

LES SPATIOCARTES EN COMPOSITION COLORÉE

Jean-Paul DONNAY

I. LE RÔLE DES COMPOSITIONS COLORÉES EN SPATIOCARTOGRAPHIE

Les compositions colorées constituent certainement la forme de visualisation des images satellitaires la plus connue et l'une des plus spectaculaires. Conçues selon le principe même de la synthèse des couleurs, elles combinent plusieurs images en un seul document coloré, rassemblant de ce fait une grande quantité d'informations. Elles laissent cependant à l'observateur le soin d'interpréter visuellement les variations de couleurs, et constituent ainsi, pour l'analyse, un support analogique privilégié, au même titre qu'une photographie en couleurs, et selon une forme très semblable.

Les premières compositions colorées réalisées en télédétection étaient conçues au départ de films et de manière analogique. La définition qui en est donnée aujourd'hui témoigne encore de ce processus : « *Color image prepared by projecting individual black-and-white multispectral images, each through a different color filter. When the projected images are superposed, a color composite image results* » (Short, 2000). Les photographies prises depuis Skylab et celles prises par les capteurs analogiques des premiers Landsat ont été largement diffusées sous forme de compositions colorées, avant que n'apparaissent les premières compositions numériques (Sabins, 1987). Seules ces dernières font l'objet du présent chapitre.

Dans un premier temps, l'analogie avec la photographie a été exploitée pour réaliser quantité de produits à destination du grand public : revues de vulgarisation scientifique et de voyage, affiches, calendriers, etc. À ce stade, les images en composition colorée sont rarement présentées comme des spatiocartes. C'est surtout l'aspect esthétique qui est recherché, tant dans le cadre géographique que dans l'usage des couleurs. Cependant, ceci n'enlève rien à la rigueur méthodologique, ni au soin apporté dans leur réalisation. Le *piqué* de l'image doit être excellent, ce qui implique une totale maîtrise des contrastes et une sélection judicieuse des images entrant dans la composition. En outre, la couverture d'un territoire représentatif impose d'habitude la réalisation d'une mosaïque de scènes voisines. Enfin, le passage à la synthèse soustractive pour la quadrichromie requise pour l'impression, au départ d'une image conçue en synthèse additive, ajoute à la

difficulté. On le constate, la majorité des préoccupations méthodologiques propres aux compositions colorées sont déjà présentes dans l'exécution de produits jugés pourtant fort banals.

D'un autre côté, la présentation de compositions colorées limitées à des territoires politiques ou administratifs précis, et présentées selon des conventions de projection et d'habillage normalisées, constituent des spatiocartes dans toute l'acceptation du terme. Elles forment même la toute grande majorité des spatiocartes publiées, soit sous forme de cartes isolées, soit rassemblées dans des atlas qui leur sont parfois totalement consacrés. Aux considérations méthodologiques mentionnées ci-dessus, s'ajoute le respect des qualités et des conventions cartographiques : respect de la projection, de l'échelle et de l'exactitude de position, ajout d'une planimétrie reportée, d'une légende et d'autres éléments de l'habillage.

Puisque la composition colorée utilise la synthèse additive des couleurs, sa visualisation doit pouvoir être effectuée sur un écran d'ordinateur de technologie vidéo. Certes, des limites existent quant aux capacités graphiques des micro-ordinateurs. Mais, d'un autre côté, les logiciels permettant la visualisation des compositions colorées sur écran offrent des fonctionnalités originales (zoom, fenêtre mobile de visualisation, saisie d'objets vectoriels superposés à l'image, etc.) et une remarquable convivialité. Ces diverses facilités assurent un haut rendement dans l'interprétation visuelle des compositions. Elles sont exploitées pour la sélection et la délimitation des sites d'entraînement, en préalable à une classification supervisée, mais surtout elles remettent à l'honneur la totalité de la démarche de photo- ou image-interprétation, dite dans ce cas assistée par ordinateur (PIAO ou IIAO). Cependant, les images affichées dans ces conditions ne sont pas assimilables à des spatiocartes, même si elles présentent une qualité géométrique équivalente pour garantir la restitution planimétrique correcte des objets localisés et interprétés.

L'affichage sur écran de véritables spatiocartes basées sur des compositions colorées est surtout devenu une opération courante dans le cadre de l'exploitation en réseau du type Internet. Dans ce cas, tous les éléments de la spatiocarte doivent être adaptés à l'usage qui en

est fait. L'image en composition colorée doit être compressée, à la fois pour des questions de vitesse de transfert, et pour s'adapter aux capacités diverses des écrans de visualisation (résolution, nombre de couleurs simultanées, etc). De même, il faut assurer à ces résolutions la lisibilité des éléments reportés, en ce compris les écritures. Cette préparation des spatiocartes relève notamment de la généralisation cartographique, évoquée à de nombreux endroits dans cet ouvrage.

II. LE PRINCIPE DES COMPOSITIONS COLORÉES

A. Synthèse des couleurs

Le principe de la synthèse des couleurs, tant en mode additif qu'en mode soustractif, est supposé connu du lecteur (Langlois, 1987 ; Garo, 1999). La présentation qui suit a pour seul but d'introduire le vocabulaire utilisé plus loin. Elle est volontairement simplifiée et n'est certes pas la seule décrite dans la littérature et mise en pratique en infographie (Marion, 1997). Néanmoins, elle suffit pour illustrer la construction des images en composition colorée et elle sera d'ailleurs complétée dans d'autres chapitres de l'ouvrage.

En synthèse additive trichrome, le plus grand nombre de couleurs peut être retrouvé par la combinaison de trois couleurs primaires, parmi lesquelles aucune n'est équilibrée par un mélange des deux autres, en l'occurrence les couleurs rouge, verte et bleue, notées traditionnellement R, V (ou G, initiale de *green*) et B. Pour faciliter le raisonnement, les trois couleurs primaires sont figurées comme des vecteurs unitaires reportés sur les axes perpendiculaires d'un trièdre. L'origine de ce trièdre, où les valeurs des trois primaires sont nulles, correspond à la couleur noire, constituant l'origine chromatique du modèle. Selon ce modèle, une couleur quelconque est formée par la combinaison de ses trois composantes chromatiques

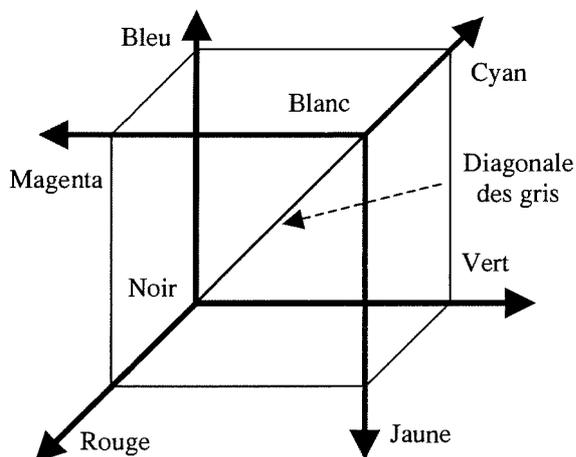


Figure 1. Le cube des couleurs

R, V et B, chacune comprise dans l'intervalle $[0-1]$. Elle peut être figurée par un vecteur issu de l'origine du trièdre, et dont extrémité est fixée par la somme vectorielle de ses trois composantes chromatiques. La couleur formée par les trois primaires prises à valeur maximale est le blanc, fermant le trièdre pour former le cube des couleurs (Fig. 1). La diagonale principale du cube, reliant le noir, à l'origine, au blanc, à l'extrémité opposée du cube, est la droite des luminances, ou diagonale des gris. En chaque point de celle-ci, le gris est obtenu par une combinaison de trois primaires de même valeur.

Les autres extrémités du cube, correspondant aux combinaisons de deux primaires à valeur maximale et une à valeur nulle, sont les couleurs secondaires de la synthèse additive. Chacune est la complémentaire d'un couleur primaire car, avec elle, elle forme du blanc en synthèse additive. Il s'agit du cyan (combinaison du vert et du bleu ; complémentaire du rouge), du magenta (combinaison du rouge et du bleu ; complémentaire du vert) et du jaune (combinaison du rouge et du vert ; complémentaire du bleu), notées C, M et J (ou *Y pour yellow*). Le trièdre qu'elles forment avec le blanc pour origine, constitue l'espace de la synthèse soustractive, dual vis-à-vis de celui de la synthèse additive. Les couleurs CMJ sont dites aussi les couleurs fondamentales de la synthèse soustractive. Par conséquent, à l'intérieur du cube, chaque point correspond à une couleur figurée, tant par un vecteur dans l'espace additif, que par un vecteur dans l'espace soustractif, et le changement entre ces deux modèles colorimétriques peut se concevoir comme un simple changement de repère orthonormé.

En pratique, le modèle RVB de la synthèse additive exploite une combinaison de sources lumineuses pour créer les couleurs, telle que celle mise en oeuvre lors de l'affichage sur un moniteur couleur. La synthèse soustractive, par contre, est fondée sur l'absorption des couleurs de l'encre sur le papier. L'éventail des couleurs, ou espace colorimétrique, d'un moniteur diffère de l'espace colorimétrique utilisé par l'imprimerie traditionnelle. Or, habituellement, à l'exception des documents graphiques conçus pour une simple visualisation sur écran (enregistrés sur CD ROM ou consultés sur une page Web par exemple), la réalisation de documents imprimés utilise successivement les deux modèles de synthèses, additif lors de la conception sur écran, puis négatif lors de l'impression. En outre, la représentation des couleurs varie également entre moniteurs, imprimantes ou logiciels de traitement d'images. On conçoit dès lors que la réalisation de documents graphiques en couleurs réclame un étalonnage précis de toute la chaîne graphique utilisée (Mourier, 1997).

B. Compositions colorées RVB 24 bits

La technologie des écrans de visualisation est aujourd'hui assez diversifiée (tubes à rayons cathodiques, écrans à cristaux liquides, etc.) et sa description serait ici hors de propos. Le principe habituel consiste à ce qu'un point (ou pixel) de couleur déterminée n'est formé à l'écran qu'en réponse au signal vidéo composite (ou à trois signaux vidéos distincts) fixant les intensités de rouge, vert et bleu formant la couleur en question. Le signal vidéo est préparé sous forme numérique par l'adaptateur graphique de l'ordinateur, puis soumis au dispositif de visualisation à travers un convertisseur numérique / analogique (un par primaire).

