

STRATÉGIES DE FUSION D'IMAGES P/XS BASÉES SUR LES PRINCIPES COLORIMÉTRIQUES ET L'EGALISATION DE STATISTIQUES LOCALES

Yves Cornet, Christophe Schenke, Stanislas de Béthune, Marc Binard et Fabrice Muller

Laboratoire SURFACES – Unité de Géomatique (Université de Liège),
Allée du 6 Août, 17, B5, B4000 Liège, Belgique
Tél.: +32 4 3665371 - Fax.: +32 4 3665693 - E-mail : ycornet@ulg.ac.be

Résumé

Dans cet article, plusieurs stratégies de fusion d'images multi-résolution P/XS basées sur le principe d'Egalisation de Statistiques Locales (ESL) sont expliquées : transformations entre espaces colorimétriques RGB-ITS et son inverse, transformation par calcul d'un Rapport Normalisé d'Intensités calculé sur plusieurs bandes (INR3b, INR4b ou INRnb), transformation par calcul d'un Rapport Normalisé d'Intensités calculé bande par bande (INRbpb). Elles ont été testées sur différents types d'images satellitaires Panchromatiques au Haute Résolution Spatiale (P-HRS) et Multispectrales à Basse Résolution Spatiale (XS-BRS) mais dans cet article, nous discutons uniquement les résultats de leur application aux données PLEIADES-HR (expérimentation ATS3-E3 du CNES). Les méthodes d'évaluation de la qualité de leurs produits sont critiquées et les performances des deux dernières stratégies sont comparées à partir du traitement de 3 imagerie du site-test de Strasbourg. Leur efficacité est discutée sur la base de divers facteurs : caractéristiques de l'imagerie de test, taille de fenêtre de convolution pour l'ESL et Rapport de Résolution (RR) entre les images XS-BRS et P-HRS.

Mots clés : Télédétection, fusion d'images multi-résolution, Egalisation de Statistiques Locales

Abstract

In this paper, several strategies of multi-resolution P/XS images fusion based on Local Statistics Matching (LSM) principle are explained: RGB2IHS and inverse colour space transformations, multibands Intensity Normalized Ratio transformation (INR3b, INR4b or INRnb) and band per band Intensity Normalized Ratio transformation (INRbpb). They have been tested on different kinds of High Spatial Resolution Panchromatic (HSR P) and Low Spatial Resolution Multispectral (LSR XS) satellite images but in this paper, we only discuss the results of their application to PLEIADES-HR data (ATS3-E3 experiment of the CNES). The methods of their products quality assessment are criticized and the performances of the two last strategies are compared from the processing 3 image-subsets from the Strasbourg test-site. Their efficiency is discussed on the basis of various factors: test-sites characteristics, convolution window size for LSM and Resolution Ratio (RR) between LSR XS and HSR P images.

Keywords : Remote sensing, multi-resolution image fusion, Local Mean and Variance Matching

1. Introduction

Cet article constitue une synthèse des travaux relatifs aux méthodes de fusion d'images développées depuis une petite dizaine d'années au laboratoire SURFACES de l'Université de Liège. Ces méthodes sont basées sur le principe de l'Egalisation de Statistiques Locales (ESL). Elles ont fait l'objet de plusieurs révisions dans le cadre de l'expérimentation ATS3-E3 du CNES dans le cadre du développement du capteur PLEIADES-HR. A la suite de cette expérimentation, nous précisons dans cet article les choix méthodologiques adoptés dans le cadre de cette expérimentation et discutons d'autres stratégies parfois plus performantes afin de comprendre les limites et perspectives de ces méthodes dont la simplicité de mise en œuvre constitue un atout indéniable.

2. Définition de la fusion d'images

Nos recherches sur la fusion d'images ont généralement été consacrées à des applications thématiques portant sur le milieu urbain. Leurs objectifs

sont de deux types : Interprétation d'Images Assistée par Ordinateur (IIAO) faisant éventuellement appel à des méthodes de classification, bien que dans ce cas précis, la fusion ne constitue pas une étape indispensable, et restitution d'objets géographiques dans ce type de milieu. L'amélioration constante des résolutions spatiale, spectrale et radiométrique des données satellitaires en font un outil particulièrement intéressant puisque ces données commencent à concurrencer la photographie aérienne qui était le produit généralement exploité par le monde des urbanistes (DONNAY *et al.*, 2000 ; DONNAY *et al.*, 2001).

La définition de la fusion d'images multi-résolution que nous adoptons dans ce cadre est la suivante : production d'une image polygénique de synthèse, appelée fusionnée (« merged » or « fused ») à partir de données constituées d'une image monogénique Panchromatique à Haute Résolution Spatiale (P-HRS) et d'une image polygénique Multispectrale à Basse Résolution Spatiale (XS-BRS), image polygénique pouvant être composée de 3, 4 (ou n) canaux, avec

l'objectif de conserver au mieux l'information spectrale de l'image XS-BRS et d'injecter dans le produit un maximum d'information texturale et structurale provenant de l'image P-HRS. Nos méthodes permettent ainsi un compromis entre l'importance de l'information texturale et structurale que l'on désire introduire dans le produit de la fusion et l'importance de l'information spectrale de l'image XS-BRS que l'on désire protéger. Ainsi, le produit de la fusion devrait correspondre à une image polygénique telle qu'elle serait acquise par un capteur XS à HRS. Nos méthodes de fusion permettent donc d'améliorer la qualité géométrique de l'information qui en serait extraite de leurs produits et rendent possible une interprétation des objets analysés basée sur des teintes, saturations, intensités et textures qui correspondraient à une telle saisie XS à HRS.

Cette définition constitue un invariant au cours de l'évolution de nos méthodes. Néanmoins, les améliorations mentionnées plus haut justifient une remise en question permanente de ces dernières, des algorithmes qui en découlent ainsi que de leur implémentation. C'est ainsi que nous avons appliqué différentes méthodes de fusion basées sur le principe d'ESL à des données dont le rapport de résolution varie de 2 à 9 : KOSMOS KVR 1000 (3.5m) et LANDSAT TM (30m) ou SPOT4 XS (20m) ; SPOT4 P (10m) et XS (20m) ; IKONOS P (1m) et XS (4m) ; PLEIADES-HR (Image P et image XS de référence à 1m de résolution - données XS simulées à 2 et 4m de résolution) ; QUICK BIRD P (0.7m) et XS (2.8m) ; SPOT5 P (2.5m) et XS (10m). Cette dernière application a été réalisée sur une scène de Toulouse fournie par le CNES.

