

LA FUSION D'IMAGES

Fabrice MULLER et Stanislas DE BÉTHUNE

I. INTRODUCTION

Lors de l'élaboration d'une spatiocarte, le recours à plusieurs images, de natures parfois fort différentes, est une procédure de plus en plus fréquente. Les combinaisons sont multiples, tant les images candidates peuvent prendre des formes variées : images satellite numériques, optiques ou radar ; photographies satellite ou aériennes scannées ; cartes ou documents de nature cartographique, numériques ou scannés. La combinaison de ces différentes images se fait par fusion ou intégration.

La fusion consiste à produire une nouvelle image qui conserve une partie de l'information contenue dans chacune des images originales. L'objectif est de créer une synergie, c'est-à-dire d'obtenir une image fusionnée géométriquement et/ou sémantiquement plus riche qu'une image initiale. De nombreuses méthodes sont capables de réaliser une fusion d'images. Elles diffèrent par la manière selon laquelle elles favorisent telle ou telle caractéristique des images originales. Le choix d'une méthode est donc conditionné par l'application et, à cet égard, la spatiocartographie n'est qu'un des domaines susceptibles de tirer profit des techniques de fusion.

La mise en oeuvre d'une fusion d'images nécessite plusieurs manipulations préalables qui interfèrent directement sur la qualité du produit fusionné. Parmi celles-ci, la correction géométrique des images soumises à la fusion est évidemment primordiale puisque les images doivent être strictement superposables. Mais les pré-traitements intervenant sur la radiométrie sont aussi importants et diversifiés.

L'objectif de ce chapitre est de présenter diverses techniques de fusion d'images dans le cadre de la réalisation d'une spatiocarte, et plus particulièrement, d'une spatiocarte en composition colorée exploitant des images satellite optiques. Les contraintes principales seront donc liées à l'obtention d'une image aisément interprétable par une majorité d'utilisateurs. L'image devra présenter des qualités esthétiques, en particulier vis-à-vis des couleurs restituées, et offrir une lisibilité maximale. Enfin, dans la mesure du possible, l'obtention de couleurs naturelles sera recherchée. Notons dès à présent qu'un chapitre ultérieur sera consacré à l'intégration d'une spatiocarte d'occupation du sol avec une image cartographique. Il

s'agit, là aussi, d'une technique de fusion, mais elle utilise ses techniques propres et apparaît à une autre phase de l'élaboration de la spatiocarte.

II. LES OBJECTIFS DE LA FUSION

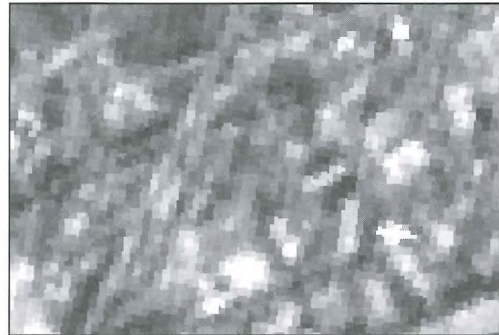
Lorsqu'il s'agit d'élaborer une spatiocarte, la fusion peut présenter plusieurs intérêts qui, le cas échéant, peuvent se cumuler, par exemple : l'amélioration de la résolution spatiale, la combinaison d'informations diachroniques ou la réduction du nombre d'images à traiter. L'amélioration de la résolution spatiale est sans doute l'objectif premier poursuivi lors de la création d'une image composite. Il faut se souvenir, en effet, que les images à haute et très haute résolution disponibles en télédétection sont pour la plupart des images panchromatiques. À l'inverse, les images multispectrales, capables de se combiner en une composition colorée, présentent des résolutions plus faibles. La fusion d'une image panchromatique, à haute résolution spatiale et faible résolution spectrale, avec une image multispectrale, à faible résolution spatiale mais haute résolution spectrale, constitue sans doute l'application la plus fréquente de la fusion.

L'exploitation de la haute résolution spatiale offerte par l'une des images à fusionner permet d'améliorer le piqué de l'image finale et, en terme de cartographie, d'augmenter l'échelle finale de la spatiocarte. Les détails non résolus dans une composition colorée multispectrale classique, sont révélés lorsque cette composition intègre un processus de fusion. Les figures 1 A à 1 D ci-dessous présentent le même territoire illustré à des résolutions spatiales de 5, 10, 20 et 30 m. Les images panchromatiques à 5 et à 10 m sont enregistrées respectivement par les capteurs photographique Kosmos KVR-1000 et numérique SPOT HRV P. Les deux autres images sont fournies par les capteurs SPOT HRV XS (20 m) et Landsat TM (30 m).

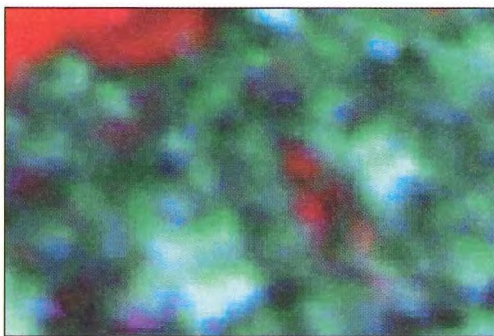
La figure 1 A permet d'identifier la structure du réseau de rues et des îlots bâtis. Par contre, les figures 1 C et 1 D, présentées ici en composition colorée, laissent deviner les différences de couvertures, végétales et minérales particulièrement, sans permettre l'identification ni la délimitation précise de ces éléments. L'interprétation visuelle peut tirer profit des deux informations, spatiale et radiométrique, pourvu qu'elles soient combinées dans une même image. Cela



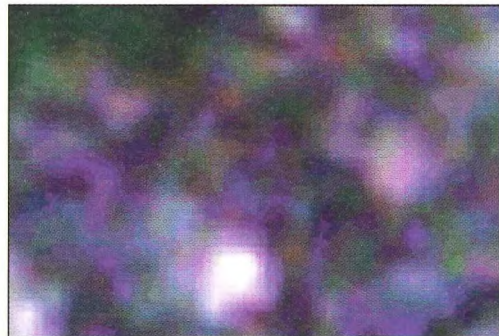
A. KVR-1000 : résolution 5 m



B. SPOT Pan : résolution 10 m



C. SPOT XS : résolution 20 m



D. Landsat TM : résolution 30 m

Figure 1. Différentes résolutions spatiales présentées par des images panchromatiques et multispectrales

signifie que l'on attend de la fusion une image à haute résolution, ou une spatiocarte à plus grande échelle, conservant une relation cohérente entre les couleurs rendues par la nouvelle composition colorée et les modes d'occupation du sol susceptibles d'être interprétés.

Un tout autre objectif est suivi lorsque la fusion se présente comme un pré-traitement à la classification d'images. Il s'agit toujours de combiner des images à haute et à basse résolution pour profiter de leur complémentarité spatiale et radiométrique. Cependant, la fusion est censée faciliter la discrimination des taxons en affinant l'agencement spatial des valeurs spectrales. Cela devrait limiter en nombre, et automatiquement en superficie, l'importance des mixels, ces pixels de couverture non homogène perturbant l'identification des affectations du sol. Mais il est impératif de conserver autant que possible les signatures spectrales originales, nécessaires au processus de classification qui suivra la fusion. La qualité de la fusion ne sera plus jugée en termes esthétiques ou d'interprétation visuelle, mais de façon quantitative, en termes physiques.

La fusion peut à nouveau être utilisée après la classification des images pour injecter une information spatiale exogène dans l'image classée. L'injection d'une texture ou d'une image cartographique dans la classification a pour but d'introduire plus de réalisme

en brisant la monotonie des aplats de couleurs. La fusion doit cependant veiller à conserver les teintes, caractéristiques de la légende de la classification, et se limiter à jouer de façon subtile sur les autres paramètres de la couleur que sont la saturation et l'intensité. L'intégration d'un estompage de pente dans une image classée est typique de cette injection d'information exogène et, comme annoncé, elle sera développée dans un chapitre particulier.

III. LES ÉTAPES PRÉALABLES À LA FUSION

A. La sélection des images

Les critères de sélection des images satellite doivent être clairement établis en fonction des objectifs. L'image obtenue en résultat de la fusion ne pourra répondre aux exigences de la spatiocarte que si certaines conditions ont été respectées.

