Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 245- 260

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

FUSION TEMPORELLE MULTIRÉSOLUTION DE SÉRIES D'IMAGES HAUTE ET BASSE RÉSOLUTIONS PAR PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE

FLORENCE LAPORTERIE-DÉJEAN[a,1], GUY FLOUZAT [b,2] et ÉRICK LOPEZ-ORNELAS [b,3]

[a] *Région Midi-Pyrénées, Service Recherche,*
22 Boulevard du Maréchal Juin, 31406 Toulouse Cedex 9, France

[b] *Université Paul Sabatier, Laboratoire de Télédétection à Haute Résolution,*
118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4, France

Courriel (1,2,3) : florence.laporterie@cict.fr ; guy.flouzat@espace.gouv.fr ; erick.lopez@cesbio.cnes.fr

(soumis : 27 juillet 2004 ; révisé : 17 janvier 2005 ; accepté 21 octobre 2005)

Le suivi de processus environnementaux nécessite des données acquises fréquemment (environ tous les 10 jours). Réaliser ce suivi par satellite avec une telle fréquence ne peut se faire qu'à partir de capteurs à grand champ de vue. Malheureusement, ces capteurs n'ont pas une résolution spatiale suffisante pour permettre de discriminer les objets d'intérêt (champs, par exemple). La solution proposée dans cet article pour pallier ce problème est l'utilisation de la fusion d'images par pyramide morphologique. Une application sur un jeu de données s'étalant sur une saison agricole permet d'évaluer les résultats.

Mots-clefs : fusion ; pyramide ; morphologie mathématique.

MULTI-RESOLUTION TEMPORAL FUSION OF HIGH AND LOW RESOLUTION IMAGE SERIES USING THE MORPHOLOGICAL PYRAMID TECHNIQUE

The monitoring of environmental processes requires frequent image acquisitions (approximately every 10 days). To perform such a survey by satellite it is necessary to rely on wide field of view sensors. However, these sensors do not have a sufficient spatial resolution to discriminate objects of interest (fields for example). The solution proposed in this article to address this problem is to use image fusion based on the morphological pyramid technique. An application on a one-year data set covering a full agricultural season enables the evaluation of the results.

Keywords : fusion ; pyramid ; mathematical morphology.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'arrivée des nouvelles images de télédétection à très haute résolution spatiale va permettre la perception d'une nouvelle gamme d'objets au sol non observables jusqu'à maintenant. La surveillance des territoires depuis l'espace devient donc possible avec une précision qui paraissait encore inaccessible dans une période récente. Dans le même temps, les nécessités de la surveillance de ces territoires imposent un suivi temporel qui ne peut être obtenu que par des systèmes d'observation à grand champ ou géostationnaires.

Or, les capteurs embarqués à bord des satellites actuels ne peuvent fournir, pour des raisons technologiques, des images ayant à la fois de bonnes résolutions spatiales et temporelles. Pour proposer des solutions permettant de contourner cette difficulté, diverses approches d'exploitation des données se sont développées. Parmi celles-ci, les méthodes de fusion d'images font actuellement l'objet de nombreux travaux (Aiazzi et al, 1999 ; Ranchin et al., 2001 ; Diemer and Hill, 2000 ; Cornet et al, 2001 ; Laporterie-Déjean, 2003 pour une synthèse). Dans cette perspective, il s'agit de combiner l'information provenant de capteurs à haute résolution spatiale et à haute fréquence temporelle, mais à résolution spatiale grossière. L'enjeu est donc important puisque le but est de construire une image virtuelle contenant à la fois la haute résolution spatiale et la haute fréquence temporelle.

Les capteurs satellites utilisables pour ce type d'étude sont de deux catégories : d'une part, les capteurs multispectraux de haute résolution spatiale délivrent des images à pixels de 20 m environ avec une fréquence temporelle d'acquisition mensuelle en moyenne ; d'autre part, les capteurs grand champ, à faible résolution spatiale (1 km environ) permettent d'acquérir des images quotidiennement en la plupart des points du globe.

Dans ces conditions, la surveillance a dû se limiter à exploiter l'information de ces pixels, appelés pixels mixtes, dont la faible résolution spatiale fait que plusieurs objets contribuent en mélange à la réponse obtenue par le capteur. Actuellement, les stratégies les plus utilisées pour obtenir, par des moyens satellites, des informations de surveillance s'appuient sur le principe de la désagrégation de ces pixels mixtes. Schématiquement, celle-ci peut s'effectuer spatialement (Puyou-Lascassies et al, 1994 ; Faivre and Fisher, 1997 ; Cherchali et al., 2000) ou spectralement (Adams and Adams, 1984 ; Adams et al., 1995 ; Hu et al., 1999).

Dans cet article, on propose une méthode de fusion de ces deux types d'images illustrée par son application sur un jeu d'images acquises sur la Roumanie. Son principe est celui de la pyramide morphologique (Flouzat et al., 2001 ; Laporterie et Flouzat, 2003a) que l'on étend ici pour la première fois à une série temporelle d'images. Après l'évaluation de la qualité des résultats, on montre ainsi la possibilité d'obtenir la signature temporelle d'un pixel à haute résolution spatiale à partir d'un exemple de données du capteur HRVIR de SPOT 4. La réalisation de cette fusion impose néanmoins deux contraintes importantes pour la qualité des données fusionnées. Tout d'abord, les images doivent couvrir la même zone géographique et doivent être parfaitement recalées ; ensuite, la bande spectrale des deux types d'images doit être la même, sinon, une adaptation doit être réalisée entre les deux images.

La partie 2 décrit le principe de la pyramide morphologique, base du processus de fusion et les raisons de son choix, tandis que la partie 3 décrit le principe de la fusion temporelle. La partie 4, à partir d'un exemple de données du capteur HRVIR de SPOT 4, évalue les capacités de cette méthode de fusion. La cinquième partie conclut sur les avantages et les inconvénients d'un tel type de fusion.

1.2 Les images satellites

Les images satellites à haute résolution spatiale (20 m environ) permettent de distinguer, dans un contexte agricole, les champs, les forêts, les fleuves. Elles permettent donc de percevoir les principaux éléments constitutifs d'un paysage.

Les images satellites à basse résolution spatiale (1 km environ) sont bien évidemment beaucoup moins précises sur le plan de la perception et ne permettent donc de distinguer que l'aspect dominant du paysage tel qu'il est synthétisé dans la tâche élémentaire représentée par le pixel : cela correspond à la réflectance globale, intégrée sur une zone donnée de 1 km * 1 km.

De plus, compte tenu de la fauchée du capteur kilométrique (par exemple, 2000 km dans le cas du capteur VEGETATION sur SPOT 4 et 5), les images ayant une basse résolution spatiale permettent de réaliser un suivi quasi journalier de ces zones : l'évolution des surfaces observées dans le temps est ainsi plus précise. Par contre, ce suivi n'est pas réalisable avec les images ayant une haute résolution spatiale qui ne permettent d'obtenir que quatre ou cinq images par an.

Parallèlement, les images à haute résolution spatiale sont donc indispensables pour percevoir et surtout analyser les caractéristiques propres à chaque objet identifié. Afin de bénéficier des avantages des deux types d'imagerie, la méthode de fusion que l'on décrit ici présente les propriétés de :

– conserver totalement les détails spatiaux des images à haute résolution ;

– apporter une meilleure la précision temporelle dans les images synthétisées à haute résolution spatiale.

Les hypothèses que l'on fait sur l'évolution temporelle des paysages sont les suivantes :

1. d'une image haute résolution à la suivante (dans le temps), les variabilités spatiales perceptibles sont stables (frontières des champs, routes, fleuves, …) ;

2. les éléments changeant sont les éléments de réflectance des objets (évolution des cultures par exemple) qui sont perceptibles grâce à la répétitivité des images à basse résolution spatiale.

Afin de remplir ces conditions et en tenant compte des hypothèses faites, nous avons choisi d'utiliser une méthode basée sur la pyramide morphologique. Elle est issue de la combinaison de la théorie des algorithmes pyramidaux avec celle de la morphologie mathématique et plus particulièrement celle du filtrage morphologique. En effet, la méthode de fusion utilisée doit décomposer les images à haute résolution en conservant, d'une part, la structure géométrique, les transitions et les contours des objets et, d'autre part, tenant compte de la non équidistribution des hautes fréquences spatiales de part et d'autre du plan de filtrage. Cela correspond tout à fait aux propriétés des outils de morphologie mathématique et a conduit au choix de fusion que nous avons réalisé.

2. LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE

Compte tenu de ces spécificités, la pyramide morphologique est conçue selon le schéma général suivant :

2.1 Schéma général de décomposition

Soient I_0 l'image de départ (de taille $n*m$, en ligne et en colonne) et i l'indice de décomposition de la pyramide à $N+1$ étages ($i=0,\ldots,N$). Cette décomposition est formée de quatre étapes distinctes (*Cf.* figure 1, Laporterie-Déjean et Flouzat, 2003a). À chaque étage i de la décomposition, on réalise :

– un filtrage morphologique passe-bas :

$IF_i = FM_{B_i,i}(I_i)$ où IF_i représente l'image filtrée de I_i, B_i est l'élément structurant au niveau i associé au filtre FM. IF_i est donc de taille $n*m$. Les filtres morphologiques mettent en évidence les éléments de taille inférieure ou égale à l'élément structurant choisi, en fonction de leur contraste avec l'environnement. Les ouvertures (resp. les fermetures) mettent ainsi en évidence les éléments clairs (resp. foncés). Ces objets contrastés avec leur environnement et de forme et taille définies par l'élément structurant sont extraits par des filtres combinant ouvertures et fermetures. Ce traitement non linéaire est ainsi mieux adapté aux contraintes évoquées au paragraphe précédent que ne le sont les ondelettes ou les autres décompositions pyramidales utilisant des filtres linéaires.