3. Etat de l'art

3.1 Méthodes triviales

Parmi les méthodes dont dérivent directement ou non les stratégies basées sur le principe ESL, nous pouvons rappeler quelques méthodes triviales telles que la substitution, la combinaison et l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

La première (TOUTIN, 1995) consiste en une substitution de la bande XS-BRS qui est la mieux corrélée par l'image monogénique P-HRS après avoir rééchantillonné l'image polygénique à la résolution de l'image P-HRS. La seconde méthode (EHLERS, 1991 ; MUNECHIKA *et al.*, 1993 ; CLICHE *et al.*, 1985 ; ZHANG, 1999) est aussi basée sur un tel rééchantillonnage de l'image XS-BRS puis sur la combinaison de chacune des bandes de cette image rééchantillonnée avec l'image P-HRS en exploitant des opérateurs arithmétiques après une éventuelle normalisation de l'image P-HRS. La troisième méthode repose sur l'extraction des Composantes Principales par diagonalisation de la matrice d'inertie (matrice variance-covariance) des données multivariées que constituent l'ensemble des bandes provenant de l'image P-HRS et de l'image XS-BRS rééchantillonnée à la résolution de la première. L'exploitation des 3

premières composantes obtenues permet de réaliser des compositions colorées en couleurs de synthèse qui sont généralement peu appréciées des interprètes. Une variante de cette méthode consiste à réaliser l'ACP sur les seules bandes de l'image XS-BRS rééchantillonnées à la résolution de l'image P-HRS, puis de substituer la composante la plus corrélée avec l'image P-HRS par cette dernière (YESOU *et al.*, 1994).

Les performances de ces trois méthodes sont très fortement influencées par la dynamique des bandes XS et par les covariances entre image P-HRS et ces bandes. De plus, la première dépend de la composition colorée adoptée, ce qui est inacceptable si l'on doit traiter plus de 3 bandes XS. Ces trois méthodes sont donc exploratoires car leurs résultats sont généralement peu prévisibles. Il en existe de nombreuses variantes comme en témoignent les travaux de VRABEL (2000) qui repose notamment sur les méthodes de fusion développées par HALLADA et COX (1983, *in* VRABEL, 2000) et par l'*Environmental Research Institute of Michigan* qui a développé la méthode SPARKLE dont les principes sont similaires à notre stratégie de fusion basée sur le calcul d'un Rapport Normalisé d'Intensités.

3.2. Méthodes basées sur les transformations entre espaces colorimétriques

3.2.1. Transformations RGB vers ITS et son inverse (RGB2HIS)

Une autre méthode de fusion très largement documentée (SABINS, 1987 ; LIU et McM. MOORE, 1990 ; CARPER *et al.*, 1990 ; CHAVEZ, 1991 ; SHETTIGARA, 1992 ; PELLEMANS *et al.*, 1993 ; GRASSO, 1993 ; EDWARDS et DAVIS, 1994 ; de BETHUNE *et al.*, 1998b ; MULLER et de BETHUNE, 2000) consiste en une transformation et son inverse entre l'espace colorimétrique des couleurs fondamentales additives, l'espace *RVB* (Rouge - Vert - Bleu), et l'espace des couleurs perçues, l'espace *ITS* (Intensité - Teinte - Saturation). Il s'agit d'une méthode en trois étapes.

La première étape permet le passage de l'espace *RVB* vers l'espace *ITS*. Trois de n canaux XS disponibles sont choisis et rééchantillonnés à la résolution de l'image P-HRS. Selon le type de composition colorée adoptée, on associe les trois canaux aux 3 couleurs fondamentales R, V et B. L'évolution de la résolution radiométrique des systèmes d'acquisition de 8 à 10 ou 11 bits (données codées sur 8 bits vers des données codées sur 16 bits) a nécessité d'adapter nos programmes pour exploiter des compositions codées sur 48 bits plutôt que sur 24 bits. Cette méthode dépend du choix de 3 canaux parmi n canaux de l'image polygénique. Les capteurs XS récents (IKONOS, QUICK BIRD) et futurs (PLEIADES-HR) présentent une résolution spectrale améliorée par rapport au capteur HRV de SPOT, puisque n est passé de 3 à 4. La transformation *RVB* vers *ITS* est réalisée en exploitant le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} I \\ v1 \\ v2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} = M = C.A \quad (1)$$

Les teinte (T) et saturation (S) peuvent être calculées dans le plan de Maxwell défini par v_1 et v_2 . En pratique, leur calcul n'est pas nécessaire. v_1 et v_2 sont exploités à la troisième étape.

La seconde étape consiste à normaliser l'image P-HRS par rapport à l'intensité (I). C'est à ce stade que le principe d'ESL décrit au §4 peut être appliqué.

Ensuite, l'image P-HRS normalisée est utilisée comme nouvelle image d'intensité (I'), alors que v_1 et v_2 restent inchangés, c'est-à-dire que les teinte et saturation sont conservées. La transformation inverse $I'VS$ vers $R'V'B'$ constitue la troisième étape et est réalisée en utilisant la matrice inverse de C . On obtient ainsi la transformation suivante :

$$\begin{pmatrix} R' \\ V' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ 1 & -1/3 & -1/\sqrt{3} \\ 1 & 2/3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I' \\ v1 \\ v2 \end{pmatrix} = A' = C^{-1}M' \quad (2)$$

3.2.2. Transformation INR (Intensity Normalized Ratio) ou RNI (Rapport Normalisé d'Intensités)

Cette transformation a été proposée par de BETHUNE *et al.* (1997, 1998a, 1998b) et MULLER & de BETHUNE (2000). Dans la forme présentée par ces chercheurs, seul est nécessaire le calcul de l'intensité à partir de l'image XS-BRS rééchantillonnée à la résolution de l'image P. Dans ce cas, le nombre de bandes XS exploitées est libre ($n = 3, 4, \dots$). C'est cette méthode avec $n = 4$ qui a été exploitée dans le cadre de l'expérimentation ATS3-E3.

Le calcul de l'intensité (I) est réalisé de la façon suivante :

$$I(l, c, n) = \sum_{i=1}^n DN_B(l, c, i) \quad (3)$$

où $DN_B(l, c, i)$ = le code numérique du pixel (l, c) de la bande i de l'image à BRS (B)

Ensuite, l'image P-HRS est normalisée par rapport à l'intensité (I) ainsi calculée en exploitant le principe d'ESL décrit au §4. L'image résultant de cette normalisation est une image d'intensité notée I' . Enfin, chaque bande i de l'image XS de synthèse est obtenue en appliquant l'équation suivante :

$$DN'(l, c, i, n) = \frac{I'(l, c, n)}{I(l, c, n)} * DN_B(l, c, i) \quad (4)$$

4. Principe d'Egalisation de Statistiques Locales (ESL)

L'Egalisation de Statistiques Locales (ESL) constitue l'étape clé de 2 des méthodes proposées ci-dessus. Elle consiste à calculer les moyennes et

variances locales à l'aide d'une fenêtre de convolution carrée de largeur f impaire. La valeur du paramètre f détermine la taille du voisinage à considérer et le nombre d'individus sur lequel porte le calcul des paramètres statistiques locaux. Ces derniers sont calculés sur l'image P-HRS à normaliser et sur l'image d'intensité provenant de l'image XS-BRS. Ainsi, on obtient, dans le cas des deux méthodes exposées plus haut, deux images de moyennes locales et deux images de variances locales. Ensuite, la formule suivante de normalisation est utilisée :

$$[I'(l, c, n)]_f = \frac{[DN_H(l, c)]_f - [M_H(l, c)]_f * [\sigma_B(l, c, n)]_f}{[\sigma_H(l, c)]_f} + [M_B(l, c, n)]_f \quad (5)$$

où $[I'(l, c, n)]_f$: image de sortie;

