



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran  
Mohamed BOUDIAF

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT ES  
SCIENCE

SPECIALITE : Electronique

OPTION : Signaux et Systèmes

PRESENTE PAR

M<sup>r</sup> GHELLAB Abdelkader Moustafa Radwane

SUJET DU MEMOIRE

**Fusion d'images multi-spectrales et panchromatiques :  
application en télédétection satellitaire**

SOUTENU LE 26/01 / 2015 DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

Nabil Boughanmi	Professeur (USTO)	PRESIDENT
Med Faouzi Belbachir	Professeur (USTO)	RAPPORTEUR
Ziane Derouiche	Maître de conférences (USTO)	EXAMINATEUR
Ali Djebbari	Professeur (Univ-SBA)	EXAMINATEUR
Salem Kahlouche	Directeur de Recherches (CNTS)	EXAMINATEUR
Hedjira Benoudnine	Maître de conférences (Univ-Most)	EXAMINATRICE

## Dédicaces

Au nom d'Allah et que sa prière et sa paix soient sur notre prophète Mohamed, autant de fois qu'il y a de mots dans cette thèse.

Je remercie Dieu de m'avoir aidé à franchir toutes les étapes de mon parcours, et par sa grâce j'ai pu atteindre le but dont j'ai toujours rêvé, et qui aujourd'hui s'est réalisé.

Je dédie ce travail à mes chers parents :

«Je vous rends hommage et j'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi ».

Je le dédie aussi à mes chers frères et sœurs, à mes neveux et nièces et à mes chers amis.

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements et ma gratitude se portent tout d'abord vers Mr. Mohamed Faouzi BELBACHIR qui m'a encadré et guidé pendant ma thèse et a su m'orienter vers les axes les plus pertinents. Je le remercie pour ses compétences, son ouverture d'esprit et sa grande disponibilité, et pour m'avoir fait découvrir et approfondir un sujet riche ainsi que pour ses conseils qu'il m'a fait part dans et hors le domaine de travail, en plus pour sa forte contribution à la rédaction et à l'amélioration de ce document de thèse ainsi que pour son côté humain.

Je remercie chaleureusement Mr. N. Boughanmi qui m'a fait un grand honneur en acceptant de présider le jury de cette thèse. J'exprime toute ma gratitude à Mr. Z. Derouiche, Mr. A. Djebbari, Mme. H. Benoudnine et Mr. S. Kahlouche pour avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèse.

Mes pensées se tournent ensuite tout naturellement vers tous les membres de notre laboratoire LSSD qui ont été toujours attentifs à mes questions et qui m'ont permis de mener mes recherches dans les meilleures conditions, et ce fut un réel bonheur de travailler avec eux pendant ces années.

Enfin les mots sont trop pauvres pour exprimer ma gratitude à mon père, à ma mère, à mes sœurs et frères, à toute ma famille et tous mes amis pour leur aide et leurs encouragements durant ma thèse.

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	1
<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Chapitre I Introduction à la fusion d'images</b> .....	6
I-1 Présentation du problème.....	6
I-2 Catégories de méthodes de fusion .....	10
I-2-1 Les méthodes de type projection-substitution .....	10
I-2-1-1 La méthode de transformation IHS ( <i>Intensity Hue Saturation</i> ) .....	10
I-2-1-1-1 Fusion d'images utilisant la FFT pour améliorer la méthode IHS .....	13
I-2-1-2- La méthode ACP (Analyse en Composantes Principales) .....	13
I-2-2- Les méthodes de type contribution spectrale relative .....	13
I-2-2-1 La méthode Brovey.....	14
I-2-2-2 La méthode CN (Color Normalized).....	15
I-2-2-3 La méthode P+XS (CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, France).....	15
I-2-3 Le concept ARSIS.....	16
I-2-3-1 Méthode de type ARSIS basée sur la TF.....	19
I-2-3-2 Méthode de type ARSIS basée sur la TO.....	20
I-2-3-2-1 Processus de la DWT ( <i>Discret wavelet Transform</i> ).....	21
I-2-3-2-2 Modèle d'injection utilisé par WisPeR.....	23
I-3 Conclusion à propos des différents types de méthodes .....	27
I-3-1 Conclusion à propos des méthodes de type projection-substitution et de type contribution spectrale relative.....	27
I-3-2 Conclusion à propos des méthodes de type ARSIS .....	31
<b>Chapitre II Etude comparative de quelques méthodes de fusion</b> .....	33
II-1 Introduction.....	33
II-2 Etude expérimentale.....	33
II-2-1. Evaluation qualitative et quantitative .....	34
II-3 Conclusions et Discussions.....	44

<b>Chapitre III Proposition d'une méthode de fusion .....</b>	<b>46</b>
III-1 Introduction.....	46
III-2 Proposition d'un algorithme de fusion basé sur la TF en introduisant les caractéristiques du senseur, FUFSER ( <i>image FUSion method based on the Fourier Transform using the SENSor's Response</i> ) .....	46
III-2-1 Sur-échantillonnage .....	46
III-2-1-1 Nature des fréquences manquantes dans l'image MS ....	47
III-2-1-2 Analyse spectrale .....	47
III-2-1-3 Analyse spectrale des images .....	50
III-2-1-3-1 Choix de type de présentation pour l'analyse Spectrale.....	50
III-2-1-3-2 Analyse spectrale d'une paire d'image PAN-MS.....	51
III-2-2 Filtrage.....	56
III-2-3 Senseur et modèle d'injection.....	58
III-2-4 Algorithme FUFSER.....	61
III-3 Etude expérimentale.....	63
III-4- Conclusion.....	74
<b>IV Conclusion générale.....</b>	<b>75</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>78</b>

## Résumé

Les satellites sont très utilisés pour l'observation de la terre. On distingue deux types de capteurs qui peuvent être portés à bord du satellite ; les capteurs actifs (radars) et passifs. Nous nous intéressons aux capteurs passifs qui, selon leurs bandes passantes, nous délivrent des images dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Les images délivrées par ces capteurs sont définies sur des résolutions spatiales différentes et dépendent du pas d'échantillonnage (ou taille du pixel au sol). Les capteurs capables de nous délivrer des images de résolution spatiale élevée et de basse résolution spectrale, dites images Panchromatiques PAN, intègrent l'énergie radiative incidente à leurs entrées sur une large bande en longueur d'onde. Par contre, les capteurs embarqués sur ces mêmes satellites et qui nous délivrent des images à basse résolution spatiale intègrent l'énergie radiative incidente à leurs entrées sur des bandes beaucoup plus étroites du spectre et nous délivrent les images Multi-Spectrales MS. Les images MS sont à résolution spectrale élevée au détriment de la résolution spatiale.

L'observation d'une même zone géographique s'effectue à partir d'une paire d'images. L'une de résolution spatiale élevée, alors que l'autre de bonne résolution spectrale (information couleurs). Comme la haute résolution spectrale et la haute résolution spatiale sont contenues dans ces deux images, il s'agit alors de construire une image qui possède la résolution spatiale de la PAN et spectrale de la MS.

Un état de l'art de la fusion est présenté dans cette thèse. Nous avons montré que ces méthodes se subdivisent en 3 types de méthodes:

- les méthodes de type projection-substitution,
- les méthodes de type contribution spectrale relative,
- les méthodes de type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures).

Nous avons ainsi mis en œuvre 09 méthodes (3 de chaque type). Une comparaison des différentes méthodes nous a permis de mettre en reliefs leurs biais et avantages. Nous avons opté pour les méthodes de type ARSIS qui présentent de meilleures performances spatiales et spectrales comparativement aux deux autres types de fusion.

Ainsi, en se basant sur une étude critique des méthodes de type ARSIS, nous avons proposé une méthode de fusion. La méthode proposée (que nous avons nommée FUFSER) a été comparée aux autres méthodes. Une étude statistique et visuelle, sur les produits de fusion obtenus par différentes méthodes, a été effectuée. La méthode proposée FUFSER présente de meilleures performances spatiales et spectrales.

La fusion de données multi-capteurs ou multi-sources est un domaine de recherche qui permet d'exploiter des informations provenant de plusieurs sources. Dans le domaine militaire, la fusion est utilisée pour la détection, l'identification et le suivi de cibles. Elle a été adaptée et développée pour d'autres applications comme le traitement du signal ou le traitement d'images dans les applications sur la domotique, sur la classification en intelligence artificielle et dans les secteurs médical et satellitaire dont il est question dans cette thèse.

Plusieurs sens ont été donnés à la fusion d'information et cela suivant que l'on soit dans le domaine de prise de décision ou que l'on soit dans le domaine de la reconstruction de signaux. C'est dans ce dernier contexte qu'on se situe. Dans cette thèse, la '*fusion*' consiste à aboutir à une image fusionnée à partir de deux images fournies par deux capteurs embarqués sur le même satellite. Un capteur Panchromatique PAN capable de délivrer des images de haute résolution spatiale et un capteur Multi-Spectrale MS délivrant, pour la même scène, une image couleur (multi-spectrale) mais de basse résolution spatiale. Le but de notre travail consiste à produire une image fusionnée s'approchant au mieux de la résolution spatiale de l'image PAN et de la résolution spectrale de l'image multi spectrale.

Les outils et les résultats de fusion d'images dans la littérature diffèrent d'une méthode à l'autre. D'une manière générale, l'image idéale de la fusion n'existe pas (dans le sens où elle ne nous est pas accessible). De ce fait, il n'est pas aisé de mesurer la qualité de l'image obtenue après fusion.

On classe les différentes méthodes de fusion en trois types. Le premier désigne les méthodes utilisant une approche par projection-substitution. La projection effectue un changement d'espace (de l'espace *Red*, *Green* et *Blue* RGB à un autre espace spécifique à chaque méthode), elle est censée donner une meilleure représentation de l'espace des images MS. Cette représentation vise à réduire la redondance d'informations en décorrélant les modalités (composantes couleurs) de l'image MS. Dans le nouvel espace, une des composantes a la particularité d'isoler les structures spatiales des images MS du reste des informations relatives à la couleur. L'hypothèse de ce type de méthodes est d'admettre que ces structures spatiales correspondent à celles présentes dans la modalité PAN. La substitution consiste à transformer la composante structure spatiale des images MS en une fonction de l'image PAN.

Le second type englobe les méthodes de contribution spectrale relative. Le fonctionnement des méthodes de ce type de fusion est régi par une hypothèse fondamentale : la modalité PAN à basse résolution spatiale (sous échantillonnée à la résolution spatiale de l'image MS) est équivalente à une combinaison linéaire des modalités MS.

L'avantage commun entre les méthodes de ces deux types est de présenter une augmentation notoire de la qualité visuelle au niveau des structures spatiales présentes dans le produit de fusion. La qualité géométrique des images synthétisées par ces méthodes est jugée satisfaisante dans la plupart des publications. Ces méthodes sont ainsi adaptées à certaines applications, telles que des applications liées à la cartographie, ou encore pour la localisation d'un phénomène particulier ou d'une cible. Cependant, leur défaut majeur est la distorsion radiométrique qui a pour incidence une modification plus ou moins importante des signatures spectrales (des couleurs des modalités MS synthétisées). Dans les deux situations, relatives à ces deux types de méthodes, la modalité PAN est injectée dans son intégralité. Les basses fréquences spatiales de la modalité PAN se retrouvent dans les modalités MS fusionnées et viennent donc modifier celles des modalités MS initiales ce qui ne conserve pas la résolution spectrale de la MS. De plus, dans le cas des méthodes de contribution spectrale relative, les basses fréquences d'une modalité MS subissent aussi l'influence des autres modalités MS par l'intermédiaire de la combinaison linéaire de ces modalités. Outre ce type ne peut donner de satisfaisants résultats que si l'hypothèse, de départ, de linéarité entre les deux images PAN et MS soit vérifiée.

Le troisième type est celui dit ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures). Le concept ARSIS suppose que l'information manquante à l'image multi-spectrale de basse résolution est composée uniquement des informations de hautes fréquences spatiales. Il considère que ces informations peuvent être synthétisées à partir de l'ensemble des données disponibles à toutes les échelles et dans toutes les modalités. La qualité de synthèse de ce type de méthodes est fortement liée à la qualité de la réponse fréquentielle du filtre utilisé pour dissocier les différentes fréquences spatiales du spectre et au modèle conçu pour adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection.

Ainsi, ce modèle a pour but de pouvoir adapter et transformer l'information à injecter (les hautes fréquences spatiales) avant de procéder à l'injection. Cela permet de ne pas induire des distorsions spectrales au niveau du produit de la fusion, comparativement aux deux précédents types de méthodes. Cependant, cette bonne restitution engendre souvent une déformation des structures géométriques de l'image : les images fusionnées présentent le phénomène de rebond.

Partant des limitations énumérées ci-dessus, nous proposons une nouvelle méthode, en se basant sur une étude critique des méthodes de type ARSIS afin de préserver les éléments essentiels et de s'affranchir à leurs limitations. La méthode proposée utilise la Transformée de Fourier TF pour extraire les niveaux spectraux à traiter dans les deux images à fusionner. En plus cette méthode propose un modèle d'injection, utilisant les réponses spectrales des capteurs, permettant d'adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection et cela dans le but d'éviter tout type de distorsions spectrales. Ainsi, un ensemble d'exemples montrent le bien-fondé de l'approche proposée.

Le manuscrit est subdivisé en trois chapitres.

Le premier chapitre aborde les propriétés de quelques méthodes de fusion appartenant aux trois types cités ci-dessus. Celle dite IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), la méthode IHS améliorée par l'utilisation de la TF et la méthode PCA (Analyse en Composantes Principales) appartenant aux méthodes de projection-substitution. Nous étudions aussi les méthodes de contribution spectrale relative (la méthode de Brovey, la méthode CN - *Color Normalized*- et celle dite P+XS). Enfin, deux méthodes du troisième type dit ARSIS sont présentées : une méthode utilisant la TF pour extraire les détails spatiaux et pour traiter les modalités MS avant l'injection [35]. L'autre méthode dite WISPER (*Window Spectral Response*) utilise la Transformée en Ondelettes TO pour la décomposition des images et un modèle d'injection permettant d'adapter les détails spatiaux aux modalités MS [36].

Le chapitre deux, nous effectuons une étude statistique et comparative entre les différentes méthodes citées ci-dessus et mettons en relief les biais et avantages de chacune. Ce qui permet de proposer des améliorations concrétisées par la méthode proposée.

Le troisième chapitre, nous proposons une nouvelle méthode FUFSER (*image FUSion method based on the Fourier Transform using the SENSor's Response*), de type ARSIS. Nous

terminons le chapitre par une étude comparative et statistique de la méthode proposée avec les autres méthodes du domaine.

# Chapitre-I

## Introduction à la fusion d'images

## I.1 Présentation du problème

Les satellites sont très utilisés pour l'observation de la terre. On distingue deux types de capteurs qui peuvent être portés à bord du satellite ; les capteurs actifs (radars) et passifs. Nous nous intéressons aux capteurs passifs qui, selon leurs bandes passantes, nous délivrent des images dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Les capteurs sont caractérisés par la résolution des images spatiales qu'ils délivrent et dépendent du pas d'échantillonnage (ou taille du pixel au sol). Les capteurs qui délivrent les images de résolution spatiale élevée et de basse résolution spectrale, dites images Panchromatiques PAN, intègrent l'énergie radiative incidente à leurs entrées sur une large bande en longueur d'onde. Par contre, les capteurs embarqués sur ces mêmes satellites et qui nous délivrent des images à basse résolution spatiale intègrent l'énergie radiative incidente à leurs entrées sur des bandes beaucoup plus étroites du spectre et nous délivrent les images Multi-Spectrales MS. Ainsi les images MS sont à résolution spectrale élevée au détriment de la résolution spatiale.

A titre d'exemple les paires d'images PAN et MS délivrées par le satellite IKONOS sont échantillonnées respectivement avec une période d'échantillonnage de 1 mètre et de 4 mètres (résolution spatiale ou taille du pixel au sol). Les structures sur terre, à observer par ces deux images possèdent, d'une part, des détails plus fins (à une échelle inférieure à l'échelle métrique) mais se sont les deux images disponibles. Ainsi, d'autre part, ces structures sur terre ont sûrement des détails à échelles comprises entre les deux périodes d'échantillonnage de 1 mètre et de 4 mètres, ce qui favorise plus, côté détails spatiaux, l'image PAN avec laquelle on peut assurer d'observer les détails dont l'échelle est comprise entre 1m et 4m ce qui n'est pas le cas pour l'image MS.

Outre, la nécessité d'une résolution spatiale élevée. Une résolution spectrale élevée est requise pour pouvoir distinguer des structures à travers leurs couleurs. Prenons l'exemple d'une image comprenant des espaces végétaux et d'autres minéraux. Il est difficile de distinguer entre les deux espaces géométriquement (à travers l'image PAN seule) sans faire appel à leurs signatures spectrales.

Le compromis résolution spatiale-résolution spectrale dans le domaine de l'imagerie satellitaire entraîne que l'acquisition d'image se présente sous forme d'une image **PAN** de haute résolution spatiale et de son image **MS** de haute résolution spectrale.

Parallèlement, le développement des applications utilisant les images satellitaires tel que l'observation de la couverture terrestre, nécessite des images ayant, à la fois, les plus hautes

résolutions spatiale et spectrale [25-26], [29-31]. Pour répondre à ces besoins, la fusion d'images est devenue indispensable pour fournir une image possédant la résolution spatiale de l'image PAN et spectrale de l'image MS.

Avant de penser à la fusion, il est primordial de se demander pourquoi les constructeurs n'ont pas directement conçu des capteurs délivrant des images à résolutions spatiale et spectrale élevées ? Pour répondre d'abord partiellement à cette question, considérons le cas de l'œil humain qui lorsqu'il se trouve dans l'obscurité (flux lumineux à faible énergie), la pupille de l'œil s'ouvre pour permettre l'augmentation de la faible énergie du flux lumineux incident sur l'œil en cherchant de le sensibiliser. En allumant la lumière, un flux lumineux important va être absorbé à travers la pupille étant ouverte. La pupille s'adapte au flux lumineux incident en diminuant son ouverture.

Nous avons le même processus au niveau des capteurs. Les capteurs MS intègrent l'énergie du flux incident sur des bandes étroites en absorbant moins de photons, associés aux longueurs d'ondes incluses dans la bande passante du capteur, nécessitent ainsi, pour les sensibiliser, un élargissement de l'ouverture de la pupille, ce qui augmente la taille du pixel au sol et diminue donc la résolution spatiale du capteur. Cas inverse pour le capteur PAN qui intègre l'énergie du flux incident sur une large bande spectrale ce qui réduit l'ouverture de la pupille, diminuant la taille du pixel au sol et ainsi augmentant la résolution spatiale du capteur. Le compromis est donc, d'abord, technique entre la résolution spatiale et la résolution spectrale.