– le calcul de la différence entre « Image Initiale » et « Image filtrée », par l'intermédiaire de deux images :

$$\begin{cases} D_{sup,filtre,i} = \mathbf{sup}(I_i, IF_i) - IF_i \\ D_{inf,filtre,i} = \mathbf{sup}(I_i, IF_i) - I_i \end{cases}$$

L'opérateur « sup », union des deux fonctions images, est traduit, en discret, par la conservation, pixel à pixel, de la valeur maximale entre les deux images. Ces deux images sont de taille $n*m$. Sur les pixels où $I_i \geq IF_i$, $D_{inf,filtre,i} = \mathbf{0}$ et $D_{sup,filtre,i}$ représentent la diminution du compte numérique dû au filtrage. Au contraire, sur les pixels où $IF_i > I_i$, $D_{sup,filtre,i} = \mathbf{0}$ et $D_{inf,filtre,i}$ représentent l'augmentation du compte numérique dû au filtrage. Les comptes numériques non nuls sur $D_{sup,filtre,i}$ montrent donc les pixels où le filtrage a abaissé la valeur ; $D_{sup,filtre,i}$ met ainsi en évidence les éléments clairs par rapport à l'environnement ; au contraire les comptes numériques non nuls sur $D_{inf,filtre,i}$ montrent les pixels où le filtrage a augmenté la valeur ; $D_{inf,filtre,i}$ met ainsi en évidence les éléments sombres par rapport à l'environnement.

– un échantillonnage qui réduit la taille et la résolution de l'image. I_{i+1} est de taille $n' < n * m' < m$. Dans le cas général, cet échantillon peut être quelconque.

$$IF_i \xrightarrow{Échantillonnage} I_{i+1}$$

– le calcul de la différence entre « Image avant échantillonnage » et « Image après échantillonnage ». Il se fait en deux étapes :

1) Interpolation $I_{i+1} \xrightarrow{Interpolation} I_{i+1,\text{int.}}$

L'interpolation généralement choisie est une interpolation bilinéaire. $I_{i+1,\text{int.}}$ est de taille $n*m$.

puis

2) Calcul de la différence

$$\begin{cases} D_{sup,échantillonnage,i} = \mathbf{sup}(IF_i, I_{i+1,\text{int.}}) - IF_i \\ D_{inf,échantillonnage,i} = \mathbf{sup}(IF_i, I_{i+1,\text{int.}}) - I_{i+1,\text{int.}} \end{cases}$$

Ces deux images sont de taille $n*m$. Elles représentent l'information qui a été perdue lors de l'opération d'échantillonnage. Cependant, ces opérations se situant après celle de filtrage, l'information contenue dans ces images est très faible. L'influence des algorithmes d'échantillonnage et d'interpolation est ainsi faible sur les étapes ultérieures de décomposition.

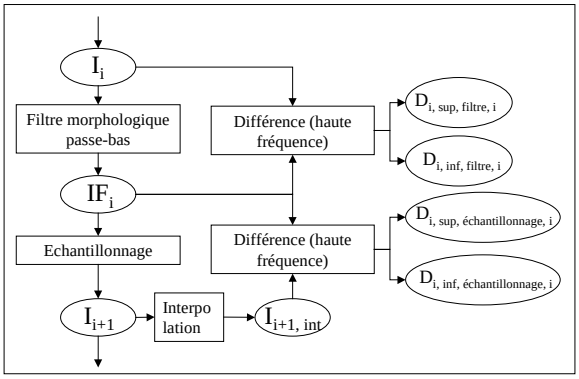


FIGURE 1 Schéma de décomposition de l'étage i par la pyramide morphologique. *Decomposition sketch of the i stage using the morphological pyramid technique.*

2.1 Schéma général de reconstruction

Elle se décompose en deux opérations (*Cf.* figure 2) :

– sur-échantillonnage,

$$IR_{i+1} \xrightarrow{Interpolation} IRF_i,\ i \in [\mathbf{0}, N-\mathbf{1}]$$

IRF_i représentent l'Image Reconstruite Filtrée au niveau i. L'image ainsi reconstruite est à la résolution de l'étage i, mais les informations qui ont été supprimées par filtrage et échantillonnage ne sont pas encore ré-injectées dans l'image. IRF_i est donc une « image filtrée ».

– ajout de la différence calculée lors de la décomposition (étapes 2. et 4. de la décomposition)
Si

$D_i = D_{sup,filtre,i} - D_{\inf,filtre,i} + D_{sup,échantillonnage,I} - D_{inf,échantillonnage}$

alors

$$IR_i = IRF_i + D_i, \ \forall\, i \in [\mathbf{0},N]$$

IR_i représente l'image reconstruite au niveau i.

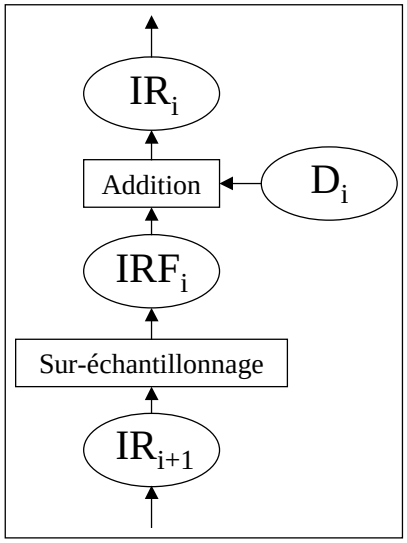


FIGURE 2 Schéma de reconstruction de l'étage i par la pyramide morphologique. *Reconstruction sketch of the i stage using the morphological pyramid technique.*

3. LE PRINCIPE DE LA FUSION TEMPORELLE D'IMAGES MULTIRÉSOLUTIONS

La pyramide peut ainsi être utilisée pour combiner des images de résolutions spatiales différentes, mais de longueurs d'onde identiques.

Appelons par exemple *HRI* l'image haute résolution et *CRI* l'image basse résolution spatiale, couvrant la même zone géographique. La fusion s'effectue de la façon suivante (Laporterie-Déjean et Flouzat, 2003b) :

– L'image *HRI* est décomposée par la pyramide morphologique jusqu'à la résolution de l'image C*RI*. L'échantillonnage et le nombre d'étages réalisés sont ajustés à cette fin. L'image I_N , obtenue à la dernière étape de la décomposition, a alors la même taille et la même résolution que l'image C*RI*.

– Dans les images issues de la pyramide, I_N est remplacée par C*RI*.

– La reconstruction est alors effectuée comme expliqué dans la section précédente. La première étape de la reconstruction s'effectue par $CRI \xrightarrow{Interpolation} IRF_{N-1}$. Le reste de la reconstruction s'effectue de façon identique.

Dans ce processus, on ne garde que les images de détails de l'image à haute résolution spatiale, tandis que l'on garde l'intégralité de l'image à basse résolution spatiale (*Cf.* figure 3).

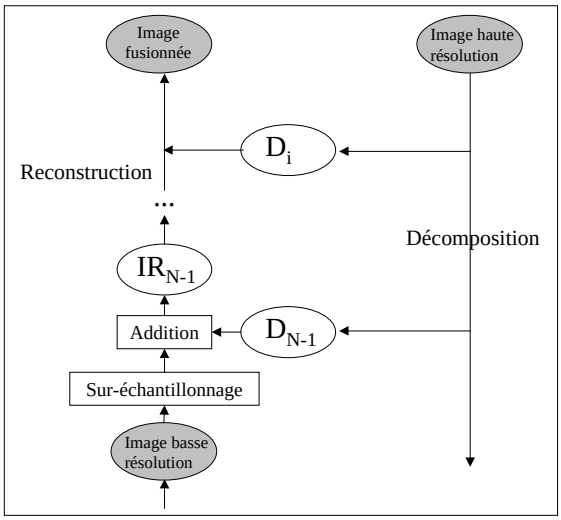


FIGURE 3 Principe de la fusion d'images entre une image à haute résolution spatiale et une image à basse résolution spatiale par la pyramide morphologique. *Principle of image fusion between a high spatial resolution image and a low spatial resolution image using the morphological pyramid technique.*

Il n'y a pas de contrainte de temps entre les deux images. Il est ainsi possible de combiner des images de dates différentes. En particulier, la fusion entre une série temporelle d'images acquises par un capteur grand champ et quelques images multispectrales acquises dans le même laps de temps est réalisable.

Lors d'un tel processus, une image de synthèse est créée pour chaque image à basse résolution spatiale. Cette méthode permet de fusionner des images de résolutions différentes, quel que soit leur nombre. Les images à haute résolution spatiale apportent les informations haute fréquence par l'intermédiaire des images de détails. Le fond est apporté par les images à basse résolution spatiale.