$DN_H(l, c)$: image P-HRS;

$[M_H(l, c)]_f$: image des moyennes locales

obtenue à partir de l'image P-HRS;

$[M_B(l, c, n)]_f$: image des moyennes locales

obtenue à partir de l'image I correspondant à l'image XS-BRS;

$[\sigma_H(l, c)]_f$: image des variances locales

obtenue à partir de l'image P-HRS;

$[\sigma_B(l, c, n)]_f$: image des variances locales obtenue

à partir de l'image I correspondant à l'image XS-BRS.

Comme le montre l'équation 5, l'ESL est une Egalisation de Moyennes et Variances Locales consistant à ajouter, à la composante basse fréquence de l'image XS-BRS (2^{ème} terme du membre de droite), une composante haute fréquence de l'image P-HRS qui est modulée par le rapport de variances (ou écarts-type) locales entre les images XS et P (1^{er} terme du membre de droite). Dans le cas où le voisinage sur l'image XS et P présente le même niveau d'hétérogénéité, la modulation vaut 1. Dans la majorité des cas, cette modulation sera cependant inférieure à 1 car la variance locale de l'image P est généralement supérieure à celle de l'image XS. Enfin, cette formule n'est applicable que si la variance locale de l'image P est non nulle. C'est généralement le cas quand on exploite une fenêtre de convolution suffisamment grande. Nous avons néanmoins rencontré une fois un cas présentant une telle variance nulle. Il s'agissait d'une image IKONOS d'un vaste étang d'eau calme. Nous avons donc introduit un test portant sur cette variance locale. Dans le cas où elle est nulle, la variance locale de l'image XS est aussi très faible et nous avons annulé le premier terme du membre de droite de l'équation 5. Au terme du traitement, les moyennes et variances locales sont conservées.

Par le principe de calcul de paramètres statistiques locaux, cette méthode présente un lien ténu avec la méthode de fusion proposée par DIEMER et HILL

(2000). L'ESL constitue l'étape la plus gourmande en temps de calculs et en mémoire utilisée. Elle a été optimisée dans la version de l'algorithme de fusion programmé en VB et exploité lors du projet ATS3-E3. Par contre les autres stratégies de fusion discutées ci-dessous ont été programmées à des fins expérimentales sous Model Maker (Imagine 8.5) et leur application à des images volumineuses est à proscrire.

Signalons enfin que lorsque f croît de façon importante on peut considérer que l'égalisation des paramètres statistiques n'est plus réalisée à l'échelle locale mais plutôt à l'échelle globale. Dans ce cas, l'algorithme peut être fortement simplifié, puisque les variances et moyennes ne sont plus des images mais des scalaires (moyennes et variances de l'image entière indépendantes de la position). On parlera alors d'Egalisation de Statistiques Globales (ESG). Dans le cas de l'application de la stratégie de fusion INRbpb décrite au §5 associée à une ESG, on obtient une image polygénique de synthèse en niveaux de gris, car il y a annulation des saturations.

Par ailleurs, dans le cadre de l'expérimentation ATS3-E3, nous avons traité les images brutes non calibrées. Il convient de signaler que les résultats obtenus à partir des images calibrées ne devraient pas être différents si l'on applique la stratégie INRbpb (§5). Par contre, si l'on applique la stratégie INRnb (§5), les résultats devraient être différents selon que l'on utilise les images calibrées ou non.

5. Stratégies de fusion basées sur le principe d'ESL

C'est la stratégie (INRnb) décrite au §3.2.2. avec $n=4$ qui a été exploitée dans le cadre de l'expérimentation ATS3-E3. Cependant, lors de tests réalisés sur une image IKONOS de la région de Toulouse (CORNET *et al.*, 2001), nous avons constaté qu'elle nécessite des adaptations pour améliorer ses performances. Lors de ces tests, il est notamment apparu que les comportements anormaux de la bande 4, canal PIR, et dans une moindre mesure la bande 1, canal B, constatés lors des fusions par transformation RGB vers ITS ou par calcul d'un RNI en combinant de n ($n = 3$ ou 4) bandes XS-BRS (INRnb) étaient atténués si l'on adoptait une stratégie de fusion bande par bande (INRbpb). Cependant cette stratégie alourdit fortement l'algorithme, puisque les moyennes et variances locales doivent être calculées sur l'image P et autant de fois qu'il y a de bandes dans l'image XS.

Bande	Min	Max	Moy	Med	Mod	SD
P	85-87-93	867-874-863	179-197-219	171-182-200	159-156-148	55-66-87
XS1	137-147-147	814-818-804	206-226-235	195-210-217	217-185-217	50-59-73
XS2	95-88-101	869-843-854	178-190-203	172-174-185	167-167-167	53-61-77
XS3	73-81-86	901-914-913	175-200-232	163-184-205	157-142-130	65-78-111
XS4	85-108-115	999-938-956	406-357-414	372-332-384	273-274-361	150-129-165

Tableau 1 : Statistiques descriptives bande par bande (1^{ère}-2^{ème}-3^{ème} valeur : ZM-ZRD-ZBE)

Dans ce cas, on réalisera l'ESL entre l'image P et chacune des bandes i de l'image XS considérée séparément. L'équation 3 devient :

$$I(l, c, i) = DN_B(l, c, i) \quad (6)$$

L'image P-HRS est alors normalisée par rapport à chacune des bandes XS en exploitant le principe d'ESL (équation 5) puis le calcul des nouveaux canaux XS est réalisé en appliquant l'équation 4 qui se simplifie de la façon suivante :

$$[DN'(l, c, i)]_f = [I'(l, c, i)]_f \quad (7)$$

6. Les applications

Les stratégies de fusion RGB2IHS sur compositions colorées FC (fausses couleurs) et VC (vraies couleurs), INR3b sur compositions colorées FC et VC, INR4b et INRbpb ont été appliquées sur des imagerie de test présentant des caractéristiques « paysagères » différentes choisies sur l'image simulée PLEIADE-HR de la région de Strasbourg. Nous avons appliqué ces stratégies en exploitant les deux rapports de résolution (RR = 2 et 4) et en adoptant les valeurs de f reportées ci-dessous.