Le choix d'une projection cartographique et surtout d'une échelle d'édition ont un impact direct sur le choix des résolutions spatiales des images. Il n'est pas concevable de publier une carte à 1/20 000 au départ d'une image dont la taille des pixels est de 20 m au sol, puisque la *pixelisation* de l'image reste perceptible et ne permet pas d'atteindre la précision géométrique attendue à cette échelle. Par contre, une fusion de ces données à 20 m avec une image à 5 m de résolution

autorise l'édition à une telle échelle. L'échelle d'édition de la carte dicte par conséquent le choix de l'image à haute résolution spatiale à utiliser dans la fusion. Cependant, l'image à haute résolution ne peut être efficacement fusionnée que dans certaines limites avec des images de résolutions plus grossières. Ces limites sont, en première analyse, évaluées sur base du rapport de résolution $R_{rés}$ défini comme suit :

$$R_{rés} = \frac{FR}{HR}$$

où :

FR : faible résolution

HR : haute résolution

Il est souhaitable de respecter un ratio inférieur à 5 lors du choix des images à fusionner. Une valeur supérieure, correspondant à une trop grande différence de résolutions spatiales, aurait deux conséquences. D'une part, elle rendrait la superposition des images à fusionner très aléatoire et, d'autre part, elle provoquerait un agencement non discriminant des valeurs spectrales dans l'image fusionnée.

À titre d'exemple, la fusion courante des images SPOT XS et P travaille sur un rapport égal à 2. Par contre, une fusion de Landsat MSS avec SPOT P impliquerait un rapport de 8. À supposer que la correction géométrique de ces deux images soit parfaite, ce qui est loin d'être évident, chaque pixel MSS couvrirait 64 pixels panchromatiques de SPOT. Cela signifie qu'une seule valeur radiométrique MSS devrait être déclinée en 64 variantes dans l'image fusionnée, opération aux résultats illusoire, voire impossible dans certains cas de figure. Tout en conservant un rapport de résolution acceptable, les possibilités de combinaisons d'images sont aujourd'hui nombreuses. Elles mettent en oeuvre, autant des images issues d'un même vecteur (SPOT, IRS, Ikonos, etc.), que des images multisources. Jusqu'ici, les images panchromatiques à haute résolution candidates à la fusion sont surtout les SPOT P, IRS-1C P et Kosmos KVR-1000, tandis que les images multispectrales à faible résolution qui leur sont combinées sont généralement les SPOT XS et Landsat TM. L'arrivée des images à très haute résolution telles que Ikonos et Quickbird, offrant des résolutions inférieures à 5 m, tant en mode panchromatique qu'en mode multispectral, devraient multiplier les possibilités de fusion.

La date de prise de vue constitue un autre critère important dans la sélection des images à fusionner. Des dates d'enregistrement similaires sont conseillées, comme dans toute manipulation multisources, pour éviter des écarts d'ordre phénologique, climatique, d'ensoleillement, d'humidité, etc. entre les images. Des modifications d'affectations entre les images, telles qu'en produisent le simple changement de saison ou les rotations agricoles, induisent des incohérences perturbant tant les compositions colorées que les

classifications qui voudraient exploiter les images fusionnées. Toutefois, on peut rappeler que certaines applications ont précisément pour objectif de rechercher, à travers la fusion d'images, ce genre d'écart diachronique. Le choix des dates de prises de vue adéquates n'en reste pas moins essentiel pour mettre en évidence les changements pressentis.

Enfin, lorsque les capteurs ne sont pas limités à des prises de vue zénithales, l'angle de prise de vue constitue un autre critère à prendre en compte dans la sélection des images. La stricte correspondance géométrique des images à fusionner constitue, on l'a dit, un préalable à la fusion. Plus les angles de vue seront distincts, plus difficile sera la correction géométrique, en particulier lorsque le relief de la zone d'intérêt est accidenté. On notera que les nouveaux capteurs, opérationnels ou annoncés, s'ils offrent d'intéressantes possibilités de visée oblique, risquent aussi, par ce fait, de compliquer les fusions d'images ou d'en altérer les résultats.

B. Les corrections géométriques

Les données images candidates à la fusion ayant été sélectionnées, il convient de les soumettre à une correction géométrique particulièrement rigoureuse. Une géoréférenciation parfaite entre les images à fusionner est en effet capitale pour la suite des opérations et aura un effet direct sur la qualité de la fusion.

Le principe consiste à rectifier dans un premier temps l'image de plus haute résolution spatiale, souvent panchromatique, qui servira de référence. La méthode de correction choisie est fonction du type d'image, du relief, de l'angle de vue, etc. Ensuite, l'image de plus faible résolution spatiale est amenée à la résolution de l'image de référence par multiplication de pixels. Elle est alors corrigée géométriquement par une mise en correspondance avec l'image à haute résolution déjà rectifiée.

Les méthodes de correction géométrique applicables à l'image à haute résolution sont celles présentées dans le chapitre de cet ouvrage consacré à ces techniques. D'une façon générale, des transformations projectives sont appliquées dans le cas de photographies scannées, tandis que des transformations polynomiales résolues par moindres carrés sont mises en oeuvre pour les images satellite numériques. Ces méthodes de correction requièrent plusieurs points d'amer dont les coordonnées sont d'habitude extraites depuis une carte topographique de base. Dans certaines régions, la précision de ces cartes peut s'avérer insuffisante pour corriger des photographies ou des images à très haute résolution. Dans ce cas, le recours au levé terrain, par GPS par exemple, peut s'avérer nécessaire. Enfin, en présence d'un relief accentué, l'orthorectification reste la seule méthode capable de garantir la précision

cherchée, ce qui implique la disponibilité d'un modèle numérique de terrain.

La correction des images à faible résolution est plus simple, dans la mesure où elle se base sur un ajustement d'image à image. Les pixels homologues sont recherchés entre, d'une part l'image à haute résolution corrigée et, d'autre part, l'image à faible résolution présentant le meilleur contraste parmi les différentes bandes spectrales disponibles. Les équations de transformation sont établies sur la base des coordonnées images de ces pixels homologues, et sont utilisées pour corriger toutes les images multispectrales d'une même scène. On comprendra aisément que la recherche de pixels homologues est facilitée par un rapport des résolutions $R_{rés}$ réduit et que, par contre, un rapport élevé ne saurait garantir la qualité géométrique des images à fusionner.

L'opération de correction géométrique s'accompagne toujours d'une procédure de rééchantillonnage des pixels des images originelles. C'est à ce moment que l'on définit la taille des pixels que présentera l'image fusionnée. Si le rapport des résolutions $R_{rés}$ est acceptable (inférieur ou égal à 5), la résolution de l'image à haute résolution peut être conservée dans l'image fusionnée. Par contre, si ce rapport est trop grand, il faut opter pour une résolution intermédiaire entre celle de l'image à haute résolution et celle de l'image à faible résolution. Cela a pour conséquence une dégradation de l'information spatiale de l'image à haute résolution lors de son rééchantillonnage, dégradation qui transparaîtra dans l'image fusionnée. En outre, cet artifice a des limites puisque le repérage des pixels homologues servant au calage est lui-même conditionné par le rapport des résolutions.

Le choix de la méthode utilisée pour le rééchantillonnage est dicté par l'utilisation future de l'image fusionnée. Si la fusion est réalisée en préalable à une classification, il y a lieu de conserver les valeurs radiométriques originales lors du rééchantillonnage et la technique du plus proche voisin est requise. Par contre, si l'objectif de la fusion est une spatiocarte en composition colorée, il peut être utile d'exploiter une technique d'interpolation bilinéaire ou cubique pour profiter de l'effet de lissage (*anti-aliasing*) durant le rééchantillonnage. L'adoucissement ainsi provoqué améliore l'esthétique de la spatiocarte puisqu'il permet de limiter les contrastes trop violents et les effets d'escalier le long des alignements de pixels hors des directions des lignes et colonnes de l'image.

IV. LES TECHNIQUES DE FUSION

A. Fusion et composition colorée

La fusion, telle qu'elle est envisagée dans ce chapitre, est de *type pixel* en ce sens que les pixels de coordonnées i, j des différentes bandes originales sont

intégrés pour donner naissance au pixel i, j de la nouvelle image fusionnée. En outre, l'objectif poursuivi, sauf mention contraire dans le texte, consiste à construire une spatiocarte en composition colorée présentant les caractéristiques suivantes :

- elle est formée, par construction, de trois images associées aux couleurs fondamentales RVB ;
- les couleurs de la composition sont issues de la combinaison de trois canaux multispectraux ou plus ;
- son piqué est amélioré et son échelle agrandie par l'intégration d'une image à haute résolution, généralement panchromatique.

