Nouvelles méthodes de fusion

Il a été rapporté à plusieurs reprises que les méthodes de fusion de type *ARSIS* donnaient de bons résultats statistiques et une bonne cohérence avec l'ensemble MS d'origine (Couloignier *et al.* 1998, Ranchin et Wald 2000, De Boissezon et Laporterie 2003, Ranchin *et al.* 2003, Alonso-Reyes *et al.* 2005a). La bonne cohérence avec l'ensemble original implique un respect des signatures spectrales contenues dans les modalités MS originales lors de l'augmentation de la résolution spatiale. La raison principale du respect de la propriété de cohérence par les méthodes de type *ARSIS* est que les noyaux de convolution utilisés sont réguliers au premier ordre, c'est-à-dire que la moyenne du plan de détails introduit est égale à 0.

L'analyse quantitative des produits de fusion renseigne sur de grandes distorsions, comme une injection insuffisante d'énergie dans les hautes résolutions spatiales avec une différence en variance entre le produit fusionné et sa référence négative, ou une distorsion radiométrique générale avec un biais non nul. Par rapport à l'approche qualitative, elle a l'avantage d'être sensible par exemple à une variation d'un compte numérique sur l'ensemble des pixels, que même un œil averti ne peut pas détecter.

L'évaluation quantitative de la qualité ne peut toutefois pas déceler tous les artefacts des produits de fusion. La complexité de la perception humaine nous procure des atouts essentiels dans la distinction des défauts lorsqu'une image est synthétisée par un processus de traitement d'image quelconque. Il n'existe actuellement pas de distance capable de reproduire cette complexité pour pouvoir nous affranchir de l'analyse qualitative. Ces deux approches sont totalement complémentaires. En dépit d'une qualité statistique évidente et d'une bonne restitution générale des couleurs, les implantations du concept *ARSIS* sont multiples, et la qualité visuelle diffère fortement d'une réalisation à l'autre. L'injection des structures de hautes fréquences peut être trop forte ou trop faible, entraînant des artefacts visuels tels que le flou, du bruit, ou encore des contours trop rehaussés. Les couleurs peuvent aussi être localement mal synthétisées ou baver sur les pixels alentours (De Boissezon et Laporterie 2003, Ranchin *et al.* 2003). Ces artefacts sont néfastes à l'interprétation et aux post-traitements (classification, détection d'objets...).

Dans le but de développer de nouvelles méthodes de fusion, nous avons choisi la stratégie d'identifier visuellement des artefacts des méthodes de type *ARSIS*. Ces nouvelles connaissances guideront les développements de nouvelles méthodes qui tenteront de préserver la qualité quantitative, tout en limitant les artefacts. L'identification et l'explication constituent la première partie de ce chapitre. Cinq implantations *ARSIS*, parmi les plus performantes à ce jour, ont été appliquées sur dix images en vraies et fausses couleurs provenant de trois satellites différents (SPOT5, Ikonos et Quickbird) et de simulations CNES. Les produits de fusion ont été confiés à quatre interprètes d'images lors d'une première campagne d'analyse visuelle dont le mode opératoire a été placé en annexe (annexe 2). Les résultats de cette analyse conjointement à nos observations ont permis la sélection d'une série d'extraits pour illustrer les différents types d'artefacts recensés. On apporte ensuite une explication mathématique sur l'origine de ces défauts.

Les conclusions de cette étude ont mené au développement de trois nouvelles méthodes de fusion. Elles ne font pas seulement appel aux méthodes de type *ARSIS*, et puisent dans d'autres catégories de méthodes des solutions pour éviter de reproduire ou au moins atténuer les artefacts. La qualité visuelle et statistique de ces nouvelles méthodes de fusion a été établie au moyen de l'application du protocole de validation proposé au chapitre 2 de ce document de thèse. Pour l'analyse

visuelle à haute résolution spatiale des produits de fusion, nous avons pu bénéficier d'une nouvelle intervention des interprètes d'images. Plusieurs méthodes existantes sont mises en concours avec les nouvelles méthodes de fusion pour montrer la performance des nouvelles méthodes.

6.1 Artefacts des méthodes de type ARSIS

On présente ici les cinq types d'artefacts que nous avons pu observer visuellement sur des résultats issus de différentes méthodes de fusion de type *ARSIS*. Cette partie est complétée par l'explication de l'origine des divers défauts observés.

6.1.1 Méthodes de fusion testées et illustrations choisies

Les méthodes de fusion sélectionnées ont été testées grâce à l'outil logiciel fusion sous IDL (annexe 1). Leurs éléments ont déjà été présentés.

- ♦ ATWT-M3 qui utilise comme MSM la transformée à trous combinée au couple IMM-HRIMM M3 qui s'appuie sur une estimation globale des paramètres entre plans de coefficients d'ondelettes.
- ◆ La seconde méthode de fusion testée est *ATWT-RWM*. Au *MSM* « à trous » est associé le modèle local *RWM* pour l'estimation des paramètres. La taille de la fenêtre d'estimation a été fixée à 17 par 17 pixels.
- *GLP-CBD* utilise la décomposition hiérarchique de la pyramide Laplacienne généralisée *GLP* conjointement avec le modèle d'estimation locale *CBD* des paramètres qui s'applique aux approximations. La taille de la fenêtre d'estimation est fixée à 7 par 7 pixels.
- *GLP-M3* se réfère au même modèle multi-échelle que la méthode précédente et y joint le couple *IMM-HRIMM M3*.
- Enfin, MallatDaub4-RWM s'appuie sur le cadre de l'analyse multirésolution de Mallat avec l'ondelette Daub4 directionnelle et non-symétrique, et utilise le couple IMM-HRIMM RWM. La décomposition avec cette ondelette produit une dégradation conséquente de la qualité visuelle des images. Nous l'avions choisi pour servir de comparatif dans cette première campagne. Cependant, comme la qualité a été jugée vraiment médiocre par les interprètes d'images, elle n'apparaîtra pas dans les commentaires et les illustrations.

Les images sur lesquelles ont été appliquées les algorithmes de fusion sont très diverses, en terme de satellites, résolutions spatiales, ratio et encore de paysages, comme en témoignent les cinq groupes d'illustrations suivantes des figures 6.1 à 6.5. Chaque figure est associée à une série de commentaires directement issus du rapport des interprètes d'images. Nous ferons référence à ces figures lors de la description des artefacts. Des cercles de couleurs différentes permettent de focaliser l'attention sur les artefacts. Nous avons recensé cinq grands types de défauts auxquels nous avons associé une couleur de cercle différente :

- le faïençage, avec des cercles de couleur rouge,
- les artefacts ponctuels ou irisations de couleurs aberrantes, avec des cercles verts,
- les inversions de contraste encerclés en bleu,
- les stries diagonales de radiométries successivement claires et sombres indépendantes du faïençage, défauts encerclés de blanc,
- enfin, le flou, entouré en rose.







d)



Figure 6.1 : image CNES, Toulouse - a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *ATWT-RWM*, c) par *GLP-CBD*, d) par *GLP-M3*, e) Pan. Copyright CNES 2000.

e)

Sur ce premier extrait de l'image CNES Toulouse en vraies couleurs, les interprètes ont observé :

- par la méthode *ATWT-M3* : un léger flou sur l'ensemble de l'image,
- *ATWT-RWM* : des zones aléatoires de flou. Flou très important sur la végétation. On observe un phénomène de rebond sur les linéaires de la piste d'athlétisme (cercle blanc),

- *GLP-CBD* : des zones aléatoires de flou, qui est important dans les zones de transitions naturelles/artificielles. Accentuation des linéaires accompagnée d'un piqué et de quelques artefacts une fois encore sur la piste d'athlétisme et sur les pelouses,
- *GLP-M3* : un léger flou dans les zones homogènes (pelouse, terrain).











d)



e)

Figure 6.2 : image Ikonos, Hasselt (Belgique) - a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *ATWT-RWM*,
c) par *GLP-CBD*, d) par *GLP-M3*, e) MS originale. Copyright Space Imaging 2002.

Observations des interprètes concernant la seconde illustration :

- ♦ *ATWT-M3* : des couleurs ternes,
- ◆ *ATWT-RWM* : une bonne restitution des couleurs, mais de nombreux artefacts, une haute radiométrie saturée et un rebond. Cet exemple met en évidence la dégradation importante réalisée par cet algorithme de fusion.
- *GLP-CBD* : des couleurs plus intenses, mais une modification de la texture du canal avec l'apparition d'une bande centrale de radiométrie claire.
- *GLP-M3* : une atténuation de la teinte des couleurs avec une perte quasi totale du vert. Apparition d'une bande centrale claire dans le cours d'eau.











d)



Figure 6.3 : image Ikonos, centre ville de Fredericton (Canada) - a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *ATWT-RWM*, c) par *GLP-CBD*, d) par *GLP-M3*, e) MS originale. Copyright Space Imaging 2002.

Observations des interprètes concernant la troisième illustration :

- *ATWT-M3* : flou général sur l'image,
- *ATWT-RWM* : phénomène d'irisation, c'est-à-dire artefacts ponctuels colorés (cercles blancs).
- *GLP-CBD* : phénomène d'irisation. Cet exemple montre des zones hétérogènes flagrantes (cercles rouges).
- *GLP-M3* : stries en diagonal sur le toit des bâtiments.



c)





Figure 6.4 : image Ikonos, abords de Fredericton (Canada) - a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *ATWT-RWM*, c) par *GLP-CBD*, d) par *GLP-M3*, e) MS originale. Copyright Space Imaging 2002.

e)

Observations des interprètes concernant la quatrième illustration :

- *ATWT-M3* : bonne qualité visuelle, même si un peu lisse,
- *ATWT-RWM* : inversion de radiométrie des voies de circulation (ovale orange). Le bord des routes est crénelé, comme s'il avait été dessiné en pointillés. Un flou important occupe le milieu de la route,
- *GLP-CBD* : des tâches floues sont présentes sur la végétation et sur les routes (cercles blancs). Des artefacts de couleur longent la route ; présence de piqué de couleur verte dans la végétation. On observe la même inversion de contraste sur la route,
- *GLP-M3* : bonne impression visuelle de l'image, moins floue que celle obtenue avec *ATWT-M3*.



a)









Figure 6.5 : image Quickbird, centre ville de Fredericton (Canada) - a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *ATWT-RWM*, c) par *GLP-CBD*, d) par *GLP-M3*, e) MS originale. Copyright Digital Globe 2002.

Observations des interprètes concernant la cinquième illustration :

- *ATWT-M3* : les transitions entre les hautes radiométries des bâtiments et leurs ombres sont trop molles, perte de la couleur de l'objet jaune pâle en bas à droite de l'image,
- *ATWT-RWM* : l'image apparaît aussi un peu floue. Par contre, la couleur de l'objet en bas à droite se rapproche de celle attendue,
- *GLP-CBD* : le défaut principal est le crénelage, c'est-à-dire la succession de radiométries claires et sombres le long du toit du bâtiment,
- *GLP-M3* : même remarque que pour la méthode précédente.

6.1.2 Bilan de la qualité visuelle, méthode par méthode

Les interprètes d'images s'accordent à dire que la fusion a un apport informatif non négligeable pour toutes les résolutions et capteurs en leur possession lors de cette première expérimentation. La fusion permet de mieux discriminer les éléments du réseau routier, de la ville ou encore d'apprécier la nature d'un sol. Elle permet aussi de mieux caractériser les surfaces qui possèdent des radiométries voisines sur l'image Pan. Ils ont néanmoins conclu que les défauts sont moins flagrants pour les images ayant pour origine un capteur à résolution spatiale moyenne (SPOT5). Les conclusion des interprètes sont en accord avec les différents travaux publiés sur l'intérêt de la fusion.

