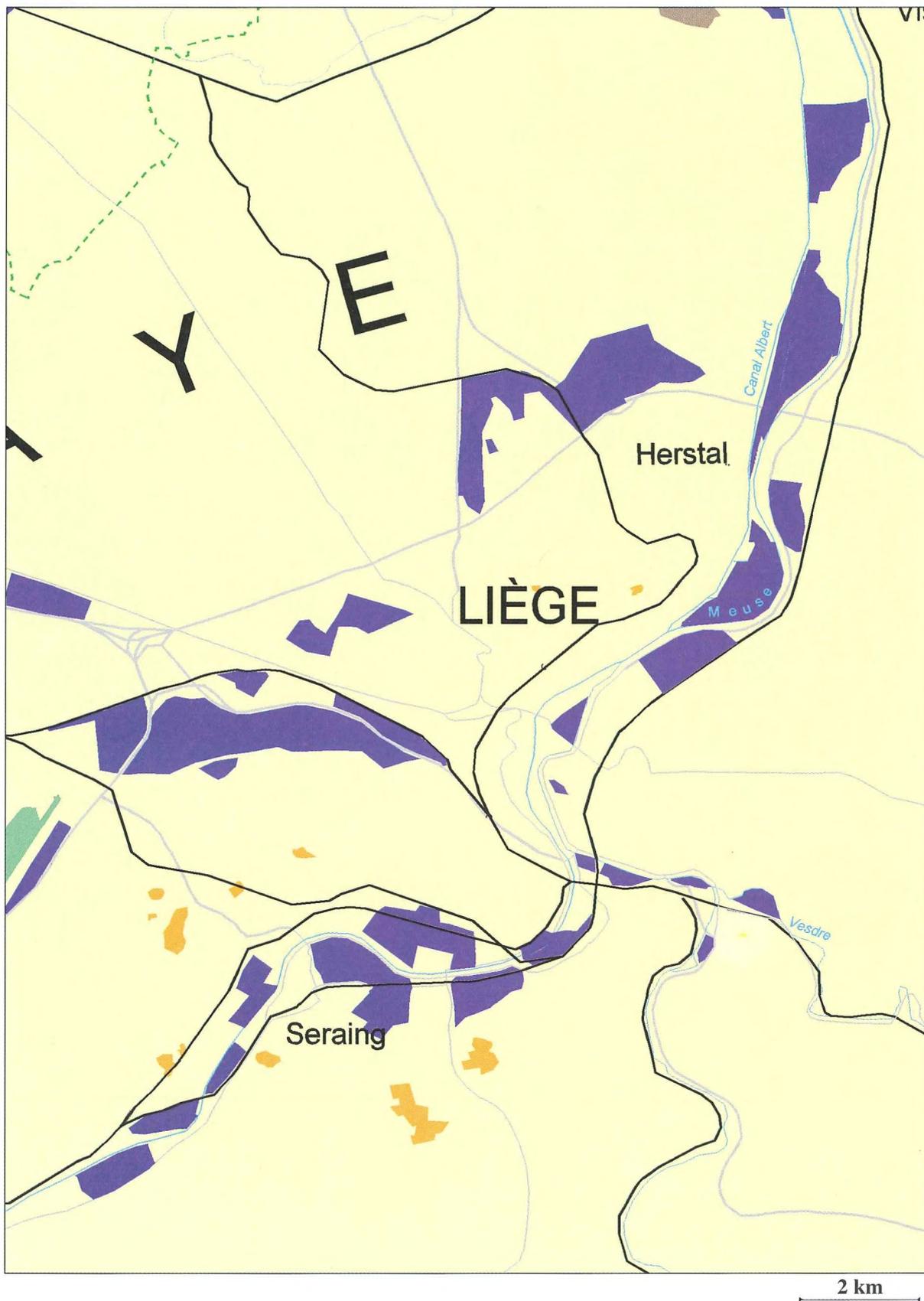


Figure 8. Information image avant superposition des données vectorielles (Extrait de SURFACES 1993).