Une solution pour augmenter la résolution spatiale des capteurs MS serait d'augmenter leurs sensibilités pour permettre de nous fournir des images ayant les résolutions spatiale et spectrale élevées. Mais la limitation est d'abord financière car des capteurs plus sensibles coûtent plus cher. En plus, d'autres contraintes sont imposées par la plate-forme satellite [4] : l'espace, le poids, la puissance, le rayonnement électromagnétique, mais aussi les objectifs de mission (orbite), la fusée pour le lancement, etc. En admettant que les capteurs soient en mesure de délivrer des images MS de résolution spatiale atteignant celle de l'image PAN, deux autres problèmes vont se poser : la capacité de stockage sur la plate-forme et la bande passante du canal de transmission sont limitées. Prenons l'exemple du satellite IKONOS ou QUICKBIRD : ces satellites possèdent quatre bandes MS. Si la résolution spatiale de ces images était augmentée d'un facteur 4 pour rejoindre celle de la PAN, leur taille serait

multipliée par 16 (4 modalités dont chacune sa résolution spatiale est augmentée d'un facteur 16), soit 16 fois plus de données à stocker et à transmettre au sol.

Résumons les deux rapports de fonction « coût/qualité » pour l'éventuelle solution d'augmenter la sensibilité des capteurs; L'augmentation de la sensibilité des capteurs vis à vis la limitation financière et vis-à-vis la quantité importante de données avec la bande passante réservée au canal de transmission. Une solution de logiciel, plus optimale serait la fusion d'images PAN et MS fournissant une image hybride (à une erreur près) tout en économisant le coût d'augmentation de la sensibilité des capteurs et réduisant la quantité de données à transmettre au sol.

Pour l'observation d'une même zone géographique, on possède une paire d'images dont une se caractérise par une résolution spatiale élevée, alors que l'autre apporte une bonne résolution spectrale (information couleur). Le tableau-I-1 représente les différentes informations sur les systèmes d'observation de la terre les plus utilisés en environnement et en cartographie [4] : SPOT4, SPOT5, IKONOS et QUICKBIRD. Par exemple, le satellite Quickbird délivre cinq images. Quatre d'entre elles sont acquises par des modalités MS, avec des bandes spectrales situées dans le Bleu, le Vert, le Rouge et le Proche InfraRouge (PIR). Leur résolution spatiale est de 2.8 m. Le capteur PAN a l'avantage de proposer une image de résolution spatiale quatre fois plus importante (0.7 m) mais sa bande spectrale est plus large en s'étendant du bleu jusqu'au PIR inclus. D'autres bandes peuvent être présentées tel que la bande du Moyen Infrarouge (MIR) du satellite SPOT-4.

Caractéristiques des images satellites						
	Modalités MS				Modalité PAN	
Satellite	Nom de la <sup>i</sup> <sup>ème</sup> bande (notée B <sub>i</sub> ou XS <sub>i</sub> )	couleur	Bande spectrale (µm)	Résolution au sol (m)	Bande spectrale (µm)	Résolution au sol (m)
SPOT4	B1	Vert	0.50 – 0.69	20	0.50 – 1.75	10
	B2	Jaune	0.61 – 0.68	20		
	B3	PIR	0.78 – 0.89	20		
	B4	MIR	1.58 – 1.75	20		
SPOT5	B1	Vert	0.50 – 0.59	10	0.48- 0.71	2.5 ou 5
	B2	Jaune	0.61 – 0.68	10		
	B3	PIR	0.78 – 0.89	10		
	B4	MIR	1.58 – 1.75	10		
IKONOS	B1	Bleu	0.45 – 0.53	4	0.45 – 0.90	1
	B2	Vert	0.52 – 0.61	4		
	B3	Rouge	0.64 – 0.72	4		
	B4	PIR	0.77 – 0.88	4		
QUICKBIRD	B1	Bleu	0.45 – 0.52	2.8	0.45 – 0.90	0.7
	B2	Vert	0.52 – 0.60	2.8		
	B3	Rouge	0.63 – 0.69	2.8		
	B4	PIR	0.76 – 0.90	2.8		

**Tableau-I-1** Systèmes d'observation de la Terre les plus utilisés, délivrant des images à différentes résolutions spatiales.

Comme la haute résolution spectrale et la haute résolution spatiale sont contenues dans des images différentes, le problème devient celui d'une synthèse d'images multi-spectrales possédant la meilleure résolution spatiale disponible.

La fusion sert à exploiter les informations provenant de différentes sources. Il s'agit de synthétiser une image hybride présentant des caractéristiques spécifiques sélectionnées dans les différents ensembles placés en entrée (que se soit des images ou des images et des capteurs).

## **I-2- Catégories de méthodes de fusion**

Afin de dresser un état de l'art des méthodes de fusion existantes, nous adoptons la classification suivante dont trois types de méthodes ont été identifiés [4]:

- les méthodes de type projection-substitution,
- les méthodes de type contribution spectrale relative,
- les méthodes de type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures).

### **I-2-1- Les méthodes de type projection-substitution**

Les méthodes de fusion de type projection-substitution suivent une approche vectorielle (toutes les modalités MS sont synthétisées simultanément dans le processus de fusion) [27]. Une image d'une scène est constituée d'enregistrements suivant différents canaux spectraux, caractéristiques du satellite d'observation (Ikonos, SPOT, ...). Les images de la scène ont des ressemblances plus ou moins importantes selon qu'elles contiennent ou non les mêmes informations. L'objectif de la projection, en procédant à un changement d'espace (de l'espace *Red, Green* et *Blue* RGB à un autre espace spécifique à chaque méthode), est d'obtenir une meilleure représentation de l'espace des images MS. Cette représentation vise à réduire la redondance d'informations en décorrélant les modalités (composantes couleurs) de l'image MS. Ainsi, dans le nouvel espace, une des composantes a la particularité d'isoler les structures spatiales des images MS du reste des informations relatives à la couleur. L'hypothèse de ce type de méthodes est d'admettre que ces structures spatiales correspondent à celles présentes dans la modalité PAN. La substitution consiste à transformer la composante structure spatiale des images MS en une fonction de l'image PAN.

Les méthodes de ce type sont la méthode IHS (*Intensity Hue Saturation*) et la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales) que nous décrivons ci-dessous.

#### **I-2-1-1 La méthode de transformation IHS (*Intensity Hue Saturation*)**

La technique IHS est l'une des méthodes les plus communément utilisées pour la fusion. Elle est devenue une procédure standard pour l'analyse d'image afin d'améliorer la couleur et la résolution spatiale. La transformée de couleur IHS peut convertir une image multi-spectrale de l'espace standard des couleurs RGB (*Red Green Blue*) vers l'espace IHS [20]. Le but d'une fusion efficace est d'apporter les détails spatiaux à l'image MS sans affecter ses signatures spectrales. Dans l'espace IHS, l'information spectrale (couleurs) est majoritairement reflétée

sur les composantes *Hue* et *Saturation* d'où la possibilité de traiter indépendamment la composante *I* sans affecter les autres composantes en la substituant par l'image PAN puisque cette dernière comporte l'information de détails [34]. La littérature propose plusieurs algorithmes pour la transformée IHS [34]. Nous adoptons celui jugé le plus efficace de la référence [34]. Les étapes basiques de la fusion par IHS sont [2], [4], [8], [29], [34]:

- 1- Rééchantillonner l'image MS à la résolution spatiale de l'image PAN,
- 2- Transformer l'image MS rééchantillonnée de l'espace RGB vers l'espace IHS, dont le contexte mathématique est exprimé dans les équations (I-1) et (I-2),
- 3- Remplacer la composante Intensité *I* de l'espace IHS par l'amplitude l'image PAN de haute résolution spatiale pour aboutir à la nouvelle composante Intensité *I'*,
- 4- Transformer la composante remplacée *I'* ensemble avec les composantes originales *H* et *S* en inverse vers l'espace RGB pour aboutir à l'image fusionnée (équation (I-3)).

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (\text{I-1})$$

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (\text{I-2})$$

Tel que *I, H* et *S* indiquent successivement les composantes Intensité, teinte (*Hue*) et Saturation.

$v_1$  et  $v_2$  sont deux variables intermédiaires.

$$\begin{pmatrix} R_{new} \\ G_{new} \\ B_{new} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I' \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (\text{I-3})$$

Ceci est la solution classique au problème. Mais avec la nouvelle génération des satellites (QuickBird, Ikonos..), les longueurs d'ondes au lieu d'atteindre comme auparavant les

longueurs d'ondes des RGB, sont étendues jusqu'au Proche Infra Rouge PIR. Cette substitution entière de la composante Intensité améliore d'une façon notable et satisfaisante la résolution spatiale (structures géométriques) au détriment de la résolution spectrale (information couleur) qui subit des distorsions. Cela est dû principalement à la substitution entière entre la composante  $I$  et la PAN [3], or la MS sur-échantillonnée contient des fréquences spatiales de même nature que celles dans la PAN. Ces fréquences communes auraient dû être éliminées complémentairement de la composante  $I$  et de la PAN avant la substitution (la composante  $I$  à substituer par la PAN est calculée linéairement en fonction des modalités couleurs de la MS et aurait pratiquement les mêmes fréquences que la MS mais à des énergies différentes). Des méthodes intéressantes [29], [18-19], [32] effectuent ce traitement bien remédiant au problème de distorsion spectrale pour IHS mais toujours, ces approches ne traitent que trois modalités spectrales (Rouge Vert et Bleu) et excluent donc les autres telle que la modalité Proche Infra Rouge PIR, pour, par exemple, le satellite Ikonos et QUICKBIRD. L'importance de cette bande PIR a été démontrée dans [16], [29-30], [33] pour l'extraction et la classification d'objets.

Pour remédier à la dégradation spectrale distinguée sur l'image fusionnée par rapport à l'image couleur initiale, on effectue un filtrage sur l'image PAN pour qu'elle n'apporte que l'information manquante à la composante Intensité avant la substitution et éviter tout recouvrement. Pour cela, il existe quatre méthodes qui sont utilisées pour effectuer le filtrage passe haut et passe bas successivement sur l'image PAN et la composante Intensité  $I$  [1], [9], [20], [24]:

- Méthode utilisant la Transformée de Fourier TF,
- Méthode utilisant la Transformée en Ondelettes TO,
- Méthode utilisant la PCA (Analyse en Composantes Principales),
- Méthode utilisant la l'EMD (*Empirical Mode Decomposition*) [85-87].

Pour améliorer l'opération de ce processus de filtrage afin retrouver l'information spectrale (couleur) de l'image MS, une parmi les méthodes existantes utilise la Transformée de Fourier TF pour ne substituer qu'une partie seulement de l'image PAN. L'application de cette méthode est discutée dans le paragraphe suivant. D'autres méthodes utilisent pour cela la Transformée en Ondelettes TO [9], [28], la PCA (Analyse en Composante Principale) [15], [17], [27] et l'EMD (*Empirical Mode decomposition*) [13], [18], [85-87].

### **I-2-1-1-1 Fusion d'images utilisant la FFT pour améliorer la méthode IHS**

L'idée de base derrière l'utilisation de la FFT (*Fast Fourier Transform*) est de modifier l'image PAN de haute résolution spatiale pour qu'elle n'apporte à l'image MS que l'information complémentaire (absente dans la composante  $I$ ) à la composante Intensité évitant ainsi tout recouvrement. Donc cette méthode utilise un remplacement partiel de la composante  $I$  au lieu d'un remplacement total [3]. Deux filtres complémentaires Passe Bas et Passe Haut sont successivement appliqués sur la composante Intensité  $I$  et l'image PAN. Ensuite, la somme des deux images filtrées est transformée en inverse ensemble avec les deux composantes  $H$  et  $S$  pour aboutir au produit de la fusion. Mais, même avec ce traitement, cette méthode reste limitée à trois bandes RGB.

Une autre méthode de type projection-substitution est la méthode ACP discutée ci-dessous.

### **I-2-1-2- La méthode ACP (Analyse en Composantes Principales)**

L'Analyse en Composantes Principales (ACP), connue aussi sous le nom de la technique de Karhunen-Loeve, est un outil mathématique qui peut s'appliquer sur un nombre  $N$  quelconque de modalités. Par rapport à IHS, cette transformée est donc particulièrement bien appropriée en imagerie multi- ou hyper-spectrale. Elle applique une transformation linéaire de l'espace multi-spectral vers l'espace des vecteurs propres des données considérées. Les  $N$  composantes ACP obtenues sont orthogonales, ce qui signifie qu'aucune composante n'est linéairement corrélée avec une autre. La variance (la variation d'amplitudes spatiales ou fréquences spatiales) totale des  $N$  images originales est répartie entre les  $N$  composantes ACP de telle sorte que la première composante possède la plus grosse part de cette variance, puisque la variance décroît en passant d'une composante à la suivante [4].

Notons que l'utilisation de la transformée ACP peut constituer la première étape pour une transformation de l'espace des  $N$  modalités MS initiales ( $N > 3$ ) vers un espace des couleurs nécessitant seulement trois modalités. En effet, en sélectionnant les trois premières composantes, l'ACP permet de réduire la quantité d'information et d'en extraire les trois canaux les plus représentatifs en terme de variance de ces images.

### **I-2-2- Les méthodes de type contribution spectrale relative [4]**

Le fonctionnement des méthodes de ce type de fusion sont régies par une hypothèse fondamentale: la modalité PAN à basse résolution spatiale  $A_I$  (sous échantillonnée à la

résolution spatiale du MS ou  $B_l$ ) est équivalente à une combinaison linéaire des modalités MS [4]:

$$A_l = \sum \alpha_k B_{k1} \quad (I-4)$$

Avec  $k=\{1..N\}$ , où  $N$  est le nombre de modalités MS, la valeur des pondérations des bandes  $\alpha_k$  dépend de la méthode de fusion considérée. Cette pondération tient généralement compte de la proportion de la réponse spectrale de la  $k^{\text{ième}}$  modalité MS par rapport à celle de la modalité PAN. L'objectif de ces méthodes est de multiplier chaque modalité MS sur-échantillonnée par une fonction des hautes fréquences de la modalité PAN.

Ci-dessous, sont décrites les trois méthodes de ce type ; Brovey, CN (*Color Normalized*) et P+XS (où P désigne l'image PAN et XS désigne modalité couleur de l'image MS).

### I-2-2-1 La méthode Brovey

La méthode de fusion Brovey est la plus simple, dans ce type de méthodes, puisque les coefficients  $\alpha_k$  sont fixés à 1. L'image fusionnée  $B_{k0}^*$  s'obtient par un produit pixel à pixel entre la modalité correspondante à basse résolution sur-échantillonnée ( $B_{k1}$ )<sup>interp</sup><sub>0</sub> et un terme fonction de la modalité PAN de haute résolution, divisé par la somme des modalités MS sur-échantillonnées [4]:

$$B_{k0}^* = (B_{k1})^{\text{interp}_0} \frac{A_0}{\sum_{k=1}^N (B_{k1})^{\text{interp}_0}} \quad (I-5)$$

Où :

$_0$  : haute résolution spatiale,

$_1$  : basse résolution spatiale,

$B$  : MS

$A$  : PAN

$k$  :  $k^{\text{ième}}$  modalité

\* : fusionnée

<sup>interp</sup><sub>0</sub> : rééchantillonnée par interpolation à la haute résolution

Les moyennes et les dynamiques des images ne sont pas ajustées, ce qui entraîne une importante distorsion radiométrique, c'est-à-dire un non-respect de la propriété de cohérence. Les deux prochaines versions de cette méthode ajustent la moyenne de la modalité fusionnée à celle de cette même modalité avant la fusion.

### I-2-2-2 La méthode CN (Color Normalized)

Cette méthode constitue une amélioration de la méthode Brovey. Pour  $N = 3$  modalités MS, elle s'écrit pour une  $k^{\text{ième}}$  modalité  $B_k$  [4]:

$$B_{k0}^* = \frac{3((B_{k1})_0^{\text{interp}} + 1)(A_0 + 1) - 1}{3 + \sum_{k=1}^N (B_{k1})_0^{\text{interp}}} \quad (\text{I-6})$$

Les valeurs sont en niveaux de gris. Les dynamiques de toutes les images de l'expression doivent être similaires. Contrairement à la méthode de Brovey et grâce à son expression analytique (eq-I-6), cette méthode CN permet d'éviter des perturbations liées aux divisions par 0.

### I-2-2-3 La méthode P+XS (CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, France)

Cette méthode a été développée par le CNES, l'agence spatiale française, pour le système SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) pour produire des images multi-spectrales avec une résolution de 10 m. L'hypothèse est que la demi-somme (moyenne) des luminances des deux premières bandes XS1 et XS2 (tableau-I-1) est égale à la luminance du PAN. Cette méthode peut s'appliquer à tout ensemble d'images vérifiant cette hypothèse.

Soient  $L_{A0}$ ,  $L_{XS1,0}$  et  $L_{XS2,0}$  les luminances d'un pixel à 10 m de résolution respectivement dans les images A (PAN), XS1\* et XS2\*. Ces deux dernières correspondent aux deux premières modalités SPOT fusionnées à haute résolution spatiale. L'hypothèse s'écrit alors [4]:

$$L_{A0} = \frac{1}{2}(L_{XS1,0}^* + L_{XS2,0}^*) \quad (\text{I-7})$$

Une seconde hypothèse est nécessaire pour décrire la distribution de la luminance  $L_{A0}$  entre  $L_{XS1,0}$  et  $L_{XS2,0}$ . La méthode P+XS suppose que le ratio entre les luminances dans les deux bandes est constant avec le changement de résolution de  $res1$  (résolution de la MS) vers  $res0$  (résolution de la PAN) [4]:

$$L_{XS1,0}^* / L_{XS2,0}^* = L_{XS1,1} / L_{XS2,1} \quad (\text{I-8})$$

Cette hypothèse n'est vraie que si le pixel représentant un carré de 20 m par 20 m au sol est composé exactement de quatre pixels de 10 m par 10 m ayant le même comportement spectral. La manipulation des équations aboutit aux expressions [4]:

$$\begin{aligned} L_{XS1,0}^* &= 2L_{A0}(L_{XS1,1})^{int\ erp_0} / ((L_{XS1,1})^{int\ erp_0} + (L_{XS2,1})^{int\ erp_0}) \\ L_{XS2,0}^* &= 2L_{A0}(L_{XS2,1})^{int\ erp_0} / ((L_{XS1,1})^{int\ erp_0} + (L_{XS2,1})^{int\ erp_0}) \end{aligned} \quad (I-9)$$

Ces formules produisent des images synthétiques  $XS1_0^*$  et  $XS2_0^*$ . A aucun moment la troisième modalité MS ( $XS3$ ) de SPOT n'intervient dans les équations (I-7) à (I-9). Les auteurs synthétisent l'image  $XS3_0^*$  par une simple duplication des pixels de la bande  $XS3_1$  (par sur-échantillonnage par interpolation d'opérateur « des plus proches voisins »).