Méthode *ATWT-M3* (image a des figures 6.1 à 6.5) : les images issues de cette méthode de fusion comportent un léger flou homogène sur toute l'image. Par exemple, la figure 6.4d présente une meilleure impression visuelle avec un contraste plus important que pour l'image 6.4a synthétisée par la méthode *ATWT-M3*. Des cercles de couleur rose permettent aussi de visualiser ce défaut. Par contre,

on observe une bonne similitude des couleurs comparées aux MS d'origine, mais elles apparaissent souvent un peu ternes. Les hautes radiométries sont souvent entourées d'un halo clair. La perception des petits objets est bonne, même si la couleur des petits objets a tendance à diffuser (baver) sur les pixels voisins. On note une légère atténuation des objets dans les ombres.

Méthode *ATWT-RWM* (image b des figures 6.1 à 6.5) : un flou important est présent sur toutes les images mais de manière aléatoire. Les zones de transition entre le bâti et la végétation, et plus généralement entre zones artificielles et naturelles, sont les plus dégradées. La couleur verte a tendance à baver. Excepté ce point, la restitution des couleurs est très bonne, particulièrement sur des objets de couleurs vives, tels que des voitures rouges ou des toits de bâtiments oranges (figure 6.3b), même si parfois la couleur contamine partiellement la radiométrie des pixels alentours. En conclusion, on note une bonne fiabilité des couleurs. Cependant, on a pu observer avec l'illustration 6.1b mais surtout 6.4b des inversions de contraste. Plusieurs irisations ponctuelles multicolores ont aussi été rapportées. Les hautes radiométries présentent des halos/rebonds. Des petits objets disparaissent par agrégation ou par le lissage des structures. On note une perte d'information dans les ombres.

Méthode *GLP-CBD* (image c des figures 6.1 à 6.5) : les remarques sont assez similaires à celles de la méthode *ATWT-RWM*. Néanmoins, les produits fusionnés ne présentent pas d'inversion de contraste. L'avantage aussi est que les couleurs apparaissent un peu plus intenses. Cependant, on note une présence accrue des artefacts ponctuels colorés et la présence de stries obliques dans des zones homogènes non floues.

Méthode *GLP-M3* (image d des figures 6.1 à 6.5) : les remarques ressemblent à celles obtenues pour la méthode de fusion *ATWT-M3*. Cependant, cette méthode de fusion présente moins de flou, mais plus de risques de faire apparaître des stries obliques (figure 6.5d).

En conclusion, les méthodes de fusion *ATWT-M3* et *GLP-M3* se révèlent juste acceptables pour un cadre opérationnel. Si la qualité informative de ces deux méthodes est acceptable, leur qualité visuelle n'est pas satisfaisante en raison d'un effet de voile et la présence de halos induits principalement par les hautes radiométries. La méthode *ATWT-M3* est considérée comme celle présentant la meilleure qualité visuelle.

6.1.3 Description et explications des artefacts visuels

6.1.3.1 Le faïençage (cercles rouges)

Le faïençage est le terme technique qui décrit les hétérogénéités locales. Il se manifeste par des zones floues distribuées de manière aléatoire dans l'image. Cet effet est visible dans tous les encerclés rouges des illustrations, et est exclusivement présent dans les illustrations des images fusionnées par les méthodes de fusion *ATWT-RWM* et *GLP-CBD*. L'intensité de ce phénomène s'accroît dans les zones de transitions entre la végétation et le bâti, c'est-à-dire de manière plus générale, entre les zones naturelles et artificielles.

L'origine du faïençage provient du choix des couples *IMM-HRIMM* pour ces deux méthodes de fusion, qui sont *RWM* et *CBD*. Ces couples ont pour point commun de procéder à une estimation locale des paramètres *a* et *b*, et à leur application conditionnelle à haute résolution en fonction de la valeur du coefficient de corrélation. Ce sont les objets visés par ces deux processus qui sont différents. Pour *RWM*, l'approche concerne les images de détails aux différentes résolutions, alors que *CBD* estime ses paramètres à partir des images d'approximation (*IMM*) et les applique au(x) plan(s) de détails (*HRIMM*). Si la corrélation spatiale locale est insuffisante entre Pan et MS (plans de détails ou contextes selon la méthode), alors les coefficients de détails à haute résolution spatiale sont fixés à 0. Des détails fixés à 0 ont pour effet de produire un suréchantillonnage des modalités MS originales, c'est-à-dire qu'aucune haute fréquence n'est injectée, alors que les pixels qui les entourent peuvent avoir des valeurs différentes de 0, et donc rehausser les structures. Un flou qui jouxte une zone fusionnée corrompt la régularité des structures d'une image, ce qui est très inconfortable pour la visualisation et pour les post-traitements comme une classification.

Par contre, même si l'origine du faïençage est le couple *IMM-HRIMM*, on remarque sur ces exemples que l'impression visuelle n'est pas parfaitement identique selon le *MSM ATWT* ou *GLP*. Dans le cas de l'implantation *ATWT-RWM*, ces zones donnent l'impression d'une peinture à la gouache sur laquelle on aurait fait tomber une goutte d'eau qui vient mélanger les tons. Pour cet algorithme de décomposition hiérarchique, toutes les images possèdent les mêmes dimensions. Ainsi, si des coefficients d'ondelettes sont égaux à zéro, la basse résolution spatiale est conservée, ce qui revient à recopier quelques pixels d'une version plus grossière et donc plus floue dans l'image fusionnée.

Par contre, pour la méthode *GLP-CBD*, les zones de flou contiennent des stries obliques, comme le montre la figure 6.3c (cercle rouge de droite). La figure 6.3e montre que les stries de la figure 6.3c sont semblables à celles présentes dans l'image MS d'origine suréchantillonnée. Les stries dans les zones de faïençage proviennent de l'utilisation de l'algorithme *GLP* qui est un *MSM* décimé. L'image MS d'origine présente une taille plus petite que l'image fusionnée. Une étape supplémentaire de suréchantillonnage est nécessaire pour adapter la taille de l'image à celle de l'image fusionnée finale, ce qui produit les stries obliques de la figure 6.3c, puisqu'il s'agit localement de la même opération que celle appliquée pour créer la figure 6.3e.

6.1.3.2 Les artefacts colorés (cercles verts)

Ce type de défaut est mis en valeur par des cercles de couleur verte sur les illustrations. La figure 6.2b montre dans le cercle de gauche un amas de pixels de couleur rose sur la piste d'athlétisme, et sur la droite, des pixels côte à côte qui présentent une radiométrie aberrante. De même, la figure 6.4c montre un arbre dont la couleur tend vers le vert fluo et les bâtiments de la figure 6.3b sont irisés, c'est-à-dire tachetés de pixels de couleurs vives.

L'origine de ce défaut est aussi inhérent aux méthodes locales *ATWT-RWM* et *GLP-CBD*, et indirectement au faïençage. La couleur d'un pixel de la composition colorée de l'image fusionnée dépend à la fois de la localisation de ce pixel dans l'image puisque ces méthodes suivent des approches locales, mais aussi de sa valeur dans chaque modalité MS. En effet, si la corrélation locale est insuffisante dans l'une des modalités MS et non dans les autres, alors la couleur de ce pixel aura tendance à tendre vers la couleur des modalités qui auront été fusionnées, au détriment de celle qui aura été suréchantillonnée. En bref, ces deux méthodes de fusion ne garantissent pas une homogénéité du résultat d'un point de vue multispectral. Cette hétérogénéité peut conduire localement à une mauvaise estimation locale qui peut se manifester par des valeurs de pixels avec une dominante de l'une ou l'autre modalité MS.

6.1.3.3 L'inversion de contraste (cercles bleus)

On remarque une première inversion de contraste sur la partie supérieure de la piste d'athlétisme de la figure 6.1a, alors que la partie inférieure ne présente pas cette inversion. Le résultat final apparaît irrégulier et très bruité. Les exemples 6.4b et c sont les manifestations les plus flagrantes de l'inversion de contraste. Les méthodes locales *ATWT-RWM* et *GLP-CBD* n'ont pas été en mesure de synthétiser correctement la route qui devrait apparaître plus sombre que la signalisation au sol, comme sur la modalité Pan.

Nous avons cherché à comprendre le comportement local de ces processus de fusion. Les illustrations sont des compositions colorées produites à partir des modalités dont la bande spectrale appartient au visible. L'inversion de contraste n'apparaît pas dans les modalités PIR. Les figures 6.6a et b rappellent les deux compositions colorées de la figure 6.4. Les deux flèches rouges matérialisent les transects de ces deux images.



Figure 6.6 : image Ikonos, échangeur autoroutier, Fredericton (Canada). a) image couleur fusionnée par *ATWT-RWM*, b) image couleur fusionnée par *GLP-CBD*, c) courbe en trait plein, transect de l'image Pan correspondant

à l'extrait de la ligne matérialisée par une flèche rouge dans les figures a et b, en pointillés, transect de la modalité rouge obtenue par *ATWT-RWM*, d) idem pour la modalité PIR fusionnée par *ATWT-RWM*, e) idem pour la modalité rouge fusionnée avec *GLP-CBD*, f) idem pour la modalité PIR, fusionnée avec *GLP-CBD*.

La modalité Pan sert de référence aux transects des images fusionnées. La courbe correspondante est en trait plein sur toutes les illustrations. Les figures 6.6c et d montrent en pointillés respectivement les modalités rouges fusionnées par les méthodes de fusion *ATWT-RWM* et *GLP-CBD*.

Le comportement de la modalité rouge est similaire à celui des autres modalités du visible, à savoir que la végétation et la route sont en inversion de contraste dans les deux images. Dans les deux cas, on remarque très nettement l'inversion de contraste au niveau de la route.

Par contre, comme nous l'avons dit auparavant, les deux méthodes de fusion locales ont été capables de synthétiser correctement la route pour les modalités PIR. Les transects Pan/PIR ont été placés figures 6.6e et f. En effet, les transects des modalités PIR sont en phase avec celui du Pan. La question dorénavant est de savoir pour quelles raisons les méthodes de fusion ont échoué dans la synthèse haute résolution des modalités visibles.

Intéressons-nous tout d'abord au comportement de la méthode ATWT-RWM. L'estimation des paramètres a et b s'effectue au niveau des plans d'ondelettes Pan et MS, respectivement figure 6.7a et b, situés entre les résolutions 4 et 8 m.



Figure 6.7 : image Ikonos, échangeur autoroutier, Fredericton (Canada). a) plan des coefficients d'ondelettes situé entre les résolutions spatiales 4 et 8 m pour la modalité Pan, b) idem pour la modalité rouge, c) transect Pan/modalité rouge, d) idem pour la modalité PIR.