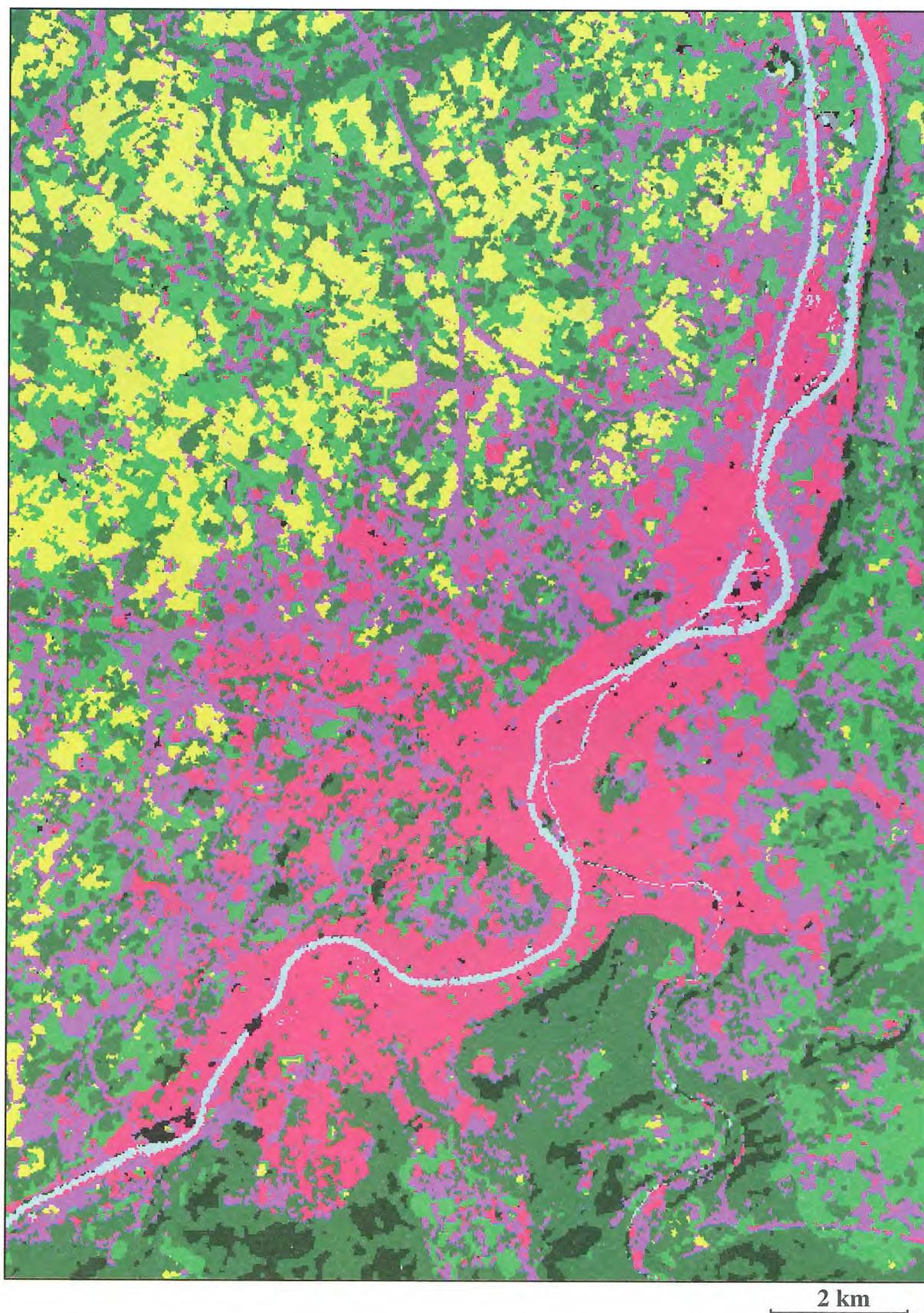


Figure 9. Information vectorielle avant symbolisation (Extrait de SURFACES 1993).

saturation/intensité est appliquée aux pseudo-canaux appropriés issus de la conversion des trois plans de la composition colorée dans l'espace colorimétrique teinte, saturation et intensité.