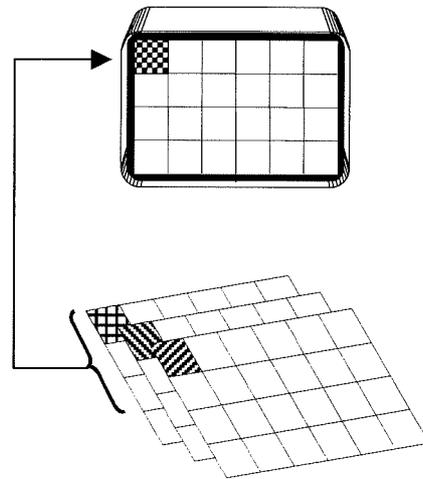


Figure 2. Mémoire graphique et écran de visualisation
 À chaque pixel de l'écran, correspondent trois registres en mémoire graphique, mémorisant les composantes rouge, verte et bleue du pixel.

Un adaptateur graphique 24 bits standard dispose d'une mémoire graphique qui peut être représentée comme composée de trois bancs d'octets disposés en matrices reflétant la position des pixels de l'écran. Chaque plan mémoire stocke l'une des trois composantes chromatiques de l'image à afficher selon une quantification en 256 niveaux (Fig. 2).

Lors de l'exécution d'une commande graphique, le dessin (ou l'image), décomposé en ses trois couleurs primaires, est écrit dans la mémoire graphique. Celle-ci est lue plusieurs fois par seconde par l'adaptateur et transformée en signal vidéo pour commander l'affichage sur l'écran. La fréquence de lecture est fonction du type de balayage, entrelacé ou non, et du taux de rafraîchissement supporté par l'écran. Les capacités de l'adaptateur sont donc déterminantes : la taille de la mémoire graphique fixe la résolution de l'affichage (limitée in fine par la capacité de l'écran), tandis que la structure en octets limite le nombre de niveaux d'intensité par couleur primaire à 256.

Si l'on considère que le système colorimétrique d'acquisition est identique au système colorimétrique de restitution, la visualisation d'une composition colorée est immédiate. Trois images, ou plus communément trois canaux d'une image multispectrale sont stockés dans les trois plans de la mémoire graphique (Fig. 3). Dans la pratique, la reproduction fidèle des couleurs demande une transformation du signal avant de l'envoyer au restituteur, mais ces considérations relèvent du calibrage du matériel graphique et non de la télédétection (pour plus de détails, consulter Marion, 1997).

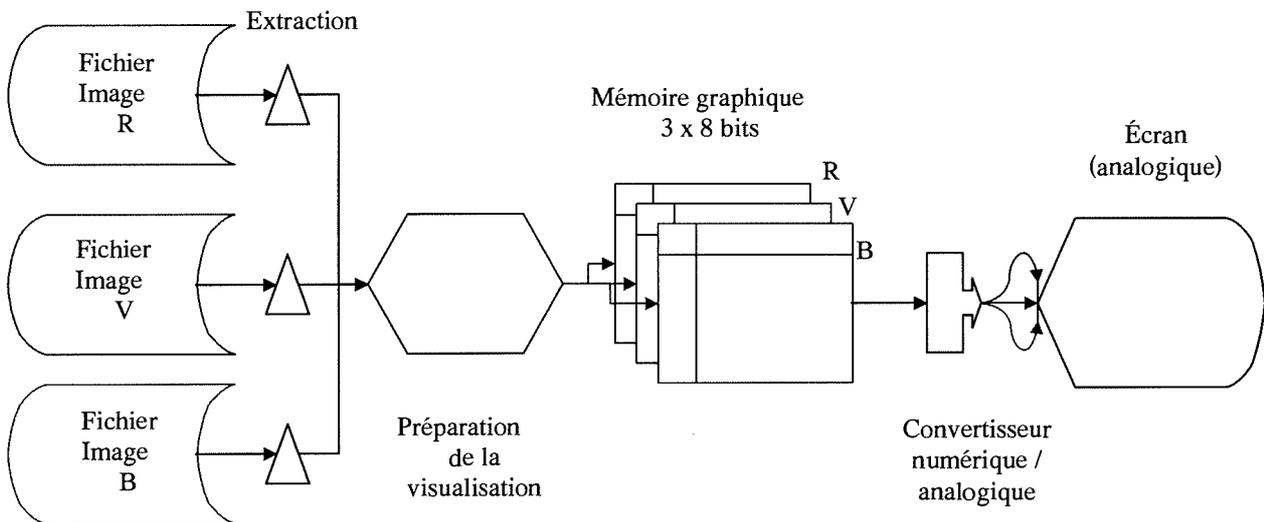


Figure 3. Composition colorée RVB en 24 bits (« vraies couleurs »)

L'assignation d'une image ou d'un canal à une couleur primaire est arbitraire, encore faut-il que la taille des images ou canaux soit compatible avec la taille de la mémoire graphique et que ces images soient codées en octets. La composition par synthèse additive est réalisée automatiquement lors de l'affichage et peut restituer jusqu'à 256^3 pixels, le compte numérique de chaque pixel (variant de 0 à 255) correspond à un index pointant vers une couleur simultanément. Ce nombre, élevé, permet d'assimiler la composition colorée RVB associée à une image en *demi-teintes* selon la terminologie utilisée traditionnellement dans le monde de l'impression. Dans le domaine du traitement d'image, une telle composition RVB en 24 bits est souvent qualifiée de composition colorée en « vraies couleurs ». Toutefois, en télédétection, cette même appellation est parfois réservée à une combinaison particulière de couleurs et de canaux d'une image multispectrale (cf. § III.D. dans le même chapitre).

soient codées en octets. La composition par synthèse

Lorsqu'une image est codée à raison de 8 bits par pixel, le compte numérique de chaque pixel (variant de 0 à 255) correspond à un index pointant vers une couleur définie par les intensités de ses trois composantes RVB, elles-mêmes codées sur un intervalle de quantification variable, mais le plus fréquemment fixé à 256 niveaux. L'ensemble de la table porte le nom de palette de couleurs (ou CLUT pour *Colour Look Up Table*). Elle est susceptible d'être éditée par l'utilisateur et les couleurs y apparaissent par conséquent dans un ordre totalement arbitraire. Le convertisseur numérique / analogique de l'adaptateur graphique utilise les intensités des trois couleurs primaires lues dans la palette pour définir le signal vidéo commandant l'affichage pixel par pixel de l'image à l'écran (Fig. 4 et 5).

C. Compositions colorées monocouches

Tous les adaptateurs ne disposent pas de 3 x 8 bits / pixel en mémoire graphique et, d'autre part, une image RVB atteint vite une taille assez considérable, peu conciliable avec une consultation en réseau (temps de transfert) et avec l'espace de stockage toujours limité des supports magnétiques. Ces raisons justifient la réduction du nombre de niveaux de quantification des compositions colorées. Visuellement, la dégradation des couleurs affichées est à peine perceptible si l'on se contente de 3 x 5, voire de 3 x 4 bits / pixel ($2^{12} = 4\,096$ couleurs simultanées). La dégradation est plus sensible avec une quantification de 8 bits / pixel ou moins, telle qu'elle était offerte par un bon nombre d'adaptateurs graphiques aujourd'hui obsolètes, mais la méthode reste largement utilisée

Le nombre d'entrées de la table détermine le nombre de couleurs qu'il est possible d'afficher simultanément, tandis que le niveau de quantification de chaque couleur primaire admis par la table fixe la palette, c'est-à-dire le nombre de couleurs parmi lesquelles il est possible de sélectionner les couleurs affichées. À titre d'exemples, une palette combinant 16 entrées avec une quantification en 64 niveaux par primaire permet d'afficher simultanément 16 couleurs différentes choisies parmi 262 144 ; tandis qu'une palette disposant de 256 entrées et d'une quantification en 256 niveaux par primaire permet la visualisation de 256 couleurs simultanées sélectionnées parmi 16 777 216.

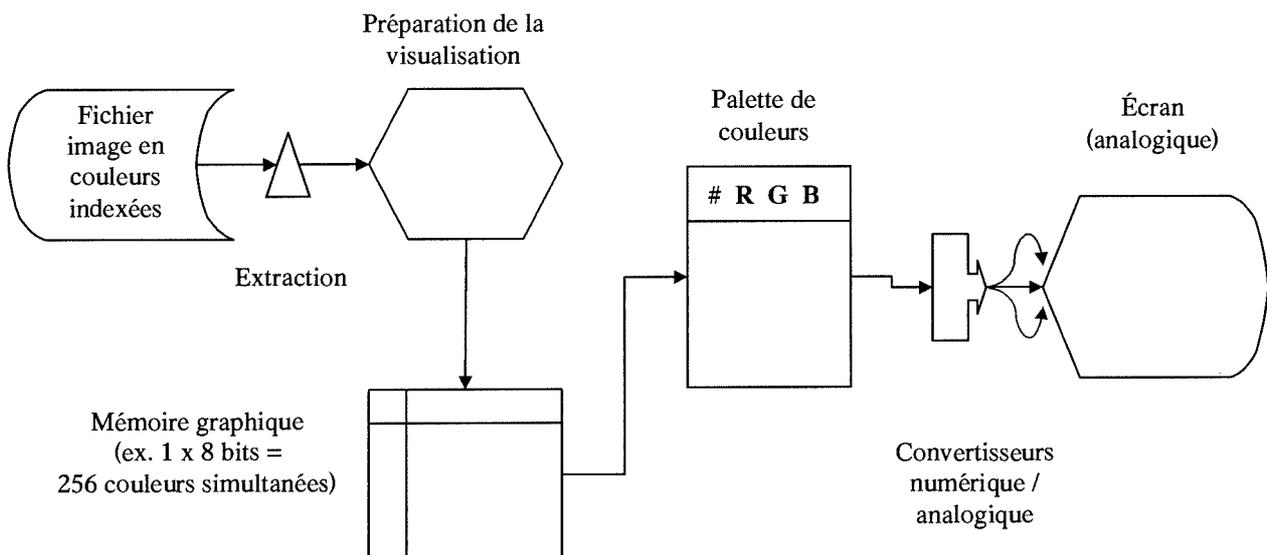


Figure 4. Composition colorée 8 bits en couleurs indexées

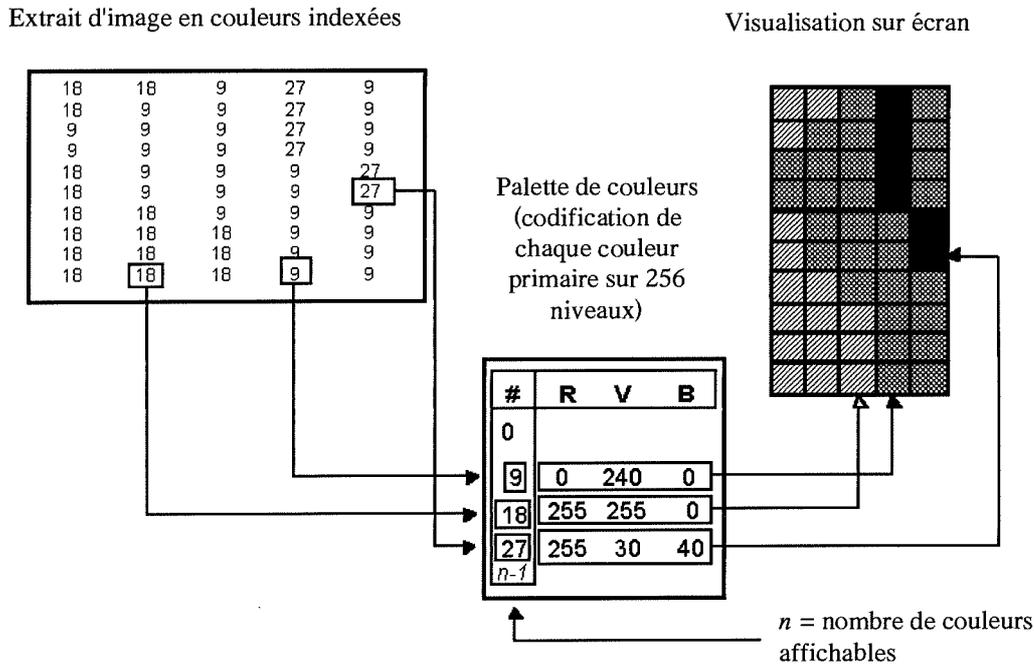


Figure 5. Indexation des couleurs par une palette RVB

La création d'une composition colorée monocouche réclame deux opérations :

- d'une part, il faut identifier les couleurs les plus « significatives » de la composition qui vont former la palette ;
- d'autre part, il faut associer à chaque pixel de l'image monocouche le numéro pointant vers la couleur la plus adéquate dans la palette.