La figure 6.7c montre les transects correspondant à ces deux images en trait plein pour l'image Pan et en pointillés pour la modalité rouge. On voit très clairement que ces deux courbes sont en inversion de phase avec une corrélation locale comprise entre -1 et -0.7, alors que dans le cas de la modalité PIR placée en d, les courbes des détails entre le Pan et le PIR sont en phase au niveau du phénomène observé. La méthode globale *ATWT-M3* a correctement synthétisé la radiométrie de la route et de la signalisation pour les modalité rouge est de 0.95. Dans le cas du modèle local *ATWT-RWM*, les coefficients *a* pour la synthèse ont été estimés à des valeurs entre -1 et -2 au cœur de la

route, avec des valeurs de *a* d'un pixel à l'autre pouvant passer de -2 à 2.8. Ce modèle n'assure à aucun moment une quelconque homogénéité spatiale des résultats sur le paramètre *a*. Les valeurs de *a* obtenues pour la modalité PIR valent 0.91 pour le modèle global, et entre 2.5 et 3 pour le modèle local, ce qui confirme que les détails ont été injectés avec une proportion différente mais avec un coefficient multiplicateur positif dans les deux cas. Les modalités Pan et PIR sont en phase car la bande passante du Pan contient une part d'infrarouge. La végétation qui a une forte réponse dans l'infrarouge apparaît plus claire que le bâti dans ces deux modalités.

Nous avons vérifié si l'on retrouvait ce comportement pour la méthode *GLP-CBD*. Dans cette méthode, l'estimation s'effectue sur les plans de coefficients d'approximation Pan et MS à l'échelle des modalités MS originales, c'est-à-dire à 4 m. La modalité Pan a été dégradée par l'algorithme *GLP* et placée figure 6.8a. La modalité rouge originale est placée figure 6.8b. La figure 6.8c donne les transects Pan/modalité rouge correspondant à ces deux extraits, et la figure 6.8d, les transects Pan/PIR.



Figure 6.8 : image Ikonos, échangeur autoroutier, Fredericton (Canada). a) plan d'approximation Pan à 4 m, b) modalité rouge originale, c) transect Pan/modalité rouge, d) idem pour la modalité PIR.

Les courbes sont visiblement en antiphase dans le cas de la modalité rouge avec une anticorrélation forte puisque inférieure à -0.8, et en phase dans le cas de la modalité PIR. On retrouve exactement le même comportement que pour la figure précédente. La méthode globale *GLP-M3* donne une valeur pour le paramètre *a* égale à 1.12 pour la modalité rouge, et 1.08 pour la modalité PIR. Ces valeurs proches de 1 signifient que les coefficients *GLP* haute résolution sont injectés presque sans aucune modification de leurs valeurs. Dans le cas de la synthèse locale par *CBD*, les coefficients le long de la route sont négatifs, comme l'on pouvait s'y attendre, avec une valeur comprise entre -1.5 et -2. Ceux pour la modalité PIR atteignent la valeur du seuil supérieur (qui vaut 2) au lieu de 1.08.

Dans les cas des deux méthodes de fusion locales, l'estimation s'effectue à une échelle où la signalisation de la route (lignes blanches) est noyée dans la radiométrie des pixels voisins ; l'échelle caractéristique de la signalisation est inférieure à la résolution spatiale d'estimation. Pour les tailles habituelles de fenêtre, de l'ordre de 11 par 11 pour le modèle *GLP* et 23 par 23 pour *ATWT*, l'anticorrélation est élevée pour les modalités visibles. Les méthodes de fusion ne sont pas en mesure de synthétiser la route et sa signalisation avec comme seule condition la corrélation.

Nous avons étudié l'influence de la taille de la fenêtre d'estimation sur la qualité de synthèse. Nous avons augmenté progressivement la taille de la fenêtre ; pour une fenêtre avec une taille de l'ordre de 29x29 pour le MSM GLP, la route est totalement floue, ce qui signifie que la corrélation a diminué en valeur absolue, et que sa valeur est inférieure au seuil en deçà duquel les modalités MS sont suréchantillonnées. Ce seuil vaut 0.37 pour la modalité rouge qui nous sert d'illustration. La corrélation locale est contrainte à la fois par l'inversion de contraste de l'environnement et de la route, et un comportement en phase des pixels situés à l'extérieur de cette zone problématique. En effet, pour que la route soit fusionnée avec une corrélation positive, il faut qu'une proportion suffisante de pixels en phase avec le Pan soit contenue dans la fenêtre d'estimation. Plus la taille de la fenêtre augmente, plus la zone située entre l'échangeur et les bâtiments de la ville, qui est correctement synthétisée, s'étend. La proportion de route fusionnée qui respecte la radiométrie du bitume et de la signalisation augmente. Les trois quarts de la route sont fusionnés pour une fenêtre de 79x79, et son intégralité avec une fenêtre 99x99. Comme on pouvait s'y attendre, lorsque la taille de la fenêtre tend vers la taille de l'image, la valeur des paramètres a et b estimés sur les fenêtres tend vers les valeurs des paramètres a et b globaux. En ce qui concerne l'algorithme ATWT, comme il n'est pas décimé, une taille 4 fois supérieure est nécessaire pour une synthèse correcte.

En apparence, dans les exemples cités ci-dessus, les méthodes de fusion locales présentent des artefacts qui affaiblissent les post-traitements appliqués aux produits fusionnés, et gênent l'interprétation. Le faïençage, les irisations et ces inversions de contraste ont contribué à ce que les interprètes rejettent systématiquement ces méthodes de fusion. On peut alors légitimement se demander quel est l'intérêt des méthodes de fusion exploitant la corrélation locale. La figure 6.9 suivante reprend l'exemple de l'inversion de contraste placé dans le premier chapitre. Il permet de montrer que dans certains cas, les méthodes locales peuvent offrir la possibilité de capter les inversions de contraste, et de manière plus générale, les dissimilitudes locales entre le Pan et les modalités à fusionner, contrairement aux méthodes globales.

6.1.3.4 Autre situation d'inversion de contraste

On rappelle que les images placées figure 6.9a et b correspondent à un extrait de la ville de Fredericton au Canada, acquis par le satellite Quickbird dans la modalité respectivement Pan et bleue suréchantillonnée par un opérateur bicubique. Les courbes placées en *c* correspondent aux sections des lignes sélectionnées par les rectangles rouges sur les deux images. L'inversion de contraste est évidente.



Figure 6.9 : image Quickbird, extraits de la zone périurbaine de Fredericton (Canada). a) Pan, 0.7 m, b) modalité bleue suréchantillonnée par un opérateur bicubique, 2.8 m, c) transects de ces deux images correspondant aux encadrés rouges. Copyright Digital Globe 2002.

La figure 6.10a et b représentent les produits de fusion par *ATWT-M3* et *ATWT-RWM*, et les graphiques c et d les transects correspondant à la même section que dans les images précédentes. Le trait plein représente encore une fois la modalité Pan, qui sert de comparatif.



Figure 6.10 : a) modalité bleue fusionnée par *ATWT-M3*, b) fusionnée par *ATWT-RWM*, c) et d) en trait plein, le transect de la modalité Pan, et en pointillés, les transects respectifs des deux produits fusionnés.

La méthode de fusion globale ATWT-M3 a généré un rebond erroné le long des contours, comme si le bâtiment était entouré d'un muret. Ce rebond est aussi présent un peu plus haut sur l'image au niveau du rond point (cercle blanc). Si on revient à la figure 6.9, on se rend compte que l'on obtient cet artefact dès lors que l'on se trouve sur des objets qui présentent des inversions de contraste avec leur environnement comparé à l'image Pan. Par contre, l'approche locale conditionnelle *RWM* a respecté le gradient de l'image bleue puisque les contours ont été rehaussés « dans le bon sens ». Une fusion qui repose sur une approche globale n'a pas été en mesure de traiter cette dissimilitude locale.

La différence avec l'exemple précédent est que l'inversion de contraste présente dans cet exemple est aussi présente à basse résolution spatiale. La taille caractéristique des objets en inversion de contraste (le rond point, le bâtiment...) est supérieure à la résolution spatiale où l'on procède à l'estimation des paramètres a et b, c'est-à-dire entre 2.8 et 5.6 m. En effet, les objets sont encore visibles à de telles résolutions spatiales.

6.1.3.5 Conclusion sur le défaut de type inversion de contraste

Le succès de la fusion vis-à-vis de ce défaut dépend de deux éléments : la taille caractéristique de l'objet par rapport à l'échelle d'estimation, mais aussi des propriétés spectrales de cet objet. Nous nous plaçons dans le cas où une plus grande proportion des pixels de la modalité MS sont en phase (c'est-à-dire corrélation positive) avec le Pan. Les conclusions sont susceptibles d'être différentes dans le cas contraire. Dans ce cas, la bande d'observation de cet objet qui le place ou non en inversion de contraste avec son environnement est prépondérante.

Dans le cas où un objet est de taille suffisamment importante, c'est-à-dire qu'il occupe encore quelques pixels à la résolution spatiale d'estimation des paramètres, deux situations sont possibles : si l'objet est en inversion de contraste et que la taille de la fenêtre utilisée dans l'approche locale est adaptée à la taille de l'objet, alors la méthode de fusion locale aura une chance de correctement synthétiser cet objet. Par contre, l'approche globale va échouer. Il s'agit du cas de la partie précédente 6.1.3.4.

Dans le cas où la taille de l'objet est insuffisante, c'est-à-dire que l'objet a disparu à l'échelle d'estimation, il ne peut en aucun cas avoir une influence sur le calcul des paramètres. Par conséquent, l'approche globale prend en compte le comportement global de l'image que nous avons admis avec une corrélation positive entre le Pan et les modalités MS. Ainsi, si l'objet est en inversion de contraste, l'approche globale échouera, mais sera couronnée de succès dans le cas contraire. Les mêmes remarques peuvent être établies pour l'approche locale, qui prend en compte le comportement du voisinage ; si l'objet est en inversion de contraste comme le voisinage, alors la fusion par l'approche locale donnera un bon résultat, mais sera un échec dans le cas contraire. Ainsi, l'exemple de la partie 6.1.3.3 correspond au cas où l'objet (route + signalisation) est en phase avec l'image, le modèle global est un succès. Par contre les pixels avoisinants correspondent à de la végétation et sont localement en inversion de contraste dans les modalités visibles par rapport à la modalité Pan. L'approche locale échoue et introduit des coefficients de détails avec le mauvais gradient.

6.1.3.6 Les stries obliques hors faïençage

Ces stries sont différentes de celles rapportées lors de l'explication du faïençage dans le cas de la méthode de fusion *GLP-CBD*. Ce défaut est entouré d'un cercle blanc. Ainsi, la figure 6.3d, mais surtout les figures 6.5c et d montrent sur une zone relativement homogène représentant des toits de bâtiments, une succession de bandes de radiométrie plus ou moins sombres dans la direction diagonale. Le point commun des deux méthodes des figures 6.5c et d qui montrent ces stries est le *MSM GLP*.

L'illustration suivante permet de comprendre ce phénomène. La figure 6.11a montre une transition sélectionnée dans une image Pan acquise par le satellite Quickbird. Cette transition correspond au bord d'un bâtiment de la ville de Fredericton (Canada). Cet extrait est dégradé deux fois par l'algorithme non-décimé *ATWT*. Pour reconstruire à l'identique l'image Pan, il suffit d'ajouter les deux plans d'ondelettes correspondant à l'analyse. Au lieu de cela, nous avons multiplié l'écart-type de ces deux plans par 2 avant de les réinjecter. L'image obtenue a été placée en b. Elle apparaît beaucoup plus contrastée que l'image de référence. Elle donne un piqué erroné à l'image, avec un halo sombre autour des deux objets ponctuels en haut de l'image ainsi qu'un rebond de radiométrie opposée le long des structures : un rebond sombre lorsque la radiométrie de l'objet est claire, et inversement. Nous avons procédé de la sorte aussi pour obtenir l'image c, mais cette fois-ci, l'algorithme de décomposition hiérarchique de l'information utilisé est *GLP*.