Une alternative intéressante consiste à conserver la spatiocarte intégrant classification et composition colorée dans une image en couleurs indexées en 8 bits, dans le but d'une diffusion de la spatiocarte numérique sur le réseau par exemple. L'ordre des étapes est identique, mais la composition colorée n'exploite qu'un nombre limité de combinaisons RVB, comme cela a été exposé au chapitre précédent. Composition colorée et classification sont dès lors toutes deux en couleurs indexées et l'intégration consiste, outre le masquage, à reclasser les valeurs des pixels d'occupation du sol au delà de la gamme de valeurs réservée à la composition. Une composition colorée réservant 6 niveaux par composante, par exemple, laisse 40 entrées dans la palette de couleurs pour les modalités d'occupation du sol et pour les éventuels compléments planimétriques vectoriels. La dégradation subie par la composition colorée n'est généralement pas préjudiciable puisque cette image ne correspond pas à la zone d'intérêt.

VII. UN EXEMPLE D'APPLICATION

Un exemple pratique de réalisation d'une carte de l'Euregio (SURFACES, 1993) illustre cette fin de chapitre. Il permet de synthétiser les différentes étapes de la création d'une spatiocarte.

Une image Landsat5 du capteur Thematic Mapper, du 5 mai 1993, a été corrigée par rapport à une carte couvrant toute la zone d'intérêt. Ensuite, une rotation de 12,25° vers l'ouest a été appliquée de manière à visualiser la plus grande partie possible de l'Euregio au sein d'un simple rectangle. Cet angle est en relation avec celui formé par la trace au sol du satellite avec la direction du nord.

L'image a ensuite été soumise à une classification dirigée suivant l'algorithme du maximum de vraisemblance. Les 11 classes retenues sont : les plans d'eau, les zones d'urbanisation dense, les zones d'urbanisation de densité moyenne, les terrains industriels et de services, les carrières, les landes et fagnes, les terrils et crassiers, les cultures, les herbages, les bois et forêts de feuillus, les bois et forêts de conifères.

Différentes procédures de filtrage ont été appliquées sur l'image, parmi lesquels le filtrage contextuel. Ces procédures ont permis de réduire le nombre de mixels, de supprimer l'aspect de pixelisation de la classification et de conserver les classes peu couvrantes.

Les carrières, les terrils et les crassiers ont été délimités par PIAO (photo-interprétation assistée par ordinateur) en mode vecteur. Les éléments zonaux reportés sont les plans d'eau, les terrains industriels et de services, les gares principales, les aéroports. Les éléments reportés linéaires sont les rivières, les lignes de chemin de fer, les autoroutes et les routes principales, les frontières nationales et régionales, la toponymie. Ces informations ont été collectées sur différentes cartes et dans différentes bases de données géographiques vectorielles. Elles ont dû être projetées dans le système de projection de la spatiocarte.

La figure 8 montre la classification après l'application des différents filtrages, sans report des éléments vectoriels. La figure 9 présente l'ensemble du vectoriel avant symbolisation. La symbolisation du vectoriel et sa superposition sur la classification seront présentées dans un chapitre ultérieur.