La sélection des couleurs significatives n'est rien d'autre qu'une classification des trois images ou des trois canaux de l'image multispectrale qui forment la composition. Le nombre de classes est fixé a priori (le nombre d'entrées accepté par la palette) et plusieurs algorithmes sont utilisables.

L'algorithme le plus simple consiste à classer indépendamment les trois composantes selon une méthode de discrétisation quelconque, de telle sorte que le produit des nombres de classes par composante ne dépasse pas le nombre d'entrées permis par la palette. La discrétisation la plus courante consiste à effectuer une classification à intervalles égaux, connue aussi sous le nom d'équidensité colorée. Cette méthode justifierait que les composantes aient été préalablement soumises à une égalisation d'histogrammes, mais on constatera par la suite qu'il ne s'agit pas de l'amélioration de contraste la plus performante à appliquer. L'application d'une discrétisation séparée sur chacune des trois composantes s'identifie à une classification par boîtes, bien connue en traitement d'images de télédétection (Fig. 6).

Si l'on considère un plan mémoire d'un octet / pixel, on constate qu'il n'est pas possible de discrétiser en un même nombre de classes les trois composantes initiales si l'on veut profiter des 256 entrées de la palette correspondante. Tenant compte de la sensibilité de l'oeil aux variations de teintes, on réservera d'habitude 8 classes (2^3 donc 3 bits) aux composantes associées aux couleurs bleue et rouge, et 4 classes (2^2 donc 2 bits) seulement à la composante associée au vert. L'espace colorimétrique est ainsi divisé en 256 classes ($8 \times 8 \times 4$) qu'il reste à numéroter de manière logique pour attribuer aisément le bon numéro de classe à chaque pixel de la composition. Selon la

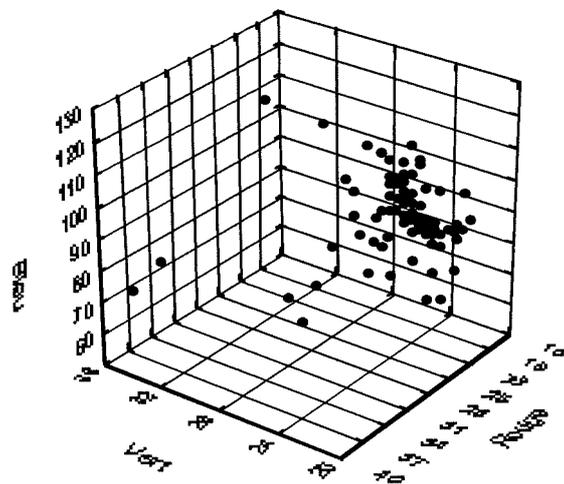


Figure 6. Discrétisation distincte des 3 composantes (classification par « boîtes »)

| Critères d'interprétation | Nature des traitements |
|-----------------------------|---|
| Présence / visibilité | Choix des composantes : capteurs, canaux, pseudo-canaux Suppression de toute couverture nuageuse |
| Structure / taille et forme | Choix de la résolution spatiale et fusion éventuelle Qualité de la correction géométrique |
| Différenciation | Choix des couleurs associées aux composantes Amélioration du contraste global |
| Discrimination / texture | Maximisation des contrastes locaux |
| Sincérité / fiabilité | Maintien des associations de couleurs sur toute la composition : problèmes des ombres et des mosaïques |

Tableau 1. Traitements influençant la facilité d'interprétation des compositions colorées

leur ombre portée doit être corrigée par incrustation de portions d'images ou par la réalisation de mosaïques utilisant des images de même type mais enregistrées à des dates légèrement différentes. Les ombres propres et les ombres portées du terrain influencent la radiométrie et, de ce fait, elles doivent être prises en compte dans beaucoup d'applications telles que les classifications. Ces différents traitements d'intérêt général sont discutés dans d'autres chapitres de l'ouvrage et ne sont développés ici que superficiellement.

III. LE CHOIX DES CANAUX ET DES COULEURS

Techniquement, les images entrant dans la réalisation d'une composition colorée en « vraies couleurs » sont soumises aux seules contraintes suivantes : elles doivent être au nombre de trois, avoir le même nombre de lignes et de colonnes, et être codées en octets. D'un point de vue géographique, il faut ajouter le fait que les images doivent être référencées spatialement de manière identique pour assurer leur

superposition parfaite. Ces contraintes laissent néanmoins une grande latitude quant au choix des composantes.

A. Sélection des canaux d'une scène multispectrale

Le cas le plus classique consiste à sélectionner trois canaux d'une même image multispectrale. Cela présente quantité d'avantages du point de vue géométrique (même attitude, même angle de vue, même résolution, etc.) et du point de vue radiométrique (synchronisme, donc mêmes conditions climatiques, état phénologique identique, etc.). Parmi les canaux disponibles, le choix peut être dicté par un objectif d'interprétation fixé a priori. Ainsi, l'analyse de la végétation ou celle de la couche superficielle des plans d'eau apprécieront de façon opposée l'intégration des canaux sensibles au proche infrarouge dans la composition. Lorsque aucune considération de ce genre n'intervient, la composition colorée doit s'efforcer de figurer un maximum de détails et d'aider à l'identification d'un maximum de couvertures du sol. Pour ce faire, les canaux doivent

| (A) Var/ Covar | TM1 | TM2 | TM3 | TM4 * | TM5 ** | TM6 *** | TM7 ** |
|-------------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|
| TM1 | 19,36 | 11,72 | 17,74 | 22,99 | 42,24 | 8,58 | 19,01 |
| TM2 | 11,72 | 9,47 | 12,55 | 33,96 | 40,96 | 5,65 | 15,64 |
| TM3 | 17,74 | 12,55 | 20,20 | 23,83 | 48,88 | 9,05 | 21,74 |
| TM4 | 22,99 | 33,96 | 23,83 | 606,05 | 370,12 | 5,60 | 82,75 |
| TM5 | 42,24 | 40,96 | 48,88 | 370,12 | 329,80 | 21,38 | 96,77 |
| TM6 | 8,58 | 5,65 | 9,05 | 5,60 | 21,38 | 8,50 | 10,47 |
| TM7 | 19,01 | 15,64 | 21,74 | 82,75 | 96,77 | 10,47 | 35,30 |

| (B) Var/ Covar | XS1 | XS2 | XS3 * | (B) Corrél. | XS1 | XS2 | XS3 * |
|-------------------|--------|--------|--------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| XS1 | 83,24 | 98,85 | -32,27 | XS1 | 1,0000 | 0,962440 | -0,139751 |
| XS2 | 42,56 | 126,72 | -65,35 | XS2 | 0,962440 | 1,0000 | -0,229371 |
| XS3 * | -32,27 | -65,35 | 640,62 | XS3 * | -0,139751 | -0,229371 | 1,0000 |

* Canal proche infrarouge

** Canal moyen infrarouge

*** Canal infrarouge thermique

Tableau 2. Matrices de variance-covariance et de corrélation entre les canaux d'une image

A. Matrice de variance-covariance des canaux d'une image Landsat TM. B. Matrices de variance-covariance et de corrélation d'une image SPOT. (Deux extraits en milieu terrestre végétalisé mais géographiquement distincts).

être porteurs d'informations originales (non redondantes) qui se compléteront au moment de la composition. Les matrices de variance-covariance et de corrélation fournissent une première indication sur l'information apportée par les canaux et par leurs combinaisons deux à deux (Tableau 2).

La variance d'un canal traduit sa dynamique et la trace de la matrice indique l'information totale des canaux mis en présence. Les corrélations témoignent de l'originalité des canaux les uns par rapport aux autres.

- Un canal à forte variance mais n'entretenant que de faibles corrélations avec les autres canaux de l'image apportera vraisemblablement une information originale à la composition.
- Entre deux canaux fortement corrélés entre eux, celui présentant la plus grande variance a plus de chances de constituer un bon candidat à la composition.

En télédétection optique, en milieu terrestre largement végétalisé, les canaux proche et moyen infrarouge (PMIR) montrent systématiquement des dynamiques plus fortes que celles des canaux de la partie visible du spectre. Mais on constate également des corrélations élevées entre les différents canaux visibles d'une image (Tableau 2), de même qu'entre ses différents canaux P(M)IR. Se basant sur ces considérations statistiques, on a imaginé un indice capable d'identifier la combinaison optimale et de classer les combinaisons de canaux d'une image multispectrale susceptibles de former une composition colorée (Chavez et al., 1982 ; Colvocoresses, 1985):

$$OIF = \sum_{i=1}^3 \sigma_i / \sum_{\substack{i=1 \\ i>i}}^3 |r_{i,j}|$$

où :

- OIF : Optimum Index Factor ;
- σ : écart-type ;
- r : coefficient de corrélation.

L'indice est pourtant très théorique et il demande à être validé par la visualisation qui, elle-même dépend notamment du matériel utilisé. En outre, l'indice n'est pas calculable avec les pseudo-canaux issus d'une analyse en composantes principales.