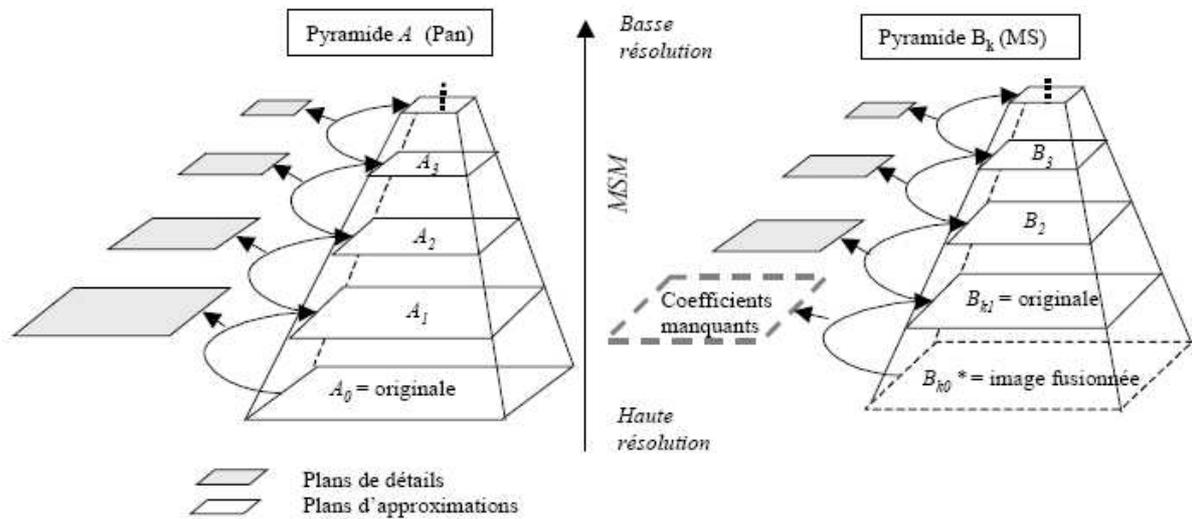
On notera que contrairement aux précédentes qui s'appliquent aux niveaux de gris, la méthode P+XS exploite des luminances qui résultent de l'application d'une fonction d'étalonnage aux niveaux de gris.

### I-2-3 Le concept ARSIS

Le concept ARSIS « Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures » suppose que l'information manquante de l'image multi-spectrale de basse résolution  $B_{k1}$  est composée uniquement des informations de hautes fréquences spatiales [4]. Il considère que ces informations peuvent être synthétisées à partir de l'ensemble des données disponibles à toutes les échelles et dans toutes les modalités. Il s'appuie sur les techniques multiéchelles (ou modèles multiéchelles, soit en anglais Multi-Scale Models ou MSM), pour modéliser puis injecter les hautes fréquences manquantes. Ces techniques font appel aussi à des outils mathématiques tels que les espaces vectoriels et le filtrage numérique, qui permettent d'obtenir une description hiérarchique des structures spatiales d'une image [14].

En traitement d'image, les décompositions hiérarchiques ont, d'une manière générale, une représentation pyramidale (figure I-1). Les différents étages de la pyramide correspondent à des versions de plus en plus grossières de l'image originale, c'est-à-dire qu'à chaque étage, les hautes fréquences spatiales de l'étage sous-jacent ont été filtrées [22], [17]. Ce sont les images de contexte ou d'approximation qui s'écrivent  $A_0, A_1, A_2 \dots A_n$  pour la pyramide  $A$  de l'image PAN, et  $B_{k0}, B_{k1}, B_{k2} \dots B_{kn}$  pour la pyramide  $B_k$  de la  $k^{\text{ième}}$  modalité MS. La

différence d'information entre deux plans d'approximation successifs correspond aux plans détails manquants dans l'approximation la plus grossière [4].

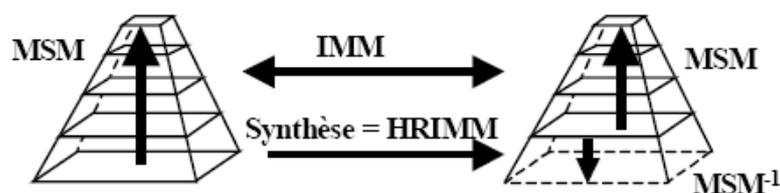


**Figure I-1** Décomposition hiérarchique de l'information.

L'enjeu du concept ARSIS est d'injecter de l'information pour compléter le plan en pointillés correspondant aux détails manquants dans la pyramide MS de la figure-I-1. Sauf cas particuliers, les détails ne peuvent directement être égaux à ceux de l'image A car l'image synthétisée  $B_{k0}^*$  ne serait pas équivalente à « ce que verrait le capteur  $B_k$  s'il possédait la résolution spatiale du capteur A ». Une transformation doit être appliquée pour convertir les informations fournies par la représentation multiéchelle de l'image A en celles adaptées à la synthèse de  $B_{k0}^*$ . Il faut donc établir un modèle (*Inter Modality Model*, MIM) permettant de concevoir les fonctions liant le contenu spatial de ces deux ensembles (les deux pyramides des images PAN et MS) aux échelles spatiales où l'information est présente dans les deux représentations. Ainsi, ce modèle a pour but de pouvoir adapter et transformer l'information à injecter.

La figure-I-2 présente une vision globale du concept ARSIS. Les quatre opérations y sont représentées par application successive de trois classes de modèles : classe 1 : MSM, classe 2: IMM, classe 3 : HRIMM (*High Resolution IMM*), et enfin une ultime étape de reconstruction utilisant l'inverse du modèle MSM :  $MSM^{-1}$  [4] :

- Les MSM produisent une description hiérarchique de l'information des structures spatiales de l'image. Par exemple, dans la littérature, les auteurs font appel aux modèles multiéchelles basés sur la transformée en ondelettes [6-7], [10], [19], [21], la pyramide Laplacienne généralisée (GLP pour Generalized Laplacian Pyramid).etc. Appliqué à une image, le MSM fournit une (ou plusieurs) image de détails qui représente les hautes fréquences spatiales, et une image d'approximation qui regroupe les basses fréquences de l'image. La première itération du MSM sur la modalité A donne donc une ou plusieurs images de structures comprises entre  $res_0$  et  $res_1$  et une image de structures supérieures ou égales à  $res_1$  (approximation 2). Le MSM doit être inversible ( $MSM^{-1}$ ) afin de retrouver la synthèse des informations de hautes fréquences,
- La classe de modèles inter-modalités (en anglais Inter-Modality Model, soit IMM) s'intéresse à la transformation des structures spatiales avec le changement de modalités. L'IMM modélise les relations entre les détails et/ou les approximations observés dans l'image A et ceux observés dans l'image  $B_k$ . Cette relation peut suivre un modèle linéaire, ou être d'une forme mathématique plus complexe [4],
- Et enfin, la classe des modèles inter-modalités à haute résolution spatiale (en anglais High Resolution IMM, soit HRIMM) qui doit synthétiser le plan de détails manquants. Le HRIMM résulte de l'ensemble des informations à notre disposition : des approximations et détails à basse résolution, des paramètres de l'IMM et du plan de détails (hautes fréquences spatiales) existant dans la pyramide A.



**Figure-I-2** Les trois classes de modèles du concept ARSIS.

Les entrées du procédé de fusion sont la modalité A (PAN) à  $res_0$ , et la modalité  $B_k$  de MS à basse résolution  $res_1$ . Les opérations sont effectuées comme suit :

1. le MSM est utilisé pour décomposer les images A et  $B_k$  originales et en calculer les détails et approximations successives,
2. les approximations et les détails connus des deux pyramides pour chaque résolution sont utilisés pour ajuster les paramètres de l'IMM,
3. à partir de l'IMM, on définit le HRIMM qui convertit les détails connus de A pour en déduire ceux de l'image  $B_{k1}$  qui étaient inconnus à res1,
4. l'image  $B_{k0}^*$  est synthétisée par inversion du MSM ( $MSM^{-1}$ ) de res1 vers res0.

En résumé, une méthode de fusion d'image est dite de type ARSIS est toute méthode qui:

- décompose les deux images PAN et MS en des composantes de niveaux spectraux différents (MSM) grâce à une transformation en ondelette, de Fourier, de Laplace..etc,
- établit à travers les différents niveaux de décomposition des deux images une fonction (IMM) permettant d'en déduire le niveau manquant par une fonction (HRIMM),
- en fin, transforme les différents niveaux spectraux de l'image MS ensemble avec le niveau retrouvé par HRIMM en inverse ( $MSM^{-1}$ ) pour aboutir à l'image fusionnée.

Ci-dessous, nous décrivons deux méthodes de type ARSIS.

Nous nous sommes principalement intéressés aux deux approches présentées dans les articles [35] et [36] que nous décrivons dans les deux sections suivantes.

### **I-2-3-1 Méthode de type ARSIS basée sur la TF**

Dans [35], les auteurs utilisent la TF pour effectuer la fusion. Contrairement à l'approche utilisant la Transformée IHS qui ne traite que trois modalités Rouge, Vert et Bleu [3]. Cette méthode considère toutes les modalités de l'image.

L'image MS étant de basse résolution spatiale par rapport à l'image PAN, les structures manquantes dans l'image MS se sont, alors, les hautes fréquences de l'image PAN, extraites par un filtrage Passe-Haut à une fréquence de coupure  $f_c$ , égale à la fréquence maximale, de l'image MS, définie à partir de sa résolution spatiale (selon Nyquist- équation(I-10))[35].

Avant de procéder à l'injection de ces hautes fréquences dans chacune des modalités de l'image MS sur-échantillonnées (l'image MS a été sur-échantillonnée, par interpolation, pour

atteindre la même définition spatiale que pour l'image PAN), ces dernières sont filtrées par le filtre complémentaire au filtre appliqué sur l'image PAN (un filtre Passe-Bas à la même fréquence de coupure  $f_c$ ) et cela pour éviter les dégradations spectrales éventuellement dues à l'injection des fréquences qui existent déjà dans l'image MS sur-échantillonnée (le spectre en fréquence de l'image MS a été élargi par le sur-échantillonnage).

Ces deux filtres ; Passe-Haut et Passe-Bas à appliquer successivement sur la PAN et sur les modalités sur-échantillonnées de la MS, ont une fréquence de coupure  $f_c$  adaptative à la résolution spatiale inférieure (celle de MS initiale). D'après le critère de Nyquist, la fréquence maximale dans une image est [35] :

$$freq\_max = \frac{1}{2\Delta x} \quad (I-10)$$

Où  $\Delta x$  est la taille du pixel en mètre (ou c'est la période d'échantillonnage). À titre d'exemple, une image PAN du satellite IKONOS de résolution spatiale de 1m, a une fréquence  $freq\_max = 0.5$  cycle/mètre. La fréquence maximale de l'image MS correspondante délivrée par le même satellite est de 0.125 cycles/m.

Dans cet exemple, les fréquences à extraire de l'image PAN pour les injecter dans les bandes sur-échantillonnées de l'image MS sont celles qui sont supérieures à la fréquence maximale (selon Nyquist) de cette dernière ce qui nécessite l'application d'un filtre Passe-Haut de fréquence de coupure  $f_c=0.125$  sur l'image PAN pour extraire les détails spatiaux et les injecter ensuite dans les bandes-sur échantillonnées de l'image MS filtrées par le filtre Passe-Bas à la même fréquence de coupure  $f_c$ .

Cette méthode, utilisant la TF, extrait précisément les détails spatiaux ou les hautes fréquences spatiales HF à injecter dans l'image MS ce qui évite toute dégradation spectrale ou artéfact. Mais présente, en revanche, l'inconvénient d'injecter identiquement la même portion énergétique des HF spatiales dans chacune des modalités de l'image MS causant des distorsions spectrales et un flou affectant la résolution spatiale au niveau de l'image fusionnée.

### I-2-3-2 Méthode de type ARSIS basée sur la TO

Dans [36], les auteurs ont été les premiers qui ont proposé d'utiliser l'information des réponses spectrales des senseurs afin de contourner le problème dû à l'injection de la même portion énergétique dans chacune des modalités MS, se traduisant, ainsi, par des distorsions spectrales sur l'image fusionnée.

Cette méthode dite WisPeR (*Window Spectral Response*) a été comparée, dans [36], aux autres méthodes de fusion basées sur la transformée en ondelettes (TO) : AW (*Additive Wavelet-based method*) et AWLP (*Proportional Additive Wavelet Intensity method*) [37]. WisPeR présente plus de performances spectrales et spatiales que ces deux dernières [36].

WisPeR utilise la TO pour effectuer l'extraction des hautes fréquences [1], [6], [17]. En plus, cette méthode, utilise l'information, à priori, des réponses spectrales des senseurs pour élaborer un modèle d'injection permettant une distribution énergétique des détails spatiaux extraits aux différentes modalités de l'image MS. Cette manière d'injecter les détails spatiaux réduit les dégradations spectrales dues à l'injection de la même portion énergétique dans toutes les modalités de l'image MS.

Dans ce qui suit, nous décrivons le processus de la TO et du modèle d'injection utilisés par la méthode WisPeR.

#### I-2-3-2-1 Processus de la DWT (*Discret wavelet Transform*)

La DWT (*Discret Wavelet Transform*) d'une image peut être résumée dans le schéma synoptique de la figure-I-3:

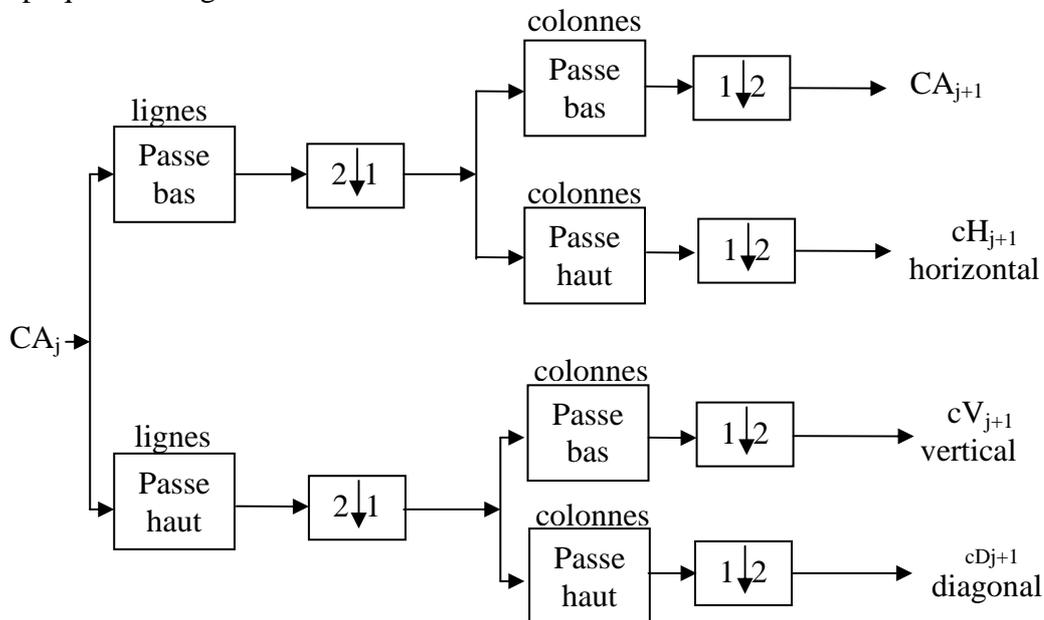
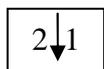
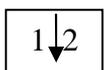


Figure-I-3 Schéma synoptique de la DWT.

Où :



Sous échantillonnage des colonnes : garder les colonnes à indexes pairs



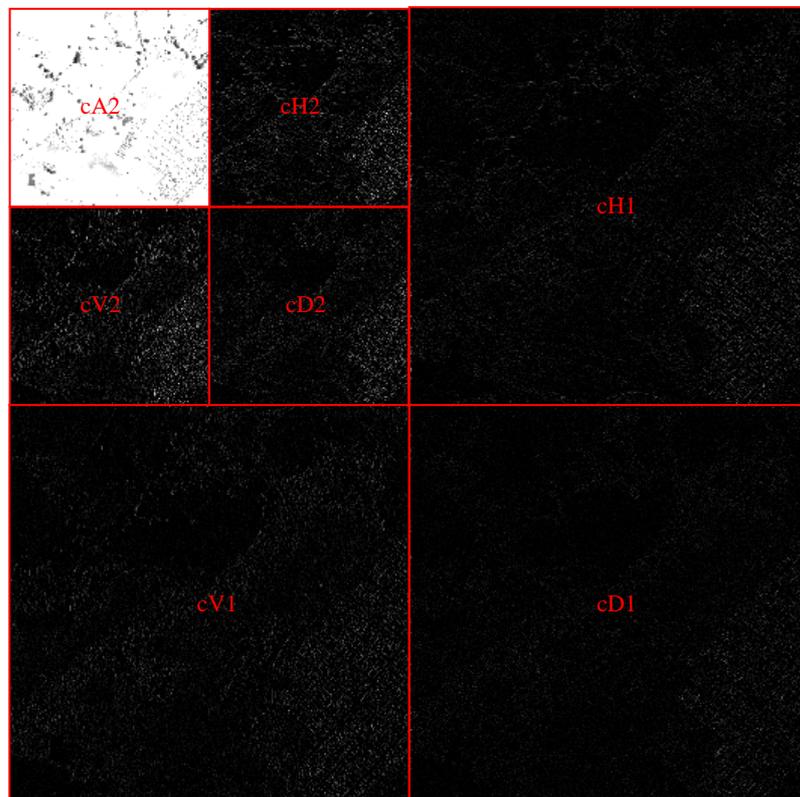
Sous échantillonnage des lignes : garder les lignes à indexes pairs

lignes  
 Convolver le filtre X avec les lignes d'entrée

colonnes  
 Convolver le filtre X avec les colonnes d'entrée

j Le niveau de la décomposition (il y a 01 niveau dans ce schéma synoptique)  
 $CA_0$  est l'image d'entrée.

Chaque niveau est constitué d'une approximation CA et de trois détails appelés horizontal (cH), vertical (cV) et diagonal (cD) et sont nommés selon leurs positions sur les quelles ils sont sauvegardés dans l'image transformée. Comme le montre l'exemple suivant dans la figure-I-4 où une DWT de deux niveaux d'une image PAN du satellite Ikonos avec l'ondelette de *Daubechies* est montrée. La décomposition de l'image initiale ( $CA_0$ ) donne au premier niveau trois détails cH1, cV1, cD1 et une approximation cA1. L'approximation cA1 se décompose dans le deuxième niveau et donne une approximation cA2 et trois détails cH2, cV2 et cD2.



**Figure-I-4** DWT de deux niveaux d'une image PAN du satellite Ikonos.

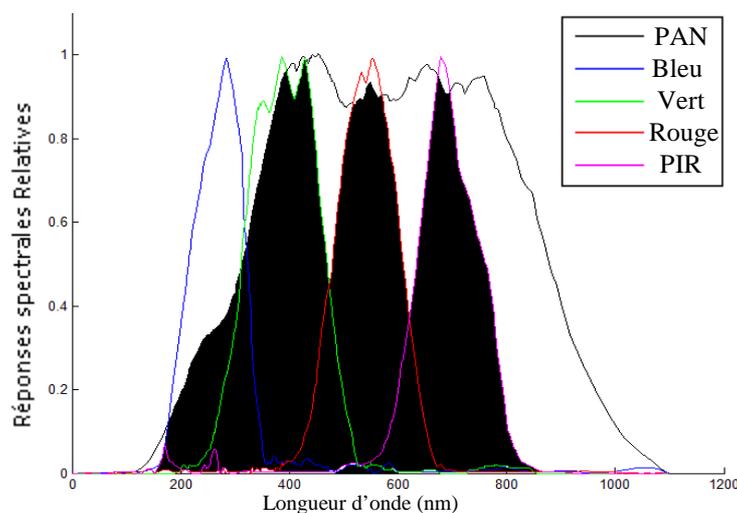
Les détails spatiaux extraits, concrétisés par les détails cD, cH et cV des différents niveaux ne sont injectés directement par WisPeR. Mais ce n'est qu'après les avoir adaptés énergétiquement aux modalités MS par le modèle décrit ci-dessous que l'injection est effectuée.