RR = 2	5	9	11	15	19		Imagerie entière*
RR = 4		9	11	15	19	51	Imagerie entière*

*ESG = Egalisation de Statistiques Globales

6.1. Imagerie de test

La première imagerie choisie montre une Zone Mixte (ZM) avec des résidences et jardins parfois arborés, des espaces industriels ou équivalents, des espaces agricoles (champs labourés et cultures à un stade précoce de croissance), des bosquets et haies et un réseau routier plus ou moins dense, de faible largeur et parfois bordé d'arbres isolés (figure 1). La seconde montre une Zone Résidentielle Dense (ZRD) avec jardins plus petits et parfois arborés. Le réseau routier y est plus dense et de largeur très variable ; il est rarement bordé d'arbres. La troisième montre une Zone de Bâtiments à Etages multiples (ZBE) produisant de larges franges d'ombre et séparés par de vastes espaces herbacés, de grandes places ou parkings bétonnés ou macadamisés et un réseau routier régulier de largeur comparable à la ZM. Ces trois images sont caractérisées par les paramètres statistiques reportés dans les tableaux 1 et 2.

r	Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4
P ZM	0.936	0.962	0.966	0.161
P ZRD	0.963	0.983	0.984	0.255
P ZBE	0.932	0.956	0.971	0.377

Tableau 2 : Corrélations (r) entre image P et chaque bande de l'image XS

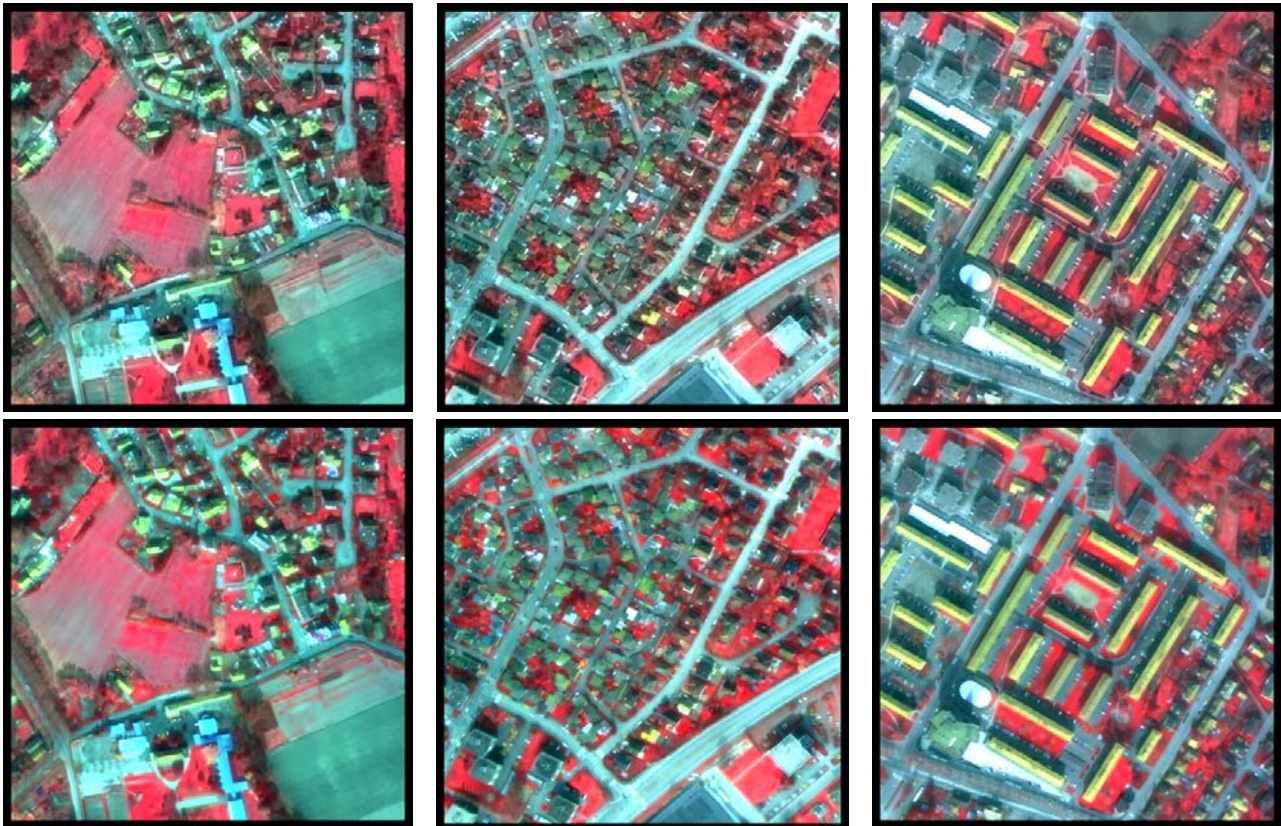


Figure 1 : Résultats des fusions INRbpb (en haut) et INR4b (en-bas) sur les 3 types de zones (de gauche à droite : ZM, ZRD, ZBE) en composition FC 432 (RR = 4, f = 15). Extension : 500 m x 500 m.

La luminance moyenne croît de la 1^{ère} à la 3^{ème} zone pour l'image P et les 3 bandes visibles de l'image XS. Par contre, la luminance moyenne dans le PIR des ZM et ZBE est plus élevée que celle de la ZRD. Les médianes des valeurs radiométriques des différentes zones montrent la même tendance. Cependant, les médianes sont systématiquement beaucoup plus faibles que les moyennes. Ceci traduit une asymétrie positive de l'histogramme des valeurs radiométriques qui est étalé vers les valeurs élevées.

L'écart-type des valeurs radiométriques croît aussi de la 1^{ère} vers la 3^{ème} zone pour l'image P et les 3 bandes visibles de l'image XS. En ce qui concerne le PIR, les ZM et ZBE montrent des écarts-type plus élevés que pour la ZRD. Les valeurs de ce paramètre traduisent une variabilité croissante du « paysage » dans le visible de la 1^{ère} à la 3^{ème} zone. Par contre, la variabilité du paysage liée à l'importance de la végétation est mise en évidence par l'écart-type des valeurs radiométriques dans le PIR. Elle est plus grande pour la ZBE que pour la ZM et la ZRD.

Les corrélations (r) entre l'image P et les 3 bandes visibles de l'image XS sont très élevées. Elles sont

beaucoup plus élevées que celles généralement constatées sur les images IKONOS. Ces fortes corrélations expliquent les tendances similaires constatées ci-dessus pour les bandes visibles de l'image XS et l'image P concernant les moyennes et écarts-type. Par contre, le PIR est très peu corrélé avec l'image P. Les valeurs du coefficient de corrélation sont beaucoup plus basses que celles généralement rencontrées sur les images IKONOS. Par ailleurs, on observe une croissance de la corrélation entre l'image P et l'image XS4 de la ZM à la ZBE. La ZRD présente une corrélation intermédiaire.