B. Sélection de pseudo-canaux

Le raisonnement tenu sur la matrice de variance-covariance laisse entendre que d'excellents candidats à une riche composition colorée sont les pseudo-canaux issus d'une analyse en composantes principales (ACP) menée sur tous les canaux d'une image multispectrale. Par construction, l'ACP (ou l'algorithme de Karhunen-Loève qui est généralement utilisé) extrait les pseudo-canaux (autant de composantes principales que de canaux originaux) par

ordre décroissant de variance et tous indépendants entre eux. Une composition colorée construite sur les trois premiers pseudo-canaux extraits par ACP devrait satisfaire la recherche d'une information maximale, puisque les trois premières composantes représentent plus, en termes de variance cumulée, que trois canaux originaux (si ces derniers sont plus nombreux que 3 au départ !). Cette propriété de synthèse de l'ACP est d'ailleurs mise à profit dans tous les traitements faisant intervenir un nombre important d'images, comme cela est illustré dans plusieurs parties de cet ouvrage.

Il faut cependant tempérer l'efficacité de l'ACP en matière de composition colorée. Les scores factoriels, soit les attributs des pixels des pseudo-canaux, constituent des valeurs synthétiques souvent difficiles à interpréter et vis-à-vis desquels, en tout cas, l'association des couleurs primaires dans la composition n'est pas évidente. D'autre part, on constate généralement que la diminution de variance est très rapide entre les différentes composantes principales extraites successivement (Tableau 3). Cela signifie que l'information apportée à la composition par le troisième, voire par le second pseudo-canal est peu significative. L'usage d'un tel pseudo-canal dans la composition colorée peut même causer un bruit parasite.

| Saturations | C1 | C2 | C3 |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| TM1 | 0,351945 | 0,721167 | 0,558067 |
| TM2 | 0,582878 | 0,650628 | 0,393398 |
| TM3 | 0,377591 | 0,808301 | 0,399903 |
| TM4 | 0,977010 | -0,209833 | 0,037314 |
| TM5 | 0,928162 | 0,357963 | -0,101662 |
| % variance | 88,45 | 9,77 | 1,52 |

Tableau 3. Matrice des saturations entre les 3 premières composantes principales et 5 canaux d'une image Landsat TM (Extrait identique à celui traité au tableau 2A).

Il est de tradition en télédétection d'extraire les composantes principales au départ de la matrice de covariance, de sorte que la contribution de chaque canal à la variance totale traduise sa dynamique propre. Ces considérations sont justifiées dans la plupart des applications (classifications, analyses diachroniques, etc.), mais vis-à-vis des compositions colorées, les comportements en milieu végétalisé des canaux visibles et PMIR sont tels que l'ACP conduit de façon assez systématique aux résultats suivants (Tableau 3) :

- une première composante principale synthétisant les canaux PMIR (plus dynamiques et corrélés entre eux) ;
- une seconde composante témoignant des canaux visibles (très corrélés entre eux également, mais avec une moindre dynamique propre) ;

- une troisième composante principale plus aléatoire, présentant généralement une faible part de variance expliquée.

Le même résultat est obtenu dans le cas d'une image XS de SPOT, bien que, ne disposant que de trois canaux à l'origine, la variance cumulée des trois composantes principales est identique à celle des trois canaux originaux.

Or, dans une composition colorée, il est fréquent que l'on s'efforce de restituer un maximum de détails rendus par les canaux visibles (en télédétection urbaine par exemple). Dans ce cas, la dynamique propre du ou des canaux P(M)IR peut s'avérer excessive. Une solution partielle au problème consiste à standardiser les canaux soumis à l'ACP ou, en d'autres termes, extraire les composantes principales au départ de la matrice de corrélation et non de la matrice de covariance. Dans ce cas, chaque canal contribue pour une part identique (1) à la variance totale, qui est elle-même un peu mieux répartie entre les composantes. Pour une image XS de SPOT par exemple (Tableau 4), la première composante traduit les deux canaux visibles, tandis que le canal PIR apparaît seulement sur la seconde composante, la troisième étant toujours peu significative et bruitée. Cette nouvelle répartition ne facilite cependant pas l'association de chaque composante à une couleur primaire, ni l'interprétation des couleurs obtenues in fine dans la composition colorée.

| Saturations | C1 | C2 | C3 |
|-------------|-----------|----------|-----------|
| XS1 | -0,222771 | 0,962179 | 0,155473 |
| XS2 | -0,313197 | 0,944268 | -0,103175 |
| XS3 | 0,996224 | 0,086680 | -0,001899 |
| % variance | 76,69 | 22,91 | 0,40 |

| | | | |
|------------|-----------|----------|-----------|
| XS1 | 0,968201 | 0,215279 | -0,127448 |
| XS2 | 0,983994 | 0,122083 | 0,129816 |
| XS3 | -0,350904 | 0,936330 | 0,012377 |
| % variance | 67,63 | 31,27 | 1,11 |

Tableau 4. Extraction des composantes principales

En haut: au départ de la matrice de covariance. En bas : au départ de la matrice de corrélation. (Extrait d'une image SPOT XS identique à celui traité au tableau 2B).

L'ACP ne constitue pas le seul artifice de synthèse capable de faire « entrer » dans une composition colorée plus de trois canaux originaux. Dans le même ordre d'idées, la transformation de Kauth-Thomas, connue aussi sous l'expression imagée de *tasseled cap*, conduit à l'obtention de trois pseudo-canaux qui, lorsque les canaux originaux sont adéquats, sont censés traduire l'humidité et jaunissement et le verdissement de la végétation. Ces trois pseudo-canaux sont susceptibles d'être visualisés à travers une composition colorée.

Les pseudo-canaux construits sur des indices divers peuvent également jouer le rôle de synthétiseur. Un indice de végétation, de brillance ou de couleur du sol permet d'incorporer deux canaux originaux, ou plus dans un pseudo-canal. Certains indices bipolaires ne se prêtent pourtant pas bien à une visualisation dans une seule teinte et, a fortiori à leur incorporation dans une composition colorée. En outre, les indices conservent généralement des corrélations non négligeables avec les canaux qui leur ont donné naissance, d'où le risque d'une redondance si l'on mélange indices et canaux originaux dans une composition colorée.

Outre la réduction du nombre de bandes, les indices, les plus simples, formés par le rapport (ou la différence) de deux canaux, offrent un autre avantage. Si l'on considère que les facteurs du milieu, tels que les facteurs climatiques ou topographiques, altèrent la radiométrie des images originales par un facteur multiplicatif (ou additif) constant, le rapport (ou la différence) de deux canaux fait disparaître ce coefficient, comme l'illustrent de façon simpliste la relation suivante et les exemples imaginaires du tableau 5 :

$$I = \frac{CN_1}{CN_2} \approx \frac{L_1}{L_2} = \frac{Q_1 k}{Q_2 k} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

où :

I : indice calculé pixel par pixel sur le rapport des comptes numériques de deux canaux ;

CN_1, CN_2 : compte numérique du pixel dans les canaux 1 et 2;

L_1, L_2 : luminance du pixel dans les canaux 1 et 2;

k : coefficient d'altération jugé constant ;

Q_1, Q_2 : réflectance au sol dans les canaux 1 et 2.

| Affectations - Illumination | Comptes numériques | | Rapport Canal1 / Canal 2 |
|--------------------------------|--------------------|---------|--------------------------------|
| | Canal 1 | Canal 2 | |
| Feuillus ensoleillés | 48 | 50 | 0,96 |
| Feuillus à l'ombre | 18 | 19 | 0,95 |
| Conifères ensoleillés | 31 | 45 | 0,69 |
| Conifères à l'ombre | 11 | 16 | 0,69 |

Tableau 5. Rapport entre les canaux pour réduire l'effet d'illumination (d'après Lillesand et Kiefer, 1994).

En toute objectivité, le rapport devrait être établi entre luminances partielles, soit la différence entre la luminance absolue et la luminance de parcours atmosphérique, de telle sorte que l'élimination du coefficient d'altération rende le rapport des réflectances au sol (Bonn et Rochon, 1992). L'usage du simple rapport entre comptes numériques n'est

qu'un pis-aller à défaut d'information sur la correction atmosphérique et sur les offsets respectifs des canaux.

Un autre exemple de pseudo-canal issu du traitement d'un ou plusieurs canaux d'une même scène est celui constitué par le résultat d'un filtrage. Deux types de filtres en particulier sont utilisés en matière de compositions colorées :

- d'une part, les filtres qui ont pour but l'amélioration du contraste d'un canal : ils sont utilisés a priori, en quelque sorte à titre de pré-traitement des canaux qui vont constituer la composition ;
- d'autre part, les filtres ayant pour objectif la mise en évidence de structures, tels les filtres de contours : ils peuvent être ajoutés aux canaux originaux avant d'effectuer la composition ; plus généralement, pourtant, ils sont injectés dans la composition a posteriori comme cela est décrit dans un chapitre ultérieur.

La plupart des constructions de pseudo-canaux engendrent des comptes numériques en nombres réels, tant positifs que négatifs. Or les composantes de la composition colorée doivent être codées sur un octet. Le changement d'échelle est généralement réalisé lors d'une opération d'amélioration de contraste précédant la composition (cf. § IV), mais il est parfois nécessaire d'effectuer la transformation dès la construction du pseudo-canal. À titre d'exemple, le rapport de canaux, qui doit se prémunir d'une division par zéro, peut être considéré comme un angle en radians, dont l'arc multiplié par une constante (162,3) retourne une valeur comprise entre 0 et 255.

Si le recours aux composantes principales issues de l'ACP est une démarche généralement exploratoire, l'utilisation des autres types de pseudo-canaux est souvent dictée par un objectif précis de l'analyse. Néanmoins, les difficultés majeures liées à l'utilisation de pseudo-canaux dans les compositions colorées à des fins de spatiocartographie restent l'instabilité et l'interprétation délicate des combinaisons de couleurs.

C. Compositions colorées multisources

Les compositions colorées construites sur les canaux d'une même image présentent déjà de nombreuses variantes, mais l'exploitation d'images multisources porte quasiment ce nombre de variantes à l'infini. Dans le seul domaine des images de télédétection, l'exploitation d'images multicapteurs offre des avantages indéniables, tant du point de vue de la résolution spatiale, que du point de vue de la radiométrie. Ces avantages sont pourtant contrebalancés par la non simultanéité des enregistrements et par la diversité des conditions géométriques des images.

La disponibilité d'images à haute ou très haute résolution (égale ou inférieure à 10 m) permet d'améliorer considérablement **le piqué des compositions colorées** qui les incorporent. La difficulté vient du fait que ces images à haute résolution sont rarement multispectrales, mais le plus souvent panchromatiques. Cela signifie qu'il est nécessaire d'associer l'image à haute résolution à des canaux issus d'une image multispectrale à plus basse résolution pour effectuer la composition colorée. Des techniques de fusion diverses ont été développées pour permettre l'obtention de trois pseudo-canaux conservant une radiométrie cohérente, tout en intégrant **l'information texturale de l'image panchromatique** dans les canaux multispectraux. Ces multiples techniques de fusion font l'objet d'un autre chapitre du présent ouvrage.