Deux stratégies de fusion peuvent être imaginées a priori, soit la fusion de l'image à haute résolution avec chacun des canaux participant à la composition colorée, soit une transformation globale effectuant la fusion de toutes les images en une fois. Dans tous les cas, les images soumises à la fusion doivent être géoréférencées de manière identique et présenter la même taille de pixel, comme cela a été exposé ci-dessus.

Le choix des types d'images à haute et basse résolution a été réglé sur la base du rapport des résolutions et de l'échelle finale de la spatiocarte. Si l'image à faible résolution présente plus de trois bandes spectrales, la plupart des méthodes exigent de sélectionner les trois canaux formant la composition colorée. Plusieurs techniques permettent d'orienter ce choix, telles que le calcul de l'index optimum (Chavez et al., 1982), l'analyse des variances-covariances entre canaux (Yésou et al., 1993), ou plus prosaïquement une sélection orientée par une thématique particulière (Sheffield, 1985). Ces différentes approches ont été évoquées dans le chapitre consacré à l'élaboration des spatiocartes en composition colorée.

Il reste maintenant à aborder le coeur du problème, à savoir réaliser une fusion de l'image à haute résolution avec les canaux multispectraux sélectionnés, pour obtenir 3 pseudo-canaux de résolution améliorée à soumettre à la composition colorée. Les méthodes de fusion, on l'a dit, sont nombreuses et il n'existe pas de recette miracle applicable à tous les cas de figure. Les méthodes de fusion dont l'objectif est la spatiocartographie ne reposent pas sur les mêmes critères que ceux prévalant dans la préparation d'une classification. Étant donné l'objectif poursuivi dans ce chapitre, seules ces méthodes dédiées à la réalisation de spatiocartes sont décrites avec un certain détail. Il ne s'agit pourtant que d'une sélection des méthodes les plus fréquemment utilisées, une description exhaustive n'étant virtuellement pas possible. Le lecteur intéressé pourra consulter la volumineuse littérature consacrée au sujet, en particulier les actes du groupe de travail de l'ERASeL spécialisé dans la fusion d'images (par exemple Ranchin et Wald, 2000a) .

B. Substitution simple dans une composition colorée

La méthode qui est certainement la plus facile à mettre en oeuvre consiste simplement à sélectionner trois images ou canaux, dont un, au moins, correspond à l'image à plus haute résolution spatiale. Il suffit ensuite d'attribuer ces images aux trois couleurs R, V et B pour obtenir la composition colorée.

La technique exploite la forte corrélation entretenue d'habitude entre les canaux couvrant la partie visible du spectre dans une image multispectrale, et une image panchromatique à haute résolution. La substitution s'effectue au détriment d'un de ces canaux du visible, généralement celui présentant la plus forte corrélation avec l'image à haute résolution.

Dans le cas d'une fusion de SPOT XS avec SPOT P ou Kosmos KVR-1000, le fait de remplacer XS2 par l'image panchromatique n'engendre pas une perte considérable du point de vue radiométrique puisque XS1 et XS2 sont fortement corrélées. L'attribution des couleurs R, V et B aux trois canaux résultants peut se faire selon plusieurs combinaisons illustrées au tableau 1.

XS1 – XS3 – P	XS3 – XS1 – P	P – XS1 – XS3
XS1 – P – XS3	XS3 – P – XS1	P – XS3 – XS1

Tableau 1. Composition colorée avec substitution
Attributions possibles des couleurs R, V, B aux 3 canaux

La figure 2 présente le résultat obtenu par cette méthode dans le cas d'une fusion de SPOT XS avec Kosmos KVR-1000 scannée et rééchantillonnée à 5 m. Les images sont présentées dans l'ordre XS3 — KVR — XS1 pour les couleurs respectives RVB. L'image résultante (Fig. 1 C) fait apparaître l'information spatiale de haute résolution en provenance de l'image KVR-1000. Le piqué est supérieur à celui de la composition colorée effectuée sur base des trois canaux XS (Fig. 1.B), bien que l'assignation des couleurs reste relativement floue. Toute permutation des images attribuées aux couleurs RVB provoque une

distribution différente des couleurs, susceptible de mettre en exergue tel ou tel type de texture ou de structure. La combinaison présentée ici a cependant le mérite de conserver l'aspect d'une composition fausse couleur infrarouge, ce qui en facilite l'interprétation.

La technique de substitution simple ne garantit pas un résultat probant avec tous les types d'images, mais elle est souvent combinée avec d'autres techniques exposées ci-dessous.

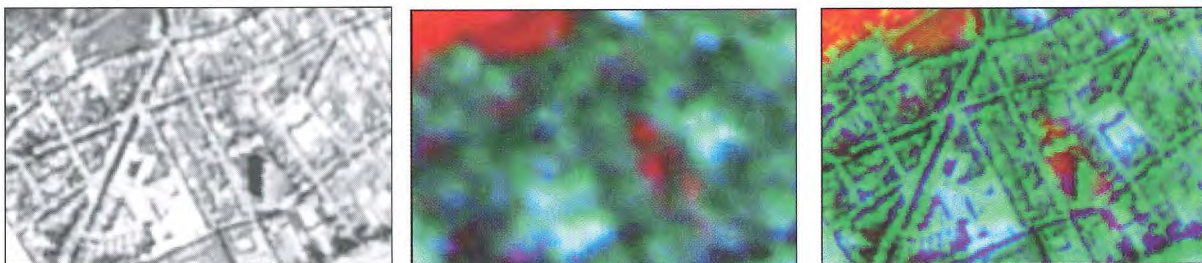
C. Passage par l'espace colorimétrique TSI

La technique présentée ici fait intervenir une transformation entre l'espace des couleurs primaires additives RVB — rouge, vert et bleu — et l'espace perceptif TSI des teinte, saturation et intensité.

Au départ du cube des couleurs, dont le principe a été présenté dans un chapitre antérieur, le passage de l'espace RVB à l'espace TSI peut être réalisé selon la démarche suivante (Fig. 3).

- Une couleur quelconque est représentée par un vecteur dans le cube, ayant pour origine le noir et comme norme, la somme vectorielle de ses trois composantes R, V et B.
- La diagonale des gris est considérée comme l'axe des intensités variant de 0 pour le noir, à 1 pour le blanc. L'intensité d'une couleur correspond à la longueur de la projection de son vecteur sur la diagonale des gris.
- Les valeurs de teinte et de saturation de la couleur sont calculées en coordonnées polaires dans le plan de Maxwell, défini comme le plan perpendiculaire à la diagonale des gris et passant par les sommets des axes R, V et B. La teinte est l'angle polaire compris entre 0 et 360° et dont l'origine est fixée par la direction de l'axe bleu du cube (parfois le rouge). Enfin, la saturation est la longueur du rayon polaire joignant le vecteur couleur à la diagonale des gris.

On notera que teinte, saturation et intensité sont exprimées toutes trois en nombres réels.



A. Image KVR-1000

B. Image SPOT XS

C. Image fusionnée :
XS3-KVR-XS1

Figure 2. Composition colorée par substitution d'une image Kosmos KVR-1000 à l'un des canaux visibles d'une image SPOT

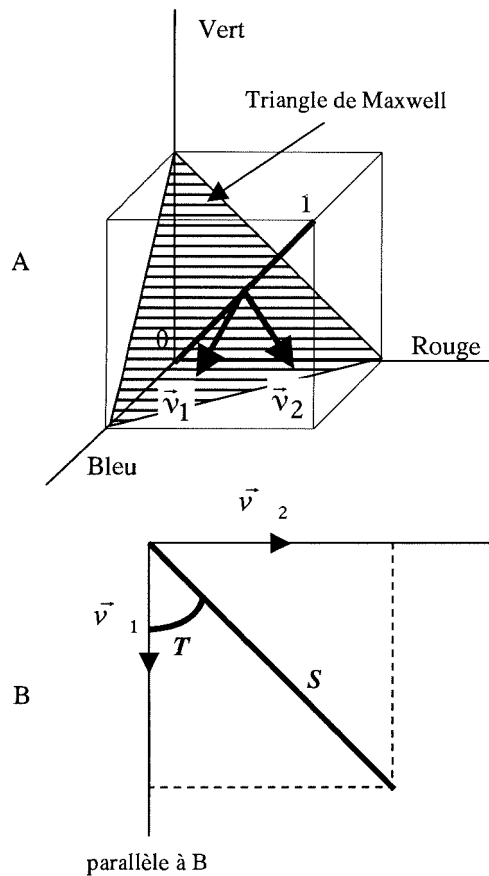


Figure 3. Transformation RVB-TSI

A. Cube des couleurs et triangle de Maxwell
B. Teinte (T) et saturation (S) dans le plan de Maxwell

La relation permettant le passage du mode RVB au mode TSI, et inversement, apparaît dans de nombreux ouvrages. La formulation proposée par Marion (1997) garantit une conversion exacte dans les deux sens de la transformation. C'est elle qui est reprise ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

avec $T = \arctan \frac{v_2}{v_1}$ et $S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$