### I-2-3-2-2 Modèle d'injection utilisé par WisPeR

La méthode WisPeR est la première méthode dans la littérature utilisant les réponses spectrales des senseurs pour adapter les détails spatiaux à injecter dans les modalités MS.

Pour contourner le problème dû à l'injection de la même portion énergétique des HF spatiales extraites de l'image PAN dans toutes les modalités MS, WisPeR utilise un modèle d'injection utilisant les réponses des senseurs permettant de calculer les portions énergétiques à injecter dans chaque modalité de l'image MS.

Ce modèle d'injection revient à rechercher dans une première étape, des coefficients permettant de définir des pondérations pour définir des portions énergétiques des HF à injecter dans chaque modalité MS. A partir de la représentation graphique des SRF *Spectral Response Functions* (Figure-I-5); Une SRF d'un senseur, représentée par sa réponse spectrale, définit la probabilité qu'un photon d'une fréquence (ou longueur d'onde) donnée soit détecté par ce senseur. L'événement de détection d'un photon par un senseur (senseur panchromatique ou un senseur pour une bande de couleur) est exprimé donc par sa probabilité qui est définie comme étant la surface définie entre la SRF concernée et l'axe des abscisses.



**Figure-I-5** Les SRF des senseurs du satellite Ikonos.

Le modèle utilisé par la méthode WisPeR définit trois pondérations pour adapter les détails spatiaux extraits de l'image PAN aux modalités MS. Ces pondérations sont définies comme suit :

-La première pondération  $P_1$  globale définit la portion énergétique globale, relativement aux modalités MS, des détails spatiaux à injecter.

$$P_1 = \frac{\text{Surface globale des réponses spectrales couleurs communes avec la réponse panchromatique}}{\text{Surface globale des réponses spectrales couleurs}} \quad (\text{I-11})$$

-La deuxième pondération  $P_{2,i}$  permet d'ordonner les modalités MS selon les portions énergétiques, des détails spatiaux, à injecter dans chacune. Cette pondération est donnée pour chaque  $i^{\text{ème}}$  modalité MS par :

$$P_{2,i} = \frac{\text{Surface de } i^{\text{ème}} \text{ réponse spectrale couleur détectée par la réponse panchromatique}}{(\text{Surface globale des réponses spectrales couleurs détectées par la réponse panchromatique}) \frac{1}{n}} \quad (\text{I-12})$$

Où  $i$  représente l'indice de modalités MS ( $i=1$  à  $n$ ),  $n$  est le nombre de modalités MS.

-Après avoir défini la pondération globale  $P_1$  à appliquer sur les détails spatiaux extraits et après avoir classé les modalités MS par ordre de pondération, par les pondérations  $P_{2,i}$ , pour définir quelle modalité nécessite la portion énergétique importante et quelle autre nécessite moins et ainsi de suite jusqu'au la modalité nécessitant la portion minimale d'énergie. Ce modèle procède à une troisième pondération  $P_3$  permettant de définir une pondération spécifique à chaque modalité MS. La pondération  $P_3$  est définie, pour chaque  $i^{\text{ème}}$  modalité MS, par :

$$P_{3,i} = \frac{\text{Surface de } i^{\text{ème}} \text{ réponse spectrale couleur détectée par la réponse panchromatique}}{\text{Surface de } i^{\text{ème}} \text{ réponse spectrale couleur}} \quad (\text{I-13})$$

Les trois pondérations  $P_1, P_{2,i}, P_{3,i}$  sont appliquées sur les détails spatiaux, de chaque niveau de la DWT de l'image PAN, afin de les adapter aux modalités MS avant de procéder à la transformée en inverse IDWT de la DWT. Les détails spatiaux adaptés, pour chaque  $i^{\text{ème}}$  modalité MS, de chaque niveau  $j$  de la DWT sont donc donnés par :

$$\begin{aligned} acH_{j,i} &= cH_j * P_1 * P_{2,i} * P_{3,i} \\ acV_{j,i} &= cV_j * P_1 * P_{2,i} * P_{3,i} \\ acD_{j,i} &= cD_j * P_1 * P_{2,i} * P_{3,i} \end{aligned} \quad (\text{I-14})$$

Où  $acH_{j,i}$ ,  $acV_{j,i}$ ,  $acD_{j,i}$  sont les détails spatiaux extraits de la PAN et adaptés à être additionnés aux détails spatiaux correspondants en niveau  $j$  de décomposition DWT et en indices  $i$  de modalités avant de procéder à la IDWT.

Mais de cette façon ces pondérations deviennent fixes pour chaque satellite et ne dépendent plus de la variété des images. Afin d'introduire l'information image, la méthode WisPeR procède à un changement d'une identité surface de réponse spectrale relative à la quantité maximale des photons aux longueurs d'ondes sensibilisant le capteur pour redéfinir le paramètre  $P_{2,i}$  par une identité image. En se basant sur l'hypothèse que la moyenne des surfaces des réponses spectrales des senseurs MS correspond à la composante des basses fréquences (approximation  $cA_1$ ) de l'image PAN [3], WisPeR effectue un changement, sur  $P_{2,i}$ , en substituant alors le dénominateur par l'approximation  $cA_1$  de l'image PAN. La pondération  $P_{2,i}$  est donc redéfinie par :

$$P'_{2,i} = \frac{\text{Surface de } i^{\text{ème}} \text{ réponse spectrale couleur détectée par la réponse panchromatique}}{cA_1} \quad (\text{I-15})$$

Après cette redéfinition de la deuxième pondération de ce modèle, les détails spatiaux adaptés à être additionnés aux détails spatiaux correspondants en niveau  $j$  de DWT et en indice  $i$  de modalités, sont redonnés par :

$$\begin{aligned} acH_{j,i} &= cH_j * P_1 * P'_{2,i} * P_{3,i} \\ acV_{j,i} &= cV_j * P_1 * P'_{2,i} * P_{3,i} \\ acD_{j,i} &= cD_j * P_1 * P'_{2,i} * P_{3,i} \end{aligned} \quad (\text{I-16})$$

Bien que la WisPeR, en utilisant un modèle d'injection, permet de contourner la dégradation spectrale due à l'injection de la même portion énergétique des détails spatiaux et présente de satisfaisantes résolutions spatiales et spectrales comparativement aux méthodes basées sur la TO, cependant elle présente des distorsions et artefacts qui sont dues aux :

- a) WiSpeR, utilisant la Transformée en Ondelettes T.O [19] ne permet pas une extraction précise des HF spatiales à injecter dans les modalités de l'image MS. Car la Transformée en Ondelettes T.O décompose l'image en des niveaux spatiaux décroissant des détails spatiaux les plus fins jusqu'au niveau d'approximation. Et pour extraire les HF à injecter dans les modalités de l'image MS en utilisant la TO, on prend

les  $n$  premiers niveaux de détails ( $n$  est défini par le rapport logarithmique à base de 2 entre les deux résolutions spatiales des deux images PAN et MS) [36]. De cette façon, on ne coupe plus à une fréquence de coupure précise mais à toute une bande de fréquence (à un niveau spatial, figure-I-4). Ce qui engendre, soit une injection d'une partie de hautes fréquences spatiales qui ne devraient pas être injectées dans les modalités MS causant une injection de fréquences qui existent. Cela se traduit par des distorsions spectrales sur l'image fusionnée et un flou qui affecte surtout les contours de l'image. Il peut en résulte aussi une élimination d'une partie des hautes fréquences spatiales qui devraient être injectées dans les modalités MS causant ainsi des artéfacts sur l'image fusionnée.

- b) Pendant l'injection des détails spatiaux(ou des HF spatiales) dans les modalités MS, ces dernières n'ont pas été filtrées pour éliminer les fréquences spatiales ajoutées par un sur-échantillonnage de la MS au début du processus (les détails spatiaux adaptés de la PAN, et au lieu de substituer ceux des modalités MS, sont additionnés à ces derniers). Ce sur-échantillonnage, en effet, ajoute des fréquences de même nature que les HF extraites de la PAN mais avec des énergies différentes, causant ainsi, lors de l'injection, des distorsions spectrales ou un flou qui risque d'affecter surtout les contours de l'image [3].
- c) Le modèle d'injection, en définissant les paramètres permettant de définir les portions énergétiques des détails spatiaux à injecter dans chaque modalité et afin de se bénéficier des deux types d'informations ; senseur et image, la WiSpeR procède à un remplacement d'une quantité physique par une autre de type différent : une quantité de photons par une image (pondération  $P'_{2,i}$ ). Ceci engendre un biais dans ce modèle car une pondération (ou rapport) doit être définie entre deux identités du même type et de la même dynamique.
- d) Un autre facteur est que la TO utilise pour décomposer l'image en détails et approximation une suite de filtres Passe-Bas et Passe-Haut appliqués à la fois ou bien sur les lignes de l'image (ou de l'approximation d'un niveau donné) ou sur les colonnes de celle-ci comme il est montré dans le schéma synoptique de la figure-I-3 (convolution linéique). Ces détails résultants de cette manière d'appliquer les filtres, ne présentent pas les vraies hautes fréquences spatiales. Pour extraire celles-ci, il faut appliquer un filtre spatial (convolution avec une fenêtre) conjointement sur les lignes et sur les colonnes de l'image à filtrer [24], [38], [39].

Pour mettre en relief les biais et limitations des méthodes étudiées dans ce chapitre, nous effectuons, dans le chapitre prochain, une étude expérimentale et comparative de ces méthodes pour pouvoir proposer, dans la suite de cette thèse, une nouvelle méthode basée sur une étude critique des méthodes étudiées dans ce chapitre afin de préserver les éléments essentiels et s'affranchir à leurs limitations.

### **I-3 Conclusion à propos des différents types de méthodes**

#### **I-3-1 Conclusion à propos des méthodes de type projection-substitution et de type contribution spectrale relative**

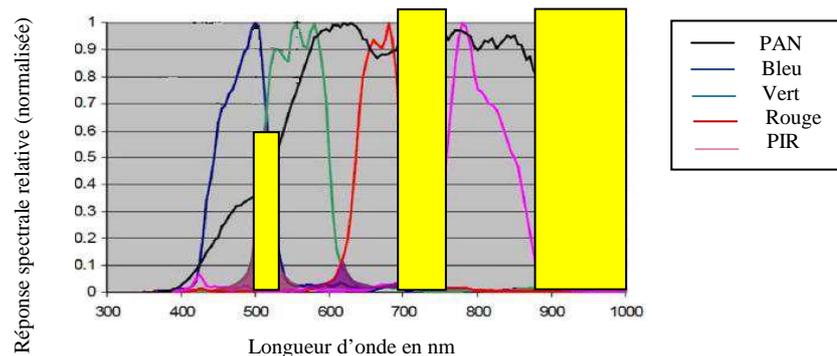
L'avantage commun entre les méthodes de ces deux types est de présenter une augmentation notable de la qualité visuelle au niveau des structures spatiales présentes dans les images. La qualité géométrique des images synthétisées par les méthodes IHS, Brovey, P+XS, ... est jugée satisfaisante dans la plupart des publications. Ces méthodes sont ainsi adaptées à certaines applications, telles que des applications liées à la cartographie, ou encore pour la localisation d'un phénomène particulier ou d'une cible [5]. Cependant, leur défaut majeur est la distorsion radiométrique qui a pour incidence une modification plus ou moins importante des signatures spectrales, c'est-à-dire des couleurs des modalités MS synthétisées [4].

La distorsion radiométrique est due à une modification des basses fréquences des modalités MS d'origine. Si on rappelle l'expression de la transformation IHS comme exemple de méthode de fusion appartenant à la première catégorie, et celle de Brovey pour la seconde, On remarque que dans les deux situations, la modalité Pan est injectée dans son intégralité [15]. Les basses fréquences de la modalité  $A_0$  (PAN) se retrouvent dans  $B_{k0}^*$  ( $k^{\text{ième}}$  modalité MS fusionnée) et viennent donc modifier celles de  $B_{k1}$  ( $k^{\text{ième}}$  modalité MS d'origine) ce qui ne conserve pas la résolution spectrale de la MS. De plus, dans le cas des méthodes de contribution spectrale relative, les basses fréquences d'une modalité MS subissent aussi l'influence des autres modalités MS par l'intermédiaire de la combinaison linéaire de ces modalités placées en dénominateur (équations I-5 et I-6).

En plus, les méthodes de type projection-substitution présentent l'inconvénient de traiter conjointement toutes les modalités MS ( $B_k$ ), avec une approche vectorielle. A partir du moment où une transformation d'espace intervient, la moindre modification apportée à la

composante comportant la quantité maximale de structures spatiales, engendre un impact sur chacune des modalités MS par l'intermédiaire de la transformée inverse. Comme c'est le cas de la méthode IHS qui en substituant la composante  $I$  par la modalité PAN; à ce niveau on n'a modifié que l'information concernée par la structure spatiale où il paraît que l'information couleur a été conservée par les composantes  $H$  et  $S$ , mais en procédant à la transformée en inverse, les autres composantes ( $H$  et  $S$ ) subissent un calcul conjoint avec la nouvelle composante intensité ( $I=$ PAN) et viennent modifier l'information couleur de l'espace RGB [12].

Tandis que le problème majeur des méthodes de type contribution spectrale relative est l'hypothèse de départ de linéarité entre les deux images PAN et MS. La figure I-6 montre un graphique à propos des réponses spectrales normalisées des différentes modalités du satellite Quickbird. A ce graphique ont été ajoutés des rectangles jaunes pour attirer l'attention sur les zones problématiques du spectre.

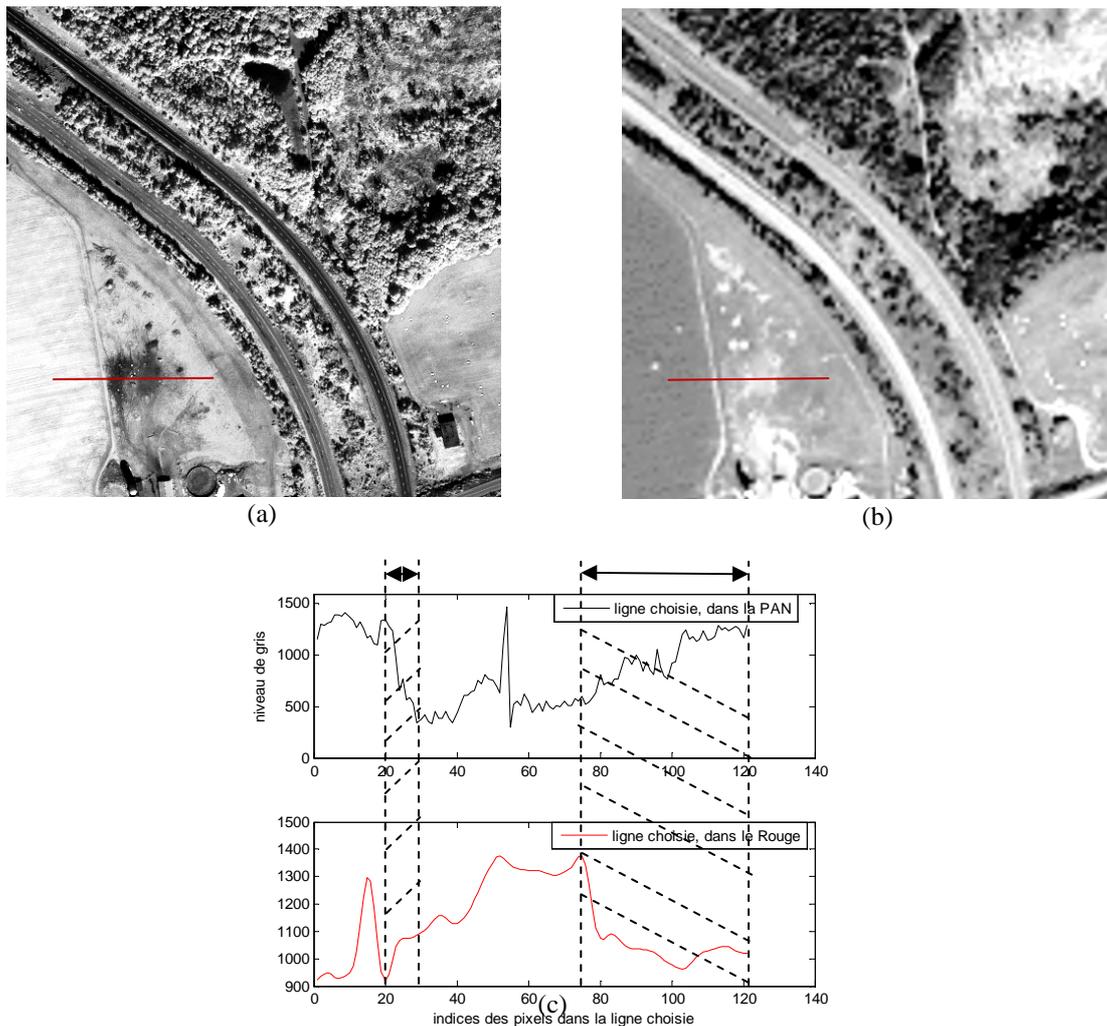


**Figure-I-6** Réponses spectrales normalisées des canaux bleu, vert, rouge, PIR et Pan pour le satellite Quickbird, en fonction des longueurs d'ondes incidentes.

Les deux rectangles de droite rappellent que seul le capteur Pan y est sensible. A titre d'exemple, dans une longueur d'onde proche de  $0.95 \mu\text{m}$ , se manifestant par des niveaux de gris non nuls dans cette modalité PAN. Par contre, comme cette partie de spectre électromagnétique n'est couverte par aucune autre modalité MS, l'hypothèse de contribution spectrale relative n'est pas vérifiée. De plus, certaines modalités se chevauchent, créant dans ces deux images verte et bleue une redondance spectrale de l'information (rectangle jaune le plus à gauche sur la figure-I-6). Toutefois, cette relation est presque vraie dans le cas de la méthode P+XS développée pour les satellites SPOT1-4. Cette méthode a l'avantage de procéder dans le domaine des luminances, et utilise une spécification initiale du satellite, à savoir que le capteur PAN a été construit pour présenter des luminances qui soient égales à la moyenne des luminances des modalités XS1 et XS2 (deux premières bandes –tableau-I-1).