Le nombre toujours plus grand de capteurs en service autorise la combinaison dans des compositions colorées, de canaux sensibles à des portions relativement **diversifiées du spectre électromagnétique** : visible, proche et moyen infrarouge, infrarouge thermique et ondes radar. Les compositions mélangeant ainsi capteurs et bandes spectrales soulèvent plusieurs difficultés relatives à la diversité radiométrique, à **leur rectification géométrique commune** et à la diachronie des enregistrements. Ces multiples cas de figure ne peuvent cependant être évoqués dans ce chapitre.

À l'inverse des compositions multicapteurs, celles utilisant les images d'un même capteur mais enregistrées à des dates distinctes peuvent mettre en évidence les différences diachroniques d'occupation du sol. À titre d'exemple, trois canaux identiques enregistrés à des dates différentes forment une composition utilisant la gamme des gris à l'endroit des occupations stables, mais des couleurs variées au niveau des changements d'occupation (qu'il reste à déterminer) entre deux ou trois dates. Le même principe peut s'appliquer à trois pseudo-canaux (composantes principales ou indices) calculés sur des images multispectrales diachroniques. Deux canaux ou pseudo-canaux à deux dates, peuvent être combinés à l'identique dans une composition, mais la stabilité d'occupation du sol sera visualisée sur une couleur fondamentale soustractive (cyan, magenta ou jaune) selon les deux primaires utilisées pour la composition. De nombreux facteurs conditionnent cependant l'intérêt de la démarche. Si des changements pérennes sont recherchés, les dates anniversaires des enregistrements doivent être proches, de manière à minimiser les changements saisonniers de la végétation. D'une manière générale, comme dans bon nombre d'études diachroniques, des corrections radiométriques précises peuvent s'avérer nécessaires pour atteindre un résultat significatif.

Il est également permis d'imaginer des compositions colorées incorporant ou fusionnant des canaux multispectraux avec une image quelconque géométriquement et géographiquement compatible (carte scannée, modèle numérique de terrain, etc.). Le recours à une composition colorée pour effectuer cette intégration répond à la recherche d'un effet visuel particulier car, en termes de spatiocartographie, les images géographiques sont plus efficacement associées aux compositions colorées dans un traitement réalisé a posteriori.

À l'exception de ceux tirant parti de la seule amélioration de la résolution spatiale, les documents issus de traitements multisources relèvent souvent d'une thématique dont les objectifs sont distincts de la composition colorée traditionnelle. Il s'agit le plus souvent de documents de recherche, conduisant

rarement à l'établissement de spatiocartes complètes.

D. Sélection des couleurs

Comme mentionné dans les paragraphes précédents, dans une composition colorée, l'association d'une image ou d'un canal à une couleur primaire est toujours arbitraire. Il reste que des associations peuvent paraître plus « naturelles » que d'autres et facilitent l'interprétation de l'image. À cet égard, l'association la plus naturelle consiste à associer à chaque couleur primaire, le canal sensible à la partie du spectre électromagnétique la plus proche de la longueur d'onde de cette primaire. Cela limite la réalisation de compositions colorées à des images multispectrales comptant 3 canaux dans le visible (Tableau 6).

| Canaux Landsat | Sensibilité (µm) | Couleur primaire | Longueur d'onde (µm) * |
|----------------|------------------|------------------|------------------------|
| TM 1 | 0,45 - 0,52 | Bleu | 0,436 |
| TM 2 | 0,52 - 0,60 | Vert | 0,546 |
| TM 3 | 0,63 - 0,69 | Rouge | 0,700 |

* Système RVB du C.I.E.

Tableau 6. Exemple d'associations entre canaux et couleurs pour une composition en couleurs naturelles

L'aspect est très proche de celui rendu par une classique photographie en couleurs et ce type de composition est qualifié de composition en *couleurs naturelles* ou en *vraies couleurs*. Cette dernière qualification peut cependant prêter à confusion avec la notion de composition RVB codée sur 24 bits, comme exposé au § II.B.

Par opposition, toute autre association conduit à une composition colorée en *fausses couleurs*. Parmi les nombreuses combinaisons possibles, il en est une qui

exploite la transposition des couleurs des émulsions infrarouges (Fig. 8) et qui, par conséquent, conserve une analogie visuelle avec les photographies infrarouges en couleurs. La combinaison consiste à associer la couleur rouge à un canal proche infrarouge, et les deux autres primaires aux deux canaux visibles dans l'ordre des longueurs d'onde. Ce type de composition est dénommé *fausse couleur infrarouge* ou *IRFC* selon le sigle anglo-saxon. Le film infrarouge en couleurs est largement utilisé en photographie scientifique en général, et en

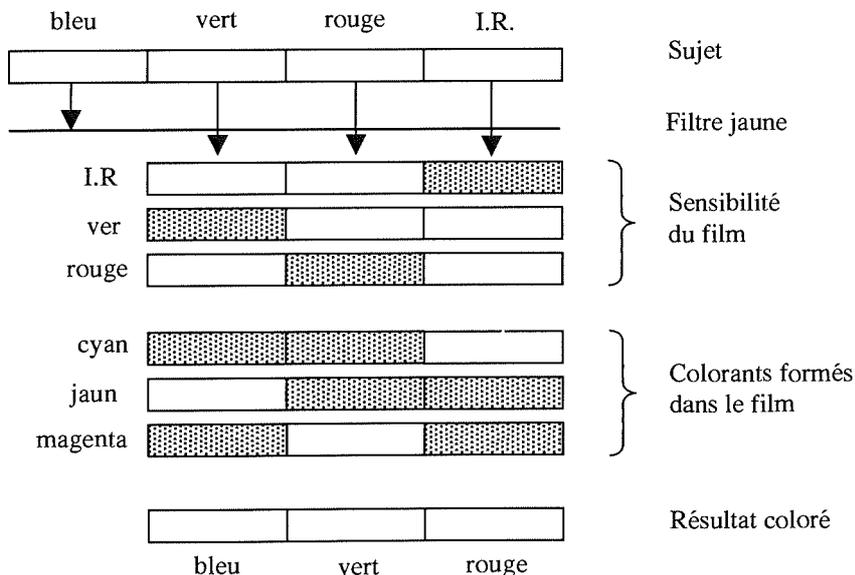


Figure 8. Transposition des couleurs sur un film infrarouge en couleurs (d'après Dérivé, 1976)

photographie aérienne en particulier où il est considéré comme un support très efficace pour l'interprétation visuelle. Il n'est donc pas étonnant que, malgré son aspect quelque peu déroutant pour le profane, ce type de composition colorée soit fréquemment retenu pour l'élaboration de spatio-cartes. Il faut aussi souligner qu'à défaut de trois canaux dans le visible, c'est le seul type de composition colorée incorporant la partie visible du spectre, accessible aux images fournies par plusieurs capteurs célèbres tel que, par exemple, SPOT HRV.

Des études empiriques, ou basées sur des indices statistiques, ont pourtant montré que les compositions colorées construites par similitude avec les résultats obtenus par des émulsions photographiques n'étaient pas les meilleures combinaisons possibles en terme d'interprétation. C'est en effet la capacité à résoudre un thème étudié à une date précise qui devrait dicter le choix de l'association des canaux ou pseudo-canaux aux trois couleurs primaires. Un très grand nombre de publications a été consacré à ce problème, notamment en milieu urbain où la rareté de la végétation enlève beaucoup d'avantages aux compositions fausses couleurs infrarouges. Les nombreuses combinaisons offertes par les seuls canaux des images Landsat TM ont fait l'objet de multiples comparaisons (NOAA, 1984 ; Lillesand et Kiefer, 1994). De façon plus fouillée encore, des clés d'interprétation, comportant parfois plusieurs dizaines de modalités correspondant à autant de nuances colorées, ont été proposées pour des combinaisons précises de canaux ou pseudo-canaux (voir notamment Nascimento et Thibault, 1987).

Cependant, la stabilité du résultat coloré n'est pas garantie, ni dans le temps, ni dans l'espace (même pas dans le cadre d'une scène selon les conditions du milieu), et l'interprétation des fausses couleurs obtenues réclame de l'interprète une grande expérience. D'autre part, le caractère analogique des

compositions colorées, tant sur écran que sur film ou sur papier, les rend très sensibles aux conditions qui président à leur réalisation (calibrage de la chaîne graphique) et à leur visualisation (éclairage, etc.). Enfin, la multiplication des capteurs et, d'une façon générale, celle des images candidates à une intégration dans des compositions colorées, rendent virtuellement impossibles des comparaisons exhaustives. Tout ceci explique sans doute qu'en ce qui concerne la réalisation de spatio-cartes, soit à destination du grand public, soit à des fins d'interprétations multiobjectifs, les modes en couleurs naturelles ou en fausses couleurs infrarouges restent les plus utilisés.

IV. LES AMÉLIORATIONS DE CONTRASTE

L'identification des objets et la différenciation des modes d'occupation du sol seront d'autant mieux résolues sur la composition colorée s'ils apparaissent dans des couleurs diversifiées et bien distinctes. En d'autres termes, les pixels devraient être répartis le plus largement possible dans l'espace colorimétrique RVB. Or, il est bien connu qu'au sein d'une même scène, les canaux d'une image multispectrale n'exploitent qu'un faible intervalle de l'échelle de quantification, comme en témoignent leurs histogrammes respectifs (Fig. 9). Par conséquent, l'opération qualifiée d'amélioration de contraste apparaît comme un préalable indispensable à toute composition colorée. Il existe cependant de nombreuses manières d'étalonner les valeurs d'un canal sur l'ensemble de l'échelle de quantification, et leur efficacité va largement dépendre de la corrélation existant entre les canaux constituant la composition.