Le minimum, le maximum et le mode constituent des paramètres de dispersion et position plus aléatoires dont on ne peut généralement pas interpréter la signification.

6.2. Evaluation de la qualité des imagerie de synthèse produites

Nous évaluons ci-après les seuls produits des stratégies INRbpb et INR4b car les autres stratégies ne permettent pas de traiter ensemble les 4 bandes de l'image XS-BRS. Cette évaluation porte sur l'effet de la valeur de f , du RR et des caractéristiques de la zone.

L'évaluation peut être de 2 types, visuelle ou quantitative.

6.2.1. Evaluation visuelle

Dans tous les cas, mais surtout pour un RR = 4, les produits des fusions sont moins contrastés et les couleurs moins saturées que l'image de référence. Lors de la visualisation en composition colorée VC, on constate, pour la stratégie INR4b, une diffusion importante, notamment, mais pas uniquement, de « l'urbain » vers « le végétal ». La valeur idéale de f est de l'ordre de 9 à 11 pour un RR = 2 et de 11 à 15 pour un RR = 4. Il s'agit de valeurs beaucoup plus petites que le point de fonctionnement adopté pour produire les images de synthèse fournies au CNES ($f = 45$) dans le cadre de ATS3-E3. Cependant, les différences sont peu perceptibles quand f varie dans la gamme de variation considérée.

Il semble que la stratégie INRbpb soit globalement plus satisfaisante que la stratégie INR4b (figure 1) sur les 3 types de zones testées. La texture des différents « types de paysages » est souvent mieux restituée sur les fusions INRbpb (champs labourés – types de toits – canopée des arbres).

6.2.2. Evaluation quantitative traditionnelle

Les indices de qualité cités dans la littérature (de BETHUNE *et al.*, 1997) sont généralement le d -index de Costantini et le coefficient de corrélation de Pearson (r) calculés entre image de synthèse et de référence. D'autres indices existent et, comme les précédents, ils sont souvent calculés bande par bande (indices monospectraux) et basés sur la comparaison (rapport entre image de synthèse et de référence) de moyennes, d'écart-type (ET), diversités (D) et entropies. Il s'agit aussi d'indices globaux (portant sur toute l'image analysée). D'autres types d'indices globaux, mais multispectraux, comme la comparaison d'entropies et de diversités multispectrales (DM) peuvent être envisagés. Tout comme le calcul de la D, celui de la DM constitue une étape de calcul des entropies. Généralement, l'analyse des D et DM permet les mêmes constatations que celle des entropies.

Les moyennes globales sont conservées dans tous les cas. En ce qui concerne l'analyse des autres indices globaux monospectraux ou multispectraux (figures 2 et 3), on constate des différences de performance liées au type de zone traitée, mais, sauf pour la DM dans les bandes visibles, elles sont moins importantes que celles dues à la variation du RR ou de f . Les meilleures performances sont constatées dans la ZBE. Dans les ZM et ZRD, les performances sont comparables et inférieures. La perte de qualité liée au passage d'un RR de 2 à 4 peut atteindre 5 à 10% (ET) mais l'importance de cette perte peut dépendre du type de zone (DM). Étrangement, selon la DM, le RR = 4 donnerait de meilleurs résultats que le RR = 2 en ZBE et, selon r , il n'y aurait pas de différence pour le PIR en fonction du RR. La qualité pour les différentes bandes varie de façon plus homogène en fonction de f pour la stratégie

INRbpb que pour l'INR4b. Le PIR présente toujours un comportement spécifique. Vis-à-vis de ce canal et plus particulièrement en ZRD, le choix de f est d'ailleurs le plus délicat (DM, d -index). Le d -index est favorable à la stratégie INRbpb avec une décroissance des performances de la bande 1 vers la 4. Plus particulièrement en ZM et ZBE et pour les deux stratégies, le coefficient r varie peu en fonction de f sauf pour le PIR. Contrairement à nos constatations au départ de données IKONOS (CORNET *et al.*, 2001) et sur base du coefficient r , la stratégie INR4b semblerait plus performante que l'INRbpb pour toutes les valeurs de f . La faible corrélation entre l'image P-HRS et le PIR de l'image XS-BRS de PLEIADES-HR explique probablement ce désaccord.

6.2.3. Vers une évaluation quantitative plus large

Il ressort de l'expérimentation ATS3-E3 que l'évaluation quantitative traditionnelle de la qualité des images de synthèse produites ne reflète pas les jugements des interprètes. Cela justifie la nécessité d'améliorer des techniques d'évaluation quantitatives. Celle-ci devrait permettre de prendre en compte différents aspects de la qualité d'une image polygénique : aspects textural (conservation des variances locales), spectral (conservation des intensité, teinte, et saturation), géométrique (qualité géométrique de l'information dérivée des produits de la fusion – détection et restitution des limites – répétabilité, reproductibilité, ...). Les indices doivent donc présenter différents niveaux d'échelle spatiale (« spatialité » des indices) : indices globaux (une valeur moyenne pour l'image – que représente une telle valeur en regard de la diversité des contextes ?), indices zonaux (une valeur par zone – comment définir les zones au sein d'une image ?), indices locaux (une valeur dans un voisinage – quelles dimensions de voisinage choisir ? - comment traiter les limites ?). Les indices peuvent être monovariés ou multivariés (« dimensionnalité » des indices). Dans le premier cas une valeur est fournie pour chaque canal et dans le second une valeur est fournie pour l'ensemble des canaux d'une image polygénique ou d'une composition colorée déterminée selon la résolution spectrale du capteur. Enfin, les indices peuvent être présentés et interprétés de différentes manières. Ainsi, on peut comparer des images (variation spatiale de l'indice), des histogrammes provenant de ces images (pouvant donner lieu à des tests statistiques permettant de comparer ces histogrammes) et enfin valeurs moyennes ou centrales telles que celles analysées ci-dessus.

Le cas de l'indice de *distance spectrale* moyenne globale entre une image polygénique de synthèse et une image de référence à 4 canaux illustre ces propos (figures 4 et 5). Cette valeur moyenne correspond à deux histogrammes légèrement différents dont seule la partie marginale est réellement significative d'un point de vue de la qualité de l'image. Ce sont ces valeurs

extrêmes et leur localisation dans l'espace qui doit faire l'objet d'une analyse pour quantifier les différences de performances entre méthodes de fusion. La variabilité spatiale des performances est aussi possible à partir du *d-index* et de la *corrélation locale*.