Soient HRI_k, $k = 1 \ldots p$ les images provenant du capteur à la haute résolution *HR*. Soient CRI_l, $l=1 \ldots q$ les images acquises par le capteur grand champ à la basse résolution spatiale *CR*. La résolution temporelle du capteur grand champ étant supérieure à celle du capteur multispectral, on a $q>p$.

– Chaque image HRI_k est décomposée jusqu'à la résolution *CR*. Ainsi, pour chaque HRI_k, on obtient des détails, appelés dans la suite $D_{sup,filtre,i,k}$, $D_{inf,filtre,i,k}$, $D_{sup,échantillonnage,i,k}$ et $D_{inf,échantillonnage,i,k}$ où *i* correspond à l'indice de niveau dans la pyramide et *k* à l'indice de date d'acquisition des images.

– Le processus de fusion est appliqué séparément sur chaque image CRI_l. Il est donc répété *q* fois.

Deux cas sont alors possibles :

– L'image CRI_l est entourée dans le temps par deux images, HRI_k et HRI_{k+1} (*Cf.* figure 4). Des images de détails différentes vont être utilisées lors du processus de reconstruction, en fonction de la proximité de la date *l* avec les dates *k* et *k+1*.

Supposons qu'il y ait *r* images à la basse résolution, de la date *1* à la date *r* (CRI_1 à CRI_r) entrelacées entre HRI_k et HRI_{k+1}. Supposons également que ces images soient acquises à des intervalles réguliers (tous les jours ou tous les dix jours par exemple).

r images de synthèse sont donc créées, SI_l, *l=1 ... r*, à partir de HRI_k, HRI_{k+1} et les images CRI_l correspondantes.

Soit $\{D_{i,k}\}$ (resp. $\{D_{i,k+1}\}$) l'ensemble des détails issus de l'image HRI_k (resp. HRI_{k+1}). Soit $\{D_{i,l}\}$ l'ensemble des détails qui seront injectés lors de la reconstruction de l'image CRI_l. Alors, selon la figure 4, on a

$$\{D_{i,l}\}_{i=0...N} = \frac{r+1-l}{r+1}\{D_{i,k}\}_{i=1...N} + \frac{l}{r+1}\{D_{i,k+1}\}_{i=0...N}$$

– L'image CRI_l n'est encadrée que par une image HRI_k. Dans ce cas, tous les détails $\{D_{i,k}\}$, *i=0...N* sont entièrement injectés lors du processus de fusion.

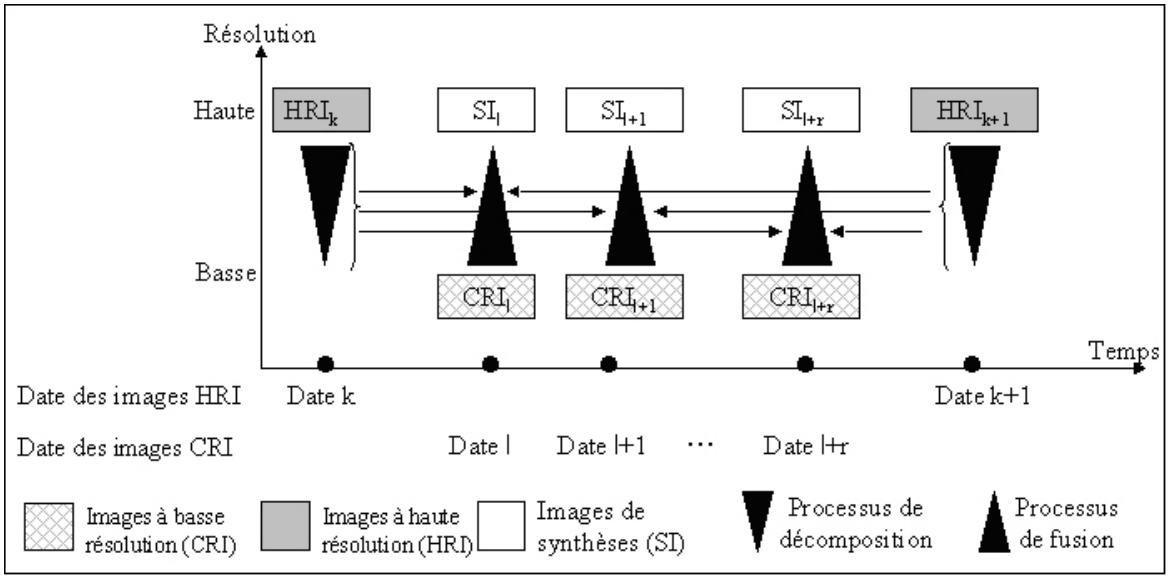


FIGURE 4 Le principe de la fusion temporelle par la pyramide morphologique. *The principle of temporal fusion using a morphological pyramid.*

Les différentes études (Laporterie et Flouzat, 2003a) déjà réalisées ont montré que les paramètres les plus adaptés dans le cadre de la fusion et plus particulièrement de la fusion temporelle d'images sont ceux réalisant un filtrage morphologique assez faible. Cela revient à prendre un pas d'échantillonnage le plus petit possible et donc un rapport 2 entre chaque étage de la pyramide, si le rapport de résolution entre les images à haute et à basse résolutions spatiales le permet. L'élément structurant est carré, de taille 3*3 : $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Le filtre choisi est la demi-somme (ouverture + fermeture).

La réalisation de cette fusion impose deux contraintes importantes pour la qualité des données fusionnées :

– les images doivent couvrir la même zone géographique et doivent être parfaitement recalées ;

– la bande spectrale des deux types d'images doit être la même, sinon, une adaptation doit être réalisée entre les deux images.

Il apparaît donc que la qualité du résultat d'une telle fusion va dépendre fortement de la qualité géométrique et radiométrique des données d'entrée.

4. ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE LA FUSION

4.1 Le jeu de données

Des images du capteur HRVIR de SPOT 4 sont disponibles sur la base de données ADAM (© CNES – *http://medias.obs-mip.fr/adam/*) et sont ouvertes à tous les scientifiques dans un but de recherche[1]. Ces images couvrent une zone de 40 par 60 km aux alentours de la ville de Fundulea en Roumanie. Grâce aux acquisitions systématiques et à la programmation de SPOT 4 spécifiquement sur cette zone du globe, on dispose de 19 images, peu nuageuses, d'octobre 2000 à juillet 2001 (14 novembre 2000, 13 décembre 2000, 24 décembre 2000, 10 janvier 2001, 10 février 2001, 08 mars 2001, 13 mars 2001, 17 mars 2001, 08 avril 2001, 12 avril 2001, 19 avril 2001, 03 mai 2001, 09 mai 2001, 24 mai 2001, 13 juin 2001, 24 juin 2001, 29 juin 2001, 05 juillet 2001 et 26 juillet 2001), à la résolution de 20 m.

Afin de valider correctement le principe de la fusion temporelle, on simule les observations à la résolution de 1 km, afin de disposer d'une série temporelle de données à basse résolution spatiale répondant aux contraintes ci-dessus. Pour cela, chacune des 19 images ayant la résolution de 20 m dans la série "Fundulea" est dégradée jusqu'à une résolution de 1 km avec un processus de convolution destiné à produire une image voisine de ce qu'auraient été des acquisitions réalisées par l'instrument VEGETATION de SPOT4.

Ensuite, la fusion temporelle est réalisée avec l'ensemble des données kilométriques ainsi obtenues et avec cinq images HRVIR (24 décembre, 10 février, 12 avril, 24 mai, 05 juillet) (*Cf.* figure 5). Ce choix de 5 images vient du postulat suivant : compte tenu des conditions de répétitivité réalistes en fonction des couvertures nuageuses, l'acquisition d'un petit nombre d'images HRVIR doit être possible pratiquement en tout point du globe. Une telle simulation semble donc réaliste du point de vue de sa représentativité. Enfin, cette approche permet de s'affranchir complètement des problèmes de recalages géométrique et radiométrique des jeux de données imposées par les contraintes définies.

Les paramètres pris pour réaliser la fusion par pyramide morphologique sont une décomposition de 5 étages, avec un rapport de résolution 2 entre chaque étage. La résolution des images de départ doit donc être de 31,25 m pour parvenir à la résolution kilométrique. Les images du capteur HRVIR sont donc dégradées à cette résolution avant le processus de fusion. On obtient ainsi 19 images fusionnées constituant un jeu de données qui présentent une résolution spatiale de 31,25 m et une résolution temporelle variable allant de quelques jours à un mois selon la position dans la série.

4.2 Évaluation des résultats de fusion

Pour évaluer la qualité des images composées, nous exploitons trois jeux de données :

– jeu n°1 : les 19 images HRVIR de SPOT 4, dégradées à 31,25 m constituent le premier jeu de données et représentent la référence contenant la mesure physique acquise ;

– jeu n°2 : les 19 images fusionnées constituent la série temporelle que l'on souhaite évaluer ;

– jeu n°3 : les 19 images de résolution kilométrique provenant des images HRVIR originales.

L'évaluation se compose de deux parties : *1)* comparaison visuelle des images de référence et des images fusionnées sur de petites régions où la perception visuelle peut s'appliquer avec acuité ; *2)* comparaison des statistiques du jeu de référence et du jeu fusionné.