A. Améliorations de contraste indépendantes

Les techniques les plus simples considèrent les canaux indépendamment les uns des autres et provoquent trois améliorations de contraste distinctes. La présence fréquente de valeurs isolées et jugées non

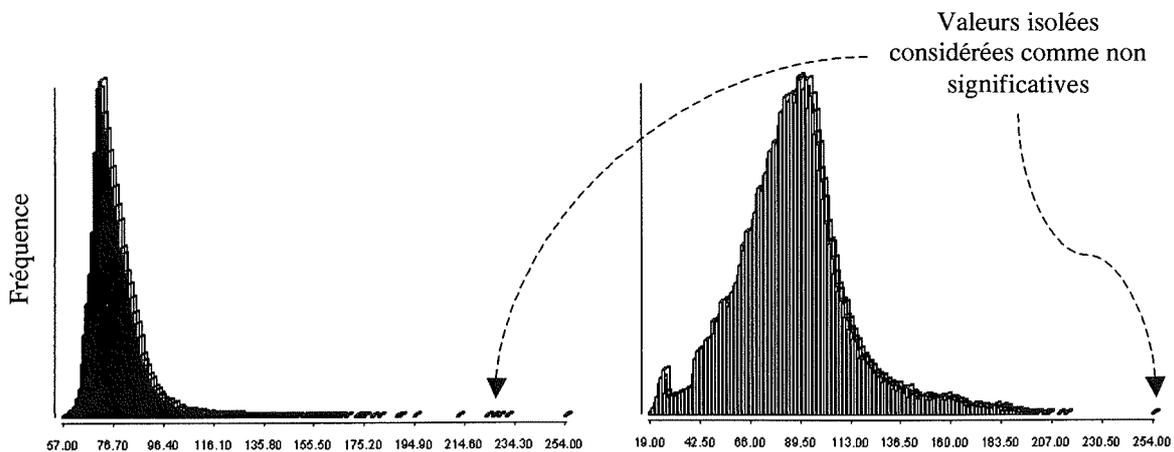


Figure 9. Histogrammes calculés avant toute amélioration de contraste

À gauche : sur un extrait d'un canal visible. À droite : sur un extrait d'un canal proche-infrarouge.

significatives dans la partie haute de l'histogramme d'une image (Fig. 9) rend inefficace la technique d'amélioration consistant en un simple étirement linéaire de la totalité de l'intervalle utilisé sur l'ensemble de l'échelle de quantification. Par contre, la technique qui consiste à étalonner l'intervalle en fonction de la fréquence des valeurs dans l'image, connue sous le nom d'égalisation d'histogramme, donne toujours un résultat spectaculaire. Elle paraît en outre recommandée si le canal doit, par la suite, faire l'objet d'une classification par équidensité pour s'accorder au nombre d'entrées permises par une palette de couleurs (cf. §

Pourtant, la kurtose positive et l'asymétrie caractérisant souvent l'allure de la distribution initiale des pixels sur un canal, font que la méthode a tendance à rassembler trop de pixels dans les parties

extrêmes (en particulier dans la partie supérieure) de la distribution corrigée (Fig. 10 A et 12 A). Cela provoque un excès de contraste qui, appliqué séparément aux trois canaux d'une composition, fait apparaître celle-ci trop claire par endroits, comme surexposée.

Ces considérations font, qu'en pratique, les techniques interactives sont les plus utilisées pour améliorer isolément le contraste d'une image. Il peut s'agir d'étalonner linéairement l'intervalle de variation entre un minimum et un maximum spécifiés par l'utilisateur, ou de forcer un pourcentage défini des pixels à des valeurs limites extrêmes (Fig. 10 B et 12 B), ou encore de définir plusieurs fonctions linéaires de transfert successives couvrant la totalité de l'intervalle, en spécifiant les bornes de celles-ci.

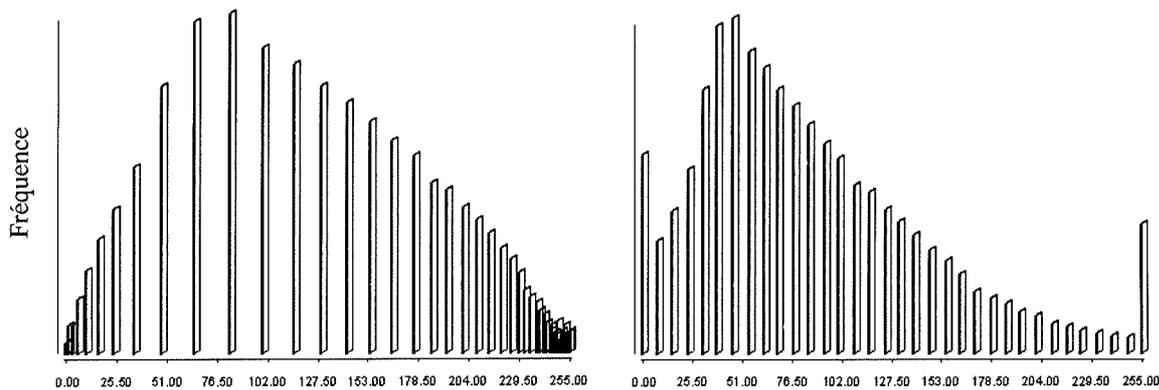


Figure 10. Histogrammes calculés sur des extraits d'un canal visible après amélioration de contraste
A. Par égalisation d'histogramme. B. Par saturation à 2,5 %

On notera encore que, moyennant l'usage d'un facteur de pondération adéquat, il est possible de définir une fonction continue entre l'étalonnage linéaire simple et l'égalisation d'histogramme. Dans la formule suivante, la valeur du facteur exponentiel est fixée entre 0 et 1, de manière interactive par l'utilisateur :

$$CNE = \frac{\sum_{i=0}^{CN} f_i^\alpha}{n/e}$$

où :

CNE : nouveau compte numérique du pixel après étalonnage ;

CN : compte numérique original du pixel ;

f : fréquence d'occurrence de la valeur CN dans l'image ;

α : coefficient compris entre 0 (linéaire simple) et 1 (égalisation), à fixer interactivement ;

n : nombre de pixels dans l'image ;

e : échelle de quantification (ex. 256 niveaux).

Pourtant, quelle que soit la technique retenue, l'amélioration de contraste menée indépendamment sur les trois canaux de la composition ne garantit pas la qualité du résultat. En cause, la corrélation presque inévitable entre au moins deux canaux d'une même image multispectrale. Trois canaux corrélés provoquent, au sein de l'espace des couleurs, un rassemblement des pixels sous forme d'un ellipsoïde allongé le long de la diagonale des gris (Marion, 1997). Toute augmentation de contraste indépendamment sur chaque canal ne fait qu'étirer l'ellipsoïde, sans améliorer sensiblement la saturation des couleurs. Il est dès lors utile de considérer des techniques alternatives, basées, soit sur des améliorations de contraste interdépendantes, soit sur la décorrélation des canaux.

B. Normalisation des canaux

Pour mieux occuper l'espace des couleurs, on peut imaginer faire prendre au nuage de pixels de l'image multispectrale la forme d'une sphère. Il s'agit de normaliser les différents canaux en termes de position et de dispersion. La référence peut être fournie par

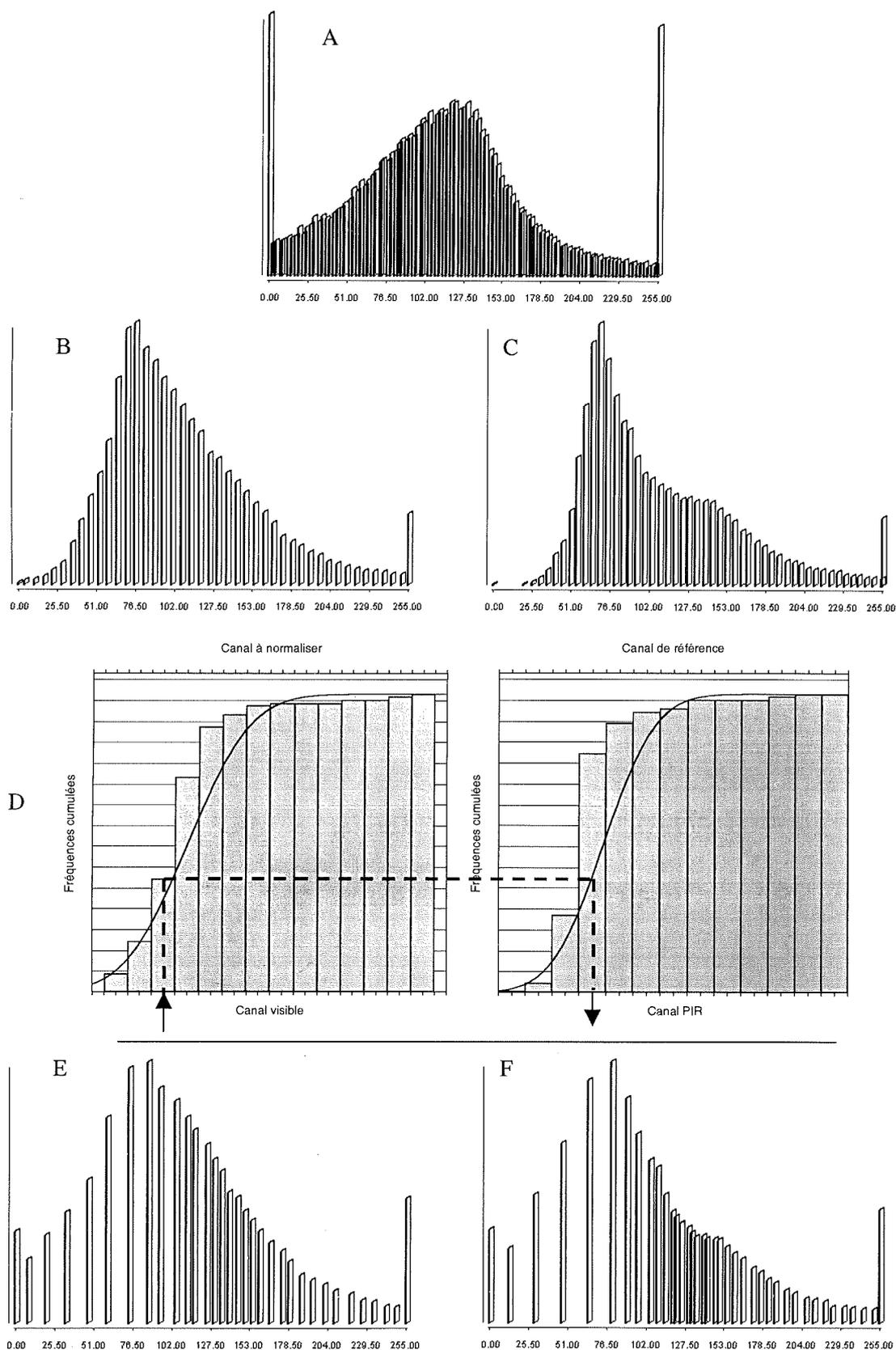
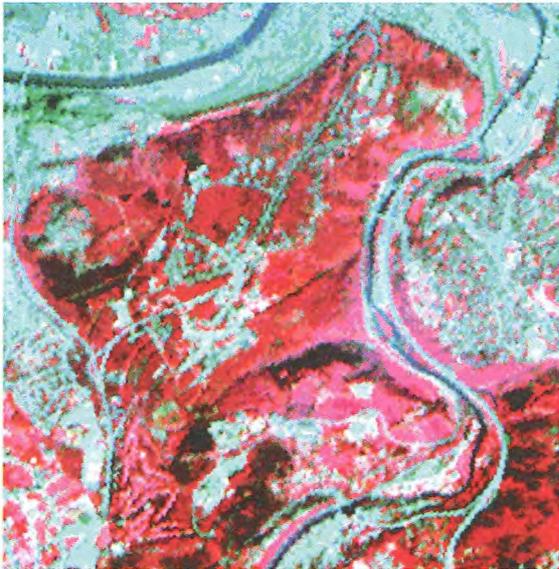


Figure 11. Normalisation et calage d'histogrammes

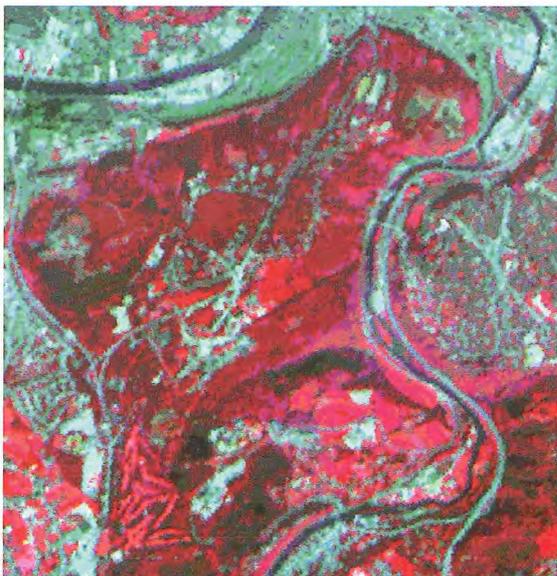
A. Canal XS3 de référence, après amélioration indépendante du contraste par saturation (1,5 %). B. Normalisation du canal XS1 sur (A). C. Normalisation du canal XS2 sur (A). D. Principe du calage d'histogrammes. E. Calage du canal XS1 sur (A). F. Calage du canal XS2 sur (A).