La relation inverse permettant de revenir au mode RVB à partir du mode TSI est obtenue en effectuant :

$$v_1 = S \cos T \quad v_2 = S \sin T$$

et

$$\begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ 1 & -1/3 & -1/\sqrt{3} \\ 1 & 2/3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

Pour réaliser la fusion d'images satellite, il y a d'abord lieu de sélectionner les trois bandes à faible résolution formant une composition colorée RVB. Une première transformation est appliquée dans le sens RVB vers TSI. Le canal I ainsi obtenu, révèle principalement une information sur la texture de l'image. Il est remplacé par l'image panchromatique à haute résolution spatiale après un éventuel ajustement d'histogramme. Cet ajustement consiste à rendre la distribution statistique des valeurs des pixels de l'image panchromatique la plus proche possible de celle du canal I. L'ajustement d'histogramme est d'autant plus utile que la radiométrie initiale doit être préservée pour des traitements postérieurs de l'image fusionnée. Toutefois, cette technique ne peut s'empêcher d'altérer plus ou moins sensiblement la radiométrie des images originales. Après cette substitution, une seconde transformation, de TSI vers RVB, est réalisée en utilisant le système d'équations inverses. La procédure est résumée à la figure 4.

La transformation peut s'accompagner d'une ou plusieurs améliorations de contraste et de luminosité, appliquées à différents stades de la procédure de fusion. Tout d'abord, la composition colorée peut être améliorée avant la transformation vers l'espace TSI. Des améliorations peuvent aussi être réalisées sur les canaux HR, S et T avant le retour dans l'espace RVB, bien qu'un travail sur la teinte risque d'avoir des conséquences malencontreuses sur les couleurs de l'espace RVB. Enfin, les améliorations peuvent être appliquées sur le résultat de la fusion pour en augmenter la lisibilité et l'esthétique. Ici encore, les combinaisons d'opérations sont multiples et il n'est pas possible de se prononcer sur une marche à suivre idéale.

L'exemple illustré à la figure 5 utilise les mêmes extraits d'images que ceux traités à la figure 2. La composition XS3-XS2-XS1 a été convertie en TSI après avoir subi une amélioration de contraste indépendante sur les trois canaux. L'image KVR-1000 a ensuite été substituée au canal I et la transformation inverse a été appliquée pour obtenir l'image fusionnée présentée en 5 C. La comparaison des figures 2 B et 5 C permet d'apprécier l'apport de la haute résolution spatiale après fusion. La comparaison de la même figure 5 C avec l'image 2 C montre l'assignation plus précise des couleurs offertes par la nouvelle technique.

D. Luminance et chrominance

Un autre système de codage des couleurs, largement utilisé dans les systèmes de transmission de télévision (NTSC), consiste à distinguer les composantes de luminance (Y) et de chrominance (I et Q) d'une couleur. La luminance Y correspond à la luminosité d'une image monochrome en combinant les signaux rouge, vert et bleu dans des proportions telles que l'oeil humain leur soit sensible. Très pratiquement, les

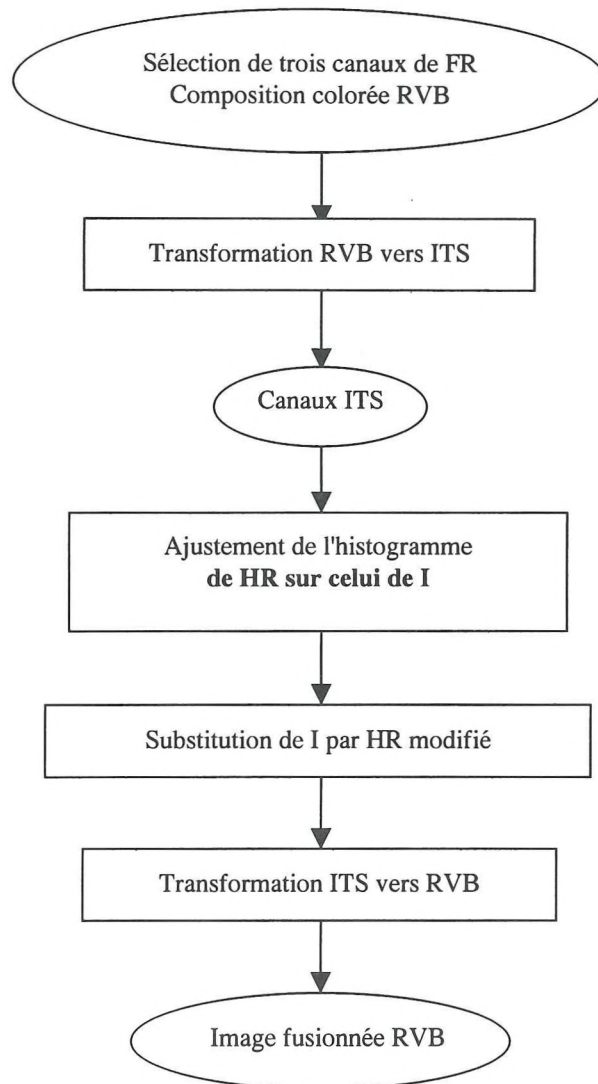


Figure 4. Organigramme de la fusion par la technique RVB-TSI-RVB

HR : image panchromatique à haute résolution spatiale

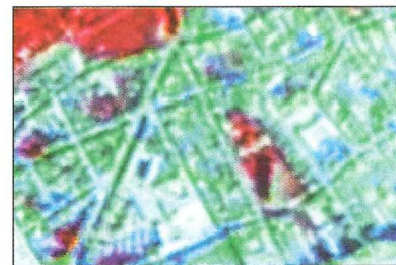
FR : image multispectrale à faible résolution spatiale



A. Image KVR-1000



B. Canal I à partir de XS



C. Image fusionnée par RVB-TSI-RVB

Figure 5. Fusion par la technique RVB-TSI-RVB

composantes I et Q des couleurs sont choisies de manière à assurer une compatibilité avec le matériel de visualisation. En général, I est égal au rouge moins le cyan, tandis que Q est égal au magenta moins le vert. Les signaux YIQ sont liés aux composantes RVB, et inversement, par les relations suivantes (Schaller, 2000) :

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

et

$$\begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,272 & -0,647 \\ 1,000 & -1,106 & -1,703 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}$$

Les composantes Y, I et Q sont moins corrélées que leurs correspondantes R, V et B, et, par conséquent, cette transformation offre de plus larges possibilités pour l'amélioration des images.

E. Combinaisons linéaires de bandes

La combinaison linéaire de canaux est utilisée depuis longtemps pour améliorer le contraste de certaines images en composition colorée. Ce procédé peut aussi être exploité en fusion d'images. Ces méthodes consistent à combiner les images par des opérations mathématiques entre les différents canaux. Des coefficients de pondération éventuels permettent d'agir sur les résultats obtenus.

Cette méthode a été appliquée avec succès sur des données Landsat TM et SPOT P (Yésou et al., 1993). Les combinaisons, appliquées sur des pixels homologues, sont données par :

$$IF = a(w_1 * FR + w_2 * HR) + b$$

$$IF = a * FR * HR + b$$

où :

- IF : image fusionnée résultante
- w_1, w_2 : facteurs de pondération
- a, b : facteurs d'échelle pour contenir les valeurs dans l'intervalle [0,255]

Dans le même esprit, d'autres relations ont été proposées pour fusionner, tantôt SPOT XS et SPOT P (Cliche et al., 1985), tantôt Landsat TM et SPOT XS ou P (Welch et al., 1987) avec des résultats jugés satisfaisants. Soit IF_i la i^e bande de l'image fusionnée, FR_i la i^e bande de l'image à faible résolution, alors les deux méthodes, toujours appliquées entre pixels homologues, sont données par les formules ci-dessous.

$$IF_i = a_i * \sqrt{HRS * FRS_i} + b_i \quad (1)$$

$$IF_i = a_i * (p_1 * FRS_i + p_2 * HRS) + b_i \quad (2)$$

où :

- N : nombre de bandes dans l'image multispectrale à faible résolution
- p_1, p_2 : facteurs de pondération
- a_i, b_i : facteurs d'échelle (avec $i = 1, \dots, N$)

La méthode (1) appliquée à la fusion SPOT XS et P aurait tendance à produire une image terne parce qu'une transformation identique est appliquée aux trois bandes, ce qui implique un accroissement de la corrélation entre XS3 et les deux canaux visibles (Cliche et al., 1985). Les mêmes auteurs reprochent à la méthode (2) de fournir une image sombre et peu contrastée et, dans le cas particulier de SPOT XS et P, ils proposent l'application des formules suivantes :

$$IF_1 = a_1 * \sqrt{PAN * XS_1} + b_1$$

$$IF_2 = a_2 * \sqrt{PAN * XS_2} + b_2$$

$$IF_3 = a_3 * (0,25 * PAN + 0,75 * XS_3) + b_3$$

Les néo-canaux IF_1 , IF_2 et IF_3 sont attribués respectivement aux couleurs R, V et B. Le gain en qualité s'explique par le fait que la bande P est moins corrélée avec le proche infrarouge XS3 qu'avec les bandes XS1 et XS2. Il convient donc d'utiliser des techniques d'intégration différentes pour chacune des bandes.