L'avantage de cette méthode n'est plus conservé lorsque l'on s'intéresse à un autre satellite. De plus, la modalité XS3 du satellite SPOT présente une bande passante totalement disjointe de celle de la modalité Pan, et la méthode P+XS suggère une simple duplication pour la modalité XS3. La duplication par la méthode des plus proches voisins a pour avantage de ne pas changer le contenu spectral d'une image. Cependant, même si cette interpolation ne change pas le contenu spectral de la bande XS3, le résultat visuel est médiocre, et le sur-échantillonnage ne peut pas être considéré comme un résultat de fusion à part entière [4].

Outre, pour apporter de meilleurs résultats, ces méthodes de type projection-substitution et de type contribution spectrale relative, en se basant sur des substitutions et des hypothèses de linéarité et afin de préserver l'information spectrale de l'image MS, nécessitent une forte corrélation entre chaque modalité  $B_k$  et la modalité A. Les dissimilitudes entre A et  $B_k$  telles que les inversions de contraste et les occultations d'objets empêchent leur corrélation. Une occultation d'objet, se traduisant par son absence dans une image et sa présence dans une autre, peut poser un problème pour la fusion (à partir qu'une relation linéaire devait lier les deux images ou que l'une substitue l'autre). Il en est de même de son environnement. Ainsi, un objet clair sur fond sombre dans la modalité PAN, peut se retrouver foncé sur fond clair dans une des modalités MS, et inversement. Dans ce cas l'importance en termes des contrastes (d'énergie) entre objets n'est pas conservée d'une image à l'autre, ce qui indique l'existence des dissimilitudes locales relatives aux capteurs de haute et de basse résolution spatiale. Cela peut affecter la fusion surtout dans la phase d'injection de structures extraites d'une image dans l'autre ou en substituant entre leurs composantes ou même en établissant des fonctions entre images (hypothèse de linéarité). La figure-I-7 illustre ce phénomène où nous constatons qu'une ligne particulière présentée en rouge dans l'image PAN et dans la modalité Rouge de l'image MS, possède deux pentes (ou évolutions locales illustrées le long d'une ligne particulière) de contrastes inversées dans les deux modalités PAN et Rouge (régions hachées de la figure-I-7). Ce qui traduit une inversion de contraste dans les transitions.



**Figure-I-7** Illustration du phénomène d'inversion de contraste sur une paire d'images PAN-MS délivrée par Ikonos: (a) image PAN (1 m), (b) modalité rouge de l'image MS de 4 m, sur-échantillonnée à 1 m (par opérateur bicubique), (c) extraits d'une ligne particulière dans les deux modalités, présentant une importance (pente) de contraste inversée de l'objet par rapport à son environnement dans les deux images.

Cet exemple montre l'existence de contraintes de dissimilarités locales existant entre les capteurs de haute et de basse résolution qui, lors d'une fusion de type projection-substitution ou de type contribution spectrale relative, devaient présenter des allures semblables vis-à-vis les hypothèses de départ des deux types afin de pouvoir conserver l'information spectrale de la MS.

Comme ces deux types présentent des méthodes globales, ils ne sont pas en mesure de proposer une solution lorsque les contenus spatiaux des deux images considérées ne sont localement pas corrélés [4].

Ainsi, une approche de fusion manipulant et les images et leurs capteurs, afin d'adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection, aurait sûrement réduit les effets de ces contraintes et cela en essayant de préserver les caractéristiques qui définissent le contenu de la bande spectrale à synthétiser tout en augmentant la résolution spatiale de l'image. C'est ce qu'on appelle « la propriété de cohérence ».

Cette propriété de cohérence est respectée par les méthodes de types ARSIS qui adaptent les détails spatiaux extraits de l'image PAN aux modalités MS avant de procéder à l'injection comme le décrit le paragraphe suivant.

### **I-3-2 Conclusion à propos des méthodes de type ARSIS**

En ce qui concerne les méthodes de type ARSIS, la principale qualité est le respect de la propriété de cohérence (adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant les injecter dans ces dernières), et donc une bonne restitution des signatures spectrales. En effet, les spectres des produits fusionnés, une fois ramenés à la résolution initiale, sont généralement fidèles à ceux des modalités MS d'origine. Cependant, cette bonne restitution s'effectue au détriment des structures géométriques de l'image. Les images fusionnées présentent des artefacts tels que les rebonds [5].

L'avantage majeur, de ce type, de ne pas induire des distorsions spectrales au niveau du produit de la fusion, comparativement aux deux précédents, réside en deux processus :

- La décomposition par le filtre MSM (ondelettes, Fourier, etc.) permet de n'injecter que la partie jugée manquante dans l'image MS, évitant ainsi toute dégradation spectrale due à la substitution de l'intégralité de la PAN ou au calcul conjoint avec cette dernière,
- L'IMM permet d'établir des fonctions (relations) entre les différents niveaux spectraux communs des deux images. Ce qui évite d'injecter la partie hautes fréquences spatiales extraite de l'image PAN directement telle qu'elle est mais ne l'injecte qu'après l'avoir adaptée aux modalités MS afin de préserver l'information spectrale de cette dernière.

La qualité de synthèse de ce type de méthodes est fortement liée à la qualité de la réponse fréquentielle du filtre MSM utilisé pour dissocier les différentes fréquences spatiales du

spectre et au modèle IMM conçu pour adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection.

Le chapitre suivant présentera une étude comparative mettant en reliefs les biais des différents types de méthodes de fusion entamés dans ce chapitre. Dans un chapitre prochain, un nouvel algorithme de type ARSIS, permettant d'en remédier aux biais soulignés pour les trois types de fusion, sera proposé.

## Chapitre-II

Etude comparative de quelques méthodes de fusion

## II-1 Introduction

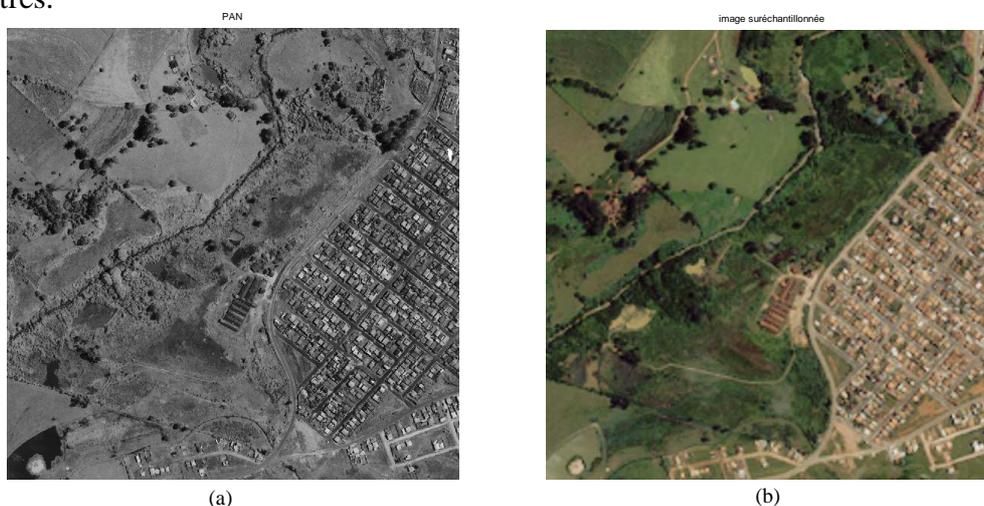
La fusion d'images sert à combiner les informations de multiples images de résolutions spatiales différentes (MS et PAN), représentantes de la même scène, afin d'obtenir une image composite appropriée à la perception visuelle humaine et aux tâches de traitement d'image.

Dans ce chapitre, nous effectuons une étude expérimentale et argumentative pour les trois types ou ensembles de méthodes de fusion déjà entamés dans le chapitre précédent, appliquées à des images satellitaires. Les méthodes de fusion de type Projection-Substitution (la méthode IHS '*Intensity, Hue, Saturation*' et la méthode PCA *Principal Component Analysis*), les méthodes de type Contribution Spectrales Relative (la méthode de *Brovey*, la méthode CN (*Color Normalized*) et la méthode P+XS), et deux méthodes de type ARSIS [35], [36]. Nous mettons en relief les différents biais et avantages des trois types de méthodes afin de proposer une nouvelle méthode dans le chapitre suivant. Pour cela, des mesures quantitatives ainsi qu'une évaluation qualitative pour l'analyse du produit de la fusion sont effectuées. Notons que dans la littérature aucun bilan général de qualité n'est disponible car les méthodes de fusion n'utilisent pas le même concept et que le produit idéal n'existe pas [2], [8], [4], [5], [18-19], [28-31], [29].

## II-2. Etude expérimentale

Pour montrer l'intérêt des méthodes qui apportent une résolution spatiale satisfaisante à l'image MS. Dans la plupart des exemples présentés, nous optons pour des images fournies par des satellites de très haute résolution spatiale tels que les satellites Ikonos et Quickbird[28-29].

La figure-II-1 montre une paire d'images Ikonos (la scène est de Guaxupé city, São Paulo state, Brazil [82]). L'image PAN est d'un mètre de résolution spatiale et les modalités B, G, R, PIR sont de quatre mètres.



**Figure-II-1** Image Ikonos : (a) Modalité Panchromatique de résolution de 1m, (b) Composition RGB des modalités MS de résolution de 4m [82].

La comparaison est tout d'abord visuelle, c'est ce qu'on appelle évaluation qualitative et ensuite quantitative basée sur la comparaison des caractéristiques spectrales et spatiales des images PAN, MS et MS fusionnée. Nous utilisons dans cette étude l'indice MSSIM (*Mean Structural Similarity*) [23].

L'indice *Structural Similarity SSIM* est donné par l'expression:

$$SSIM = \frac{(C1 + 2\overline{xy})(C2 + 2\sigma_{xy})}{((\overline{x})^2 + (\overline{y})^2 + C1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C2)} \quad (\text{II-1})$$

Où  $\overline{x}$  et  $\overline{y}$  sont les moyennes de chacune des images originale ( $x$ ) et fusionnée ( $y$ ).  $\sigma_x^2$  et  $\sigma_y^2$  sont respectivement les variance de  $x$  et de  $y$ . Et  $\sigma_{xy}$  est la covariance de  $x$  et  $y$ .

Et :

$C1 = (k_1 L)^2$ ,  $C2 = (k_2 L)^2$  sont définis tel que  $k_1 \ll 1$  et  $k_2 \ll 1$  et  $L$  est la dynamique (égale à 255 pour une image codée sur 8bits).  $C1$ ,  $C2$  sont introduits pour éviter des résultats instables lorsque  $((\overline{x})^2 + (\overline{y})^2)$  ou/et  $(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$  sont proches de zéro [23].

Cet indice (SSIM) modélise la dissemblance entre 02 images à partir de 03 facteurs [23] : la perte de corrélation, la distorsion de la luminance et la distorsion de contraste. L'indice MSSIM a été calculé utilisant des fenêtres divisant l'image en imagettes.

$$MSSIM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SSIM_i \quad (\text{II-2})$$

Où  $N$  est le nombre d'imagettes divisant l'image.

De même que pour une évaluation spectrale (inter- modalités de MS et image fusionnée), cet indice est utilisé pour l'évaluation spatiale en calculant le *MSSIM* entre la PAN et chacune des modalités couleurs avant et après fusion. Plus *MSSIM* est important plus on améliore la résolution spatiale ou spectrale de la modalité MS concernée.

### II-2-1. Evaluation qualitative et quantitative

Pour une comparaison visuelle entre les trois types de méthodes, nous optons d'effectuer, en premier, une comparaison entre les méthodes des deux premiers types car ces méthodes ont un inconvénient majeur commun (la distorsion spectrale au niveau du produit de la fusion). Ensuite, une méthode de ces deux types, soit IHS, sera comparée aux méthodes de type ARSIS. La figure-II-2 présente une portion spatiale représentative du résultat de fusion de la paire d'images Ikonos de la figure-II-1 en

montrant les résultats obtenus par les méthodes des deux types ; projection-substitution et contribution spectrale relative.



**Figure-II-2** Fusion d'images : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par PCA, (e) image fusionnée par la méthode de Brovey, (f) image fusionnée par la méthode CN, (g) image fusionnée par la méthode P+XS.

D'après la Figure-II-2-c, on constate, visuellement sur l'image MS fusionnée utilisant la méthode IHS, qu'il y a une amélioration notable et satisfaisante de la résolution spatiale (structures géométriques) au détriment de la résolution spectrale (information couleur) qui subit des distorsions par rapport à l'image MS (figure-II-2-b). Cela est dû principalement à une substitution entière entre la composante  $I$ , résultante de la transformation par IHS, et la PAN [15], [84], or la MS sur-échantillonnée contient des fréquences de même nature que celles dans la PAN. Ces fréquences communes auraient dû être éliminées complémentaires de la composante  $I$  et de la PAN avant la substitution (la composante  $I$  à substituer par la PAN est calculée linéairement en fonctions des modalités couleurs de la MS et aurait pratiquement les mêmes fréquences que la MS mais à des énergies différentes). Des méthodes intéressantes [3], [18], [23-24] effectuent ce traitement bien remédiant au problème de distorsion spectrale pour IHS mais toujours, cette approche ne traite que trois modalités spectrales (Rouge Vert et Bleu) et exclut donc les autres telle que la modalité Proche Infra Rouge PIR, pour, par exemple, le satellite Ikonos et Quick-Bird. L'importance de cette bande PIR a été démontrée dans [22], [33] pour l'extraction et la classification d'objets.

Dans le même type de méthodes, la méthode PCA, figure-II-2-d présente le même inconvénient que l'IHS ; la distorsion spectrale encore due à la substitution totale par la PAN de la première composante principale de la MS [84].

Ainsi, on constate visuellement, des Figures-II-2-e,f,g, qu'il y'a une dégradation spectrale importante pour la MS fusionnée obtenue par les méthodes de type contribution spectrale relative ; Brovey, CN et P+XS. Ceci est dû principalement à la supposition sur laquelle se basent les méthodes de ce type et qui supposent une linéarité entre les images MS et PAN. Ce type de méthodes peut donner de résultats plus satisfaisants pour certains cas plus précis comme à titre d'exemple le cas de CNES (Centre National d'Etude Spatiale, Toulouse, France) qui utilise la méthode P+XS développée pour les satellites SPOT1-4 qui délivrent une base de données vérifiant l'hypothèse de cette méthode [4].

Pour une comparaison de ces deux premiers types de fusion, présentant le même inconvénient majeur de la dégradation spectrale au niveau de l'image fusionnée, avec les méthodes de type ARSIS, la figure-II-3 présente une comparaison entre la méthode IHS et les deux méthodes de type ARSIS ; celle utilisant la TF [35] et celle dite WiSpeR [36].



**Figure-II-3** Fusion d'images : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].

Nous constatons (figure-II-3) que la méthode IHS, comme représentante des méthodes de son type, en apportant une résolution spatiale satisfaisante à l'image fusionnée, présente des dégradations spectrales au niveau de l'image fusionnée (figure-II-3-c). Ainsi, dans cet exemple, il est difficile de distinguer l'espace minéral dans l'espace végétal. De plus cette méthode est limitée à trois modalités et exclut les autres tels que la modalité PIR. L'intérêt de cette modalité a été montré pour la classification des structures géométriques [16].

Tandis que la méthode utilisant la TF (figure-II-3-d) apporte la résolution spatiale de l'image PAN à l'image MS tout en préservant ses signatures spectrales. Cela est principalement dû à ce que la TF permet d'extraire exactement les détails spatiaux manquant dans la MS (à une fréquence de coupure prédéfinie) [35]. Ainsi, le filtrage complémentaire effectué sur les modalités de l'image MS, avant de procéder à l'injection, évite tout éventuel recouvrement qui serait traduit en des dégradations spectrales dans le cas contraire.

Néanmoins, cette méthode (figure-II-3-d) présente un flou au niveau de l'image fusionnée, affectant légèrement les contours de l'image fusionnée. Ce flou est dû principalement, comme il a été décrit dans le chapitre précédent, à ce que cette méthode procède à injecter les HF spatiales identiquement dans toutes les modalités de l'image MS sans les avoir adapté à ces modalités.

De même que la méthode utilisant la TF, la méthode WiSpeR (figure-II-3-e) présente une résolution spatiale satisfaisante au niveau de l'image fusionnée tout en préservant ses signatures spectrales grâce au modèle d'injection, décrit dans le chapitre précédent, permettant d'adapter les détails spatiaux aux modalités MS. Néanmoins, cette méthode présente un léger flou affectant et la couleur et les contours de l'image fusionnée. Cela est dû aux biais, déjà discutés dans le chapitre précédent, relatifs à la TO et au modèle d'injection.

Ainsi, pour nous situer dans différentes conditions, nous utilisons, dans la figure-II-4, une paire d'images Ikonos avec de riches contrastes (variété urbanisme, végétal, etc.) et de larges dynamiques (images codées sur 11bits) afin d'effectuer une comparaison entre la méthode IHS, celle utilisant la TF [35] et la méthode WiSpeR [36].