À partir des jeux n°1 et n°2, on extrait des zones de 1 km par 1 km qui correspondent à l'emprise d'un pixel kilométrique. Cela correspond à extraire un pixel précis sur le jeu n°3. Des exemples de zones extraites sont montrés sur la figure 6 :

– l'extrait 1 correspond à la zone délimitée par les deux pixels suivants : coin haut / gauche (ligne 897, colonne 353), coin bas / droit (ligne 928, colonne 384), le pixel du jeu n°3 correspondant a pour coordonnées (29, 12) ;

– l'extrait 2 correspond à la zone délimitée par les deux pixels suivants : coin haut / gauche (ligne 673, colonne 1185), coin bas / droit (ligne 704, colonne 1216), le pixel du jeu n°3 correspondant a pour coordonnées (22, 38) ;

– l'extrait 3 correspond à la zone délimitée par les deux pixels suivants : coin haut / gauche (ligne 193, colonne 961), coin bas / droit (ligne 224, colonne 992), le pixel du jeu n°3 correspondant a pour coordonnées (7, 31) ;

[1] Pour utiliser ces données, il vous faut constituer un dossier décrivant votre projet de recherche et vous inscrire directement en ligne sur le site.

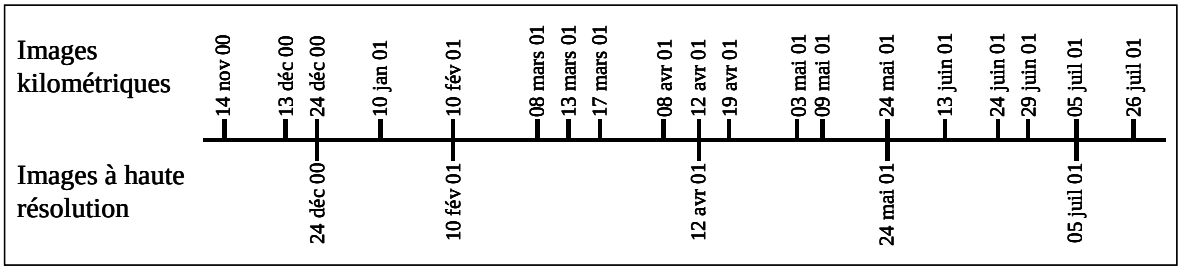


FIGURE 5 Les dates correspondant au jeu de données. *The dates corresponding to the dataset.*

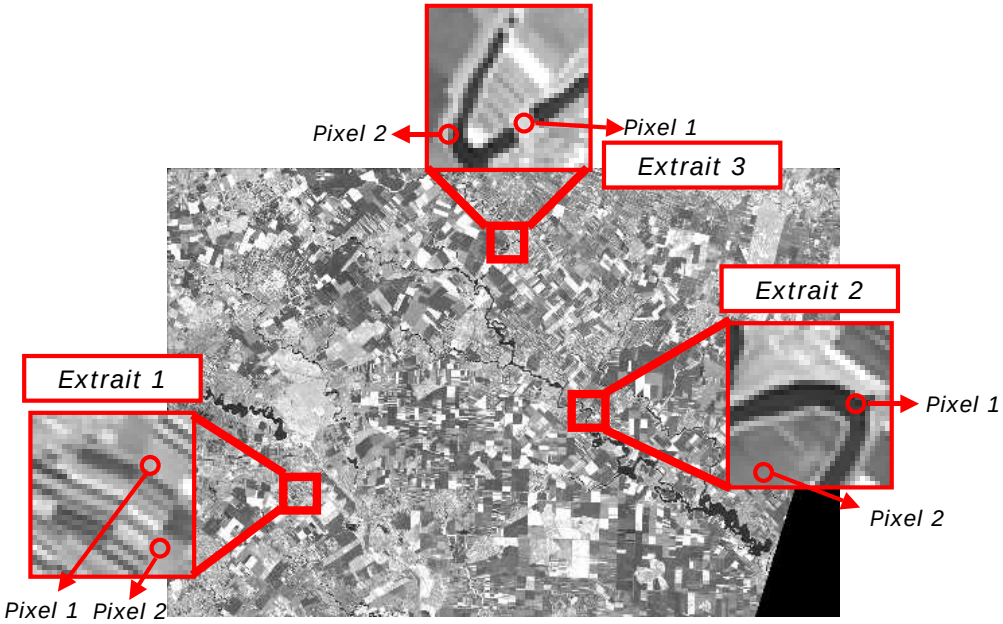


FIGURE 6 Image SPOT 4 HRVIR du 24 juin 2001 et exemples d'extraits correspondant à l'emprise d'une image kilométrique. *SPOT 4 HRVIR image of 24 June 2001 and examples of extracts corresponding to the kilometric image swath.*

Ainsi, chacun des extraits est disponible sur les 19 dates, en images de référence, en images fusionnées et correspond à un seul pixel kilométrique. Cela nous permet d'évaluer la méthode de fusion sur des zones précises et nous permet d'analyser les résultats avec la capacité de les relier à la visualisation.

4.2.1 Évaluation visuelle

Visuellement, l'évolution temporelle de l'extrait 2 sur le jeu n°1 est montrée par la figure 7, celle sur le jeu n°2 sur la figure 8. On constate que les deux séries temporelles sont proches et que les évolutions sont bien retranscrites lors de la fusion. On peut noter cependant des changements plus marqués sur les images du 09 mai et du 26 juillet du jeu de référence que l'on ne retrouvent pas sur les images fusionnées.

– La zone sombre sur l'image du 9 mai correspond à l'ombre d'un nuage présent sur la zone ce jour (cf. figure 9). Les images à haute résolution spatiale utilisées pour faire la fusion à cette date sont datées du 12 avril et du 24 mai. Aucun nuage n'est présent à ces deux dates sur cette zone : il est donc normal, et positif, que la fusion ne le fasse pas apparaître.

– La zone sombre qui apparaît sur l'image du 26 juillet correspond à un changement de l'état cultural, qui apparaît après qu'ait été acquise la dernière image HRVIR utilisée dans la fusion (en date du 5 juillet) : il est normal, là aussi, que la mise à jour ne soit pas faite lors de la fusion.

Mis à part ces deux cas, on constate que la série fusionnée est très proche visuellement de la série de référence.

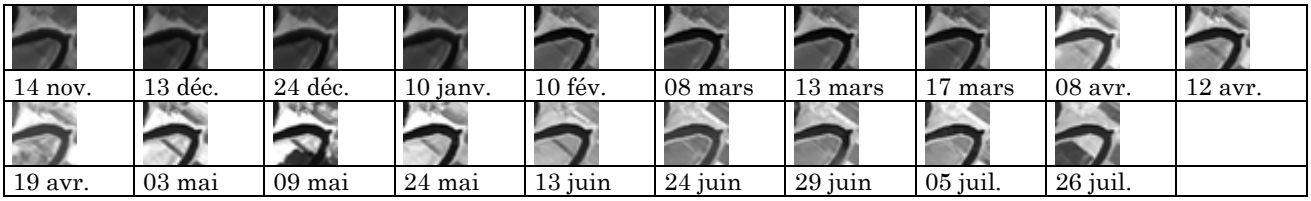


FIGURE 7 Visualisation de l'extrait n°2 de la série temporelle d'images HRVIR dans le canal proche infrarouge. *Visualisation of extract n°2 of the HRVIR image temporal series in the near infrared channel.*

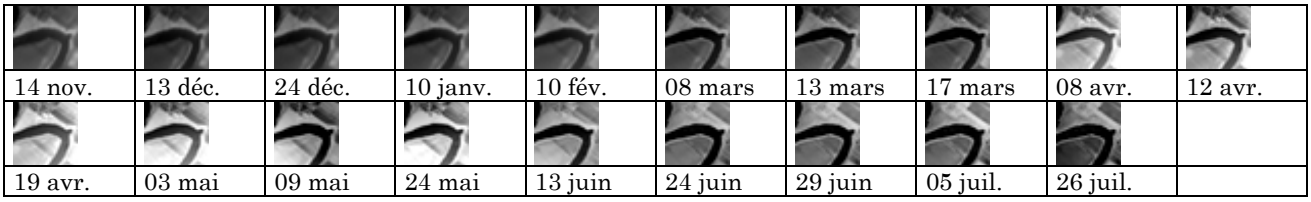


FIGURE 8 Visualisation de l'extrait n°2 de la série temporelle d'images fusionnées dans canal proche infrarouge. *Visualisation of extract n°2 of the fused image temporal series in the near infrared channel.*



FIGURE 9 Visualisation en fausses couleurs de l'ombre du nuage visible sur l'extrait 2 des images HRVIR en date du 9 mai. *Visualisation in false color of the cloud shadow visible on extract n°2 of the HRVIR images of May 9.*

4.2.2 Évaluation statistique

Dans cette seconde partie de l'évaluation, nous contrôlons sur la zone entière de l'image l'erreur relative sur la moyenne des images du jeu n°1 et celles du jeu n°2 (tableau 1). Les calculs sont réalisés pour toutes les longueurs d'onde et toutes les dates. Les valeurs sont toutes faibles à l'exception des résultats en date du 13 décembre 2001. La donnée HRVIR à cette date est particulièrement sombre et contraste fortement avec les données HRVIR du 14 novembre et du 24 décembre (date utilisée lors de la fusion). C'est cette raison qui explique cette forte différence. Il est donc sûrement plus judicieux de considérer que l'image fusionnée est plus proche de la réalité des réflectances que l'image HRVIR du 13 décembre. Nous retrouverons ce résultat sur les courbes d'évolution temporelle du paragraphe 4.3.