Figure 6.11 : image Quickbird, bord d'un bâtiment de Fredericton (Canada). a) extrait de référence provenant d'une image Pan, b) même image dégradée par *ATWT*, puis reconstruite avec ses deux plans de coefficients d'ondelettes de plus haute résolution spatiale multipliés par un facteur 2, c) idem mais avec l'algorithme *GLP*. Copyright Digital Globe 2002.

La figure 6.11c montre une augmentation générale du contraste de l'extrait, des objets ponctuels de radiométrie élevée entourés d'un halo sombre. On remarque aussi dans l'ombre du bâtiment oblique sur l'image la présence des stries, qui sont similaires à celles des images des figures

6.5c et d. On a artificiellement créé ce défaut en injectant des coefficients de détails *GLP* dont la dynamique est trop élevée par rapport à celle nécessaire à la bonne reconstruction de la référence. On remarque que dans le cas d'un algorithme décimé, lorsque l'on fait une erreur en injectant des coefficients de détails dont la valeur est trop élevé, cette erreur se répercute à travers le suréchantillonnage par le biais de stries.

6.1.3.7 Le flou

Le flou a essentiellement été relevé dans les produits de fusion de la méthode *ATWT-M3* ; ce défaut est encerclé en rose dans les illustrations 6.1 à 6.5. Les analyses de la propriété de synthèse sur différents produits de fusion résultant de cette méthode globale montrent que généralement, la variance du produit de fusion est inférieure à la variance de la référence. Cela signifie que l'on n'a pas injecté suffisamment d'énergie au niveau des hautes fréquences de l'image.

Nous avons procédé à une expérience similaire à la précédente, à savoir que nous avons modifié une fois encore la dynamique/variance des plans d'ondelettes lors de la reconstruction de l'image de référence. La figure 6.12 suit la même logique que la figure précédente, excepté que les coefficients ont été divisés par deux.



Figure 6.12 : image Quickbird, bord d'un bâtiment de Fredericton (Canada). a) extrait de référence provenant d'une image Pan, b) même image dégradée par *ATWT*, puis reconstruite avec ses deux plans de coefficients d'ondelettes de plus haute résolution spatiale divisés par un facteur 2, c) idem mais avec l'algorithme *GLP*. Copyright Digital Globe 2002.

L'effet produit par ce traitement est un flou général, quelque soit le *MSM* utilisé. Les transitions sont plus progressives, les ponctuels en haut de l'image ont tendance à baver sur les pixels voisins.

Ceci montre que le flou est lié à un manque d'énergie injectée. Ce flou provient du fait que le modèle d'estimation des paramètres est un modèle global (méthodes ATWT-M3 et GLP-M3). Comme nous l'avons expliqué précédemment, un modèle global ne peut prendre en compte les dissimilitudes locales. Ces dissimilitudes ont pour effet d'augmenter l'écart entre la modalité MS à fusionner et la modalité Pan, c'est-à-dire de diminuer la corrélation entre les images. Pour le couple *IMM-HRIMM* M3, l'estimation des paramètres s'effectue entre coefficients d'ondelettes Pan et MS. Que ce soit par une minimisation moindres carrés ou par centre d'inertie, le modèle M3 cherche à tracer une droite par régression linéaire sur le nuage de points entre le Pan et chaque modalité MS. Mais comme la corrélation n'atteint pas sa valeur idéale de 1, les paramètres a et b estimés seront entachés d'erreur à cause des zones de corrélation moindre. Ils rentrent en contradiction avec le comportement local qui aurait donné une autre valeur aux paramètres. Si par contre la corrélation entre ces images est élevée, le modèle global (ici M3) donnera de meilleurs résultats.

6.1.4 Conclusion : vers de nouvelles méthodes de fusion

Les interprètes ont confirmé la présence d'artefacts géométriques qui avaient déjà été soulignés par le passé (De Boissezon et Laporterie 2003, Ranchin *et al.* 2003). Ces observations ont été aussi confirmées par les résultats du concours « fusion d'images » organisé par IEEE (Alparone *et al.* 2006). Notre outil d'évaluation a en effet été choisi par le comité d'organisation et notre laboratoire a procédé à l'évaluation des différents produits de fusion créés. Nous avons ainsi pu vérifier la présence de ces défauts pour d'autres images et d'autres méthodes de fusion. Quelques éléments de réponse ont été apportés quant à la formation de ces défauts lors des différents processus de fusion. La conclusion de ces analyses est que les deux approches, globale et locale, comportent des avantages et des inconvénients.

D'une part, les modèles globaux s'appliquent à synthétiser les structures géométriques en respectant leur régularité, au détriment d'un aspect un peu brumeux de l'image finale. Toutefois, le modèle global a l'avantage de procéder de manière équivalente sur toute l'image. Ainsi, même si un artefact est créé par la méthode, il est également distribué dans l'image, ou tout au moins peut s'observer sur tous les objets de même type. Ainsi, le flou de la méthode *ATWT-M3* et les stries obliques de la méthode *GLP-M3* sont présents sur toute l'image, et se visualisent plus facilement le long des transitions brutales de radiométrie.

D'autre part, les méthodes locales ont systématiquement été rejetées car l'aspect hétérogène du résultat se révèle trop inconfortable pour l'utilisateur et entraîne un manque de fiabilité en cas de post-traitements. En effet, contrairement aux approches globales, une zone de l'image peut subir un traitement totalement différent de ses pixels avoisinants, et ce traitement peut différer en fonction de la taille de la fenêtre d'estimation. Par contre, l'avantage des modèles locaux d'estimation est la qualité des BQ de leurs produits de fusion (cf tableaux 6.2 et 6.3 de ce chapitre). Cette qualité s'explique par le fait que l'injection de données du Pan vers les modalités MS ne s'effectue qu'en cas de corrélation 'suffisante' par rapport à un seuil donné. Dans le cas contraire, le modèle contourne la difficulté en procédant à un suréchantillonnage de la modalité originale basse résolution, donnant ainsi un meilleur respect de la propriété de cohérence avec l'ensemble original. En dépit de l'aspect hétérogène engendré par le suréchantillonnage, l'avantage est de s'intéresser au comportement local des images. Comme nous l'avons souligné en introduction, certains objets peuvent être occultés, voire même présenter une radiométrie contraire d'une image à l'autre. Les modèles globaux ne sont toujours pas capables de capter les dissimilitudes locales.

Voilà pourquoi nous avons développé avec Gabriel Peyré, chercheur au CNRS, une méthode de fusion exploratoire qui nous a permis d'analyser le comportement des approches locales conditionnelles exclusivement basées sur la corrélation locale en images de détails Pan et MS. La méthode de fusion est décrite avec précision en annexe (annexe 5). Le principe consiste à maximiser la corrélation locale en faisant varier différents paramètres tels que la pondération des pixels de la fenêtre d'estimation en fonction de leur distance au pixel central et la taille et l'orientation de cette fenêtre. Nous avons vérifié le bon comportement dans l'orientation des fenêtres d'estimation sur une photographie de visage placée aussi en annexe ; l'algorithme était bien en mesure de capter les directions de régularité maximale dans l'image. Par contre, l'évaluation visuelle des résultats à haute résolution spatiale a montré des hétérogénéités se manifestant avec des zones de flou plus ou moins denses. En suivant une arête de bâtiment, une partie pouvait tout à fait avoir été correctement rehaussée alors qu'une autre tendait à disparaître. La conclusion est qu'une approche locale ne devrait pas uniquement se baser sur la maximisation de la corrélation locale. En effet, une image n'est composée que de signaux discontinus, de contours ou de régions qui ont une dimension finie dans l'image. Toutes les irrégularités des deux images ainsi que les dissimilitudes qui les séparent, engendrent un comportement du coefficient de corrélation qui est lui-même discontinu, en fonction de l'environnement du pixel considéré. L'effet produit est un mauvais traitement au niveau de la synthèse des coefficients de détails à injecter. Les résultats obtenus grâce à cet outil exploratoire corroborent mes conclusions, à savoir qu'il semble plus judicieux de partir d'une méthode de fusion globale, et de venir localement la perturber avec une approche locale.

Trois nouvelles méthodes de fusion ont été développées et sont présentées dans la partie suivante. Elles pallient au moins partiellement les défauts présentés jusqu'alors. Une analyse visuelle et statistique d'images fusionnées par ces méthodes et par des méthodes existantes a été établie et les résultats sont résumés par la suite. Pour cette présentation et par souci de simplicité, nous allons nous placer dans le cas où le *MSM* permet directement de passer de *res0* à *res1* puis à *res2* ... comme dans le cas de la présentation des diverses implantations d'*ARSIS*.

6.2 Description et évaluation de nouvelles méthodes de fusion

Ces nouvelles implantations sont disponibles dans l'atelier logiciel fusion (annexe 1).

6.2.1 ATWT-M3-FONC

La méthode de fusion de Ballester *et al.* (2003) a attiré notre attention grâce à la bonne qualité géométrique de ses produits de fusion. Elle nous a inspiré la méthode hybride suivante. Les produits provenant de *ATWT-M3* laissant apparaître un flou général sur l'image, nous avons eu l'idée d'associer aux produits de fusion provenant de *ATWT-M3* une minimisation du terme géométrique de la fonctionnelle d'énergie. Nous cherchons à rehausser les contours un peu trop progressifs, tout en évitant les problèmes de distorsion radiométrique globale et locale liés à l'imprécision du terme radiométrique et à l'implantation du terme d'attache aux données. Cette nouvelle méthode de fusion, nommée *ATWT-M3-FONC*, devrait respecter la propriété de cohérence grâce à la première méthode de fusion de type *ARSIS* tout en tentant de limiter son flou.

6.2.2 ATWT-SharpenedM3

Cette nouvelle méthode de fusion tente de tirer profit de l'homogénéité du modèle global *ATWT-M3*, tout en venant à nouveau localement rehausser les structures jugées trop floues. La variance injectée étant insuffisante dans *ATWT-M3*, nous avons cherché à combler au moins partiellement le manque d'énergie des hautes fréquences spatiales en amplifiant les coefficients d'ondelettes correspondants. Le coefficient de pondération des coefficients d'ondelettes est une fonction qui dépend de l'activité locale de l'image que nous avons définie comme une fonction des écart-types locaux.

Notons que cette méthode peut être combinée avec le MSM GLP pour donner un GLP-SharpenedM3.

6.2.2.1 IMM de la méthode de fusion ATWT-SharpenedM3

Les paramètres a_{M3} et b_{M3} du modèle global M3 sont estimés à basse résolution spatiale (par un ajustement par les moindres carrés ou l'axe d'inertie), c'est-à-dire entre les plans de coefficients d'ondelettes Pan et MS situés entre *res1* et *res2*.

Soit *cc* le coefficient de corrélation local entre ces deux plans, défini pour le ratio 4 sur une fenêtre t = 21 pour l'algorithme *ATWT* comme utilisé dans l'implantation pratique de l'algorithme *ATWT-RWM* décrit au chapitre précédent. La taille de la fenêtre devient t = 9 pour l'algorithme *GLP* comme définie dans la description de *GLP-CBD*. Sur cette même fenêtre, on calcule également les paramètres η et $\sigma RelLoc(D_{A,1-2})$.