(a), PAN



(b), MS sur-échantillonnée



(c), méthode IHS



(d), Méthode TF

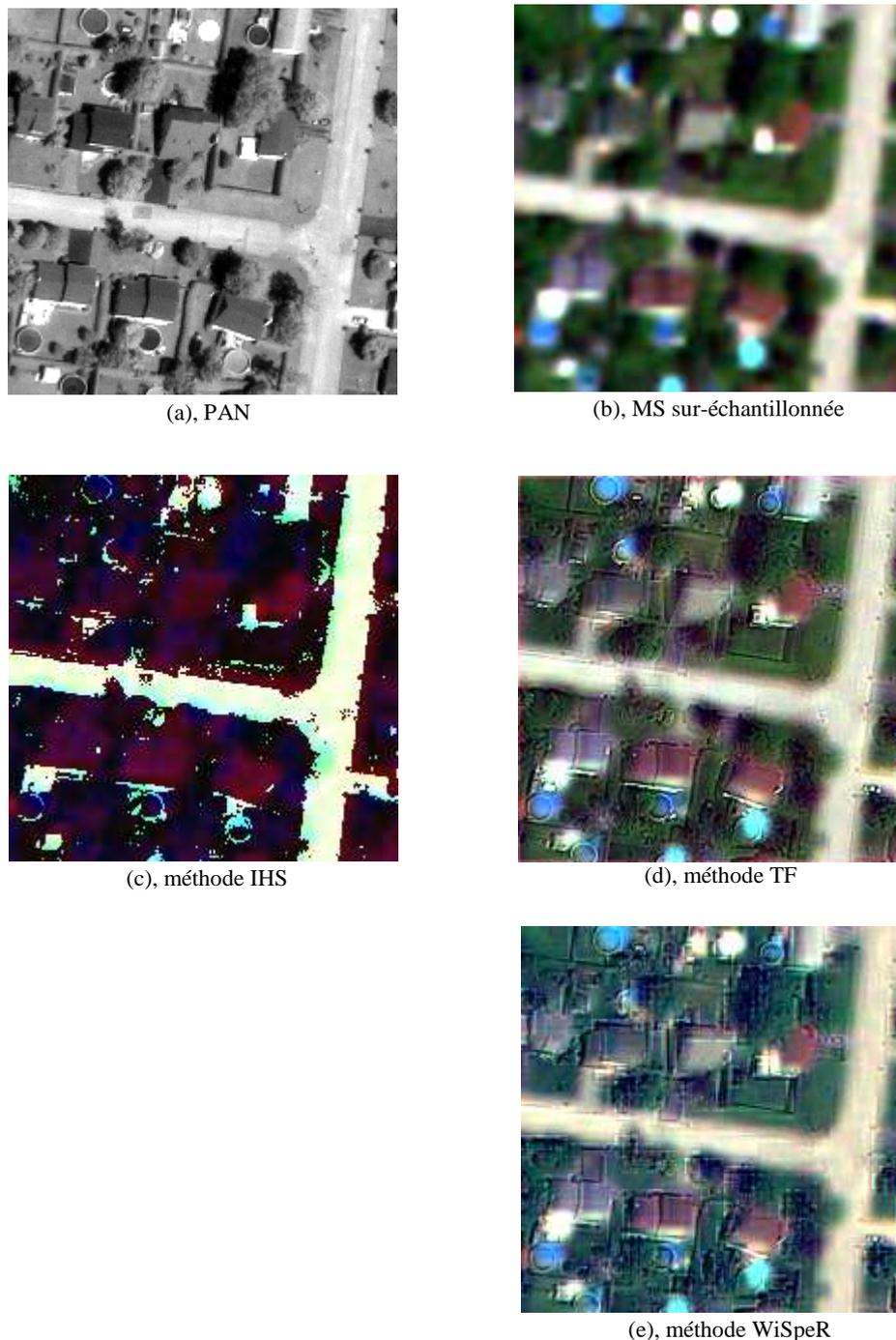


(e), méthode WiSpeR

**Figure-II-4** Fusion d'images de 11 bits d'entropie : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].

Cette figure montre la dégradation spectrale au niveau du produit de la fusion par IHS (figure-II-4-c). Ainsi, nous constatons que la méthode utilisant la TF (figure-II-4-d) présente une résolution spatiale satisfaisante (structures géométriques, contours et détails spatiaux) en se référant à la PAN et préserve la résolution spectrale de l'image MS. Néanmoins, cette méthode présente un léger flou dû à l'injection de la même portion énergétique dans les différentes modalités MS, la méthode WiSpeR (figure-II-4-e) bien qu'elle utilise un modèle d'injection afin d'adapter énergétiquement les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection, présente une légère dégradation spectrale due, d'une part, à l'injection des détails spatiaux dans les modalités MS sans avoir filtré ces dernières afin d'éviter tout éventuel recouvrement et d'autre part aux biais relatifs au modèle d'injection utilisé et à la TO comme il est expliqué dans le chapitre précédent.

Il nous a semblé aussi utile d'étudier un autre exemple. La figure-II-5 illustre une fusion d'une paire d'images Quickbird de riches contrastes et de larges dynamiques (images codées sur 11bits). La comparaison concerne la méthode IHS et les deux méthodes de type ARSIS ; la méthode utilisant la TF [35] et la méthode WiSpeR [36].



**Figure-II-5** Fusion d'images Quickbird de 11bits d'entropie : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].

D'après l'analyse visuelle de la figure-II-5, la méthode IHS présente une dégradation spectrale importante. Cela est dû, comme il a été discuté dans le chapitre précédent, à ce que l'intégralité de l'image PAN substitue la composante intensité  $I$ . Tandis que les deux méthodes de types ARSIS (figures-II-5-d, e) donnent une restitution satisfaisante de la résolution spatiale au niveau de l'image fusionnée tout en préservant sa résolution spectrale. Néanmoins, la méthode utilisant la TF présente

un léger flou, principalement dû à l'injection de la même portion énergétique des HF spatiales extraites de la PAN dans les différentes modalités MS. De même, la méthode WiSpeR présente un flou global sur l'image fusionnée et une dégradation spectrale. Ces artéfacts présentés par la méthode WiSpeR sont dus comme il a été discuté dans le chapitre précédent, d'une part au biais du modèle d'injection utilisé et d'autre part aux biais liés à la DWT.

Une étude statistique pour différentes méthodes, des trois types cités, est résumée aux tableaux-II-1,2.

Pour une évaluation quantitative de la qualité spectrale (tableau-II-1) de fusion de la paire d'images de la figure-II-1, nous donnons le coefficient MSSIM (paragraphe-II-2) inter modalités des images MS sur-échantillonnée et MS fusionnée. Le même coefficient est calculé entre la PAN et chacune des modalités de l'image MS fusionnée pour une évaluation quantitative de la qualité spatiale au tableau-II-2.

	Inter modalités : MS d'origine-MS fusionnée	B-B	G-G	R-R	PIR-PIR
	Méthode				
<b>Premier type : Projection substitution</b>	IHS	0.34	0.25	0.28	
	PCA	0.17	0.09	0.21	
<b>Deuxième type : Contribution spectrale relative</b>	Brovey	0.23	0.22	0.27	0.28
	CN	0.40	0.35	0.41	0.40
	P+XS	0.35	0.31	0.35	
<b>Troisième type : ARSIS</b>	Méthode utilisant la TF	0.33	0.38	0.37	0.50
	WiSpeR	0.9736	0.9164	0.9126	0.9078

**Tableau-II-1** Indexe MSSIM entre les modalités fusionnées et leurs modalités correspondantes d'origine pour différentes méthodes.

A partir du tableau-II-1, conformément à l'évaluation visuelle, nous constatons, en générale, que l'indice MSSIM, qui a pour fonction de mesurer la similitude entre les deux images ou modalités comparées, indique une faible similitude (une similitude parfaite indique MSSIM=1) pour les méthodes de premier et de deuxième types s'expliquant par des distorsions spectrales sur les différentes modalités. Pour les méthodes de type ARSIS, nous constatons de ce tableau que ce type de méthodes préserve plus, comparativement aux deux autres types, la résolution spectrale de la MS en améliorant sa résolution spatiale comme le présente la méthode WiSpeR, à titre d'exemple, au niveau de la modalité Bleu, l'indice MSSIM =0.9736 montrant une similitude importante indiquant une conservation de la qualité spectrale de l'image MS.

Le tableau-II-2 présente, pour la même paire d'image que le tableau précédent, une étude comparative entre les différentes méthodes, sur l'apport de la résolution spatiale de l'image PAN à l'image MS.

	<b>Inter modalités : PAN-MS fusionnée</b>				
	<b>Méthode</b>	PAN-B	PAN-G	PAN-R	PAN-PIR
Inter modalités PAN-MS d'origine (avant fusion)		0.21	0.27	0.22	0.36
<b>Premier type : Projection substitution</b>	IHS	0.76	0.88	0.87	
	PCA	0.77	0.71	0.63	
<b>Deuxième type : Contribution spectrale relative</b>	Brovey	0.34	0.52	0.49	0.46
	CN	0.31	0.36	0.32	0.29
	P+XS	0.29	0.37	0.33	
<b>Troisième type : ARSIS</b>	Méthode utilisant la TF	0.73	0.87	0.77	0.88
	WiSpeR	0.8774	0.9325	0.9144	0.9183

**Tableau-II-2** Indice MSSIM entre les modalités MS et la modalité PAN avant et après fusion pour différentes méthodes.

Le tableau-II-2 montre que les méthodes de types projection substitution apportent plus d'amélioration pour l'information spatiale comparativement à celles de types contribution spectrale relative. Mais, il reste toujours utile de noter que les méthodes de type ARSIS surpassent celles de type projection-substitution et celle de type contribution spectrale relative, comme le montre le tableau-II-2. Prenons, la modalité Rouge présentant un  $MSSIM=0.9144$  pour la méthode WiSpeR et un  $MSSIM=0.77$  pour celle utilisant la TF. Tandis que la même modalité présente un  $MSSIM$  compris entre 0.33 et 0.49 pour les méthodes de contribution spectrale relative. La méthode IHS présente une bonne restitution de la résolution spatiale au niveau de l'image fusionnée ( $MSSIM=0.87$  pour la modalité Rouge du tableau-II-2) mais en plus que cette méthode est limitée uniquement à trois modalités MS, cet apport de résolution spatiale est effectué au détriment de sa résolution spectrale (figure-II-3,4,5 et tableau-II-1).

### II-3. Conclusions et Discussions

Ce chapitre effectue une étude descriptive, expérimentale et argumentative des trois types de fusion ; projection-substitution, contribution spectrale relative et ARSIS.

D'après l'étude effectuée, l'avantage du premier type (IHS, PCA) est de présenter une augmentation notable de la qualité visuelle au niveau des structures spatiales présentes dans les images fusionnées [3], [27]. La qualité géométrique (spatiale) des images synthétisées est jugée satisfaisante pour la méthode IHS ce qui signifie une amélioration de la résolution spatiale. Cependant, leur défaut majeur est la distorsion radiométrique qui a pour incidence la modification des signatures spectrales (des couleurs) des modalités MS synthétisées.

La distorsion radiométrique est due à une modification des basses fréquences des modalités MS d'origine, et donc à un non-respect de la propriété de cohérence. Si on rappelle l'expression de la transformation IHS comme exemple de méthode de fusion appartenant à la première catégorie, On remarque que la modalité PAN est injectée dans son intégralité. Les basses fréquences de la modalité PAN se retrouvent dans MS fusionnée et viennent donc modifier celles de MS initiale. Ce problème d'injection intégrale de la PAN peut être remédié en associant à la méthode IHS une méthode permettant le traitement de la PAN avant injection mais cette méthode reste toujours limitée à trois modalités spectrales.

Les méthodes Brovey, CN et P+XS, de deuxième type, chacune suppose une linéarité différemment présentée entre la PAN et la MS. Ce type de méthodes ne peut donner de satisfaisants résultats de

fusion sauf pour des images délivrées par des satellites portant à leurs bords des senseurs vérifiant l'hypothèse, de départ, de linéarité entre modalités.

Les méthodes de type ARSIS apportent la résolution spatiale de l'image PAN à l'image MS d'une façon notoire, comparativement aux deux premiers types de méthodes de fusion, tout en évitant d'introduire des distorsions spectrales sur l'image fusionnée [14]. Néanmoins, ces méthodes présentent visuellement un flou affectant légèrement les couleurs et les contours de l'image fusionnée. Ceci est dû à ce que la méthode utilisant la TF ne procède pas à adapter les HF spatiaux avant l'injection aux modalités MS. Ainsi, la WiSpeR présente des artefacts en ne traitant pas les modalités MS avant l'injection afin d'éviter tout type de recouvrement éventuel, en utilisant la TO pour extraire des détails spatiaux en traitant dis-jointement les lignes et les colonnes des images [24] et en procédant à un modèle présentant un biais comme il sera montré dans le chapitre suivant.

Vis-à-vis ces limitations, une nouvelle méthode, en se basant sur une étude critique des méthodes de type ARSIS, sera proposée dans le chapitre suivant. Ainsi, un ensemble d'exemples montrera le bien fondé de l'approche proposée par rapport à ces prédécesseurs.

## Chapitre-III

Proposition de FUFSEER : une méthode efficace de fusion

### III-1 Introduction

Les méthodes usuelles de fusion d'images satellitaires, par différentes manières, injectent des structures extraites de l'image panchromatique PAN de haute résolution spatiale dans chacune des composantes spectrales, dites modalités, de l'image, correspondante, MultiSpectrale MS de haute résolution spectrale tout en essayant de préserver ses signature spectrales et améliorer sa résolution spatiale pour atteindre celle de la PAN. L'objectif est donc d'obtenir l'image que devrait observer un capteur qui délivrerait, s'il existait, une seule image ayant la résolution spatiale de la PAN et la résolution spectrale de la MS.

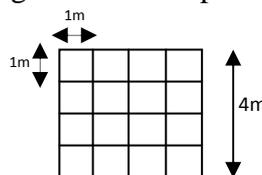
Dans le chapitre précédent, nous avons effectué une étude comparative des trois types de méthodes de fusion. Nous avons opté pour le type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures). Nous proposons dans ce chapitre, une méthode de fusion, de type ARSIS, basée sur la Transformée de Fourier en introduisant les réponses spectrales des capteurs.

### III-2 Proposition d'un algorithme de fusion basé sur la TF en introduisant les caractéristiques du capteur, FUFSER (*image FUSion method based on the Fourier Transform using the SENSor's Response*) [83]

La méthode que nous proposons se base sur l'étude critique des travaux précédents [35], [36]. La TF est utilisée pour extraire les HF spatiales de l'image PAN et pour traiter les modalités de l'image MS avant l'injection. En plus, cette méthode utilise les caractéristiques du capteur pour élaborer un modèle d'injection permettant de distribuer énergétiquement les HF spatiales sur les différentes modalités MS.

#### III-2-1 Sur-échantillonnage

Un sur-échantillonnage est nécessaire pour manipuler les images PAN et MS ensemble. L'image MS du satellite Ikonos, à titre d'exemple, est de basse résolution spatiale de 4m (un pixel représente une surface 16 fois plus large que celle représentée par un pixel dans l'image PAN (de 1m)). Comme schématisé sur la figure-III-1, chaque pixel dans chaque modalité de l'image MS doit être donc remplacé par 16 pixels représentant chacun 1m et cela par sur-échantillonnage utilisant une interpolation permettant d'estimer les valeurs des pixels ajoutés relativement aux pixels voisins d'une modalité de l'image MS. Après cette opération, une image MS de  $n \times n$  pixels aura  $16n^2$  pixels, c'est la taille de l'image PAN correspondante.



**Figure-III-1** Un pixel de 4m d'une modalité MS divisé en 16 pixels de 1m, pour sur-échantillonnage.

Ce sur-échantillonnage, étant indispensable, ne sauvegarde pas le spectre de l'image MS. Pour montrer quelle bande de fréquences spatiales est manquante dans l'image MS sur-échantillonnée par rapport à l'image PAN, une étude spectrale est effectuée ci-dessous.

### **III-2-1-1 Nature des fréquences manquantes dans l'image MS**

Considérons à titre d'exemple les paires d'images PAN et MS délivrées par le satellite IKONOS. Ces deux images PAN et MS sont échantillonnées successivement avec une période d'échantillonnage de 1 mètre et de 4 mètres. Sûrement les structures, sur terre, à observer par ces deux images ont, d'une part, des détails plus fins c.à.d. à une échelle inférieure à l'échelle métrique et ces images nécessitent les deux un échantillonnage à une période (taille du pixel) encore inférieure pour observer ces structures mais se sont les deux images disponibles. Ainsi, d'autre part, ces structures sur terre ont sûrement des détails à échelles comprises entre les deux périodes d'échantillonnage de 1 mètre et de 4 mètres, ce qui favorise plus, coté détails spatiaux, l'image PAN avec laquelle on peut assurer d'observer les détails dont l'échelle est comprise entre 1m et 4m ce qui n'est pas le cas pour l'image MS.

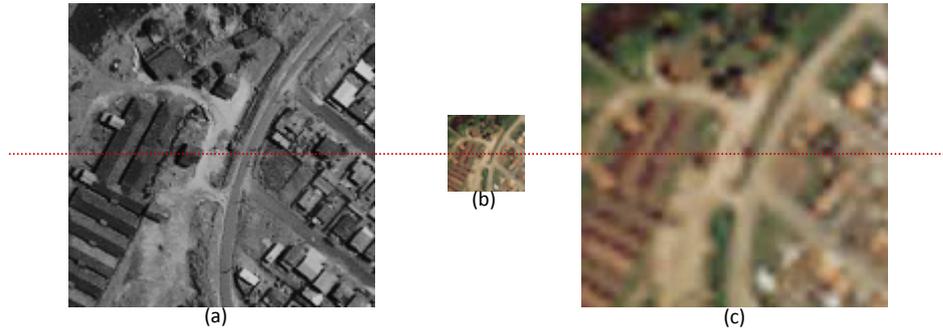
Relions ce raisonnement côté détails spatiaux au domaine fréquentiel : étant donné que la fréquence maximale d'un signal ou d'une image est proportionnelle à sa fréquence d'échantillonnage, à son tour cette dernière est inversement proportionnelle à sa période d'échantillonnage (résolution spatiale ou taille du pixel) ce qui implique que plus une image est échantillonnée à une période d'échantillonnage inférieure plus elle a une fréquence maximale plus élevée. L'image PAN échantillonnée à 1m a donc une fréquence maximale plus élevée que celle pour une modalité MS échantillonnée à 4m. Autrement dit la bande fréquentielle, dont sa limite inférieure est définie par la fréquence maximale de l'image MS échantillonnée à 4m et dont sa limite supérieure est définie par la fréquence maximale de l'image PAN échantillonnée à 1m, est totalement absente dans l'image MS et est entièrement présente dans l'image PAN.

Montrons pratiquement que les fréquences manquantes dans l'image MS par rapport à l'image PAN se sont les Hautes Fréquences spatiales de cette dernière, effectuons une analyse spectrale d'images.

### **III-2-1-2 Analyse spectrale**

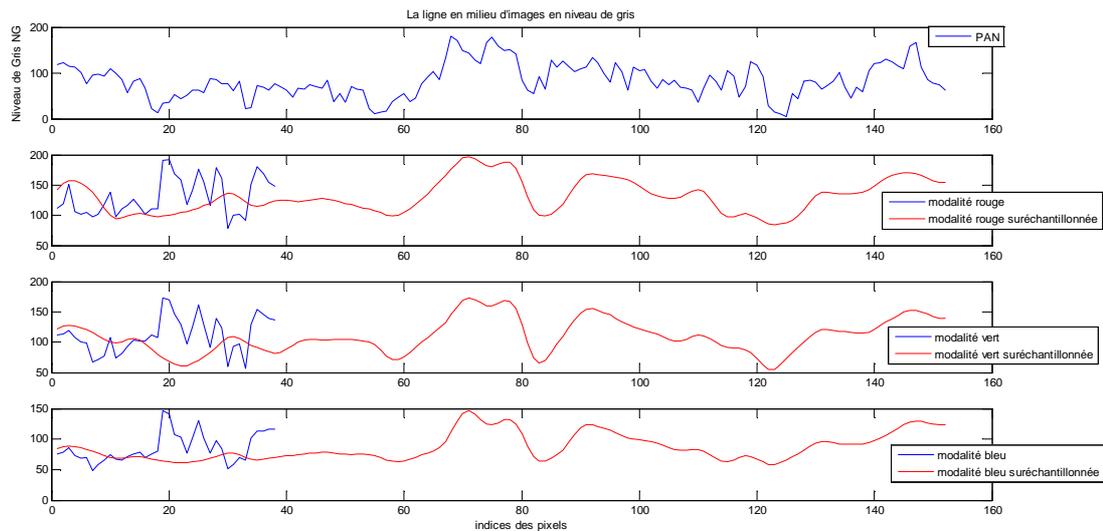
Considérons la paire d'image PAN-MS illustrée sur la figure-III-2. Pour une illustration claire et simple à analyser et avant d'entamer une analyse spectrale d'images, prenons, dans un premier

temps, une ligne en milieu, discrète en rouge (figure-III-2), pour chacune des images PAN, MS et MS sur-échantillonnée.