Ce résultat donne une indication globale très intéressante, mais peut masquer des effets locaux de tendances inverses.

Pour s'affranchir de cette limitation, on réalise la suite de l'évaluation statistique sur les extraits. Cela permet de comparer les résultats avec les remarques visuelles formulées au paragraphe précédent. Par exemple, on sait que les résultats sur l'extrait 2 à la date du 9 mai ne seront pas bons en raison de la présence de l'ombre du nuage dans l'image de référence et que les résultats du 13 décembre ne le seront pas non plus.

Il convient de souligner à nouveau que la fusion d'images s'opère par intégration des détails provenant des images à haute résolution dans les images à basse résolution aux différentes dates concernées. Par conséquent, l'évaluation porte sur des différences entre fonctions images (jeu n°x, jeu n°y) et la corrélation d'une fonction image à la date t_1 avec une fonction image à la date t_2 est nécessairement incluse dans ce processus du calcul élémentaire de différence.

TABLEAU 1 Erreur relative sur la moyenne entre les données du jeu n°1 et du jeu n°2, pour toutes les dates et toutes les longueurs d'onde. *Relative error on the mean between the n°1 and n°2 datasets, for all the dates and all the wavelengths.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
b0	-0,04	-0,63	-0,10	-0,06	-0,07	-0,03	-0,05	-0,04	0,05	-0,05
b2	-0,07	-0,25	-0,10	-0,06	-0,08	-0,04	-0,06	-0,05	0,03	-0,07
b3	-0,12	-0,17	-0,17	-0,10	-0,13	-0,07	-0,11	-0,07	-0,01	-0,06
b4	-0,05	-0,08	-0,07	-0,03	-0,06	-0,02	-0,04	-0,02	-0,01	-0,05

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
b0	0,02	-0,03	-0,01	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,02
b2	-0,01	-0,06	-0,03	-0,07	-0,02	-0,01	-0,01	0,01	0,04
b3	0,00	-0,02	0,00	-0,04	-0,02	-0,01	0,00	0,00	-0,01
b4	-0,02	-0,04	-0,02	-0,06	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03

Les tableaux 2 à 5 montrent les résultats de l'erreur relative sur la moyenne entre les images fusionnées et de référence et dans les quatre longueurs d'onde ; les tableaux 6 à 9 montrent l'erreur relative sur l'écart type dans les mêmes conditions.

D'une façon générale, pour tous les paramètres statistiques, il est intéressant de constater que, si, comme on pouvait s'y attendre, les images fusionnées aux dates où une image HRVIR est injectée dans le processus de fusion fournissent en moyenne de bons résultats, la proximité en date des autres images fusionnées avec les images HRVIR injectées ne semble pas un critère pour obtenir un bon résultat. Cela signifie que les écarts de temps entre les images haute résolution utilisés dans le processus de fusion sont adaptés. Par exemple, un écart de deux mois, entre le 10 février et le 12 avril, permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

Les résultats obtenus à partir de l'écart type (tableaux 6 à 9) sont plus resserrés que ceux obtenus à partir de la moyenne (tableaux 2 à 5). Cela signifie que les différences les plus importantes ne proviennent pas de la forme de l'histogramme et donc de la variabilité spatiale des données, mais d'un décalage dans les radiométries. Cela est très probablement dû à la présence de nuages ou de brume sur les différents extraits.

TABLEAU 2 Erreur relative sur la moyenne entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b0. *Table 2 : Relative error on the mean between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b0.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	-0,05	-1,64	-0,16	-0,12	-0,10	-0,12	-0,06	-0,13	0,06	-0,08
Extrait2	-0,09	-0,46	-0,08	-0,02	-0,04	0,10	0,07	0,11	0,06	0,04
Extrait3	-0,18	-1,29	-0,36	-0,26	-0,19	-0,14	-0,11	-0,13	0,06	-0,06

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,04	-0,06	-0,09	-0,06	0,01	-0,05	0,00	0,00	0,01
Extrait2	0,04	0,06	0,22	0,16	0,06	0,04	-0,01	-0,01	0,01
Extrait3	0,06	-0,01	-0,08	-0,10	-0,06	-0,01	-0,04	-0,01	0,02

TABLEAU 3 Erreur relative sur la moyenne entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b2. *Relative error on the mean between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b2.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	-0,10	-0,46	-0,18	-0,11	-0,12	-0,19	-0,12	-0,22	0,08	-0,14
Extrait2	-0,07	-0,10	-0,05	0,03	0,03	0,19	0,13	0,21	0,12	0,13
Extrait3	-0,17	-0,56	-0,26	-0,19	-0,20	-0,06	-0,11	-0,04	0,06	0,05

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,18	-0,14	-0,17	-0,13	-0,06	-0,17	-0,17	-0,11	-0,04
Extrait2	0,11	0,19	0,40	0,29	0,08	-0,01	-0,18	-0,03	-0,01
Extrait3	0,00	0,01	0,05	-0,02	-0,10	0,00	-0,09	-0,16	-0,09

Tableau 4 Erreur relative sur la moyenne entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b3. *Relative error on the mean between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b3.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	-0,16	-0,31	-0,22	-0,16	-0,19	-0,14	-0,14	-0,07	-0,04	0,00
Extrait2	0,00	-0,04	-0,05	0,01	-0,02	0,12	0,10	0,14	0,08	0,04
Extrait3	-0,48	-0,62	-0,60	-0,48	-0,42	-0,32	-0,36	-0,37	-0,20	-0,36

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	0,09	0,04	0,09	0,03	-0,01	-0,02	0,09	-0,03	-0,06
Extrait2	-0,01	-0,01	0,20	0,01	0,15	0,27	0,24	0,30	0,42
Extrait3	-0,20	-0,18	-0,19	-0,20	-0,10	0,09	0,04	0,07	-0,01

TABLEAU 5 Erreur relative sur la moyenne l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b4. *Relative error on the mean between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b4.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	-0,07	-0,06	-0,06	-0,02	-0,06	-0,10	-0,09	-0,10	-0,07	-0,12
Extrait2	0,06	0,10	0,11	0,16	0,12	0,24	0,19	0,26	0,22	0,21
Extrait3	-0,16	-0,24	-0,26	-0,14	-0,18	-0,07	-0,09	-0,07	0,02	0,01

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,11	-0,19	-0,18	-0,18	-0,18	-0,13	-0,12	-0,14	-0,21
Extrait2	0,22	0,26	0,49	0,32	0,32	0,26	0,15	0,16	0,18
Extrait3	0,09	0,13	0,08	-0,04	-0,06	-0,04	-0,15	-0,18	-0,19

TABLEAU 6 Erreur relative sur l'écart type entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b0. *Relative error on the standard error between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b0.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	0,59	0,12	0,05	-0,24	0,10	-0,27	0,39	-0,15	#NOM?	0,31
Extrait2	0,10	-0,08	-0,01	0,13	0,03	0,09	0,03	-0,14	-0,89	-0,18
Extrait3	0,30	-0,28	-0,10	0,11	0,06	0,09	0,12	-0,25	-0,50	0,04

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,35	0,24	0,39	0,25	-0,48	0,26	0,22	0,69	-6,41
Extrait2	-0,26	-0,46	0,28	-0,24	-0,07	0,32	0,48	0,26	-9,50
Extrait3	-0,61	-0,08	0,03	0,00	0,07	0,20	0,34	0,26	-1,57

TABLEAU 7 Erreur relative sur l'écart type entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b2. *Relative error on the standard error between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b2.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	0,30	-0,06	-0,09	-0,35	0,07	-0,61	0,19	-0,22	-3,28	0,30
Extrait2	0,08	-0,12	0,01	0,12	0,02	0,02	-0,03	-0,37	0,03	-0,10
Extrait3	0,03	-0,09	-0,10	0,14	-0,02	0,00	-0,02	-0,36	-0,01	-0,09

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,38	0,19	0,35	0,19	0,09	0,04	-0,13	0,39	0,30
Extrait2	-0,02	-0,24	0,18	-0,33	-0,10	0,02	0,10	-0,01	-0,04
Extrait3	-0,24	-0,02	-0,02	-0,08	-0,20	-0,15	-0,18	0,31	0,33

TABLEAU 8 Erreur relative sur l'écart type entre l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b3. *Relative error on the standard error between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b3.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	0,11	0,05	-0,07	0,00	-0,10	0,13	-0,04	0,07	-0,15	-0,06
Extrait2	0,05	-0,01	-0,02	0,08	-0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	-0,07
Extrait3	0,08	-0,25	-0,22	-0,15	-0,10	-0,08	-0,04	-0,15	0,10	0,04

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	0,27	0,29	0,29	-0,08	-0,21	0,09	0,11	-0,08	0,32
Extrait2	-0,10	0,01	0,15	-0,06	-0,08	-0,08	-0,07	0,05	0,18
Extrait3	0,09	0,09	0,16	0,03	-0,07	-0,09	-0,08	-0,02	-0,05