Soit $\sigma loc(D_{A,I-2})$ l'écart-type calculé sur la fenêtre pour le plan de détails de la modalité Pan $D_{A,I-2}$. Soit $\sigma glob(D_{A,I-2})$ l'écart-type calculé sur l'ensemble de la modalité Pan. On définit l'activité locale relative du plan de détails $D_{A,I-2}$, $\sigma RelLoc(D_{A,I-2})$ par : $\sigma RelLoc(D_{A,I-2}) = \sigma loc(D_{A,I-2})/\sigma glob(D_{A,I-2})$ Eq. 6.1

De même, on calcule l'activité locale relative du plan d'ondelettes de la k^{ième} modalité MS $\sigma RelLoc(D_{Bk,1-2})$. On définit la quantité β par : $\beta = [\sigma RelLoc(D_{Bk,1-2}) / \sigma RelLoc(D_{4,1-2})]^2$ Eq. 6.2

et si $\beta < 1$ alors $\beta = 1$.

Le coefficient η permet de pondérer et d'amplifier les coefficients d'ondelettes haute résolution des modalités MS calculés avec a_{M3} et b_{M3} . Il est défini de la manière suivante :

si |cc| < 0.8, alors $\eta = 1$ sinon $\eta = 1 + \beta (|cc| - 0.8)$ enfin, si $\eta \ge 2$ alors $\eta = 2$.

6.2.2.2 HRIMM de ATWT-SharpenedM3

Le *HRIMM* reçoit de l'*IMM* les coefficients a_{M3} et b_{M3} globaux, ainsi que les paramètres η et $\sigma RelLoc(D_{A,I-2})$, et doit synthétiser le plan d'ondelettes $D_{Bk,0-I}$. On mesure l'évolution de l'activité locale dans les échelles pour l'image Pan grâce à l'expression suivante :

 $\gamma = \sigma RelLoc(D_{A,1-2}) / \sigma RelLoc(D_{A,0-1})$ Eq. 6.4 avec une contrainte $1 \le \gamma \le 2$. La taille de la fenêtre d'estimation des écart-types locaux doit s'adapter aux dimensions des structures étudiées ; nous l'avons empiriquement fixée à t = 11 pour *ATWT* et t = 5pour *GLP*.

Le plan d'ondelettes MS situé entre *res0* et *res1* est donné par la relation :

 $D_{Bk,0-1} = \gamma \eta (a_{M3} D_{A,0-1} + b_{M3})$

Eq. 6.5

Eq. 6.3

6.2.3 ATWT-EnhancedRWM

Le point de départ de cette nouvelle méthode de fusion est l'*IMM-HRIMM RWM*. Elle peut s'adapter à tous les *MSM* disponibles sur notre plate-forme IDL, à savoir *ATWT*, *GLP* et *MallatDaub4*. L'objectif de cette nouvelle méthode est d'éviter le faïençage en appliquant les paramètres globaux a_{M3} et b_{M3} lorsque la corrélation locale est insuffisante. Ainsi, on évite le suréchantillonnage des modalités MS lorsque la corrélation entre le Pan et les MS est localement trop faible. Afin de ne pas produire de discontinuité entre le modèle global et local, on utilise une fonction linéaire entre les deux modèles pondérés par la valeur absolue du coefficient de corrélation local, estimé à basse résolution spatiale entre les plans de détails Pan et MS entre *res1* et *res2*.

6.2.3.1 IMM de la méthode de fusion ATWT-EnhancedRWM

Comme pour la méthode de fusion précédente, l'*IMM* calcule les paramètres a_{M3} et b_{M3} issus du modèle global *M3*, ainsi qu'une image de coefficients de corrélation locaux. De plus, on calcule les coefficients a_{RWM} et b_{RWM} locaux selon le modèle *RWM*. La taille de la fenêtre d'estimation est fixée pour le ratio 4 comme pour la méthode de fusion précédente, à savoir t = 21 pour le *MSM ATWT*, et t = 9 pour *GLP*.

6.2.3.2 HRIMM de ATWT-EnhancedRWM

Le modèle *HRIMM* initial consiste en une combinaison linéaire entre les paramètres globaux et locaux, pondérée par une fonction du coefficient de corrélation local *cc*. Si μ est une fonction de la valeur absolue du coefficient de corrélation, alors le plan d'ondelettes $D_{Bk,0-1}$ se calcule de la manière suivante :

 $D_{Bk,0-1} = (1-\mu) (a_{M3} D_{A,0-1} + b_{M3}) + \mu (a_{RWM} D_{A,0-1} + b_{RWM})$ Eq. 6.6 La fonction μ est par exemple $\mu = \sqrt{(cc)}$ ou $(cc)^{1/4}$.

On sait déjà qu'il y a un problème important lorsque le modèle local entre en contradiction avec le global. Par exemple un a_{M3} positif avec et un a_{RWM} négatif, produira, au pixel (i, j) concerné, une valeur aléatoire de $D_{Bk,0-1}$.

Notons que le produit qui donne le plan de détails $D_{Bk,0-1}$ est un produit terme à terme qui sous-entend que les images a et $D_{A,0-1}$ ont les mêmes dimensions. Si on utilise un *MSM* décimé tel que *GLP*, il est nécessaire de suréchantillonner l'image de paramètres a estimés à une échelle inférieure en utilisant par exemple le même outil *GLP*.

6.3 Evaluation de la qualité des nouvelles méthodes

Pour évaluer les nouvelles méthodes de fusion par rapport aux méthodes existantes, nous avons appliqué le protocole d'évaluation décrit dans le chapitre 2 de cette thèse.

6.3.1 Evaluation visuelle des produits de fusion à haute résolution

Pour cette évaluation visuelle, nous avons bénéficié d'une seconde campagne d'expérimentation. Elle a eu lieu à l'école des mines de Paris à Sophia-Antipolis, du 12 au 16 juin 2006. Le mode opératoire de cette seconde campagne a été placé en annexe (annexe 3).

Quatre méthodes de fusion ont été jugées par les expérimentateurs. Nous avons tout d'abord repris la méthode *ATWT-M3* qui donnait les résultats visuels les plus satisfaisants lors de la première campagne. Ballester *et al.* (2003) n'avaient jamais eu l'occasion de tester leur algorithme sur une panoplie importante d'images et de satellites, et cette campagne était l'occasion de comparer sa qualité à d'autres méthodes de fusion. Enfin, les deux nouvelles méthodes *ATWT-M3-FONC* et *ATWT-SharpenedM3* ont été retenues pour l'étude. La méthode de fusion *ATWT-EnhancedRWM* n'a pas été sélectionnée car elle a présenté des artefacts lors d'analyses préliminaires comme le montre la partie 6.3.1.3.

Les interprètes d'images ont étudié vingt-neuf extraits répartis sur sept images différentes. Ces images avaient été acquises par les satellites Ikonos et Quickbird ou provenaient des simulations CNES que nous avons déjà utilisées dans cette thèse. Le ratio de fusion est donc 4 pour toutes les images. Les produits fusionnés ont été présentés sous forme de compositions colorées en vraies couleurs, c'est-à-dire dont les composantes sont les modalités rouge, verte et bleue. Aucune image en fausses couleurs n'a été proposée aux interprètes contrairement à la campagne précédente qui avait conclu à leur manque d'intérêt dans ce cadre. Le tableau 6.1 rappelle les résolutions spatiales et le nombre d'extraits pour chaque site.

Satellite ou simulations	<i>Résolution des modalités MS originales</i>	Résolution des images Pan	Ville	Nombre d'extraits
Ikonos			Fredericton (Canada)	4
	4 m	1 m	Hasselt (Belgique)	5
			Toulouse	3
Quickbird			Fredericton (Canada)	3
	2.8 m	0.7 m	Starckville (USA)	8
			Toulouse	3
CNES	1.6 m	0.4 m	Toulouse	3

Tableau 6.1 : récapitulatif des images pour la seconde campagne d'expérimentation.

La redondance des sites (Fredericton et Toulouse) pour différents satellites a permis l'observation de l'incidence des différentes méthodes de fusion en fonction du capteur et de la résolution spatiale. Notons que nous avons synthétisé les modalités Pan des différents extraits CNES à partir des coefficients de contribution spectrale de chaque modalité MS par rapport au Pan de l'imagerie Quickbird (chapitre 3 de cette thèse, équation 3.2).

L'objectif de cette nouvelle campagne était l'évaluation qualitative à haute résolution spatiale de ces différentes méthodes, de procéder à un classement relatif et enfin de déterminer si ces méthodes sont acceptables pour un usage opérationnel des produits de fusion dans le cadre d'une exploitation opérationnelle au sein du ministère de la défense. Préalablement à la campagne, nous avions défini avec les interprètes les sites d'intérêt dans les images et les différents aspects qu'ils devaient évaluer. Nous avons classé ces différents aspects en quatre grandes catégories, qui concernaient leur impression générale sur l'image, une critique de la géométrie, suivie par une critique de la radiométrie, pour aboutir finalement à une étude généralisée sur la qualité de l'image en terme de bruit, flou, piqué ...

La partie qui suit reprend les illustrations du début de chapitre afin de montrer que les nouvelles méthodes de fusion testées lors de la campagne ne reproduisent plus, ou dans une moindre mesure, les artefacts relevés lors de la première campagne. Nous y associons un bilan qualitatif par méthode de fusion. Ensuite, on montre les résultats visuels sur ces illustrations pour la méthode *ATWT-EnhancedRWM*, non retenue pour cette analyse. Enfin, nous présentons les résultats quantitatifs obtenus par les méthodes de fusion de la campagne 2, ainsi que par *ATWT-EnhancedRWM* et quelques autres méthodes existantes de type *ARSIS*.

6.3.1.1 Les méthodes de la campagne 2 vis-à-vis des artefacts

Les prochaines figures reprennent quatre des cinq illustrations présentées en début de chapitre. Nous y avons ajouté un exemple pour illustrer le défaut de l'inversion de contraste qui reste problématique pour la plupart des méthodes. Nous rappelons que les interprètes n'ont pas formé de mosaïque pour leur interprétation qualitative. Cependant, nous avons nous-même procédé à la création de ces mosaïques pour nous assurer que leurs conclusions demeuraient valables. Nous avons remarqué que les différences de couleurs n'étaient pas imputables à l'outil de visualisation. Les illustrations présentées ici ont toutes la même table de couleur au sein d'une même figure.





d)



Figure 6.13 : image CNES, Toulouse. a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *FONC*, c) par *ATWT-M3-FONC*, d) par *ATWT-SharpenedM3*, e) modalités MS originales. Copyright CNES 2000.

Aucune des quatre méthodes de fusion n'a produit de faïençage sur ce premier exemple. Les inversions de contraste et hétérogénéités de la piste d'athlétisme ne sont plus visibles. Il est dorénavant possible de suivre et donc de dessiner les traits des pistes de course et des différents terrains de sport. Le flou perceptible sur le ponctuel rectangulaire en haut à droite de la figure 6.13a donne une impression similaire dans l'image 6.13c, mais est nettement moins flou dans les deux derniers produits de fusion. La figure 6.13b présente une distorsion radiométrique globale qui tend vers le rose.





a)

b)



Figure 6.14 : image Ikonos, Hasselt (Belgique). a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *FONC*, c) par *ATWT-M3-FONC*, d) par *ATWT-SharpenedM3*, e) Pan, f) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Space Imaging 2002.

Les artefacts des méthodes de fusion de la première session étaient très nombreux sur cet exemple (figure 6.14). Ici, on remarque une fois encore l'absence de faïençage et une disparition des artefacts ponctuels colorés, comme la tache rose observée au bout de la piste du terrain de football. Par contre, des aplats de couleurs apparaissent pour les deux méthodes *FONC* et *ATWT-M3-FONC*. Par 'aplats', on entend des zones de l'image qui présentent à peu près la même couleur, comme avec des lignes de niveaux. Ce nouvel artefact est moins gênant mais reste un obstacle à une bonne interprétation de la composition colorée du produit fusionné.