**Figure-III-2** Paire d'images PAN-MS : (a) image PAN, (b) image MS, (c) image MS sur-échantillonnée.

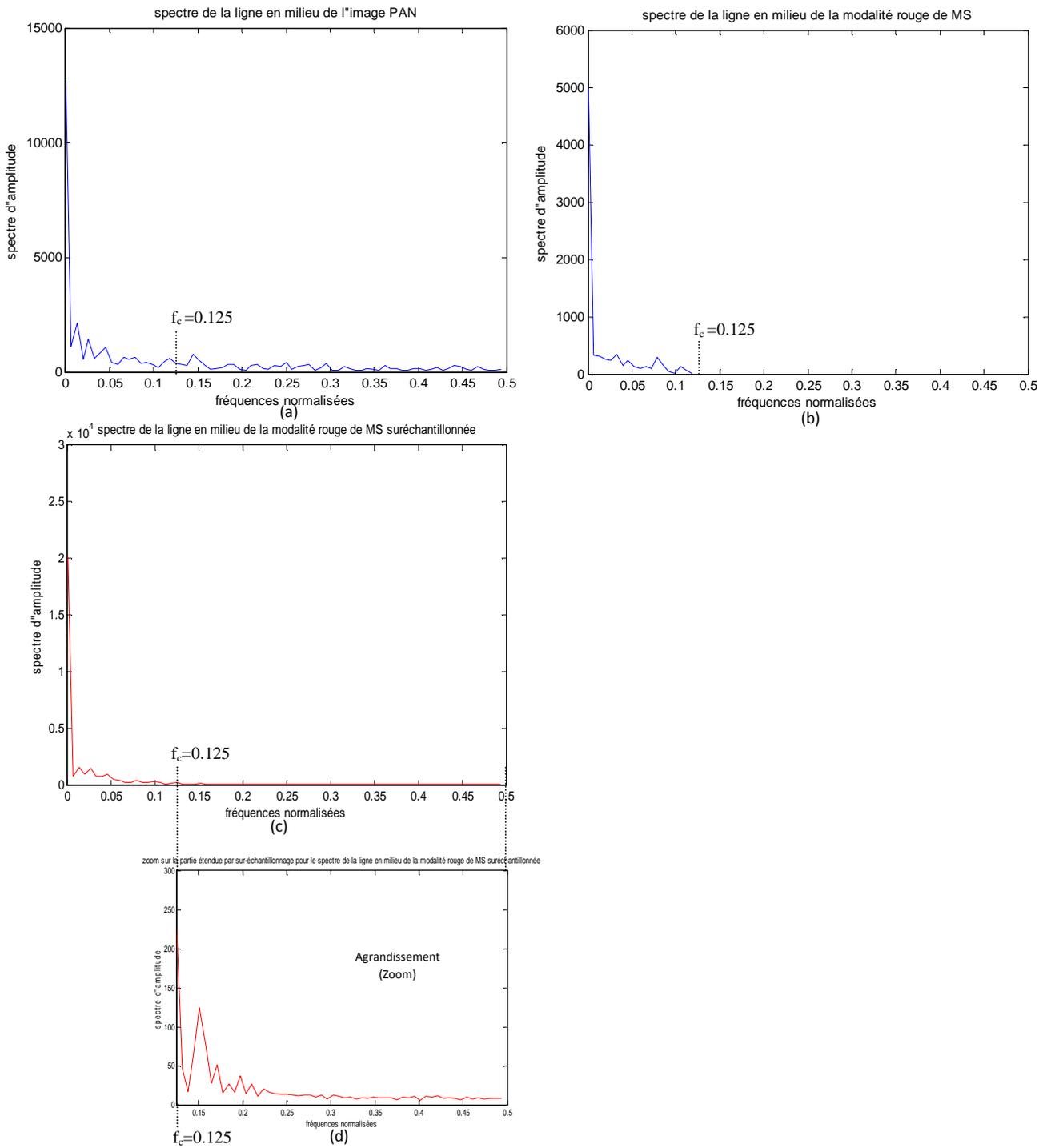
La figure-III-3 illustre une présentation en amplitude de cette ligne (en milieu des images dans la figure-III-2). Nous constatons que la ligne de l'image PAN possède plus de variations par rapport aux lignes correspondantes, dans les modalités de l'image MS.



**Figure-III-3** La ligne en milieu d'images en niveau de gris.

Le sur-échantillonnage a pour but de donner la même définition spatiale (le même nombre de pixels) que l'image PAN pour l'image MS afin de pouvoir les manipuler ensemble. La fonction d'interpolation (*bicubic Spline*) est utilisée pour estimer les valeurs de nouveaux pixels. Comme toute fonction d'interpolation, elle est mathématiquement conçue à ne pas introduire de nouvelles fréquences (interpolation lisse).

Pour une analyse spectrale, nous considérons cette ligne en milieu pour la PAN et pour une modalité, soit le rouge, pour chacune des images MS et Ms sur-échantillonnée (figure-III-4).



**Figure-III-4** Spectres d'amplitude de la ligne en milieu pour :(a) l'image PAN, (b) Modalité Rouge de l'image MS, (c) Modalité Rouge de l'image MS sur-échantillonnée, (d) Zoom (agrandissement) sur la partie étendue du spectre de la modalité rouge par le sur-échantillonnage.

La fréquence maximale (celle de l'image PAN) étant présentée en 0.5 cycles/m, la fréquence maximale pour la MS est présentée en  $f_c=0.125$  cycles/m.

Nous constatons bien de la figure-III-4-c,d que le sur-échantillonnage a étendu le spectre de la MS vers les HF  $= ] f_c, 0.5]$ . Cette extension a ajouté des HF spatiales à faibles amplitudes et de même nature que les HF de l'image PAN (figure-III-4-d,a). Ces HF à faibles amplitudes sont indésirables et risquent de causer des dégradations spectrales au niveau de l'image fusionnée lors de l'injection des HF extraites de la PAN, c'est pour cela qu'un filtrage passe bas à une fréquence de coupure  $f_c=0.125$  sur les modalités de l'image MS sur-échantillonnées est nécessaire pour éliminer ces HF ajoutées par le sur-échantillonnage qui avait pour rôle juste de donner la même définition spatiale que la PAN à la MS pour pouvoir les manipuler ensemble.

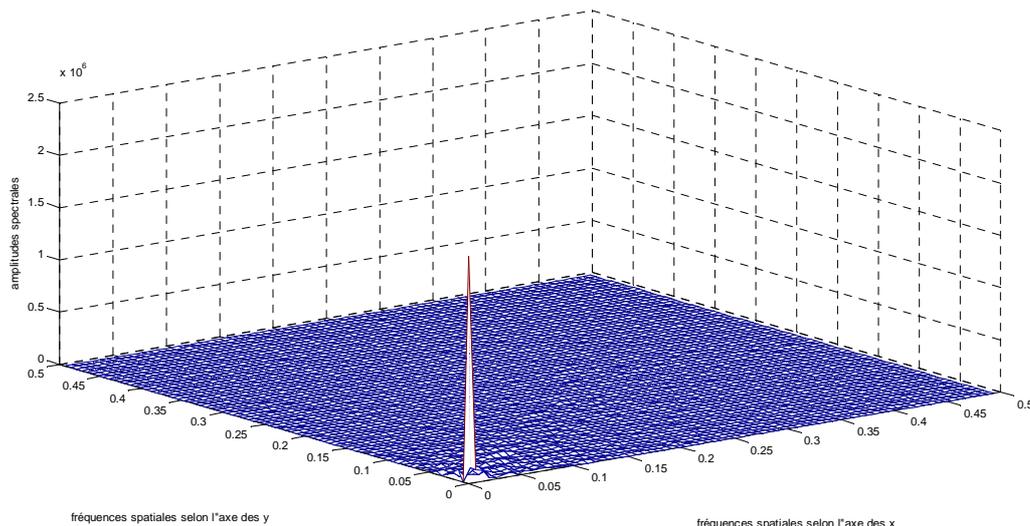
Cette analyse a montré que la nature des informations ou structures manquantes dans la MS sont des HF spatiales. Pour confirmer cette démonstration effectuée sur une ligne de la paire d'images PAN-MS, effectuons une analyse spectrale d'images.

### III-2-1-3 Analyse spectrale des images

Reconsidérons pour cette analyse, la paire d'image PAN-MS illustrée sur la figure-III-2.

#### III-2-1-3-1 Choix de type de présentation pour l'analyse spectrale

D'abord avant d'entamer l'analyse spectrale des images, choisissons la représentation adéquate (linéaire ou logarithmique). La figure-III-5 illustre une présentation linéaire du spectre d'amplitude de l'image PAN.

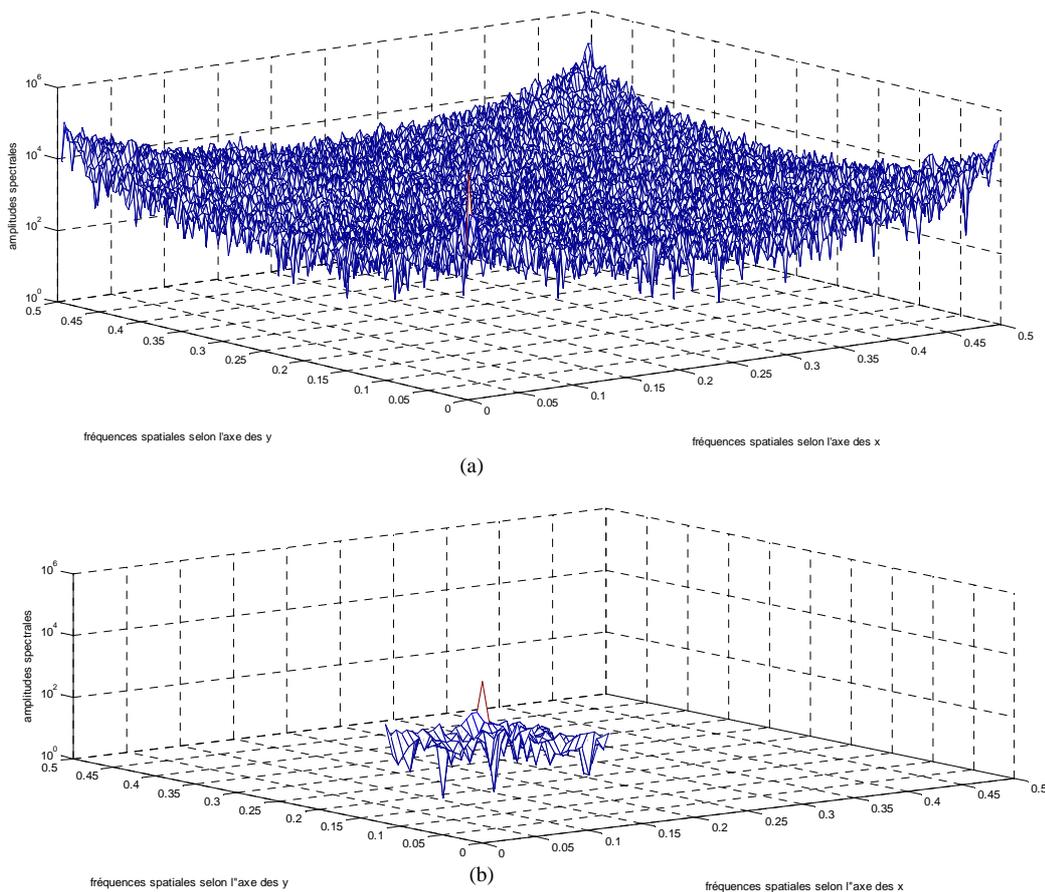


**Figure-III-5** Spectre d'amplitude de l'image PAN de la figure-III-2.

Nous constatons, de la figure-III-5, que les plus basses fréquences spatiales (la composante continue dans l'image et les premières basses fréquences ou harmoniques) présentent une amplitude importante par rapport aux HF qui dans de telle représentation linéaire sont difficilement décelables. Généralement, dans de telle représentation où les amplitudes sont d'une échelle incomparable les unes par rapport aux autres (l'une est négligeable par rapport à l'autre), et au lieu de faire un Zoom (agrandissement) local, on opte pour une représentation logarithmique pour l'axe des Z. Nous optons alors dans la suite de cette analyse spectrale pour une représentation logarithmique.

### III-2-1-3-2 Analyse spectrale d'une paire d'image PAN-MS

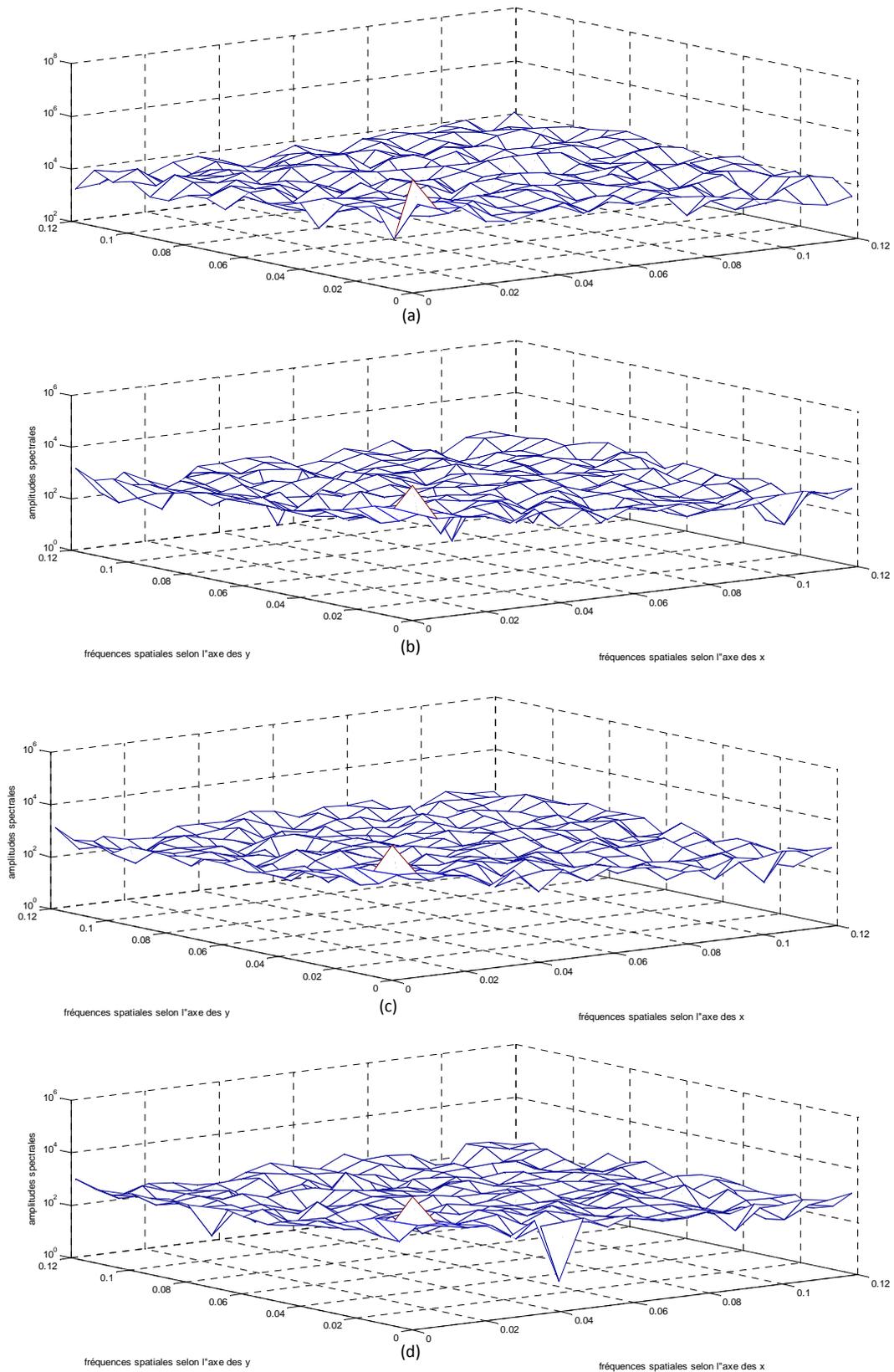
Pour montrer l'absence totale des HF spatiales de l'image PAN dans les modalités de l'image MS, la figure-III-6 montre le spectre de l'image PAN et celui de la modalité Rouge R de l'image MS.



**Figure-III-6** Fréquences spatiales manquantes dans MS : (a) Spectre d'amplitude de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS.

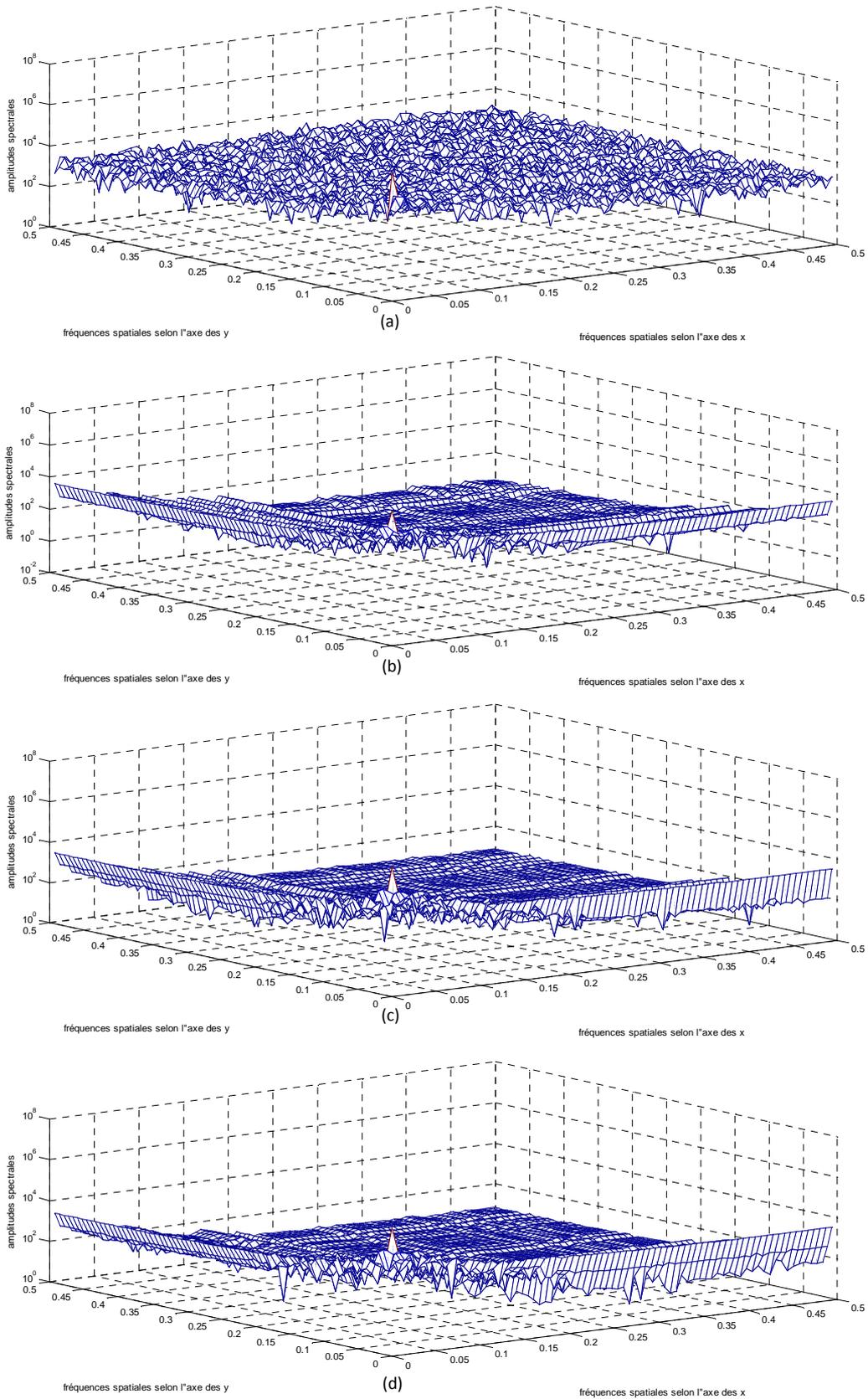
Rappelons que l'image PAN étant échantillonnée à 1m, a une fréquence spatiale maximale de 0.5 cycle/mètre et que la MS échantillonnée à 4m, a une fréquence maximale  $f_c = 0.125$  cycle/mètre. Nous constatons de la figure-III-6-b que les fréquences comprises entre les deux fréquences maximales pour successivement l'image MS et l'image PAN sont totalement manquantes dans la modalité Rouge de l'image MS et c'est de même que cette bande de fréquences spatiales est absente pour les autres modalités de l'image MS.