Par ailleurs, une application fréquente de la télédétection est la restitution d'objets par Interprétation d'Image Assistée par Ordinateur (IIAO) et digitalisation. Pour démontrer l'effet déterminant de nos stratégies de fusion sur l'amélioration de la qualité géométrique de ce type d'opération, un opérateur a répété 4 fois à intervalle de 1 semaine la digitalisation des coins et faîtes des toits des bâtiments de la ZBE. Ceci a été

effectué sur l'image de référence, sur l'image XS-BRS à 4 m rééchantillonnée à 1 m par convolution cubique et sur les produits de la stratégie de fusion INRbpb. Cette digitalisation a été réalisée à l'écran, en affichant les images en composition colorée VC, toujours avec une accentuation de contraste linéaire avec saturation de 5% et le même niveau de zoom. Comme le montre la figure 6, la dispersion des vertex est fortement réduite après fusion et, dans le meilleur des cas, elle est du même ordre de grandeur que pour l'image de référence. De plus, l'anisotropie observée sur l'image XS-BRS pour les points définissant les faîtes des toits a disparu après fusion.

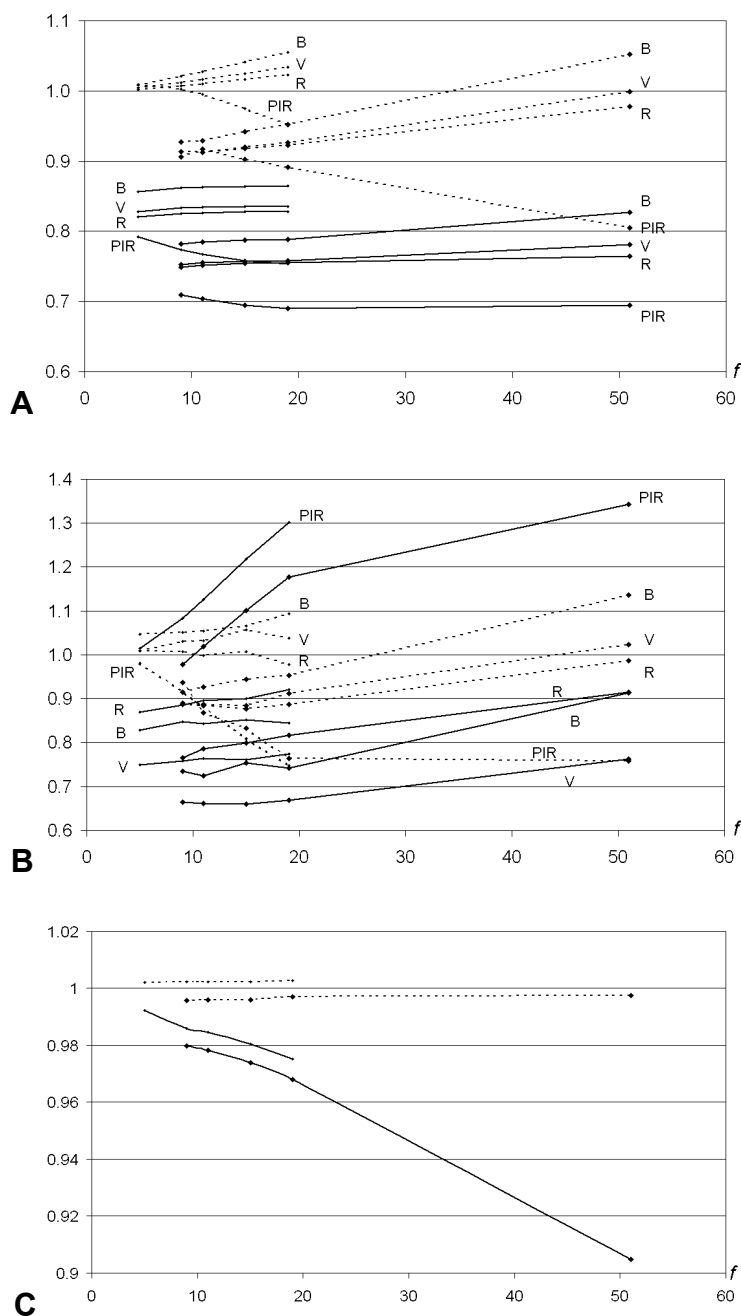


Figure 2 : Rapports entre image de synthèse et de référence en ZRD.

A. Ecart-type (ET). **B.** Diversité (D). **C.** Diversité multispectrale (DM).

Traits continus = stratégie INRbpb. Traits discontinus : stratégie INR4b. B = XS1, V = XS2, R = XS3, PIR = XS4
 $f = 5$ à 19 : RR = 2 (petits points) et $f = 9$ à 51 : RR = 4 (gros points).

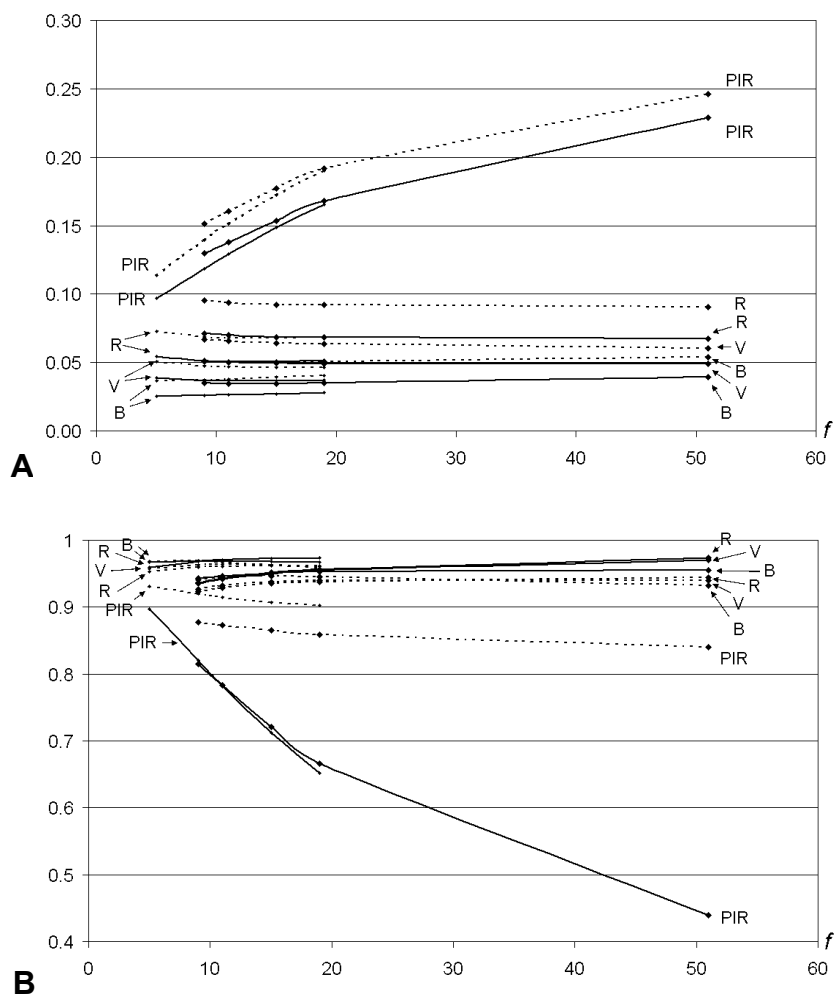


Figure 3 : Indices calculés globalement bande par bande entre images de synthèse et de référence.
A. *d*-index en ZM. **B.** Coefficient de corrélation, *r*, en ZRD.
 Légende : voir figure 2.