On ne retrouve pas non plus le rebond de radiométrie plus élevé du milieu de la rivière pour toutes les méthodes. La radiométrie de la méthode *FONC* est mauvaise, avec des couleurs qui tendent vers le jaune. Les hautes radiométries saturées sont présentes tout en étant moins prononcées. On remarque que le rectangle blanc correspondant probablement à un bus ou un véhicule de transport de marchandises en haut au milieu de l'image est parfaitement synthétisé par la méthode *ATWT-M3-FONC*, sans aucun bavé sur la droite correspondant au déplacement du véhicule entre les différentes acquisitions Pan et MS. En effet, le flou à droite du véhicule donne l'impression qu'il a « allumé ses phares », mais il s'agit d'un phénomène que l'on appelle « le fantôme ». La méthode de fusion *ATWT-M3-FONC* a été fidèle au contenu géométrique de la modalité Pan, en ne tenant pas compte de l'information MS.



Figure 6.15 : image Ikonos, abords de Fredericton (Canada). a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *FONC*, c) par *ATWT-M3-FONC*, d) par *ATWT-sharpenedM3*, e) Pan, f) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Space Imaging 2002.

La troisième illustration (figure 6.15) avait montré lors de la première campagne un défaut d'inversion de contraste produit par les méthodes de fusion qui suivaient une approche locale. Ce défaut est désormais absent des quatre produits fusionnés présentés. La méthode de fusion *FONC* présente une forte distorsion des couleurs : le bâti (routes, bâtiments et véhicules) ainsi que la rivière

ne sont plus gris comme sur la composition colorée des modalités MS d'origine, mais sont teintés de bleu. Il s'agit du défaut majeur de cette méthode. Par contre, le rendu géométrique est très bon en ce qui concerne cette méthode et il en est de même pour la méthode *ATWT-SharpenedM3*, si on la compare avec la méthode *ATWT-M3* jugée un peu trop lisse sur cet exemple. Les aplats de couleurs déjà abordés dans l'exemple précédent (figure 6.14) sont bien visibles pour la méthode de fusion *ATWT-M3-FONC* placée figure 6.15c ; les transitions entre la route et la végétation ne sont plus très bien définies, ce qui rend difficile le tracé et la mesure des distances des différents éléments de l'image, et peut être dommageable pour l'interprétation.





c)





d)



Figure 6.16 : image Quickbird, centre ville de Fredericton (Canada). a) produit fusionné par ATWT-M3, b) par FONC, c) par ATWT-M3-FONC, d) par ATWT-sharpenedM3, e) Pan, f) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Digital Globe 2002.

En ce qui concerne le quatrième exemple (figure 6.16), la transition entre le bâtiment et son ombre avait été jugée trop molle pour *ATWT-M3*, ce qui donnait l'impression d'un dégradé entre les deux régions. On remarque ici la supériorité de la méthode *FONC* sur toutes les autres méthodes de fusion. Le rendu de la transition est parfait, très proche de celui de la modalité Pan en terme de qualité géométrique. Même si la couleur de la composition colorée de cet extrait tire vers le jaune, la qualité de synthèse des scènes situées en ville est très bonne. Les deux autres méthodes *ATWT-M3-FONC* et *ATWT-sharpenedM3* présentent une fidélité des couleurs vis-à-vis des modalités MS originales. Cependant, la transition bave un peu, particulièrement sur la figure 6.16c. La voiture rouge/orangée en haut à droite sur la route n'a pas été correctement synthétisée dans ces images ; soit la couleur se trouve légèrement décalée par rapport au véhicule, soit elle est diffusée dans la radiométrie des pixels aux alentours du bitume.

Nous avons sélectionné un exemple supplémentaire (figure 6.17) pour montrer le problème d'inversion de contraste. Cet exemple concerne aussi le stade de la ville de Toulouse, mais provient du satellite Ikonos. On remarque que la résolution spatiale de la modalité Pan (1 m) ne permet plus la distinction des différents couloirs de la piste d'athlétisme. Les méthodes de fusion ont toutes échoué dans la synthèse de la piste d'athlétisme, exceptée la méthode *FONC*.



b)



Figure 6.17 : image Ikonos, Toulouse. a) produit fusionné par *ATWT-M3*, b) par *FONC*, c) par *ATWT-M3-FONC*, d) par *ATWT-sharpenedM3*, e) Pan, f) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Space Imaging 2002.

En effet, les deux figures 6.17e et f montrent que la piste d'athlétisme est en inversion de contraste sur les deux images. Lors de la synthèse à haute résolution spatiale des modalités MS, la piste devrait apparaître plus claire que son environnement, ce qui n'est pas le cas des images 6.17a, c et d. On se retrouve tout à fait dans la situation où les approches locales se trouvent favorisées puisqu'elles ont la capacité de capter ces dissimilitudes avec une taille de fenêtre adaptée. Par contre, les approches globales se trouvent en échec puisque la corrélation globale entre la modalité Pan et chaque modalité MS est positive, ce qui engendre des coefficients de détails avec le même gradient que la modalité Pan. Ainsi, la méthode *FONC*, qui est la méthode se rapprochant le plus d'une approche locale, a été en mesure de capter cette dissimilitude et de synthétiser cet objet avec le bon gradient.

6.3.1.2 Synthèse de l'évaluation de la qualité par méthode de fusion

Méthode *ATWT-M3* (image a des figures 6.13 à 6.17) : sur les exemples testés lors de cette seconde campagne d'interprétation, les interprètes ont confirmé un bon comportement au niveau de la restitution des couleurs (aucune aberration chromatique). La végétation apparaît trop floue, et les hautes radiométries ponctuelles se trouvent souvent entourées d'un halo.

Méthode FONC (image b des figures 6.13 à 6.17) : les points forts de cette méthode sont une bonne restitution du contraste et un bon comportement de la méthode dans les zones artificielles

(conservation des géométries, ponctuels, linéaires et textures). Cette méthode est aussi capable de capter les dissimilitudes entre le Pan et les modalités MS. Cependant, l'inconvénient principal de cette méthode de fusion est la distorsion radiométrique, évidente pour les satellites Quickbird et surtout Ikonos. L'origine principale de cette distorsion est le terme radiométrique qui fait appel à des coefficients de pondération de la relation linéaire des modalités MS par rapport au Pan des méthodes de type contribution spectrale relative. Comme cette relation n'est qu'une approximation globale, elle n'est pas vérifiée précisément en chaque pixel de l'image, contrairement aux simulations CNES où la modalité Pan a été synthétisée comme telle.

Néanmoins, on note de très nombreux artefacts dans la végétation, avec des aplats qui dénaturent le paysage ; les textures sont atténuées et l'on perd les transitions entre la végétation et le bâti. Les défauts touchent aussi la couleur, avec la présence de halos, d'irisations colorées et des couleurs erronées qui ne permettent plus de distinguer les différents sols, qui donnent une impression non naturelle à l'image et faussent l'interprétation.

La perte des transitions se manifeste par des aplats, par un manque de netteté qui s'accompagne de la perte de ponctuels le long des transitions. Ce défaut apparaît aussi dans les extraits de la méthode *ATWT-M3-FONC*. La figure 6.18a montre un extrait fusionné par *FONC* où la présence des aplats est flagrante. Il n'est pas possible de distinguer le bord du chemin par rapport à la végétation. Les images b et c de la figure 6.18 correspondent au même extrait respectivement dans la modalité Pan et la composition colorée MS d'origine suréchantillonnée par un bicubique.



Figure 6.18 : image Quickbird, extrait de la périphérie de Starckville (USA). a) composition colorée obtenue par la méthode *FONC*, b) extrait Pan correspondant, c) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Digital Globe 2003.

La figure 6.19 suivante met l'accent sur le problème de distorsion locale engendrée par cette méthode de fusion. Comme pour l'illustration précédente, nous avons placé les modalités Pan et MS de référence figure 6.19b et c. Nous avons sélectionné un exemple de l'imagerie CNES pour montrer qu'il s'agit d'un problème indépendant de la distorsion radiométrique globale engendrée par le terme radiométrique. Cet extrait montre un immeuble orienté selon la diagonale ; on y voit très nettement des couleurs aberrantes apparaître sur le toit du bâtiment avec des dominantes violette et jaune. Les formes de haute radiométrie présentent un rebond violet parallèle et décalé de quelques pixels vers le bas et la droite de l'image. Quelques points du toit apparaissent aussi très nettement jaunes ou verts clairs. Il s'agit d'une mauvaise estimation de la radiométrie des pixels qui provient d'un, ou des deux autres termes de la méthode de Ballester *et al.* (2003).



Figure 6.19 : image CNES, Toulouse. a) composition colorée obtenue par la méthode *FONC*, b) extrait Pan correspondant, c) modalités MS de référence à haute résolution spatiale (40 cm). Copyright CNES 2000.

Le non-respect de l'information colorée et le mauvais comportement de cet algorithme sur les linéaires, les réseaux, les surfaces et les contours ont poussé les interprètes à ne pas accepter cette méthode.

Méthode *ATWT-M3-FONC* (image c des figures 6.13 à 6.17) : les zones uniquement artificielles sont bien restituées par la méthode ; les géométries, les ponctuels et les linéaires ont été préservés. Le contraste est bon, dès lors que la végétation est absente de la scène. Le problème se corse nettement en présence de végétation, où les aplats de couleurs sont très nombreux. La méthode de fusion rencontre des difficultés à synthétiser les transitions artificiel/naturel, où le flou généré entraîne une perte des détails (ponctuels et linéaires). Il est possible d'y rencontrer des inversions de radiométrie. Les aplats rendent les couleurs un peu ternes. Cette méthode n'a pas été systématiquement rejetée par les interprètes, mais ils restent méfiants et mesurés dans leurs conclusions.

La figure 6.20a suivante est un exemple intéressant, puisqu'il illustre à la fois le point fort et le point faible de la méthode. Cet extrait montre un bâtiment dont la transition avec son ombre est particulièrement bien synthétisée, alors que la transition opposée, avec la végétation, est beaucoup plus floue. Les images placées en b et c représentent une fois encore les deux références Pan et MS suréchantillonnées correspondant à l'extrait d'intérêt.



Figure 6.20 : image Ikonos, Fredericton (USA). a) composition colorée obtenue par la méthode *FONC*, b) extrait Pan correspondant, c) modalités MS originales suréchantillonnées par un opérateur bicubique. Copyright Space Imaging 2002.

Le point commun entre ces deux méthodes est le terme géométrique. On rappelle que le terme géométrique prend la valeur du gradient des modalités MS, mais en tenant compte de la direction du gradient de la modalité Pan. La conclusion est que l'approximation numérique du gradient ne permet pas de retranscrire correctement les inversions de contraste.

Méthode *ATWT-SharpenedM3* (image d des figures 6.13 à 6.17) : cette méthode de fusion synthétise correctement les signatures spectrales puisqu'aucune aberration chromatique n'a été observée sur les exemples traités. Le comportement de la méthode vis-à-vis des textures sur la végétation a été jugé satisfaisant par les interprètes. On note l'apparition ponctuelle de flou et de halo d'une part, et d'autre part un ajout de bruit pour les images à plus haute résolution spatiale, c'est-à-dire pour l'imagerie Pléiades. Ces artefacts correspondent à un problème de compromis entre des coefficients d'ondelettes qui ont été trop ou pas assez rehaussés, donc un mauvais dosage dans l'injection des hautes fréquences spatiales.