BIBLIOGRAPHIE

- ATKINSON P.M. & LEWIS P., 2000. Geostatistical classification for remote sensing: an introduction. *Computers & Geosciences*, 26 (4), 361-371.
- BINARD M. & COLLETTE B., 1993. Traitement contextuel en post-classification pour l'élaboration d'une spatio-carte destinée à la gestion et à l'aménagement du territoire. *Actes des 17^{es} journées scientifiques de télédétection de l'AUPELF-UREF : Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*, Montréal, AUPELF-UREF, Les presses de l'université du Québec, Québec, 285-295.
- BINARD M. & NADASDI I., 1997. *Modélisation des données issues des traitements d'image satellitaire en vue de la réalisation d'un schéma de structure transfrontalier*. Étude de faisabilité, contrat de recherche S.S.T.C. T4/DD/015, rapport final.
- BINARD M., NADASDI I., LAMBINON M., MARCHAL D. & DONNAY J-P., 1997. Études multi-échelles : application aux agglomérations du nord-ouest de l'Europe. *Actes des 16^{es} journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUPELF-UREF : Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Liège, AUPELF-UREF, Montréal, 15-23
- CHIN-TENG L., YIN-CHEUNG L. & HER-CHANG P., 2000. Satellite sensor image classification using cascaded architecture of neural fuzzy network. *IEEE Transaction on geoscience and remote sensing*, 38 (2), 1033-1043.
- DONNAY J-P., 1992. Applications de la télédétection satellitaire à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. *Télédétection spatiale* (CNES, Éd.), CEPADUES Éditions, Toulouse, 221-241.
- DONNAY J.P., 1995. *Cartographie topographique*, 2^e édition, série SURFACES, 1, Liège.
- JUSTICE C.O., WHARTON S & HOLBEN B.N., 1981. Using digital terrain data to quantify and

- reduce the topographic effect on Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(3), 213-230.
- MEINKE D., 1970. Gravitations und Potentialmodelle. *Handwörterbuch der Raumforschung und Raumordnung*, 1, Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Gebrüder Jänecke Verlag, Hannover, 1048-1060.
- NADASDI I., 1994. Inventaires biophysiques de l'occupation du sol et pratique des plans d'organisation du territoire: Expériences de l'Euregio Meuse-Rhin, de la Wallonie et du Grand-Duché de Luxembourg. *Jornadas técnicas sobre Sistemas de Información Geográfica y Teledetección espacial aplicados a la Ordenación del territorio y el Medio Ambiente*, Vitoria-Gasteiz, 171-198.
- NADASDI I., BINARD M. & DONNAY J-P., 1991. Transcription des usages du sol par le modèle de potentiel. *Mappemonde*, 3, 27-31.
- NADASDI I., MARCHAL D. & BINARD M., 1996. Modélisation des occupations biophysiques du sol issues des traitements d'images XS de SPOT : exemple de l'agglomération de Luxembourg. *Actes de la conférence internationale : D'une décennie de réalisations ... à une décennie de promesses*, La Villette, CNES, Paris, 619-624.
- RAPTIS V., VAUGHAN R., RANCHIN T. & WALD L., 1998. An assessment of different data fusion methods for the classification of an urban environment. *Proceedings of the Second International Conference : Fusion of Earth Data merging point measurements, raster maps and remotely sensed images* (Ranchin T. & L. Lucien Wald, Éds), EARSeL-SEE-Ecole des Mines de Paris, 167-181.
- SIMPSON J.J., McINTIRE T.J. & SIENKO M., 2000. An improved hybrid clustering algorithm for natural scenes. *IEEE Transaction on geosciences and remote sensing*, 38 (2), 1016-1032.
- SURFACES, 1990. *Classification des modes d'occupation des sols dans le Sud-Ouest du Grand Duché de Luxembourg* (+ 2 cartons), 1/50.000, 60 x 90 cm, photogravure et impression De Schutter, Bruxelles-Anvers, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement du Grand Duché de Luxembourg, Université de Liège.
- SURFACES, 1993. *Land use of the urban part Maastricht - Hasselt - Aachen - Liège : MHAL of the Euregio Meuse-Rhin* (+ 4 cartons) (quadrilingue), 1/100.000, 80 x 120 cm, photogravure et impression De Schutter, Bruxelles-Anvers, Provincie Nederlands-Limburg, Hoofdgroep R.O.V., Afd. A-Z provincie Limburg, Université de Liège.
- TAHIRI, D., 1991. *Interactions des facteurs topographiques sur l'interprétation des images satellitaires: application à la région de Zoumi (Maroc)*. Mémoire d'ingénieur agronome, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, inédit.