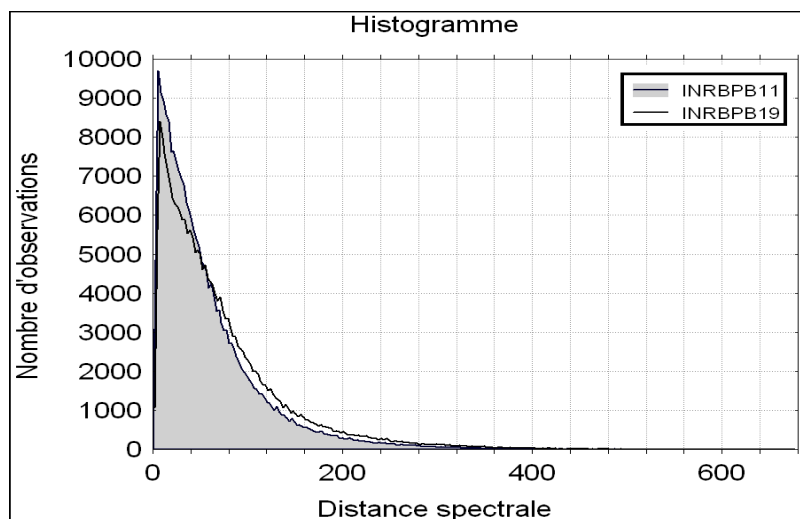
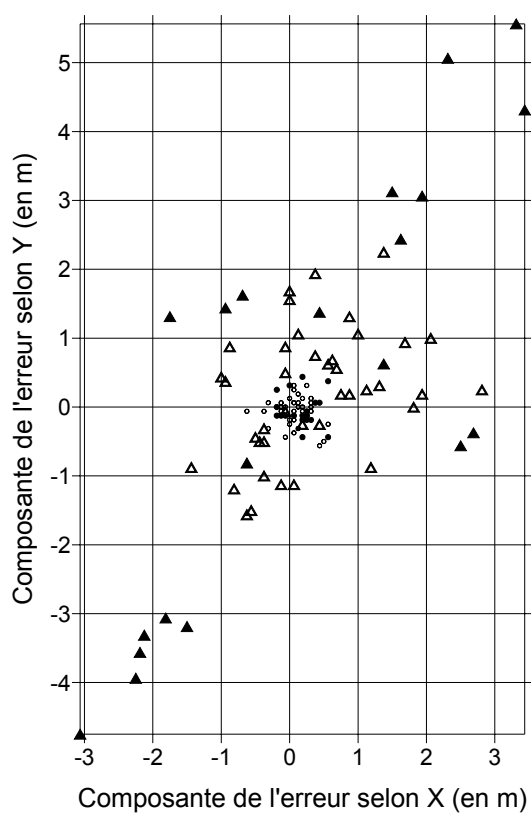


Figure 4 : Stratégie INRbpb en ZM, RR = 4. Histogrammes des images de distance spectrale (4 canaux) entre images de synthèse obtenue par application de la stratégie INRbpb (INRbpb11 : $f = 11$ et INRbpb19 : $f = 19$) et image de référence. Les distances moyennes pour $f = 11$ et 19 sont respectivement 59 et 71.



Figure 5 : Stratégie INRbpb en ZM, RR = 4. Image de distance spectrale (4 canaux) entre images de synthèse et de référence pour $f = 11$ (INRbpb11). Extension : 500 m x 500 m.



Légende

Cercles et triangles pleins : faites des toits

Cercles et triangles vides : coins des toits

Cercles : Image de synthèse INRbpb (RR = 4 et $f = 11$)

Triangles : Image XS-BRS à 4m rééchantillonnée à 1m de résolution par convolution cubique.

Les images ont été visualisées en VC avec la même accentuation de contraste linéaire avec saturation de 5% et le même niveau de zoom.

Precision	EQM (m)	Valeurs relatives de l'EQM
Référence	0.357	1
Données 4m	0.974	2.73
INRbpb 9x9	0.433	1.21
INRbpb 11x11	0.413	1.16
INRbpb 15x15	0.424	1.19
INRbpb 19x19	0.433	1.21
INRbpb 51x51	0.430	1.20
Globale	0.399	1.12

Précision de la digitalisation illustrée ci-contre

Figure 6 : Composantes de l'erreur de digitalisation des toits des bâtiments de la ZBE sur l'image de synthèse obtenue par application de la stratégie de fusion INRbpb et sur l'image XS-BRS.

7. Conclusion

En conclusion, l'efficacité des stratégies INRbpb et INR4b basées sur le principe de l'ESL varie peu en fonction des caractéristiques de la zone traitée. C'est la ZBE qui présente les plus grands espaces homogènes et la plus forte corrélation entre la bande PIR de l'image XS-BRS et l'image P-HRS que les meilleurs résultats sont obtenus. Dans les 3 zones, l'analyse visuelle montre une nette supériorité de la stratégie INRbpb par rapport à l'INR4b.

La variation de f , seul paramètre dont dépend ces stratégies, entraîne des variations faibles de certains indices de qualité tels que : l'ET pour la stratégie INRbpb ; la D pour les deux stratégies, sauf pour le PIR ; la DM pour la stratégie INR4b ; le d -index, sauf pour le PIR ; le r , sauf pour le PIR. Ceci est confirmé par l'analyse visuelle. On constate cependant que l'accroissement de f entraîne une divergence des valeurs de certains indices (ET) pour la stratégie INR4b selon les canaux. Cet accroissement produit une importante détérioration de tous les autres indices de qualité pour le PIR. Quant au seul indice multispectral global utilisé, la DM, il montre une forte détérioration de la qualité quand f augmente pour la stratégie INRbpb. Le point de fonctionnement idéal de f est donc difficile à déterminer. Contrairement au choix effectué dans le cadre de l'expérimentation ATS3-E3 où f a été fixé à 45, il conviendrait d'exploiter une fenêtre moins grande. Les valeurs idéales de f semblent être 11 et 15 respectivement pour des RR de 2 et 4.

En ce qui concerne ce RR, il apparaît que, pour la plupart des indices, les différences de performance sont presque toujours largement inférieures à 10%. C'est l'indice D qui varie le plus quand le RR est modifié. Dans certains cas et plus particulièrement pour le PIR, quand l'indice varie en fonction de f , il est possible, d'un point de vue spectral, de compenser cette variation de qualité liée à la variation du RR par une modification de la valeur de f . Lors de l'analyse visuelle, ces quelques pourcents de différence sont cependant très nettement perceptibles.