F. Filtre passe-haut

Cette méthode consiste à appliquer un filtre passe-haut à l'aide d'une fenêtre de convolution de petite taille sur l'image panchromatique à haute résolution spatiale. Ce filtre a pour effet de conserver les hautes fréquences présentes dans l'image panchromatique, qui sont liées principalement à l'information de texture, au détriment de l'information spectrale qui s'en trouve considérablement dégradée. L'image ainsi filtrée est alors additionnée aux bandes de l'image multispectrale. Cette technique, initiée par Showengerdt (1980), a été largement exploitée, notamment par Chavez (Chavez et al., 1988) pour fusionner Landsat TM avec SPOT P. Shettigara (1992) montre toutefois les faiblesses et limitations de cette technique.

À Liège, la technique a été utilisée pour fusionner SPOT XS et Kosmos KVR-1000 (de Béthune et al., 1998c). La méthode a cependant fait l'objet d'une adaptation de manière à ce que le filtre soit appliqué localement. Dans ce cas, l'algorithme de fusion par filtrage passe-haut consiste en la formule suivante :

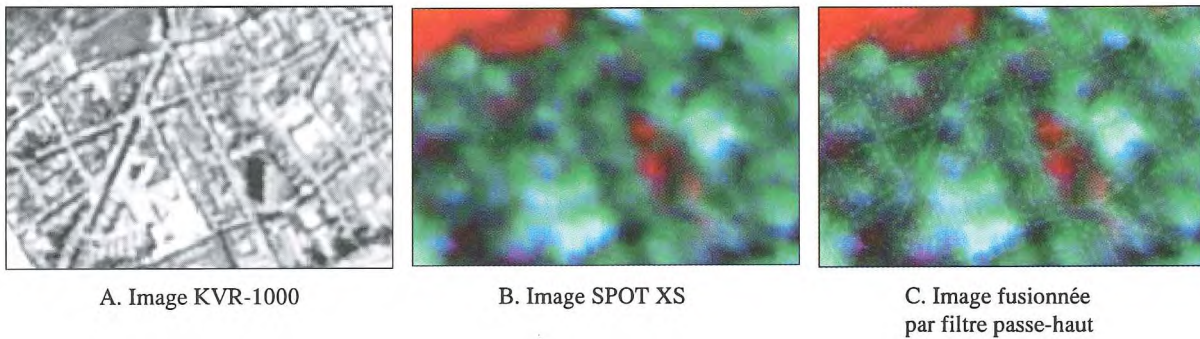


Figure 6. Fusion par la technique du filtrage passe-haut

$$IF_{i,j} = FR_{i,j} + (HR_{i,j} - \overline{HR}_{i,j}(l,h))$$

où :

- i, j : indices de ligne et de colonne du pixel
- \overline{HR} : moyenne locale de l'image à haute résolution
- l, h : hauteur et largeur de la fenêtre centrée en (i, j) , dans laquelle est calculée la moyenne arithmétique locale.

L'application de la méthode sur les mêmes extraits que ceux illustrant les figures précédentes ne semble pas très convaincante (Fig. 6). Or, appliquée à des images de même type en milieu urbain, cette méthode de fusion a été jugée préférable à d'autres (Terretaz, 1998), ce qui souligne encore la relativité de l'efficacité des techniques face aux contextes d'application.

G. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée dans de multiples applications de la télédétection, parmi lesquelles la fusion d'images. Il s'agit d'une méthode statistique qui consiste à transformer un ensemble de variables intercorrélées en un nouvel ensemble de variables non corrélées obtenues par combinaisons linéaires des variables originales. La transformation est réversible, ce qui signifie qu'il est possible de retourner dans l'espace des variables originales au départ des composantes principales sélectionnées. Les modalités d'application

et plusieurs exemples ont été discutés dans le chapitre relatif aux compositions colorées.

La fusion sur base de l'ACP peut être envisagée suivant deux approches. La première approche consiste à calculer les composantes principales de l'image multispectrale à faible résolution spatiale et de substituer l'image à haute résolution à la première composante (PC1) avant de réaliser la transformation inverse. Comme dans toute substitution, il est recommandé d'ajuster la variance et la moyenne du canal à haute résolution à celles de la première composante avant d'effectuer le remplacement. La substitution se justifie car le pseudo-canal PC1 rassemble l'information commune à toutes les bandes initiales, contrairement aux autres composantes traduisant des informations de plus en plus spécifiques. En lui substituant l'image à haute résolution avant la transformation inverse, on est certain d'affecter toutes les images à faible résolution. On réalise ainsi, en une seule opération, la fusion de l'image à haute résolution dans tous les canaux de l'image à faible résolution.

La seconde approche consiste à calculer l'ACP à partir de toutes les images intervenant dans la fusion, quelle que soit leur résolution. Une composition colorée RVB peut alors être réalisée en combinant les trois premières composantes rassemblant le maximum de l'information. On trouve dans la littérature de nombreuses applications, tant de la première approche (par exemple Yésou et al., 1993), que de la seconde (notamment Richards, 1984).

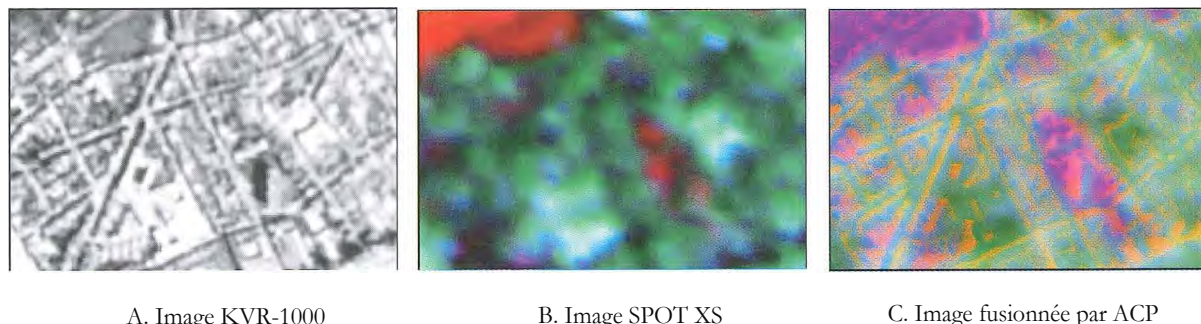


Figure 7. Fusion par la technique de l'analyse en composantes principales

La figure 7 illustre la seconde méthode avec les extraits utilisés jusqu'ici. La matrice de variance-covariance des canaux KVR-1000, XS1, XS2 et XS3 est soumise à l'ACP, et la composition colorée associe les trois premières composantes, dans l'ordre aux couleurs RVB. On constate que, si l'information spatiale à haute résolution transparait dans la composition, la distribution des couleurs est floue et la gamme des couleurs peu standard. Ce sont là des caractéristiques fréquentes des résultats d'ACP qui ne facilitent pas l'interprétation (voir aussi le chapitre consacré aux compositions colorées). Les résultats statistiques de l'opération illustrée à la figure 7 sont présentés au tableau 2.