Cette méthode de fusion a été sélectionnée comme celle présentant la meilleure qualité visuelle de cette deuxième session d'évaluation qualitative. Elle dépasse la qualité visuelle de la méthode *ATWT-M3* et a été désignée comme étant la seule à pouvoir être utilisée dans un cadre opérationnel sans la visualisation parallèle des modalités Pan et MS.

6.3.1.3 Evaluation visuelle de la méthode ATWT-EnhancedRWM

Les résultats préliminaires de cette méthode de fusion étaient très prometteurs, comme en témoignent les deux extraits de la figure 6.21. Ils correspondent aux extraits des figures 6.13 et 6.16.



Figure 6.21 : a) Composition colorée qui reprend l'exemple CNES au-dessus de Toulouse, issue de la fusion par *ATWT-EnhancedRWM*, b) extrait Quickbird au-dessus de Fredericton, même méthode de fusion.

Toutefois, en appliquant la méthode à d'autres extraits de la campagne 2, nous avons observé la présence d'artefacts. La figure 6.22 montre les deux extraits des illustrations 6.14 et 6.15 fusionnés par *ATWT-EnhancedRWM*. L'image de la ville de Hasselt avec le stade de foot montre des zones de flou ainsi que des amas de pixels colorés aberrants (rose). La route de l'image de droite arbore toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. C'est très joli, néanmoins ce n'est pas l'objectif de la synthèse d'images à haute résolution spatiale.



Figure 6.22 : a) Composition colorée qui reprend l'exemple Ikonos au-dessus de Hasselt (Belgique), issue de la fusion par *ATWT-EnhancedRWM*, b) extrait Ikonos au-dessus d'un échangeur de Fredericton (Canada), même méthode de fusion.

Ces deux extraits justifient la mise à l'écart de cette méthode de fusion dans le cadre de l'évaluation visuelle des produits de fusion pour la seconde campagne d'expérimentation.

6.3.2 Evaluation des propriétés de cohérence et de synthèse

Les étapes suivantes du protocole d'évaluation ont été appliquées aux images de la seconde campagne. Pour montrer un exemple de résultat obtenu grâce à la plate-forme IDL, nous avons choisi l'extrait de l'image Pléiades qui contient la piste d'athlétisme, utilisé pour nos illustrations. En plus des méthodes de fusion de la seconde campagne, nous y avons ajouté les produits de fusion des méthodes existantes *ATWT-RWM* et *ATWT-CBD* ainsi que ceux issus de *ATWT-EnhancedRWM*.

La vérification des deux propriétés nécessite l'utilisation d'un filtre de dégradation, que nous recommandons extérieur à celui utilisé dans les méthodes de fusion. Comme le *MSM* est *ATWT* pour toutes les méthodes de fusion, nous avons utilisé *GLP* pour la vérification des deux propriétés. Les distances choisies pour la qualité appartiennent au bilan de qualité que nous recommandons. Cependant, les deux distances de ce dernier, qui concernent la qualité géométrique, n'ont pu être calculées par manque de temps.

6.3.2.1 Vérification de la propriété de cohérence

La vérification de la propriété de cohérence correspond à la seconde étape du protocole d'évaluation de la qualité. Pour cela, tous les produits de fusion ont été dégradés jusqu'à la résolution spatiale des modalités MS d'origine : 160 cm pour les modalités CNES, 2.8 m pour Quickbird et 4 m pour Ikonos. Le tableau 6.2 donne un exemple de bilan de qualité, celui obtenu sur l'extrait CNES. Une remarque générale est que, quel que soit la méthode considérée, les résultats sont moins performants pour la modalité PIR que pour les autres modalités.

Discussion à propos des méthodes *ATWT-M3, ATWT-RWM, ATWT-CBD* **et** *ATWT-EnhancedRWM*: les valeurs des distances correspondant aux méthodes *ATWT-RWM* et *ATWT-EnhancedRWM* sont identiques pour les modalités visibles, et *ATWT-RWM* donne de meilleurs résultats pour la modalité PIR. Si on compare ces quatre méthodes, les modalités visibles ont été synthétisées au plus proche de leurs références par *ATWT-CBD* mais les résultats sont assez proches de ceux obtenus par *ATWT-RWM* et *ATWT-EnhancedRWM*. Par contre, la modalité PIR est mieux synthétisée par *ATWT-M3*.

Comparaison entre méthodes de la seconde campagne : en ce qui concerne les simulations CNES, on rappelle que la modalité Pan a été synthétisée à partir des quatre modalités MS. Les bandes

passantes des modalités MS couvrent ainsi parfaitement celle du Pan, donc certaines dissimilitudes ne vont pas exister avec ce type d'imagerie. Voilà pourquoi on s'attend aussi à ce que la méthode *FONC* offre un meilleur comportement avec les simulations CNES qu'avec les autres types d'imagerie.

Si on observe les résultats pour le biais, on remarque qu'il est proche de 0 pour toutes les méthodes de fusion et toutes les modalités, excepté pour les modalités rouge et verte synthétisées par *FONC*. Les valeurs de biais pour *FONC* traduisent la distorsion radiométrique rapportée lors de l'évaluation visuelle à basse résolution spatiale. Le biais est plus faible pour toutes les modalités MS synthétisées par *ATWT-M3*, avec une valeur inférieure ou égale à 0.2 %.

La différence en variance relative (référence - fusionnée) est la meilleure pour *ATWT-SharpenedM3* toutes modalités confondues. Cette différence est plutôt similaire pour *ATWT-M3* et *ATWT-M3-FONC* pour les modalités dans le visible. Par contre, sa valeur est doublée ou triplée pour *FONC* pour chaque modalité. Pour la modalité PIR, la différence de variance en valeur absolue de *ATWT-M3* vaut la moitié de celle obtenue par *ATWT-M3-FONC*, qui vaut elle-même la moitié de celle par *FONC*. Toutes les valeurs sont positives, sauf pour les modalités bleue et PIR de *FONC*, ce qui signifie que pour ces deux modalités, l'innovation a été trop importante tout en n'étant pas toujours pertinente qui peut alors être considérée comme un bruit.

L'écart-type de l'image de différence indique la proportion de pixels de l'image fusionnée en désaccord avec la référence. On remarque une fois encore la supériorité de *ATWT-SharpenedM3* sur les trois autres méthodes, à part cette fois-ci pour la modalité PIR. La valeur de l'écart-type relatif est moitié moindre pour cette méthode que pour *ATWT-M3* et *ATWT-M3-FONC. FONC* donne les valeurs d'écart-type les plus élevées. *ATWT-M3* est plus performante sur la modalité PIR. Les résultats de la méthode *ATWT-SharpenedM3* à propos de la modalité PIR nous pousse à prendre des précautions quant aux conclusions à apporter vis-à-vis de la méthode. Si elle donne les meilleures résultats pour les modalités du visible en diminuant considérablement la différence en variance et l'écart-type, une exploitation conjointe de ces deux distances sur la modalité PIR montre que l'on a injecté une quantité plus importante de hautes fréquences spatiales (baisse de la différence de variance), mais comme parallèlement l'écart-type de l'image de différence a augmenté, on peut affirmer que l'information injectée est partiellement erronée.

Le coefficient de corrélation n'est pas très discriminant puisque sa valeur est souvent très proche de 1, sa valeur idéale.

Les distances multimodales choisies sont *ERGAS*, *SAM* et *biaisRel(diffNorms)*. Les valeurs sont très élevées pour *FONC* comparées aux autres méthodes. La meilleure valeur obtenue pour la distance *ERGAS* est celle trouvée pour *ATWT-SharpenedM3*. L'angle moyen entre les vecteurs spectraux des références et des produits fusionnés *SAM* est le plus faible pour *ATWT-M3*, mais reste assez proche de celui obtenu pour *ATWT-M3-FONC* et *ATWT-SharpenedM3*. Le biais relatif entre les normes des vecteurs spectraux est le meilleur pour *ATWT-M3*, et se dégrade progressivement en passant de *ATWT-SharpenedM3* à *ATWT-M3-FONC* puis *FONC*. Notons que l'angle des vecteurs MS et la différence de leurs normes présentent le défaut de ne pas prendre en compte la dynamique des images, comme le fait *ERGAS*. La dynamique de la modalité PIR est plus importante que pour les autres modalités, on obtient des valeurs moins bonnes pour les deux distances multimodales *SAM* et *biaisRel(diffNorms)*.

Conclusion sur la vérification de la propriété de cohérence pour toutes les méthodes de fusion et toutes les images de la campagne 2 : l'évaluation visuelle des produits de fusion ramenés à la basse résolution spatiale n'a pas révélé de distorsion flagrante. Néanmoins, les produits de fusion issus de la méthode *FONC* montrent des couleurs aberrantes même s'ils bénéficient d'une qualité géométrique satisfaisante. Au niveau de l'évaluation quantitative, la méthode de fusion *ATWT-SharpenedM3* est celle qui respecte le mieux la propriété de cohérence pour les modalités du visible. Pour ces modalités, ses résultats sont assez proches de ceux obtenus par *ATWT-CBD*, *ATWT-RWM* et *ATWT*-

EnhancedRWM. La modalité PIR a été synthétisée au plus proche de sa référence par *ATWT*-*SharpenedM3*, *ATWT-M3* et *ATWT-CBD*.

La distance *ERGAS* est inférieure à 1.5 pour toutes les images fusionnées, exceptée celle fusionnée grâce à la méthode *FONC*. Les deux meilleures méthodes à ce niveau sont *ATWT-SharpenedM3* et *ATWT-CBD* avec une valeur *ERGAS* inférieure à 1. Cette dernière méthode présente globalement la meilleure qualité multimodale pour tous les extraits.

En conclusion, les méthodes *ATWT-M3*, *ATWT-SharpenedM3* et *ATWT-CBD* respectent bien la propriété de cohérence. Les autres méthodes respectent plutôt bien cette propriété, mais la méthode *FONC*, quant à elle, ne la respecte que faiblement.

Modalités	Distances	ATWT-M3	FONC	ATWT-M3-FONC	ATWT- SharpenedM3	ATWT- EnhancedRWM	ATWT-RWM	ATWT-CBD
Bleue	biaisRel	0.1	0.4	0.6	0.3	0	0	0
	diffVarRel	6.5	-13.7	7.2	1.9	1.4	1.4	2.1
	σRel	4.4	16.5	4.4	2.8	2.7	2.7	2.4
	сс	0.997	0.993	0.997	0.999	0.999	0.999	0.999
Verte	biaisRel	0.1	13	0.6	0.4	0	0	0
	diffVarRel	6.7	21.8	7.4	1.8	1.5	1.5	2.1
	σRel	4.2	6.4	4.1	2.4	2.5	2.5	2.1
	сс	0.998	1.000	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999
Rouge	biaisRel	0.1	12.7	0.5	0.4	0	0	0
	diffVarRel	5.9	18.1	6.4	0.9	0.9	0.9	1.8
	σRel	3.8	5.7	3.6	2.1	2.3	2.3	1.9
	сс	0.998	1.000	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000
PIR	biaisRel	0.2	0.1	0.4	0.4	-1.3	-1.7	0
	diffVarRel	7.9	-24.6	13	2.2	-11.1	-20	8.4
	σRel	5.2	8.3	8.5	6.3	11.6	10	5.6
	сс	0.990	0.985	0.976	0.986	0.958	0.973	0.990
Distances multimodales	ERGAS	1.1	2.88	1.38	0.95	1.56	1.38	0.84
	SAM	2.33	6.25	2.94	3	2.8	2.81	1.4
	biaisRel(diffNorms)	2.8	23.3	6.5	4.9	-11.4	-16.5	0.3

Tableau 6.2 : résultats pour la vérification de la propriété de cohérence, extrait CNES

6.3.2.2 Vérification de la propriété de synthèse

Les ensembles originaux sont dégradés d'un ratio 4 par l'algorithme de décomposition hiérarchique de l'information *GLP*, avant d'appliquer toutes les méthodes de fusion à ces nouveaux ensembles. Il n'était pas nécessaire de procéder de la sorte pour les simulations CNES où les modalités MS à haute résolution (40 cm) étaient déjà disponibles. Les résultats qui concernent la vérification de la propriété de synthèse sur l'extrait CNES sont placés tableau 6.3.