Bien que ne disposant pas d'image de référence dans le cas de la fusion de données IKONOS, la supériorité de la stratégie INRbpb sur l'INR4b semble moins nette dans la fusion des données PLEIADES-HR que dans celui de la fusion des données IKONOS (CORNET *et al.*, 2001). Ceci est probablement lié à la trop petite largeur de bande du P de PLEIADES-HR vers le PIR. Néanmoins, le comportement hétérogène des 4 bandes pour l'indice ET quand f croît et la valeur systématiquement plus élevée du d -index sont défavorables à la stratégie INR4b.

Enfin, suite aux remarques émises par les interprètes auxquels les images de synthèse produites par la stratégie INR4b ont été soumises, nous pouvons envisager quelques pistes de recherche à explorer pour améliorer les stratégies de fusion basées sur le principe d'ESL. Le « flou », la « diffusion » et la « contamination » des couleurs qui apparaît dans les

images proviennent probablement de la méthode de rééchantillonnage par convolution cubique de l'image XS-BRS. Il convient d'évaluer les avantages et inconvénients que produiraient d'autres techniques. En ce qui concerne la « diffusion » et surtout la « contamination », la stratégie INRbpb solutionne déjà partiellement le problème. Le manque de « texturation » des zones vertes et en particulier des zones forestières est aussi partiellement corrigé par la stratégie INRbpb. A ce sujet, il est aussi possible qu'une autre technique de rééchantillonnage de l'image XS-BRS puisse aussi améliorer la qualité des produits selon ce critère. L'effet « rebond » constaté en bordure de certaines zones devrait être réduit en adoptant une plus petite valeur de f que celle choisie pour produire les images fournies aux interprètes. Par ailleurs, il est possible d'envisager une ESL qui porterait sur la médiane et un intervalle inter-quartile, par exemple, et permettrait d'éliminer l'effet du passage d'une zone à une autre, puisque ces paramètres statistiques sont moins sensibles aux valeurs marginales des distributions locales. Ceci devrait aussi contribuer à réduire la « contamination ». L'effet « bleuté » des compositions en vraies couleurs est aussi partiellement éliminé par la stratégie INRbpb. Bien que non appliquée pour produire les images distribuées aux interprètes, la calibration est recommandée si la stratégie INR4b est exploitée puisque le calcul de l'intensité de l'image XS-BRS combine les 4 canaux. Enfin, le comportement aberrant du PIR pourrait être partiellement résolu en élargissant vers cette gamme de longueurs d'ondes la largeur de bande du capteur P.

Bibliographie

- CARPER W.J., LILLESAND T.M. et KIEFER R.W., 1990. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 459-467.
- CHAVEZ P.S. jr., SIDES S.C. et ANDERSON J.A., 1991. Comparison of tree different methods to merge multiresolution and multispectral data: LANDSAT TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 295-303.
- CLICHE G., BONN F. et TEILLET P., 1985. Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 311-316.
- CORNET Y., de BETHUNE S., BINARD M., MULLER F., LEGROS G. et NADASDI I., 2001. RS data fusion by Local Mean and Variance Matching algorithms: their respective efficiency in a complex urban context. In: *Proceedings of IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Rome, 8-9 November, pp. 105-111.
- de BETHUNE S., MULLER F. et DONNAY J.-P., 1998a. Fusion of multispectral and panchromatic images by Local Mean and Variance Matching filtering techniques. In: *Proceedings of the Second International Conference "Fusion of Earth Data merging point measurements, raster maps and remotely sensed images"*, pp. 31-36.

- de BETHUNE S., DONNAY J.-P. et MULLER F., 1998b. Fusion d'images multirésolution par Egalisation de Moyennes et de Variances Locales : comparaison avec la méthode des ondelettes. In: *La réalité de terrain en Télédétection : pratiques et méthodes*, Ed. J.-M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et F. Boivin, Série Actualité Scientifique, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, pp. 119-126.
- de BETHUNE S., MULLER F. et BINARD M., 1997. Adaptive intensity matching filters: a new tool for multi-resolution data fusion. In: *AGARD Conference Proceedings - 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar*, pp. 28-1 – 21-13.
- DIEMER Cl. et HILL J., 2000. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolution. In: *Proceedings Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, pp. 91-98.
- DONNAY J.-P., BARNESLEY M. et LONGLEY P., 2001. Remote Sensing and Urban Analysis – Introduction. in *Remote Sensing and Urban Analysis*, J.-P. Donnay, M. Barnesley & P. Longley (Editors), Taylor & Francis, pp. 3-18.
- DONNAY J.-P., COLLET, Cl. Et WEBER Chr., 2000. La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution. in *La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives*, J.-M. Dubois, R. Caloz et P. Gagnon (Editeurs), Série Actualité Scientifique, Agence Universitaire de la Francophonie, Montréal, pp. 3-13.
- EDWARDS K. et DAVIS P. A., 1994. The use of Intensity-Hue-Saturation transformation for producing colour shaded-relief images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1369-1374.
- EHLERS M., 1991. Multisensor image fusion techniques in Remote Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 19-30.
- GRASSO D. N., 1993. Applications of the HIS color transformation for 1:24,000-scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 19-30.
- HALLADA W. et COX S., 1983. Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems. *International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 9-10 may, Ann Arbor Michigan.
- LIU J. G. et McM. MOORE J., 1990. Hue image RGB colour composition. A simple technique to suppress shadow and enhance spectral signature. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp 1521-1530.
- MULLER F. et de BETHUNE S., 2000. La fusion d'images. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, vol. 38, 79-94.
- MUNECHIKA C.K., WARNICK J.S., Salvaggio C. et SCHOTT J., 1993. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, n° 1, p. 67-72.
- PELLEMANS A. H. J. M., JORDANS R. W. L. et ALLEWIJN R., 1993. Merging Multispectral and Panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 81-87.
- SABINS F. F. Jr., 1987. *Remote sensing principles and interpretation*. Freeman, 2d. ed., 449 p.
- SHETTIGARA K. V., 1992. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using higher resolution data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 561-567.
- TOUTIN Th., 1995. Intégration de données multisources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, n° 15, pp. 2795-2811.
- VRABEL J., 2000. Multispectral imagery advanced band sharpening study. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, n° 1, p. 73-79.
- YESOU H., BESNUS Y. et ROLET J., 1994. Perception of geological body using multiple source remotely sensed data – relative influence of the spectral content and the data resolution. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, n° 12, pp. 2495-2510.
- ZHANG Y., 1999. A new merging method and its spectral and spatial effects. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n° 10, pp. 2003-2014.