Matrice de variance-covariance :

	KVR	XS3	XS2	XS1
KVR	1890.6765	-29.7656	115.3748	106.7457
XS3	-29.7656	82.2096	-3.1227	3.5110
XS2	115.3748	-3.1227	21.2135	21.908
XS1	106.7457	3.5110	21.9086	27.4284

Matrice de corrélation :

	KVR	XS3	XS2	XS1
KVR	1.0000	-0.0755	0.5761	0.4688
XS3	-0.0755	1.0000	-0.0748	0.0739
XS2	0.5761	-0.0748	1.0000	0.9083
XS1	0.4688	0.0739	0.9083	1.0000

Valeurs propres :

		%	% cumulé
PC1	1904.4558	94.2087	94.2087
PC2	82.1744	4.0650	98.2737
PC3	33.150	1.6399	99.9136
PC4	1.7473	0.0864	100.0000

Vecteurs propres :

	PC1	PC2	PC3	PC4
KVR	-0.9963	-0.0112	0.0843	0.0115
XS3	0.0163	-0.9962	0.0668	-0.0532
XS2	-0.0617	-0.0012	-0.6237	-0.7792
XS1	-0.0573	-0.0862	-0.7742	0.6244

Saturations (corrélations) :

	PC1	PC2	PC3	PC4
KVR	-0.9999	-0.0023	0.0112	0.0003
XS3	0.0783	-0.9960	0.0424	-0.0078
XS2	-0.5849	-0.0024	-0.7797	-0.2236
XS1	-0.4779	-0.1493	-0.8512	0.1576

Tableau 2. Principaux résultats de l'ACP réalisée sur les extraits d'images illustrant la figure 7

H. Transformée en ondelettes

La fusion d'images par la transformation en ondelettes constitue sans doute la méthode la plus discutée aujourd'hui dans la littérature. Il est donc difficile de ne pas l'évoquer ici, même si son objectif consiste clairement à préserver au maximum la richesse

radiométrique des images au terme de la fusion, plutôt que faciliter l'élaboration de tel ou tel type de spatio-carte.

Il existe différentes implémentations de la fusion par ondelettes. La version classique comporte quatre étapes (Garguet-Duport et al., 1996) :

- 1) La référencement géométrique du canal FR par rapport à l'image HR ;
- 2) La mise en correspondance de l'histogramme de l'image HR avec celui du canal FR utilisé.
- 3) La transformation en ondelettes de l'image HR, de manière à produire quatre nouvelles images à la même résolution que l'image FR. Trois de ces images contiennent l'information de structure de l'image HR à injecter. Elles sont codées par les coefficients d'ondelettes et correspondent en quelque sorte à des filtres passe-haut directionnels. La quatrième image est un filtre passe-bas et correspond à l'image HR rééchantillonnée à la résolution du canal FR.
- 4) La transformation en ondelettes inverse appliquée au canal FR afin de produire un néo-canal spectral à haute résolution simulée.

Une variante de cette méthode de fusion a été proposée par Ranchin (1993) et s'applique principalement au cas de l'intégration SPOT XS et P. Elle est connue sous le nom de ARSIS (Augmentation de la Résolution Spatiale par Injection de Structures). Elle utilise le principe de l'analyse multirésolution se basant sur le calcul d'approximations successives d'une image à des résolutions spatiales de plus en plus faibles. Les coefficients d'ondelettes calculés à partir de la transformée en ondelettes servent alors à modéliser la différence d'information entre deux approximations successives. Dans le cas d'une fusion SPOT XS et P, les coefficients d'ondelettes obtenus pour la bande P sont utilisés pour calculer ceux nécessaires à la construction de la bande XS à 10 m de résolution. (Fig. 8)

I. Ajustement des histogrammes locaux

Toutes les méthodes précédemment exposées, à l'exception d'une version améliorée du filtre passe-haut, opèrent de manière globale sur la totalité de l'image. Or, au sein même d'une image satellite, la variabilité radiométrique est souvent fort importante d'un endroit à l'autre, selon l'agencement spatial des structures et des affectations du sol. Il semble donc opportun d'envisager des méthodes de fusion qui tiennent compte de cette variabilité locale, ce qui est réalisable par l'utilisation de techniques opérant localement dans des fenêtres de convolution. Plusieurs solutions permettant ainsi d'aboutir à la fusion d'images par le calcul de statistiques locales, plutôt que globales, ont été développées à l'Université de Liège (de Béthune et al., 1998a, b, c). Selon les

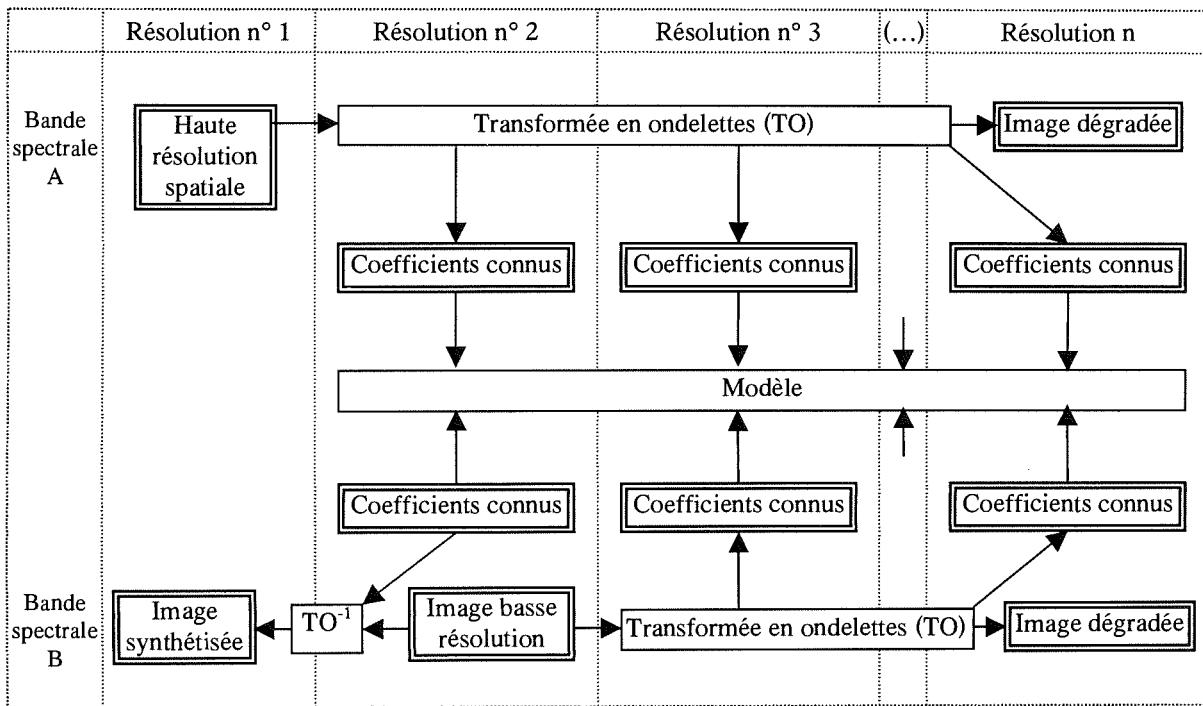


Figure 8. Schéma général de la méthode ARSIS
 Utilisation de la transformée en ondelettes (TO) et son inverse (TO⁻¹). (d'après Ranchin, 2000c)

paramètres sélectionnés, ces méthodes prétendent, soit préserver l'information radiométrique, soit améliorer le piqué des images fusionnées en vue de la réalisation de compositions colorées.

Deux algorithmes, intitulés AML et AMVL pour l'ajustement des moyennes — ou des moyennes et variances — locales, respectivement, ont ainsi été mis au point. Le premier se contente de caler les moyennes, selon la formule :

$$IF_{i,j} = HR_{i,j} \cdot \frac{\overline{FR}_{i,j}(l,h)}{\overline{HR}_{i,j}(l,h)}$$

où :

- i, j : indices de ligne et de colonne du pixel
- \overline{FR} : moyenne locale de l'image à faible résolution
- \overline{HR} : moyenne locale de l'image à haute résolution
- l, h : hauteur et largeur de la fenêtre centrée en (i, j) , dans laquelle est calculée la moyenne arithmétique locale.