TABLEAU 9 Erreur relative sur l'écart type l'image de référence et l'image fusionnée, pour toutes les dates et tous les extraits, dans le canal b4. *Relative error on the standard error between the reference image and the fused image, for all the dates and all the extracts, in channel b4.*

	14-nov-00	13-déc-00	24-déc-00	10-janv-01	10-févr-01	08-mars-01	13-mars-01	17-mars-01	08-avr-01	12-avr-01
Extrait1	-0,02	0,16	0,05	0,30	0,05	0,26	-0,17	-0,29	0,28	0,02
Extrait2	0,06	-0,08	0,02	0,08	0,02	0,03	-0,02	0,02	0,03	-0,02
Extrait3	0,13	-0,26	0,03	0,09	0,04	0,04	0,02	-0,12	0,06	-0,01

	19-avr-01	03-mai-01	09-mai-01	24-mai-01	13-juin-01	24-juin-01	29-juin-01	05-juil-01	26-juil-01
Extrait1	-0,88	-0,06	0,19	-0,05	-0,03	0,07	-0,19	0,04	0,30
Extrait2	-0,10	0,00	0,37	0,05	0,05	-0,28	-0,14	-0,03	0,11
Extrait3	-0,10	0,03	-0,03	-0,05	-0,12	-0,28	-0,17	0,02	0,25

5. APPLICATION AU SUIVI TEMPOREL À HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE

Les données fusionnées permettent donc d'accéder à la signature temporelle de tous les pixels à haute résolution. Ainsi, il est intéressant de comparer l'évolution d'un pixel du jeu n°1 à celle d'un pixel du jeu n°2, ainsi qu'à celle du pixel grossier du jeu n°3. Pour cela, on sélectionne plusieurs pixels à haute résolution spatiale à l'intérieur de chaque extrait. La localisation des pixels est montrée sur la figure 6. De façon générale, nous avons choisi des pixels de natures différentes.

– Sur l'extrait n°1, deux pixels représentent deux cultures différentes.

– Sur l'extrait n°2, le pixel n°1 représente une rivière et le pixel n°2 une parcelle agricole.

– Sur l'extrait n°3, les pixels n°1 et n°2 représentent deux zones culturales différentes.

Les courbes d'évolution temporelle des six pixels sont montrées sur les figures 10 à 15. Les figures 10 et 11 montrent l'évolution des pixels 1 et 2 de l'extrait 1. Les courbes des pixels fusionnés et des pixels de référence sont proches dans toutes les longueurs d'onde. On constate que la courbe du pixel kilométrique est également proche des courbes des pixels à haute résolution spatiale de l'image 11. L'évolution du pixel kilométrique est plus éloignée des courbes de la figure 10, notamment dans les canaux proche et moyen infrarouge, ce qui signifie que la culture sous-jacente au pixel 2 est majoritaire dans l'extrait 1. Cela témoigne aussi du fait que les canaux proche et moyen infrarouge caractérisent bien l'état de la végétation.

Les courbes 12 et 13 montrent l'évolution des deux pixels de l'extrait 2. Contrairement à l'exemple précédent, les deux pixels choisis sont de natures différentes : le premier pixel représente une surface en eau, sa réflectance doit donc être faible, notamment dans le canal proche infrarouge ; au contraire, le deuxième pixel représente une zone agricole, sa réflectance sera donc plus importante dans le canal proche infrarouge. Ici aussi, les courbes des pixels fusionnés et de référence sont proches, les courbes du pixel kilométrique semblent mieux suivre l'évolution du pixel 1 ; cela se remarque surtout sur les courbes proche et moyen infrarouge.

Sur la figure 13, on constate que, quelle que soit la longueur d'onde, sur la première partie de la courbe, les évolutions temporelles des pixels de référence et fusionnés sont très proches. Ensuite, à partir du mois d'avril, les différences sont plus marquées, même si les évolutions globales sont correctes. On peut supposer qu'à partir de cette date, les changements dans la végétation sont beaucoup plus rapides et que la fréquence des images à haute résolution spatiale insérées lors de la fusion apporte peu d'information.

Les courbes 14 et 15 montrent l'évolution des deux pixels de l'extrait 3, dans les quatre longueurs d'onde. Là aussi les courbes fusionnées et de référence sont proches. L'évolution des deux pixels est différente, la courbe représentant l'évolution kilométrique est également un

mélange des deux. La rivière présente sur l'image, et donc également sur la réponse de la courbe kilométrique, ne rabaisse pas énormément la réflectance de celui-ci. Sa surface n'est pas suffisante pour avoir une influence majeure.

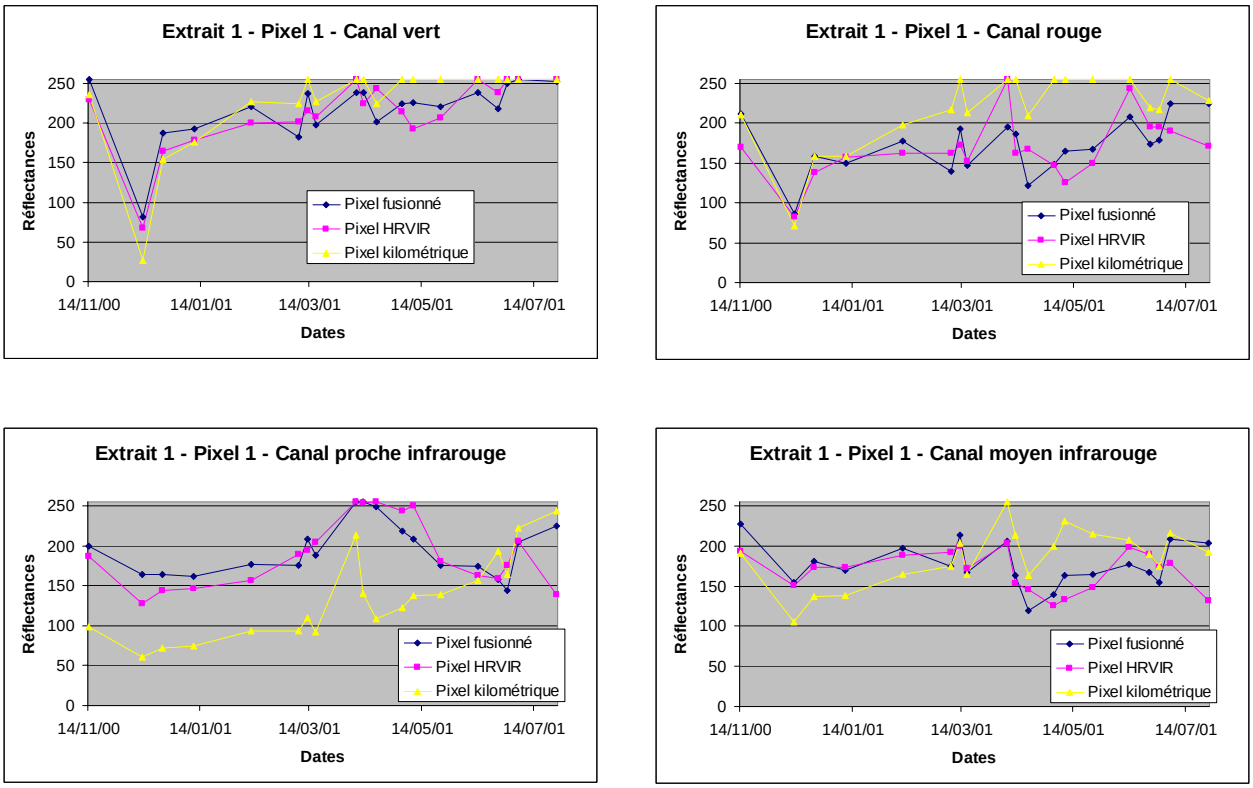


Figure 10 : Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 1 de l'extrait n°1 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 1 of extract n°1 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

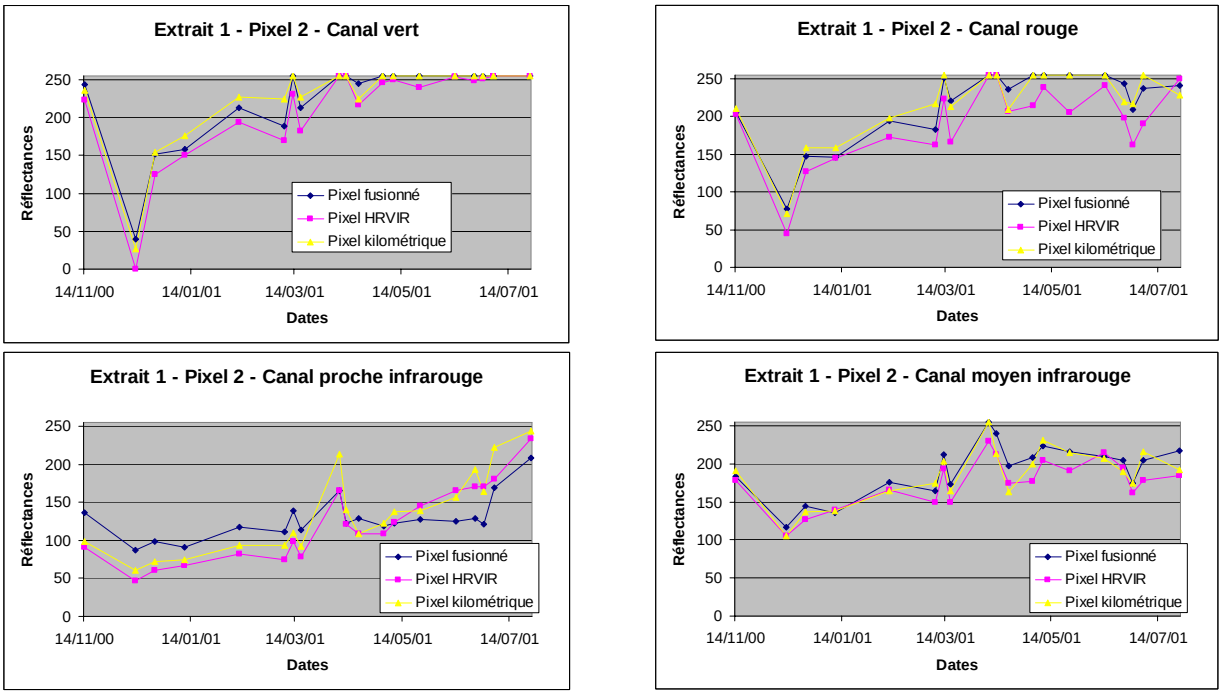


FIGURE 11 : Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 2 de l'extrait n°1 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 2 of extract n°1 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