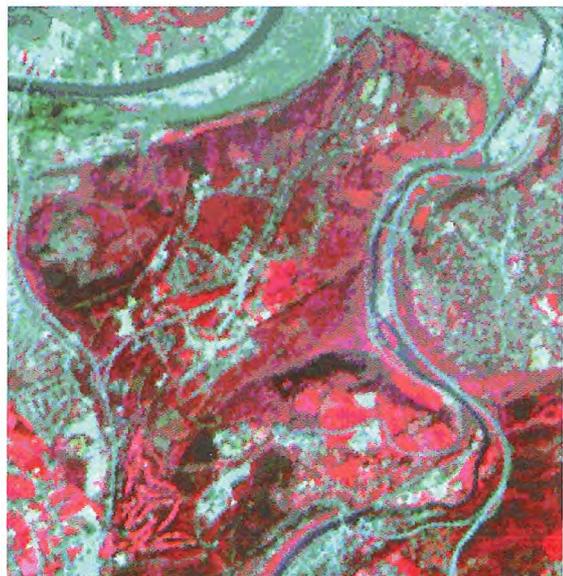
A. Égalisations indépendantes des histogrammes des 3 canaux.



B. Saturations indépendantes à 2,5 % des histogrammes des 3 canaux.



C. Normalisation de XS1 et XS2 sur XS3, après saturation de l'histogramme de XS3 à 1,5 %.



D. Calage des histogrammes de XS1 et XS2 sur XS3, après saturation de l'histogramme de XS3 à 1,5 %.

Figure 12. Différentes formes d'améliorations de contraste appliquées sur une composition colorée
En haut : améliorations indépendantes. En bas : améliorations interdépendantes.
Scène SPOT multispectrale KJ 44-247 du 05/05/1995.

l'un des canaux entrant dans la composition, pourvu que sa distribution soit proche de la normale et sa moyenne avoisine la moitié de l'intervalle de quantification. C'est souvent le cas d'un canal PIR, si le territoire couvert par l'image ne comporte pas de plans d'eau trop étendus, sinon un second pic, proche de zéro, apparaît dans l'histogramme perturbant la référence. La formule suivante, facilement applicable par le jeu de simples opérations scalaires, assure la normalisation des autres canaux sur la référence (mêmes moyenne et écart-type) :

$$CNN_i = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} (CN_i - \mu_i) + \mu_r$$

où :

- CN_i : compte numérique initial d'un pixel du canal i ;
- CNN_i : compte numérique du même pixel après normalisation du canal i ;
- σ_i : écart-type du canal i avant normalisation ;
- μ_i : moyenne du canal i avant normalisation ;
- σ_r : écart-type du canal de référence ;
- μ_r : moyenne du canal de référence.

La difficulté pratique vient du fait que l'intervalle de variation des valeurs des canaux normalisés n'est plus nécessairement maintenu entre les bornes de l'échelle de quantification. Des valeurs (réelles) négatives ou supérieures au maximum de l'échelle peuvent apparaître, et un étalonnage complémentaire altérerait les paramètres obtenus par normalisation (Fig. 11 B et C et Fig. 12C).

La technique intitulée calage d'histogrammes permet de pallier la difficulté. Non seulement elle normalise les canaux, mais elle les maintient dans l'intervalle de variation de la référence. Le principe est simple : il consiste à calculer les histogrammes cumulés de la référence et du canal à normaliser, puis pour chaque valeur du dernier, chercher la valeur correspondante dans l'histogramme de référence, c'est-à-dire celle qui présente (approximativement) la même fréquence cumulée (Fig. 11 D). La référence peut avoir subi une amélioration de contraste préalable (Fig. 11 E et F et Fig. 12 D), ou bien les trois composantes sont soumises à la même procédure d'amélioration après calage des histogrammes. Enfin, plutôt que de sélectionner une des composantes comme référence, il est possible de forcer le calage sur une distribution théorique quelconque, la distribution gaussienne constituant ici le choix le plus logique.

C. Transformation de Taylor

Toutes les procédures passées en revue jusqu'à présent, si elles permettent de mieux redistribuer les valeurs sur l'échelle de quantification, ne peuvent prétendre modifier les fréquences : les pixels de même valeur sur un canal brut obtiendront une autre valeur,

mais identique pour tous, après traitement. En d'autres termes, les corrélations entre canaux n'en seront pas affectées et l'espace des couleurs ne sera pas occupé de manière idéale par le nuage de pixels.

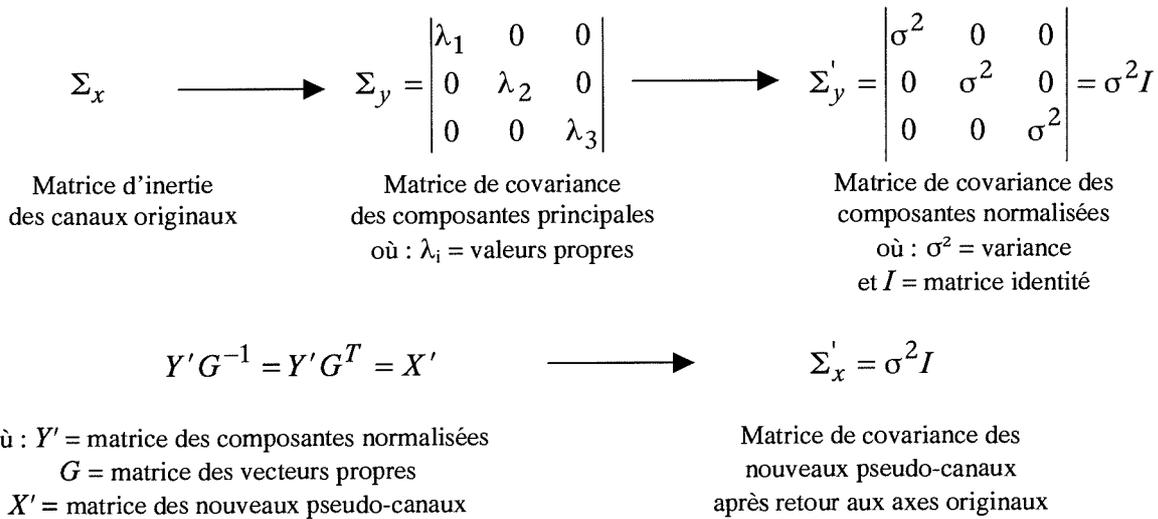
En théorie, la forme idéale du nuage de pixels devrait être celle d'un cube qui, par amélioration de contraste, pourrait occuper tout le cube des couleurs. Pour tendre à cet objectif, le passage par des pseudo-canaux issus d'une ACP est la technique la plus naturelle. Les pseudo-canaux sont décorrélés et les scores factoriels sont redistribués indépendamment dans l'espace de chaque pseudo-canal. Une fois soumis à une amélioration de contraste commune, ils devraient former un nuage de pixels bien réparti dans l'espace des couleurs. Cette qualité de l'ACP a déjà été évoquée au § III.B, mais il avait été aussitôt remarqué que l'association arbitraire des couleurs aux scores factoriels, hybrides par construction, rendait difficile l'interprétation de toute composition colorée construite sur les pseudo-canaux.

C'est ici qu'intervient la transformation imaginée par Taylor (1974). Elle consiste à présenter les valeurs des trois premières composantes principales normalisées dans un espace colorimétrique optimal. Selon Bonn et Rochon (1992), cet espace correspond à peu près à celui défini par le système $L * a * b$, largement utilisé dans l'industrie des colorants et qui peut être considéré comme un espace perceptuel, au même titre que le système TSI largement évoqué dans plusieurs chapitres ultérieurs. Il est proche de la classification des couleurs de Munsell, et sans entrer dans le détail, on retiendra que L est équivalent à la luminance (ou brillance ou clarté); a est un axe rouge-vert et b , un axe jaune-bleu dans l'espace des couleurs.

En pratique, la transformation de Taylor s'applique après qu'aient été extraites les composantes principales de la matrice d'inertie (covariance ou corrélation) des canaux originaux. Les pseudo-canaux indépendants issus de l'ACP sont ensuite normalisés, par exemple par un calage d'histogrammes sur une distribution gaussienne, leur assurant une même variance. Ensuite, on applique à ces pseudo-canaux normalisés une transformation inverse à celle qui leur a donné naissance, en d'autres termes ils sont re-projetés dans l'espace des trois canaux originaux. Pour ce faire, on multiplie la matrice des scores factoriels normalisés par la matrice inverse des vecteurs propres (la matrice des vecteurs propres étant orthogonale, son inverse équivaut à sa transposée). On peut montrer qu'après retour aux axes originaux, la matrice de covariance des composantes principales normalisées est préservée (Richards, 1986). L'opération engendre donc trois nouveaux pseudo-canaux exempts de corrélation et exploitant au mieux l'espace des couleurs.

Comme on l'a mentionné précédemment, la troisième composante extraite est le plus souvent peu significative et traduit le bruit de l'image multispectrale. La normalisation de cette composante et l'étalonnage parfois forcé sur un octet de certains résultats intermédiaires de la transformation de Taylor

ne font qu'amplifier ce bruit, qui reste gênant dans la composition colorée même s'il est filtré. Quoiqu'il en soit, cette transformation est largement implantée dans les logiciels de traitement d'images de télédétection, et elle est considérée comme donnant d'habitude de bons résultats.