Discussion à propos des méthodes *ATWT-M3, ATWT-RWM, ATWT-CBD* **et** *ATWT-EnhancedRWM* : concernant l'analyse monomodale, les mêmes remarques que précédemment peuvent être établies en comparant *ATWT-RWM* et *ATWT-EnhancedRWM*, à savoir qu'elles donnent les mêmes valeurs de distances pour les modalités du visible. La modalité PIR se révèle très pénalisante pour la qualité de *ATWT-EnhancedRWM* comme on peut le voir sur la figure 6.23. Toutes modalités confondues, les résultats délivrés par *ATWT-CBD* et *ATWT-RWM* sont bons et assez proches. Leurs résultats dépassent nettement ceux issus de la méthode *ATWT-M3*. Cette dernière montre la meilleure performance de ces quatre méthodes sur la modalité PIR, avec toutefois un aspect brumeux du résultat (figure 6.23a). Lors des analyses visuelles, *ATWT-M3* a été préférée à *ATWT-CBD* et *ATWT-RWM* comme nous l'avons discuté auparavant.



c)

d)



Figure 6.23 : image CNES, Toulouse. a) modalité PIR fusionnées par *ATWT-M3*, b) par *FONC*, c) par *ATWT-M3-FONC*, *d) par ATWT-SharpenedM3*, *e)* par *ATWT-RWM*, f) par *ATWT-CBD*, g) par *ATWT-EnhancedRWM*, h) modalité PIR originale. Copyright CNES 2000.

Comparaison entre méthodes de la seconde campagne : le biais obtenu lors de la vérification de la propriété de synthèse est très faible pour toutes les méthodes et toutes les modalités, excepté pour les modalités rouge et verte synthétisées par la méthode *FONC*. Ceci apparaît de manière évidente lors des analyses visuelles.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, il est plus pertinent d'analyser la différence en variance et l'écart-type de l'image de différence en même temps pour pouvoir conclure. Les modalités bleue et PIR synthétisées par *FONC* montrent le même comportement au niveau de ces distances, c'est-à-dire une différence en variance négative et un écart-type élevé. Ces deux nombres caractérisent une injection trop importante de structures de haute fréquence équivalentes à un bruit. Au contraire, les modalités rouge et verte montrent conjointement à un écart-type élevé, une différence en variance élevée. Dans ce cas, l'injection a été insuffisante. *ATWT-SharpenedM3* présente les deux valeurs les plus faibles pour toutes les bandes spectrales du visible. Pourtant, les compositions colorées de certains extraits CNES ont donné une impression de bruit dans les zones homogènes de l'image. Les valeurs de ces deux distances du bilan de qualité monomodal sont moins bonnes dans le PIR. Une partie de l'énergie injectée n'est que du bruit. La figure 6.23d ne montre pas cet aspect bruité car l'extrait montre une zone riche en hautes fréquences spatiales, et montre au contraire un rehaussement des détails dans les arbres qui n'est pas aberrant.

La corrélation confirme les conclusions des deux distances précédentes. La méthode *FONC* donne la corrélation la plus faible par modalité. Les trois autres méthodes de la seconde campagne

montrent des coefficients de corrélation équivalents pour les modalités visibles. On observe une nette supériorité de *ATWT-M3* pour le PIR.

Les valeurs d'*ERGAS* sont proches et discréditent *FONC* par rapport aux trois autres méthodes. Les valeurs de la distance *SAM* favorisent *ATWT-M3* et *ATWT-M3-FONC*, alors que le biais relatif des normes est le plus faible pour *ATWT-M3*. Ainsi, les distances multimodales donnent l'avantage à *ATWT-M3* et *ATWT-SharpenedM3*.

Modalités	Distances	ATWT-M3	FONC	ATWT-M3- FONC	ATWT- SharpenedM3	ATWT- EnhancedRWM	ATWT-RWM	ATWT-CBD
Bleue	biaisRel	0.2	0.7	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1
	diffVarRel	11.8	-6.7	12.1	3.8	5.9	5.9	5.2
	σRel	7.4	13.7	7.2	5	5.4	5.4	5
	сс	0.993	0.972	0.993	0.996	0.996	0.996	0.996
Verte	biaisRel	0.3	13.6	0.8	0.5	0.1	0.1	0.1
	diffVarRel	10.7	21.7	10.8	2.4	5	5	4.3
	σRel	6.4	7.1	6.1	4.1	4.6	4.6	3.9
	сс	0.995	0.999	0.996	0.997	0.997	0.997	0.998
Rouge	biaisRel	0.2	12.6	0.7	0.5	0.1	0.1	0.1
	diffVarRel	9	17.5	9.1	0.2	3.4	3.4	2.8
	σRel	5.4	6.3	4.9	3.9	4.1	4.1	3.1
	сс	0.997	0.985	0.998	0.998	0.998	0.998	0.999
PIR	biaisRel	0.2	0.3	0.4	0.4	-0.9	-1.1	0
	diffVarRel	4.4	-14.4	9.3	-6.7	-17.2	-10	11.7
	σRel	7.7	14.1	10.5	10	20.2	12.9	11.9
	сс	0.987	0.960	0.975	0.978	0.918	0.965	0.968
Distances multimodales	ERGAS	1.7	3.58	1.88	1.58	2.73	1.92	1.73
	SAM	3.25	6.44	3.26	8	5.77	3.51	2.73
	biaisRel(diffNorms)	2.5	27.1	6.2	4.4	-10.2	-11.2	0

Tableau 6.3 : résultat pour la vérification de la propriété de synthèse, extrait CNES

Conclusion sur la vérification de la propriété de synthèse pour toutes les méthodes de fusion et toutes les images de la campagne 2 : l'évaluation visuelle des produits de fusion des méthodes *ATWT-M3*, *ATWT-RWM* et *ATWT-CBD* a permis de constater les mêmes artefacts que lors de la première campagne d'analyse. En ce qui concerne les nouvelles méthodes et *FONC*, les conclusions de l'analyse visuelle des produits de fusion à haute résolution spatiale (partie 6.3.1) et celles de l'analyse visuelle pour la vérification de la propriété de synthèse correspondent. La méthode *FONC* montre une distorsion radiométrique générale des compositions colorées et la présence de quelques ponctuels de couleurs aberrantes. Les transitions entre le bâti et la végétation ne sont pas correctement synthétisées avec des aplats de couleurs qui atténuent le contraste qui peuvent faire disparaître des éléments ponctuels. Cette remarque a aussi été faite pour la méthode *ATWT-M3-FONC*. Par contre, ces méthodes montrent une très bonne performance dans la synthèse des structures urbaines telles que les bâtiments et les axes routiers. La méthode *ATWT-M3* confirme l'impression générale de flou dans les images. *ATWT-SharpenedM3* est celle qui montre la meilleure qualité visuelle, excepté sur les modalités CNES.

6.4 Conclusion

L'observation des artefacts de quelques méthodes de type *ARSIS* nous a apporté des pistes de développement pour de nouvelles méthodes de fusion. En effet, en dépit d'une bonne qualité de ces méthodes et particulièrement des méthodes qui adoptent une approche locale dans la synthèse haute résolution des coefficients de détails, les défauts observés affaiblissaient le bilan de qualité de ces méthodes. L'enjeu était de proposer de nouvelles méthodes de fusion qui conservaient la qualité quantitative de ces méthodes tout en luttant contre les artefacts identifiés.

Trois nouvelles méthodes ont donc été développées et évaluées en appliquant le protocole d'évaluation défini dans le chapitre 2 et en comparant ces résultats à ceux de méthodes existantes.

Par rapport à la référence qu'est *ATWT-M3*, on constate que la méthode *FONC* la dépasse en performance pour la qualité géométrique sur les zones urbaines, mais dégrade fortement les signatures spectrales des images. Ce non-respect de la propriété de cohérence est évité dans la méthode *ATWT-M3-FONC* qui utilise comme point de départ les produits fusionnés *ATWT-M3*. Par contre, si l'avantage de cette méthode par rapport à *ATWT-M3* est de mieux synthétiser les contours des bâtiments, on perd en qualité sur les régions naturelles. Par conséquent, grâce aux résultats statistiques, *ATWT-M3* reste globalement plus performante que ces deux méthodes.

De manière générale, c'est la méthode *ATWT-SharpenedM3* qui est la plus satisfaisante. Elle surpasse *ATWT-M3* en conservant de bons résultats pour la vérification de la propriété de cohérence et en offrant parallèlement une solution qui a permis de lutter efficacement contre le flou.

Toutefois, notons qu'il est difficile de conclure de manière catégorique quant aux performances d'une méthode relativement à d'autres. Comme l'interprétation des résultats l'a révélé, une méthode peut être satisfaisante sur un élément de l'image et pour une modalité donnée, et non pour d'autres. Ainsi, la méthode *ATWT-M3* a très souvent été surpassée en terme de qualité radiométrique et/ou géométrique par des méthodes de fusion qui n'ont pas été retenues lors de la seconde campagne ou parce qu'une ou plusieurs modalités donnaient de mauvais résultats en terme de distances. Des pistes d'amélioration de *ATWT-M3* ou *ATWT-SharpenedM3* peuvent être trouvées dans les autres méthodes *FONC* et *ATWT-EnhancedRWM*.

L'évaluation visuelle des produits de fusion à haute résolution spatiale en vraies couleurs par les interprètes d'images a mené à la conclusion que la méthode *ATWT-SharpenedM3* présente une qualité visuelle satisfaisante sur des images satellites (hors simulations), quasiment utilisable dans un contexte d'exploitation opérationnelle au sein du ministère de la défense.

Les interprètes émettent toutefois un bémol concernant le comportement de la méthode vis-àvis des simulations CNES. En effet, la méthode n'est pas toujours en mesure de calculer le bon dosage au niveau de l'injection de l'énergie dans les hautes fréquences spatiales. Certaines régions homogènes ont tendance à laisser apparaître un bruit correspondant à une injection trop importante de détails de hautes fréquences spatiales. Cette limite à propos de la méthode est confirmée par l'évaluation quantitative ; une diminution de la différence en variance relative conjointement à une augmentation de l'écart-type de l'image de différence comparée à la méthode *ATWT-M3* suggèrent une injection d'information haute fréquence erronée.

Dans la perspective de nouveaux développements, il faut noter que l'inversion de contraste est un problème qui risque d'être récurrent à cause des raisons exprimées dans la partie 6.1.3.5. L'enjeu du compromis entre approche locale et globale est toujours d'actualité. D'après la nouvelle méthode de fusion exploratoire développée avec Gabriel Peyré et placée en annexe (annexe 5), on peut conclure qu'une approche locale basée exclusivement sur la valeur du coefficient de corrélation locale ne permet pas de se prémunir d'un aspect hétérogène du produit fusionné final : on peut envisager que l'intervention d'une grandeur supplémentaire apporte une solution à cette limitation.