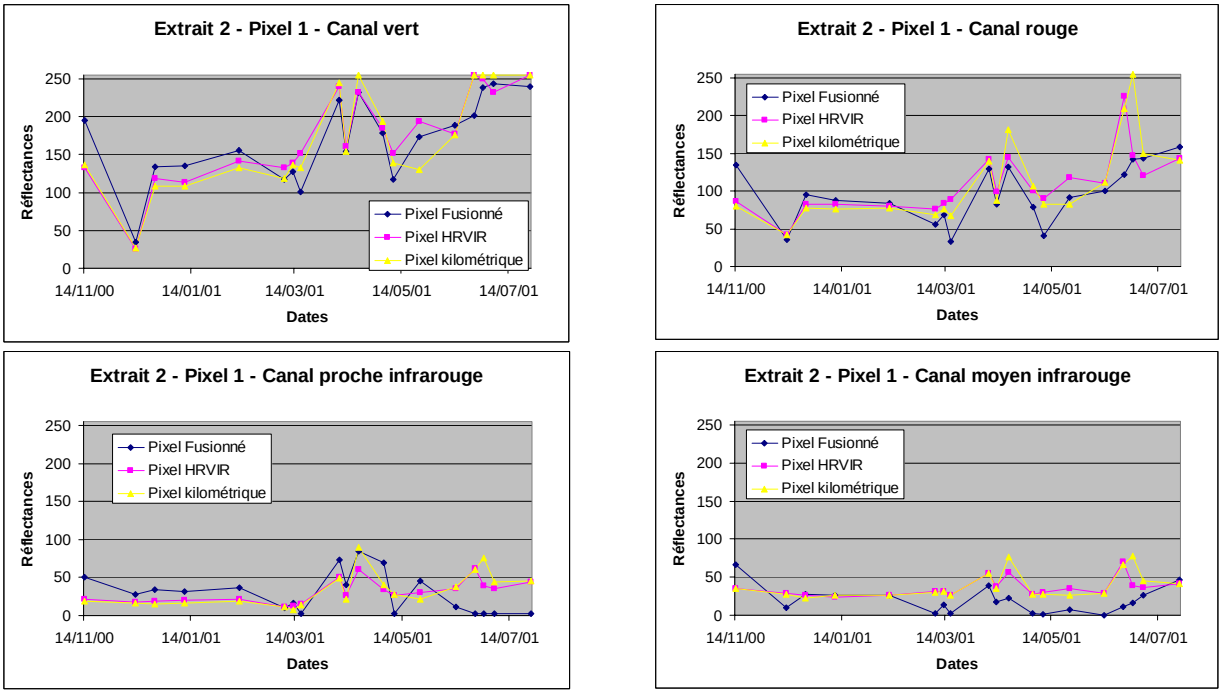


FIGURE 12 Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 1 de l'extrait n°2 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 1 of extract n°2 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

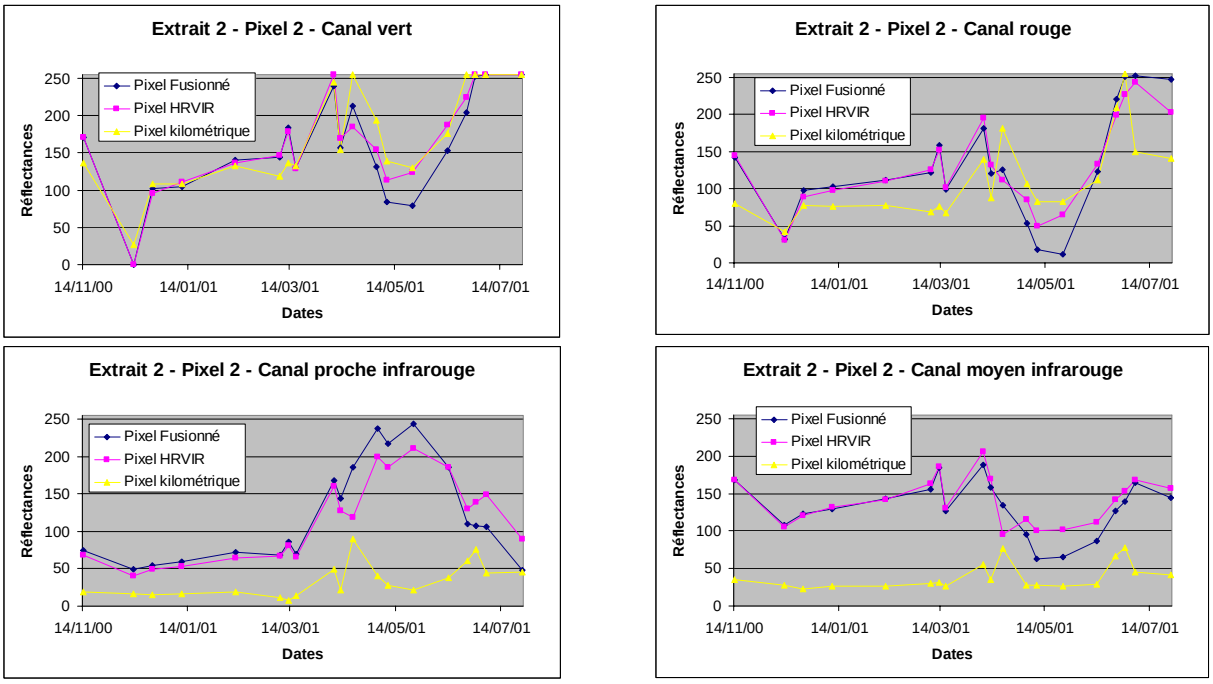


FIGURE 13 Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 2 de l'extrait n°2 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 2 of extract n°2 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

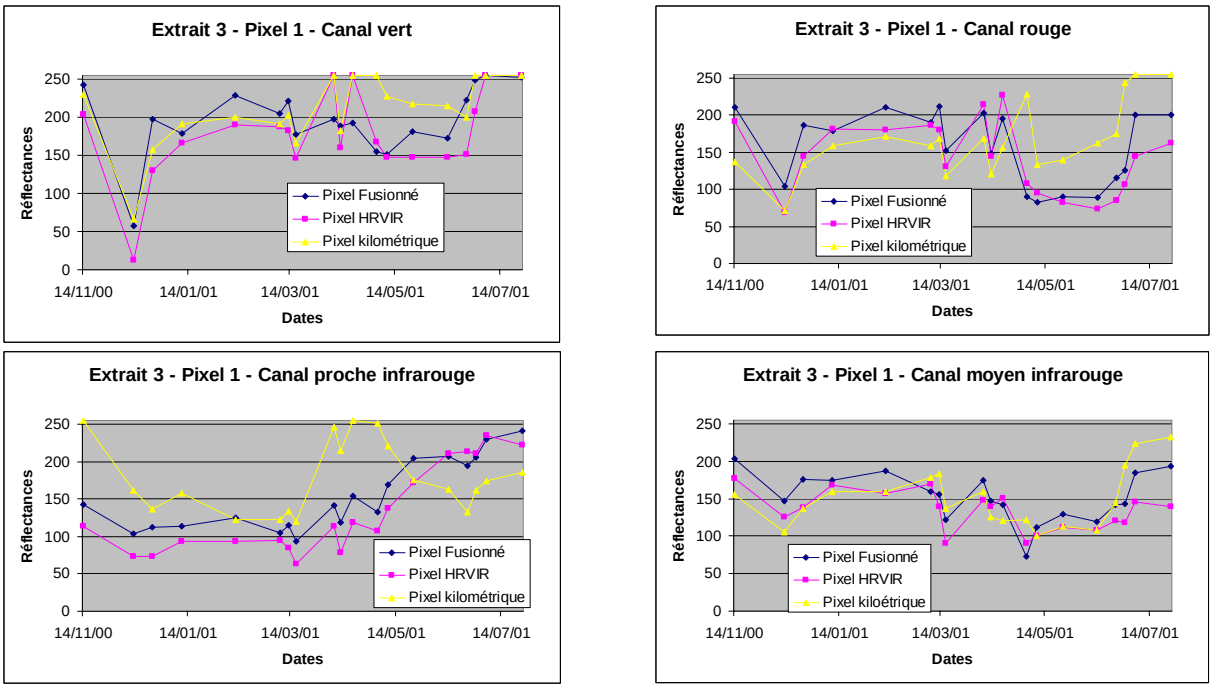


FIGURE 14 Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 1 de l'extrait n°3 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 1 of extract n°3 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