L'algorithme AMVL effectue une normalisation d'images en utilisant l'image à faible résolution comme référence (Joly, 1986), mais limitée à un contexte local par l'intermédiaire de la formule :

$$IF_{i,j} = \frac{(HR_{i,j} - \overline{HR}_{i,j}) \cdot s(FR)_{i,j}(l,h)}{s(HR)_{i,j}(l,h)} + \overline{FR}_{i,j}$$

où :

- $s(FR)$: variance locale de l'image à faible résolution
- $s(HR)$: variance locale de l'image à haute résolution

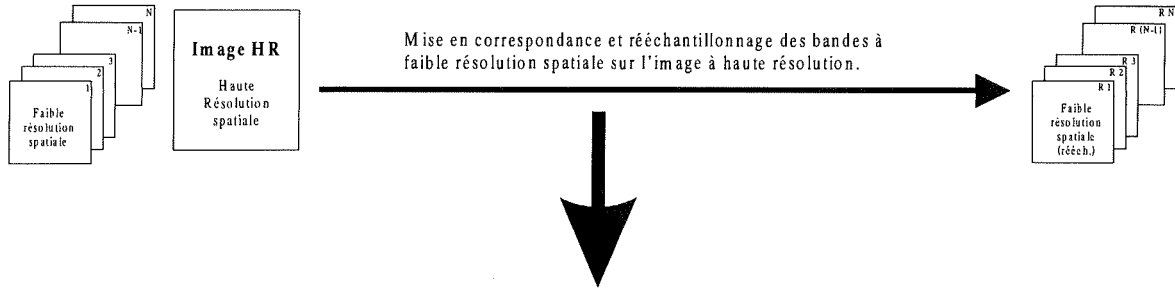
Ces algorithmes conduisent à une image fusionnée à haute résolution spatiale simulée préservant relativement bien les caractéristiques spectrales de l'image à faible résolution. En fait, la qualité de la fusion dépend principalement de la taille de la fenêtre de convolution utilisée pour le filtrage. De petites fenêtres restituent des valeurs spectrales très proches des valeurs originales ; par contre, des fenêtres de plus grande taille permettent d'incorporer davantage d'information de texture issue de l'image HR au prix d'une altération plus importante de l'information spectrale.

Les algorithmes AML et AMVL peuvent être appliqués à n'importe quel couple comportant une image HR et une image FR., pour construire une image fusionnée à haute résolution simulée. Pour réaliser une composition colorée, on peut ainsi provoquer trois fusions distinctes entre une image HR et trois canaux FR, puis combiner les trois images fusionnées entre elles. Toutefois, au lieu d'appliquer l'algorithme séparément à trois reprises, la procédure peut être simplifiée en la combinant avec la méthode de fusion passant par l'espace colorimétrique TSI. Trois canaux de l'image multispectrale sont sélectionnés pour composer une image RVB qui est convertie en TSI. Ensuite, l'histogramme de l'image à haute résolution est ajusté par AML ou AMVL sur celui du canal intensité I résultant de la

N bandes à faible résolution spatiale
1 bande à haute résolution spatiale.

CORRECTIONS GÉOMÉTRIQUES

N bandes multispectrales rééchantillonnées à la résolution de l'image à haute résolution.



N bandes multispectrales rééchantillonnées à la résolution de l'image à haute résolution.

CALCUL DE L'INTENSITÉ GLOBALE

Image I à faible résolution spatiale.

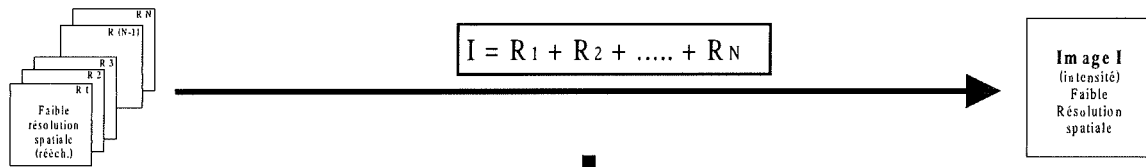


Image I à faible résolution spatiale
Image HR à haute résolution spatiale.

Image HR à haute résolution spatiale dont l'histogramme est ajusté sur celui de l'image I.

AJUSTEMENT DE L'HISTOGRAMME DE HR SUR I

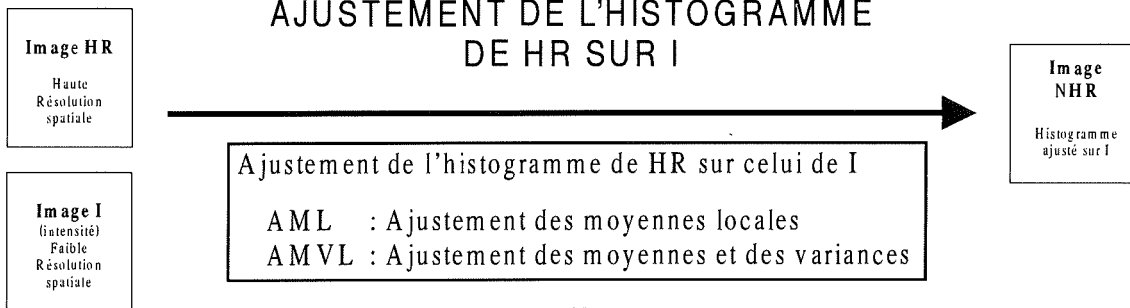


Image I à faible résolution spatiale
Image HR à haute résolution spatiale.
N bandes multispectrales rééchantillonnées.

N bandes simulées à haute résolution spatiale.

INTÉGRATION

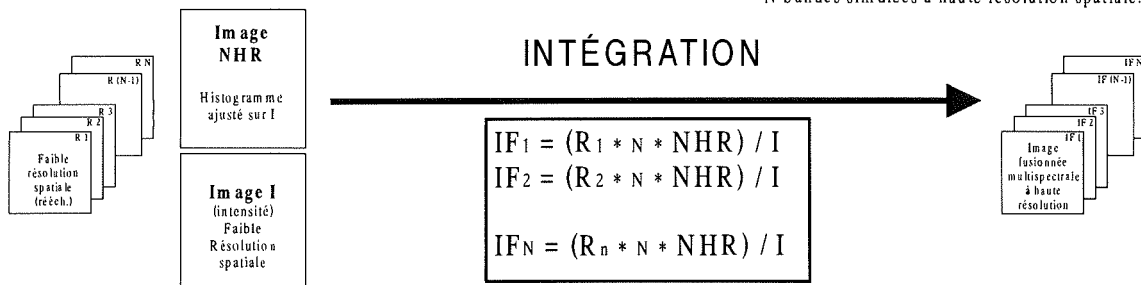


Figure 9. Organigramme de la méthode AMVL (d'après de Béthune et al., 1998a)

conversion RVB — TSI. L'image HR ajustée est alors substituée au canal I avant d'appliquer la transformation inverse pour retrouver une image en composition colorée. C'est cette démarche qui est illustrée par l'organigramme de la figure 9. Une variante de cette méthode a aussi été développée pour appliquer la fusion à plus de trois canaux multispectraux et éviter ainsi de devoir opérer une sélection parmi ceux-ci a priori.

Dans la pratique, la méthode AMVL sera presque toujours préférée à la méthode AML. Le seul désavantage de AMVL, qui peut justifier le recours à l'algorithme alternatif, est qu'il requiert un temps de calcul beaucoup plus important. Par contre, les résultats obtenus par AMVL seront souvent jugés supérieurs en qualité à ceux obtenus par AML, ces derniers constituant déjà une amélioration face à bon nombre d'algorithmes de fusion travaillant sur des statistiques globales.

V. APPLICATION DE LA MÉTHODE AMVL

L'algorithme AMVL constituant un développement original de notre laboratoire, il est illustré par une application sur la région liégeoise. La figure 10 présente le résultat de la fusion d'une image Landsat TM et d'une photographie satellitaire KVR-1000 scannée.

La résolution spatiale originale des bandes TM est de 30 m, tandis que l'image KVR-1000 est scannée à une résolution de 3,5 m. Le rapport des résolutions dépasse de beaucoup le seuil tolérable (8,57 contre 5). Par conséquent, une résolution intermédiaire de 7 m a été sélectionnée pour effectuer la fusion. Cela conduit à un rapport de 4,3 pour l'image TM et de 0,5 pour l'image KVR-1000. L'objectif recherché étant la réalisation d'une image fusionnée présentant des couleurs naturelles, c'est-à-dire les couleurs saisies dans le spectre du visible, les canaux 1 à 3 de TM ont été sélectionnés pour constituer l'image multispectrale à faible résolution spatiale.

La première opération consiste en la correction géométrique et au calage des deux images initiales. Pour ce faire, 23 points homologues ont été saisis entre les deux images et une fonction polynomiale du premier degré a été appliquée conduisant à une erreur quadratique **moyenne de 21,8 m**. Les rééchantillonnages à 7 m ont été réalisés par interpolation cubique.