D. Amélioration locale de contraste

Les améliorations de contraste envisagées jusqu'à présent sont qualifiées de globales, dans la mesure où elles travaillent sur l'histogramme, simple ou cumulé, de la totalité d'un canal. La moyenne générale et les écarts à cette moyenne générale étant les seules statistiques utilisées, elles ne garantissent pas la mise en évidence de contrastes subtils apparaissant dans un environnement local. Il est dès lors souvent suggéré de soumettre les canaux, ou au moins ceux qui présentent la meilleure dynamique, à une opération d'amélioration locale du contraste. Celle-ci est généralement appliquée au tout début de la procédure conduisant à l'élaboration de la composition colorée, et elle ne substitue pas à une amélioration globale (normalisation par exemple) susceptible d'intervenir plus tard dans la procédure.

Plusieurs types de filtres sont proposés pour mieux mettre en valeur les variations locales de contraste : filtre passe-haut, filtre de contours ou normalisation locale par exemple. Le plus utilisé est sans doute celui ajoutant au compte numérique de chaque pixel de l'image, la différence entre ce compte numérique et la moyenne des comptes numériques des pixels voisins. Le résultat est évidemment exprimé en nombres réels et doit être ramené dans l'intervalle de quantification avant de réaliser la composition. L'opération peut être mise en oeuvre à travers une opération de convolution unique, utilisant des fenêtres de tailles diverses. Ainsi, avec une assiette (3 x 3), les coefficients présentés dans le petit tableau suivant sont d'application.

| | | |
|------|-------|------|
| -1/9 | -1/9 | -1/9 |
| -1/9 | +17/9 | -1/9 |
| -1/9 | -1/9 | -1/9 |

Si un filtrage passe-bas (moyenne) a été effectué préalablement, la même opération peut être effectuée selon la relation scalaire suivante, appliquée pixel par pixel :

$$CN' = CN + (CN - M) = 2 * CN - M$$

- où :
- CN' : compte numérique après filtrage ;
 - CN : compte numérique original ;
 - M : compte numérique du pixel homologue dans l'image du filtre passe-bas.

On peut remarquer que cette dernière expression n'est rien d'autre que l'opération d'interpolation-extrapolation entre deux images, donnée par la relation plus générale :

$$I_N = \alpha I_1 + (1 - \alpha) I_2$$

- où :
- I_N : image résultat ;
 - I_1 : image originale ;
 - I_2 : image de référence ;
 - α : coefficient $\in [0, 1]$ pour une interpolation ; hors de cet intervalle pour une extrapolation.

Selon le type d'image de référence et la valeur du coefficient a , il est possible d'effectuer avec une grande souplesse des améliorations globales ou locales de brillance, de contraste, de saturation, de contours, etc. Ainsi, l'amélioration de contraste locale dont il est question ici utilise pour référence 12, l'image du filtre par la moyenne. Un coefficient a de valeur 2 rend la relation scalaire présentée plus haut, mais des valeurs de a différentes accentuent plus ou moins fort le contraste local. À titre d'exemple, une amélioration globale du contraste utiliserait une référence 12 constituée d'une image de gris neutre (CN = 127) et un coefficient a variable (pour plus d'information sur l'interpolation - extrapolation d'images, on consultera utilement Haerberli et Voorhies, 1994).

V. LES TRAITEMENTS RÉALISÉS EN AVAL DE LA COMPOSITION COLORÉE

Les différents traitements décrits jusqu'à présent ne rassemblent que les étapes fondamentales intervenant dans la réalisation d'une composition colorée. La multiplicité des options, à chacune de ces étapes, exige déjà une analyse sérieuse du problème pour atteindre un résultat efficace. Pourtant, nous avons laissé dans l'ombre tous les cas particuliers où des traitements spécifiques s'avèreraient nécessaires, et le produit auquel aboutit la démarche suggérée dans les pages précédentes ne constitue pas encore une carte.

La plupart des chapitres qui suivent ont précisément pour tâche de présenter, d'une part, plusieurs manipulations requises face à des données ou des applications spéciales et, d'autre part, les différentes phases de rédaction et d'habillage des spatiocartes. À chaque occasion, cependant, on constatera que le degré de difficulté est sensiblement plus grand lorsqu'une technique quelconque est appliquée à une composition colorée, plutôt qu'à un autre type d'image.

A. Traitements spéciaux

La difficulté commence avec les banales mosaïques, puisque les images qui sont mises côte à côte, ou plus exactement qui se chevauchent, peuvent présenter des caractéristiques radiométriques très distinctes. Les méthodes d'amélioration de contraste évoquées dans ce chapitre devront par conséquent être étendues à plusieurs images voisines, en veillant à assurer une transition insensible à l'endroit des raccordements.

La fusion d'images présente un intérêt tout particulier pour les compositions colorées, puisqu'elle permet de ramener dans trois composantes des images d'origines diverses. Mais, par définition, la technique mélange des caractéristiques radiométriques les plus variées. On comprend que la sélection de l'algorithme de fusion est d'une importance cruciale pour conserver, au terme de l'opération, des combinaisons de couleurs qui restent plausibles et interprétables. On retrouvera

d'ailleurs dans ce chapitre relatif à la fusion, plusieurs notions et techniques abordées ici, telles que l'analyse en composantes principales et les conversions entre espaces colorimétriques différents.

L'intégration de l'estompage de pente dans une carte augmente généralement très sensiblement l'esthétique et le réalisme du document. Les compositions colorées restituent déjà les effets d'ombre propre et d'ombre portée, puisqu'en quelque sorte, elles ne font que visualiser l'éclairement naturel reçu par le sol dans différentes bandes spectrales simultanément. Le problème est que l'éclairement naturel prévalant dans l'hémisphère nord conduit à une perception inversée du relief, et cette inversion transparaît dans les compositions colorées. L'intégration d'un estompage de pente cartographique, donc artificiel, dans une composition colorée impliquerait d'abord une correction difficile de la radiométrie, en retranchant les effets d'ombre en chacun des pixels de l'image (voir par exemple Colby, 1991).

B. Rédaction de la spatiocarte

Au moment de rédiger la spatiocarte, la composition colorée se singularise de nouveau. Tout point ou pixel d'une telle spatiocarte est porteur d'une information originale, c'est-à-dire qui n'est pas partagée par les points ou pixels voisins. Par conséquent, le report d'éléments de la planimétrie et l'insertion de toponymes, pourtant essentiels à la compréhension du document, se feront toujours au détriment d'une information originale. Le problème est évidemment partagé par d'autres documents de nature cartographique, comme les orthophotoplans par exemple. Mais dans le cas d'une composition colorée d'images satellite, tout pixel caché peut représenter une superficie considérable au sol.

L'originalité de l'information portée par chaque pixel d'une composition colorée induit une multitude de textures et d'agencements spatiaux à travers tout le champ de la spatiocarte. Il est bien difficile de rendre compte de cette diversité de façon cohérente et complète lorsqu'il s'agit d'établir la légende de la carte. Une connaissance approfondie de la région cartographiée et de ses paysages caractéristiques doit guider la sélection de postes de légende jugés exemplatifs. Les dimensions requises pour permettre la perception de ces textures ou structures particulières font que ces postes de légende prennent l'importance de véritables cartons en marge de la carte principale. Ils compliquent la mise en page générale et réclament des textes explicatifs relativement longs pour être utiles.

Enfin, lorsqu'il s'agit d'imprimer la spatiocarte en composition colorée, toute la construction savamment élaborée dans l'espace colorimétrique additif doit être convertie dans le mode des couleurs soustractives. Si

une transformation fidèle est déjà délicate à mettre en oeuvre avec un document de teintes, elle peut s'avérer pénible avec le document en demi-teintes formé par la composition colorée. Le recours à une filière d'impression professionnelle, à du matériel calibré et à de multiples épreuves d'essai, s'impose pour obtenir un résultat acceptable. Ces solutions augmentent bien évidemment le coût de production de spatiocartes en composition colorée de façon non négligeable.

Si le principe de la composition colorée est en théorie fort simple, on est bien forcé de constater que sa mise en pratique se heurte à de nombreuses difficultés. L'obtention d'une spatiocarte en composition colorée claire et lisible, susceptible d'être interprétée facilement et sans ambiguïté par le lecteur, est loin d'être immédiate.

BIBLIOGRAPHIE

- CHAVEZ P.S., BERLIN G.L. & SOWERS L.B., 1982. Statistical methods for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8(1), 23-30.
- COLBY J.D., 1991. Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(5), 531-537.
- COLVOCORESSES A., 1985. Mapping of Washington D.C. and vicinity with the Landsat-4 T.M. *EARSeL News*, Août 1985, 43-46.
- DÉRIBÉRE M., 1976. La photographie scientifique. *Toute la photographie* (Montel P., Éd.), Larousse-Montel, Paris.
- DONNAY J.-P. & BINARD M., 1993. GIPSY. Un système d'information géographique orienté image. *Outils informatiques et télédétection de l'évolution des milieux* (Dubois J.-M. & F. Blasco, Éd.), Presses de l'Université du Québec, 281-307.
- EASTMAN J.R., 1992. *Idrisi User's Guide. Edition 2.0*. Idrisi Production, Clark University, Worcester.
- EASTMAN J.R., 1997. *Idrisi for Windows. User's Guide. Edition 2.0*, Idrisi Production, Clark University, Worcester.
- HAEBERLI P. & VOORHIES D., 1994. Image Processing by Linear Interpolation and Extrapolation. *Silicon Graphics IRIS Universe Magazine*, 28, et *Web Grafica Obscura* <http://www.sgi.com/grafica/interp/index.html>.
- GARO L.A., 1999. *Color Theory*. Department of Geography & Earth Sciences, University of North Carolina at Charlotte, <http://www.uncc.edu/lagaro/cwg/color/index.html>.
- LANGLOIS P., 1987. Modélisation et algorithmes du traitement de la couleur. *Cahiers Géographiques de Rouen : le traitement informatique de la couleur en cartographie*, 27, 1-44.
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W., 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3^e édition, John Wiley and Sons, New York.
- MARION A., 1997. *Acquisition et visualisation des images*. Eyrolles, Paris.
- MATHER P.M., 1999. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. 2^e édition, Wiley, Chichester.
- MOURIER G., 1997. *Guide de la PAO sous Windows 3.1, 95 et NT. De la conception au flashage*. Collection Référence informatique, Marabout, Allier.
- NASCIMENTO I. & THIBAUT C., 1987. *Observer l'espace urbain par satellites : l'exemple de l'agglomération parisienne*. Rapport de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France, Paris.
- NOAA, 1984. Visual Interpretation of TM Band Combinations Being Studied, *Landsat Data User's Notes*, 30, Mars 1984.
- RICHARDS J.A., 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- SABINS F.F., 1987. *Remote Sensing. Principles and Interpretation*. 2^e édition, Freeman and Company, New York.
- SHORT N.M., 2000. *Remote Sensing Tutorial. Appendix E : Glossary*. 2^e édition, NASA, <http://rst.gsfc.nasa.gov/AppE/El.html>.