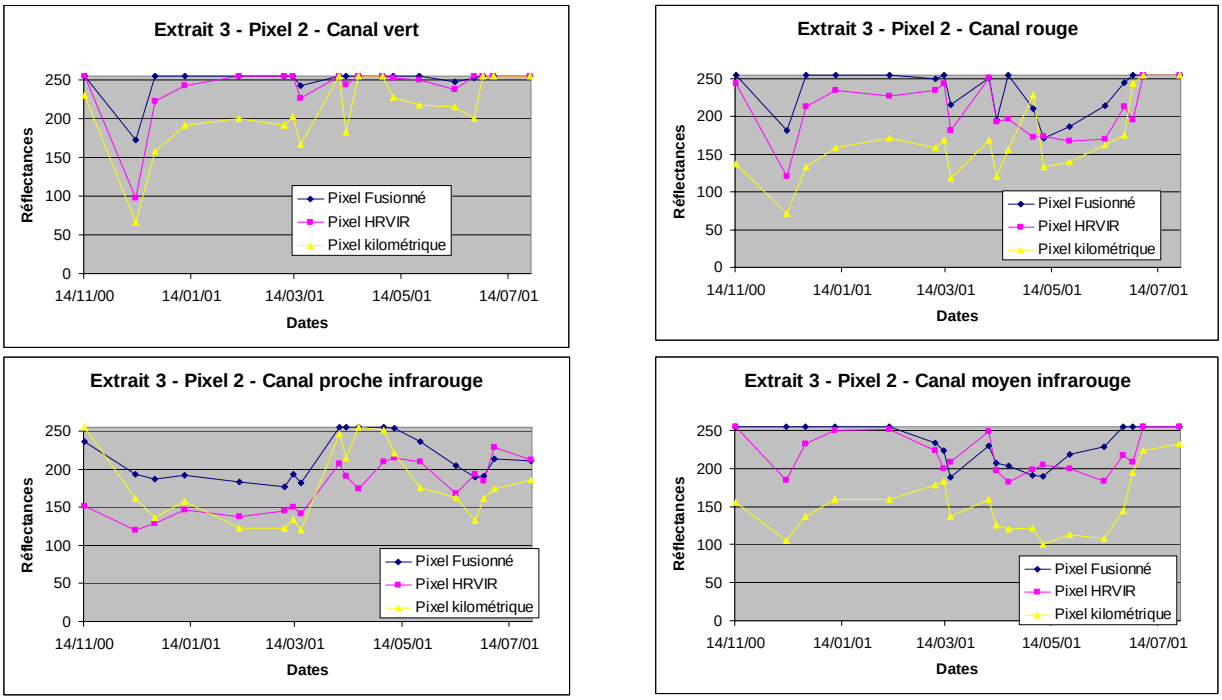


FIGURE 15 Suivi de l'évolution temporelle sur l'ensemble des canaux multispectraux du pixel 2 de l'extrait n°3 (Cf. figure 6), sur les jeux de données n°1, n°2 et n°3. *Monitoring of the temporal evolution over the whole multispectral channels of pixel 2 of extract n°3 (Cf. figure 6), on the n°1, n°2 and n°3 datasets.*

6. CONCLUSION

Cet article présente une méthode de fusion temporelle multirésolution par pyramide morphologique. Ce processus intègre un filtrage morphologique, non linéaire, et préserve la distribution de la composante haute fréquence du signal. Il permet de réaliser des images de synthèse à haute résolution spatiale et temporelle. Cela ouvre donc de nouvelles perspectives pour la surveillance des territoires puisqu'une alerte précoce dépendra de la fréquence temporelle d'acquisition et que la précision de localisation dépendra de la résolution spatiale disponible.

Deux groupes de conclusions se dégagent des résultats obtenus à partir d'images satellites à haute résolution et d'un jeu d'images simulées à basse résolution spatiale. Le fait d'utiliser des données simulées a permis de s'assurer d'une parfaite superposition des données ainsi que d'une parfaite compatibilité des réflectances, ce qui était important pour évaluer la qualité des résultats.

Tout d'abord, dans la plupart des cas, les images de référence et les images fusionnées sont proches pour tous les thèmes contenus dans les pixels kilométriques. Dans certains cas, des différences existent ; elles s'expliquent toujours facilement par la différence de radiométrie entre les images à haute résolution spatiale utilisées lors de la fusion et l'image de référence à la date de la fusion (présence de nuages, de brume, changement brutal de la végétation, comme un moissonnage par exemple, …).

Les courbes d'évolution temporelle montrent que les signatures temporelles de deux pixels de natures différentes, mais sous un même pixel kilométrique ont effectivement des comportements temporels et spectraux différents. Ceux-ci sont proches du comportement « kilométrique » lorsque l'objet au sol contenu dans le pixel fusionné est dominant dans le pixel grossier, ce qui est logique, mais ils sont bien différenciés lorsque le pixel fusionné a une signature spectrale différente des autres objets présents dans le pixel grossier.

Ensuite, sur le plan méthodologique, ces résultats montrent une voie nouvelle pour la désagrégation des pixels mixtes puisque la haute résolution spatiale est recomposée.

Il apparaît également qu'il devient possible de créer des images virtuelles physiquement significatives par l'approche de fusion par pyramide morphologique sur une gamme de résolutions jamais présentée à ce jour. En effet, le rapport de résolution des données fusionnées dans

cet article est de 1 à 50 avec les données HRVIR et VEGETATION de SPOT 4.

La conséquence de cette capacité de fusion étendue en résolution est la possibilité d'extraire des signatures temporelles à haute résolution spatiale. Cela ouvre une perspective à développer pour la surveillance de précision des territoires avec les nombreuses applications qui pourront en tirer un bénéfice significatif.

Références

Adams, J.B., and Adams, J.D. (1984) Geologic mapping using Landsat MSS and TM images: Removing vegetation by modeling spectral mixtures. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment, Third Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology. Colorado Springs, Colorado, April 16-19, 1984.

Adams, J.B., Sabold, D.E., Kapos, V., Filho, R.A., Roberts, D.A., Smith, M.O. and Gillespie, A.R. (1995) Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers : Application to Land-Cover Change in the Brazilian Amazon. Remote Sensing of Environment, Band 52, S. 137-154.

Aiazzi, B., Alparone, L., Argenti, F., Baronti, S., (1999) Wavelet and pyramid techniques for multisensor data fusion: a performance comparison varying with scales ratios. Proceedings Europto, Image and Signal Processing for Remote Sensing V, vol. 3871, pp. 251-262.

Cherchali, S., Amram, O. and Flouzat, G. (2000) Retrieval of temporal profiles of reflectances from simulated and real NOAA-AVHRR data over heterogeneous landscapes. International Journal of Remote Sensing, 21(4), pp. 753-775.

Cornet, Y., De Bethune, S., Binard, M., Muller, F., Legros G., Nadasdi, I. (2001) RS data fusion by local mean and variance matching algorithms: their respective efficiency in a complex urban context. Proceedings of IEEE / ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data fusion over Urban Areas, Rome, 8-9 Novembre 2001, pp. 106-111.

Diemer C, Hill J., (2000) A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolution. Fusion of Earth Data, Sophia-Antipolis, France, pp. 91-98.

Faivre R. and Fisher A. (1997) Predicting crop reflectances using data observing mixed pixels. Journal of agricultural, biological and environmental statistics, vol 2(1), pp. 87-107.

Flouzat G., Amram O., Laporterie F., Cherchali S. (2001) Multiresolution analysis and reconstruction by a morphological pyramid in the remote sensing of terrestrial surfaces. Signal Processing, Vol 81(10), pp. 2171-2185.

Hu Y.H., Lee H.B. and Scapace F.L. (1999) Optimal linear unmixing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 37, pp. 639-644.

Laporterie-Déjean, F. (2003) Revue des méthodes de fusion d'images de télédétection de résolution spatiale différente. Bulletin de la Société française de Photogrammétrie et Télédétection, vol. 169, p. 7-16.

Laporterie, F. and Flouzat, G. (2003a) The morphological pyramid concept as a tool for multi-resolution data fusion in remote sensing. Integrated Computer-Aided Engineering, vol. 10, n°1, p. 63-79.

Laporterie-Déjean, F. et Flouzat, G. (2003b) Fusion de données multi-résolution et multitemporelle par la pyramide morphologique. Application à la fusion SPOT 4 HRVIR / VEGETATION. Bulletin de la Société française de Photogrammétrie et Télédétection, vol. 169, p. 64-72.

Puyou-Lascassies, Ph., G. Flouzat, M. Gay and C. Vignolles (1994) Validation of multiple linear regression for crop reflectance estimation with coarse resolution remote sensing imagery. Remote Sensing of Environment, n° 49, pp 155-166, 1994.

Ranchin T., Wald L., Mangolini M. (2001) Fusion of high spatial and spectral resolution image: the ARSIS concept and its implementation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66(1), pp. 49-61