La composition colorée des trois canaux TM3-TM2-TM1, associés respectivement aux couleurs RVB, a été transformée en trois pseudo-canaux dans l'espace TSI. L'algorithme AMVL a alors été appliqué sur l'image KVR-1000 afin d'ajuster ses moyennes et variances locales à celles du pseudo-canal intensité. La taille de la fenêtre pour le calcul des statistiques

locales est de 30 x 30 pixels. Le tableau 3 présente les valeurs des moyennes et écarts-types du canal intensité I et de l'image KVR-1000 avant et après l'application de l'algorithme. La nouvelle image présente alors une luminosité et un contraste similaires à ceux du canal intensité. L'image KVR-1000 ajustée ainsi obtenue est substituée au canal I et la transformation vers l'espace RVB est effectuée. L'image fusionnée en composition colorée est enfin soumise à un rehaussement de contraste.

	Moyennes	Écarts-types
Image KVR-1000	127,37	56,62
Canal I (intensité)	65,53	7,68
KVR-1000 après AMVL	64,51	6,65

Tableau 3. Statistiques des canaux intensité et KVR-1000 avant et après l'application de la méthode AMVL

VI. LES CRITÈRES D'ÉVALUATION

L'évaluation du résultat d'une fusion d'images satellite reste relativement subjective. Différents objectifs peuvent être recherchés lors de la réalisation d'une fusion, comme cela a déjà été exposé au début de ce chapitre. Le respect des valeurs radiométriques initiales, la lisibilité ou l'esthétique de l'image fusionnée peuvent conduire à autant de critères d'évaluation distincts. On a cependant tenté d'établir une sélection de critères afin de pouvoir estimer et comparer les différentes méthodes de fusion (Wald et al., 1997 ; Ranchin et al., 2000b). Ces critères ont été testés par les mêmes auteurs pour différents jeux de données, afin d'évaluer la méthode ARSIS par rapport aux autres méthodes de fusion. Ces mêmes critères ont également été utilisés par Terrettaz (1998) dans le cadre d'un exercice de délimitation d'agglomérations et de segmentation d'images urbaines du capteur SPOT HRV.

Selon les objectifs recherchés dans la fusion, l'accent peut être mis soit sur l'aptitude des méthodes à injecter la texture et l'information spatiale de l'image à haute résolution dans l'image à plus faible résolution, soit sur la conservation des valeurs radiométriques. Même si l'image fusionnée n'est pas destinée à des traitements numériques ultérieurs, ce dernier aspect garde toute son importance. En effet, le photo-interprète a traditionnellement recours à des schémas d'interprétation des compositions colorées conventionnelles, en vraies ou fausses couleurs. Par conséquent, la conservation de la radiométrie des canaux et des couleurs qu'ils engendrent par combinaisons, permet l'application de ces schémas à des images fusionnées. La conservation de la radiométrie facilite aussi les comparaisons temporelles ou spatiales entre images.

La première évaluation qu'il est possible de faire pour juger du résultat de la fusion consiste à comparer



Figure 10. Fusion par la méthode AMVL

Une image Landsat TM et une photographie satellitaire KVR-1000 numérisée. La résolution intermédiaire est de 7 m.

visuellement les images initiales et l'image fusionnée, après rehaussements de contraste et de luminosité éventuels. Ensuite, des comparaisons statistiques peuvent être opérées en calculant tout d'abord les corrélations entre les bandes fusionnées et les bandes multispectrales originales rééchantillonnées à une résolution identique. Les différences entre les moyennes et les écarts-types des deux images permettent d'apprécier l'ampleur et la variabilité des modifications des valeurs spectrales. L'analyse de la distribution spatiale des différences locales constitue une démarche intéressante pour identifier les artefacts de la fusion. On devine cependant que tous ces critères risquent de favoriser l'une ou l'autre méthode de construction de l'image fusionnée, puisqu'ils en reprennent partiellement la démarche.

Les critères d'évaluation ne sont donc pas encore clairement établis, mais il existe une demande pressante en la matière, notamment de la part des distributeurs d'images à haute et très haute résolution. La définition de critères et de méthode d'évaluation constitue l'un des objectifs du groupe de travail de l'EARSel chargé des techniques de fusion d'images et plusieurs expériences internationales sont en cours.

VII. CONCLUSION

Les techniques de fusion sont presque aussi nombreuses que les types de fusion. Les méthodes évoquées au point IV ne constituent qu'un inventaire non exhaustif des procédés communément employés.

Le choix d'une méthode est souvent difficile à faire a priori, en particulier lorsque l'objectif consiste à créer une spatio-carte. De plus, les méthodes sont rarement fermées, mais au contraire, relativement modelables. Elles consistent, pour la plupart, en une succession d'étapes pouvant être agencées selon les désirs et objectifs de l'utilisateur. Lorsque l'objectif poursuivi exige la préservation de la radiométrie, le choix des techniques de fusion est plus réduit, mais ce sont souvent les techniques les plus lourdes à mettre en oeuvre.

La fusion d'images satellite ne consiste donc pas simplement en l'application de recettes préétablies. Dans l'état actuel des connaissances, elle constitue à chaque fois un travail de recherche et réclame plusieurs essais successifs. La comparaison objective des résultats obtenus n'est pas la moindre des difficultés soulevées par la fusion d'images, une technique pourtant appelée à se développer de manière considérable dans un proche avenir.

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.
- CLICHE G., BONN F. & TEILLET P., 1985. Integration of the SPOT PAN channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(3), 311-316.
- DE BÉTHUNE S., MULLER F. & BINARD M., 1998a. Adaptive intensity matching filters : a new tool for multiresolution data fusion. *Agard Conference Proceedings 595 : Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar*, Lisbonne, sept-oct. 1997, RTO-NATO, 28.1-28.15.
- DE BÉTHUNE S., DONNAY J-P. & MULLER F., 1998b. Fusion d'images multirésolution par égalisation de moyennes et variances locales : comparaison avec la fusion par la méthode des ondelettes. *Actes des VII' journées scientifiques du réseau de télédétection de l'AUPELF-UREF, Sainte-Foy, octobre 1997: La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*, Montréal, Presses de l'Université du Québec, 119-126.
- DE BÉTHUNE S., MULLER F. & DONNAY J-P., 1998c. Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques. *Proceedings of the Second International Conference : Fusion of Earth Data : merging point measurements, raster maps and remotely sensed images*, Sophia-Antipolis, Nice, 31-36.
- GARGUET-DUPORT B., GIREL J., CHASSERY J.-M. & PAUTOU G., 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1057-1066.
- JOLY G., 1986. *Traitements des fichiers-images*. Collection Télédétection satellitaire, n° 3, Paradigme, Caen.
- KACZYNSKI R., DONNAY J-P. & MULLER F., 1995. Satellite image maps of Warsaw in the scale 1:25,000. *Topography from space, EARSeL Advances in Remote Sensing*, 4(2), 100-103.
- MARION A., 1997. *Acquisition et visualisation des images*. Eyrolles, Paris.
- RANCHIN T., 1993. *Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection*. Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, Sophia-Antipolis, inédit.
- RANCHIN T. & WALD L. (Éds) 2000a. *Proceedings of the Third international Conference of the EARSeL Working Group on Earth Data Fusion*, Sophia Antipolis, janvier 2000.
- RANCHIN T. & WALD L., 2000b. Comparison of different algorithms for the improvement of the spatial resolutions of images. *Proceedings of the Third International Conference : Fusion of Earth data, janvier 2000*, Sophia Antipolis, 33-41.
- RANCHIN T. & WALD L., 2000c. Fusion of high spatial and spectral resolution images : the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(1), 49-61.
- RICHARDS J.A., 1984. Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation. *Remote Sensing of Environment*, 16(1), 35-46.
- SCHALLER N.C., 2000. *Introduction to Color*. <http://www.es.rut.edu/~ncs/color>.
- SHEFFIELD C., 1985. Selecting band combinations from multispectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(6), 681-687.
- SHETTIGARA V.K., 1992. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. *Proceedings of IGARSS'99*, Vancouver, 2615-2618.
- SHOWENGERDT R.A., 1980. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency contents. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(10), 1325-1334.
- TERRETTAZ DE VOLLÈGES P., 1998. *Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV*. Thèse de doctorat en sciences de l'Université de Fribourg, inédit.
- WALD L., RANCHIN Th. & MANGOLINI M., 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions : assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(6), 691-699.

WELCH R. & EHLERS M., 1987. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(3), 301-303.

YÉSOU H., BESNUS Y. & ROLET J., 1993. Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery. A contribution to the study of geological structures. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(5), 23-36.