Pour pouvoir comparer les deux images PAN et MS, nous considérons uniquement la bande des fréquences spatiales pour laquelle l'image MS est définie (bande de fréquences spatiales commune entre la PAN et la MS). La figure-III-7 montre, pour la bande des fréquences spatiales communes entre les deux images PAN et MS, une comparaison entre le spectre de l'image PAN et ceux des modalités de l'image MS. De la figure-III-7, nous pouvons constater que la MS (figure-III-7-b,c,d) ne manque plus de basses fréquences spatiales car, dans cette bande, toutes les fréquences spatiales présentes dans le spectre de la PAN (figure-III-7-a) sont présentes dans les différents spectres pour les modalités de l'image MS (à différentes amplitudes bien évidemment). Cette présente comparaison, après que la précédente (figure-III-6) a montré le manque des HF, affirme que l'image MS manque seulement les hautes fréquences spatiales.



**Figure-7** Comparaison entre la PAN et la MS pour la bande de fréquences spatiales commune (basses fréquences) : (a) Spectre d'amplitude de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS, (c) spectre d'amplitude de la modalité Vert de l'image MS, (d) spectre d'amplitude de la modalité bleu de l'image MS.

Après avoir confirmé que l'image MS ne manque d'information que pour les HF comparativement à l'image PAN (figures-III-6 et 7), une approche nécessaire pour l'apport des informations manquantes à la MS est la fusion d'image PAN-MS basée sur le filtrage. Un ensemble de méthodes extraient ces informations manquantes par filtrage et les injecte ensuite dans les modalités de l'image MS. Le filtrage est utilisé d'une part pour extraire l'information manquante et d'autre part pour traiter les modalités de l'image MS sur-échantillonnées avant l'injection. Le sur-échantillonnage est incontournable pour donner à l'image MS la même définition spatiale que l'image PAN afin de pouvoir les traiter ensemble et c'est le seul rôle désiré de cette opération. Ainsi, toute autre information (fréquence spatiale) ajoutée par cette opération (sur-échantillonnage) est considérée indésirable pour la fusion. Ce sur-échantillonnage affecte sûrement les modalités de l'image MS, c'est pour cela que nous étudions son effet coté spectral. Considérons, pour analyser cet effet, le spectre de l'image PAN et ceux des modalités de l'image MS sur-échantillonnées présentés dans la figure-III-8.



**Figure-III-8** Comparaison entre la PAN et la MS sur-échantillonnée : (a) Spectre d'amplitude de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS sur-échantillonnée, (c) spectre d'amplitude de la modalité Vert de l'image MS sur-échantillonnée, (d) spectre d'amplitude de la modalité bleu de l'image MS sur-échantillonnée.

Nous constatons ( figure-III-8-b,c,d) que le sur-échantillonnage a étendu le spectre de l'image MS vers les HF  $= ] 0.125, 0.5]$  en se référant au spectre de la MS non sur-échantillonnée (figure-III-6). Cependant, ces modalités sur-échantillonnées manquent toujours les HF spatiales de la PAN. Cette extension a ajouté des HF spatiales à faibles amplitudes et de même nature que les HF de la PAN. Ces HF à faibles amplitudes, ajoutées par sur-échantillonnage, sont indésirables et risquent des dégradations spectrales au niveau de l'image fusionnée lors de l'injection des HF extraites de la PAN. C'est pour cela qu'un filtrage passe bas est nécessaire à une fréquence de coupure  $f_c=0.125$  sur les modalités MS sur-échantillonnées pour éliminer ces HF ajoutées par sur-échantillonnage.

### III-2-2 Filtrage

Pour extraire les HF spatiales de l'image PAN, un filtre Passe-Haut HP est appliqué sur cette dernière. L'image MS nécessite un sur-échantillonnage afin d'avoir la même définition spatiale de la PAN et de pouvoir les manipuler ensembles. Ce sur-échantillonnage estime, par interpolation, des HF de même nature que les HF de la PAN à énergies différentes ce qui risque des dégradations spectrales lors de l'injection. Pour éviter ce genre de dégradations, une élimination de ces fréquences estimées est nécessaire utilisant un filtrage Passe-Bas BP complémentaire à celui appliqué sur l'image PAN (ayant la même fréquence de coupure pour éviter tout recouvrement).

Nous avons utilisé le filtrage dans le domaine fréquentiel. Nous avons opté pour le filtre de Hanning 32x32. Dans une première étape, une Transformation de Fourier à Court Terme TFCT de fenêtre de 32x32 pixels est appliquée sur l'image à filtrer, ensuite chaque bloc de taille 32x32 pixels du spectre d'amplitude est filtré par un produit avec la réponse fréquentielle du filtre de Hanning. Le processus de filtrage est schématisé dans la figure-III-9 :

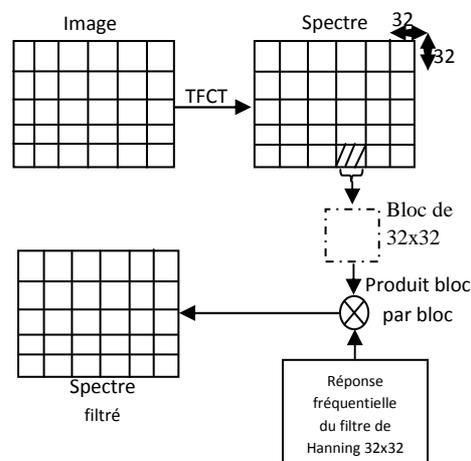
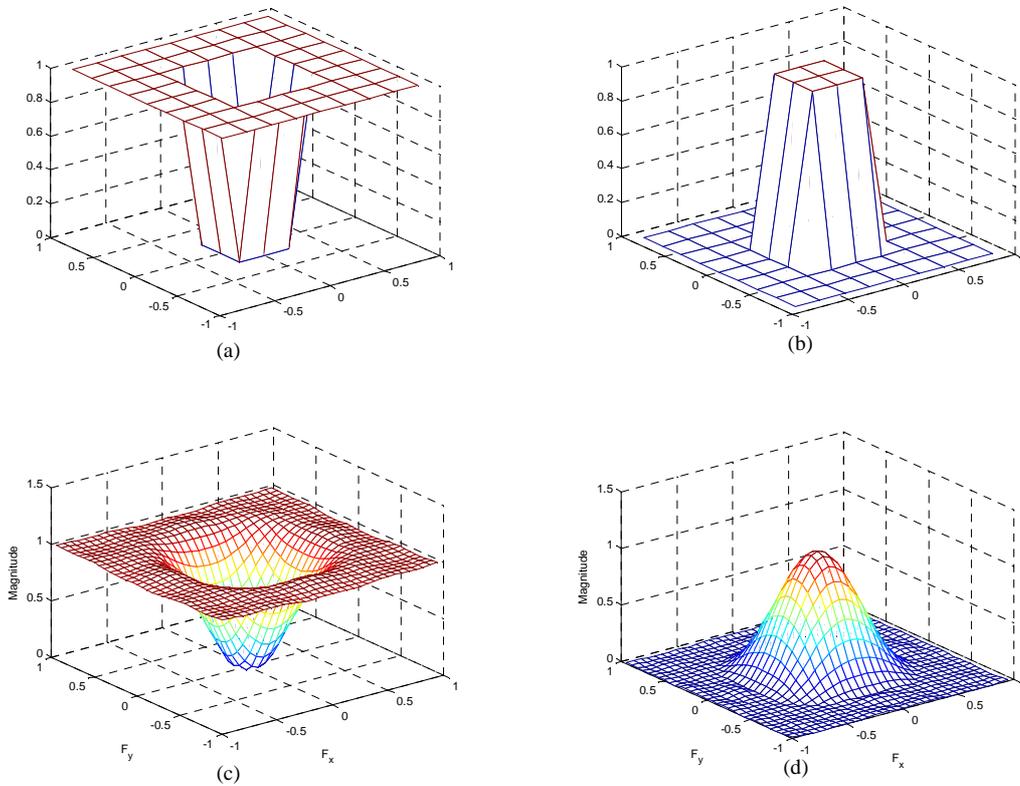


Figure-III-9 Schéma synoptique du filtrage dans le domaine fréquentiel.

Les réponses fréquentielles des deux filtres complémentaires, de Hanning, Passe-Haut HP et Passe-Bas BP utilisés pour filtrer successivement la PAN et les modalités MS sur-échantillonnées sont présentées sur la figure-III-10 :



**Figure-III-10** Réponses fréquentielles des filtres: (a) Passe-Haut idéal, (b) Passe-Bas idéal, (c) Passe-Haut de Hanning, (d) Passe-Bas de Hanning.

Rappelons qu'en fréquences normalisées (figure-III-10), toutes les fréquences sont divisées par la fréquence maximale (celle de l'image PAN de 1m de résolution spatiale et 0.5 cycles/m, selon Nyquist). La fréquence de coupure, déjà calculée,  $f_c$  de 0.125 cycles/m correspondant à la fréquence maximale de Nyquist pour l'image MS (de résolution spatiale de 4m) est donc présentée par 0.25 ( $0.125/0.5$ ) et la fréquence maximale de l'image PAN (de résolution spatiale de 1m) de 0.5 cycles/m est présentée par 1 ( $0.5/0.5$ ).

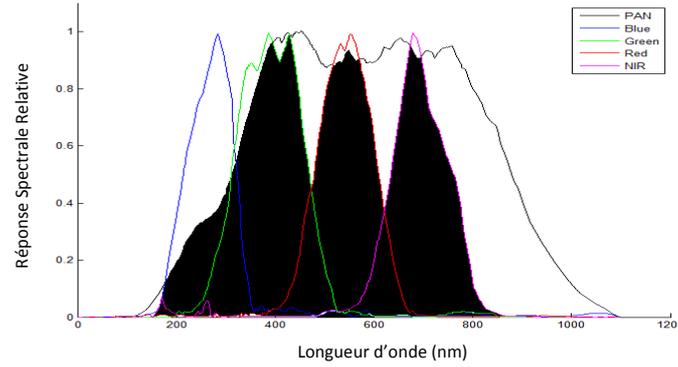
Après avoir extrait les HF spatiales de l'image PAN et filtré les modalités de l'image MS pour éviter tout recouvrement, une adaptation énergétique de ces HF spatiales aux modalités MS est indispensable avant de procéder à l'injection. Pour cela, nous utilisons le modèle d'injection décrit ci-dessous.

### III-2-3 Senseur et modèle d'injection

Pour contourner au problème dû à l'injection de la même portion énergétique des HF spatiales extraites de l'image PAN dans toutes les modalités de l'image MS, nous proposons un modèle d'injection utilisant les réponses des senseurs permettant de calculer les portions énergétiques à injecter dans chaque modalité de l'image MS.

L'énergie d'une modalité MS ou d'une image PAN dépend et de la largeur de la réponse spectrale du senseur [la surface, définie par la réponse du senseur, qui présente le nombre possible de fréquences (ou de longueurs d'onde) associées aux photons incidents inclus dans cette bande, figure-III-11] et des caractéristiques de l'objet observé. Dans le but de préserver les signatures spectrales de l'image MS, lors de l'injection dans ses modalités les hautes fréquences spatiales qui sont des fréquences communes entre l'image PAN et l'image MS fusionnée, nous préservons les fonctions (quotients d'énergies) reliant les fréquences communes des bandes spectrales entre le senseur MS de basse résolution spatiale et le senseur PAN, pour qu'elles soient les mêmes fonctions reliant les fréquences communes des bandes spectrales entre le senseur MS idéal (ayant la résolutions spatiale de la PAN) s'il existe, et le senseur PAN. Nous utilisons ces fonctions, dans une première étape, pour définir les portions énergétiques des HF spatiales à injecter dans chaque modalité de l'image MS. Les portions d'énergie nécessaires pour les modalités de l'image MS sont donc définies en appliquant ces fonctions sur les énergies des HF spatiales extraites de l'image PAN. Dans une deuxième étape, ces fonctions définissant les énergies à injecter doivent aussi dépendre des radiances de l'objet observé et de ses signatures spectrales (information image).

Ce modèle d'injection revient à rechercher dans une première étape, des coefficients permettant de définir des pondérations pour les portions énergétiques des HF à injecter dans chaque modalité MS. A partir de la représentation graphique des SRF *Spectral Response Functions* (Figure-III-11) ; Une SRF d'un senseur, représentée par sa réponse spectrale, définit la probabilité (on parle de la probabilité car la réponse correspondant à la quantité des photons incidents, associés aux longueurs d'ondes incluses dans la bande de la réponse du senseur peut être plus rétrécie que celle du senseur qui représente la quantité maximale possible de photons incidents associés aux fréquences incluses dans la bande spectrale du senseur) qu'un photon d'une fréquence, ou d'une longueur d'onde, donnée soit détecté par ce senseur. L'événement de détection d'un photon par un senseur (senseur panchromatique ou un senseur pour une bande de couleur) est exprimé donc par sa probabilité qui est définie comme étant la surface définie entre la SRF concernée et l'axe des abscisses.



**Figure-III-11** Réponses spectrales des bandes des senseurs du satellite Ikonos.

Soit le rapport,  $k_1$ , entre  $NPHCLDTC$  (la somme des surfaces communes remplies en noir dans la figure-III-11), le Nombre de PHotons CouLeurs possibles DéteCTés par le capteur PAN et  $NPHCL$  (la somme des surfaces de bandes couleurs dans la figure-III-11), le Nombre de PHotons possibles détectés par les senseurs CouLeurs:

$$k_1 = \frac{NPHCLDTC}{NPHCL} \quad (\text{III-1})$$

Ce rapport permet de savoir qu'elle est la pondération totale sur les HF à distribuer, suivant d'autres paramètres, aux modalités MS.

Pour en pouvoir distribuer énergétiquement cette portion pondérée  $k_1[HF]$  (où [HF] est le spectre d'amplitude de l'image PAN filtré par le filtre passe-haut), deux autres rapports sont introduits :

Un rapport  $k_{2,i}$ , où  $i \in [1 : n]$  et  $n$  étant le nombre de bandes MS, défini entre  $NPHiDTC$  (la  $i^{\text{ème}}$  surface commune remplie en noir dans la figure-III-11), le Nombre de PHotons de la  $i^{\text{ème}}$  bande MS possibles DéteCTés par le capteur PAN et la moyenne des  $NPHiDTC$ .

$$k_{2,i} = \frac{NPHiDTC}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} NPHiDTC} \quad (\text{III-2})$$

Ce rapport permet de trier les modalités MS pour savoir qu'elle modalité MS nécessite une portion énergétique importante des HF et qu'elle autre nécessite le moins.

Un troisième rapport,  $k_{3,i}$ , où  $i \in [1 : n]$  et  $n$  étant le nombre de bandes MS, défini entre  $NPHiDTC$ , le Nombre de PHotons de la  $i^{\text{ème}}$  bande MS possibles DéteCTés par le capteur PAN et  $NPHi$  (la  $i^{\text{ème}}$  surface de la  $i^{\text{ème}}$  bande couleur du capteur), le Nombre de PHotons possibles détectés par le capteur de la  $i^{\text{ème}}$  bande couleur de MS.

$$k_{3,i} = \frac{NPHiDTC}{NPHi} \quad (III-3)$$

Ce troisième rapport, après avoir défini la pondération totale et mis en ordre les modalités de l'image MS selon les énergies requises par  $k_1$  et  $k_{2,i}$  respectivement, est utilisé pour définir les pondérations pour chaque modalité de l'image MS permettant de distribuer les portions énergétiques requises par chacune.

Notons que dans le calcul du rapport  $k_1$ , on prend en considération les intersections des bandes spectrales des senseurs pour que celles-ci (les intersections des SRFs) ne soient pas prises doublement dans le calcul des surfaces.

A partir des trois paramètres ;  $k_1, k_{2,i}, k_{3,i}$ , calculés pour en définir les portions énergétiques des HF (détails spatiaux) à injecter, il devient:

$$MS_{fi} = MS_i + (k_1 \cdot k_{2,i} \cdot k_{3,i}) \cdot [HF] \quad (III-4)$$

Où  $MS_i$  est le spectre de la  $i^{eme}$  modalité de l'image MS et  $MS_{fi}$  est le spectre de la  $i^{eme}$  modalité de l'image résultante après le processus de la fusion.

Mais, de cette façon, les paramètres ;  $k_1, k_{2,i}, k_{3,i}$ , deviennent constants pour chaque satellite et ne dépendent plus de l'image fournie (ou des caractéristiques physiques de l'objet) représentant ainsi un seul cas où le spectre des fréquences aux quelles sont associés les photons incidents, se superpose avec celui du senseur correspondant. Cependant, les propriétés physiques des objets définissent leurs radiances et signatures spectrales [36]. Pour une image, par exemple, contenant des espaces végétaux et des forêts, on devrait enregistrer principalement des photons PIR et verts. On doit donc injecter, énergétiquement, plus de HF, extraites de l'image PAN, aux bandes verte et PIR qu'aux autres bandes couleurs ce qui signifie que les pondérations  $k_1, k_{2,i}, k_{3,i}$  doivent être relatifs et aux senseurs et à l'image.

Contrairement à la méthode WiSpeR qui pour bénéficier des deux types d'informations ; senseur et caractéristiques physiques de l'objet, procède à un remplacement de seulement le dénominateur d'une quantité physique par une autre de type différent (chapitre-I, éq-I-15), de cette façon le rapport n'est plus devenu, physiquement, un rapport (nombre de photons ou surface/énergies ou amplitudes), dans notre modèle d'injection, nous procédons à préserver les deux définitions des deux paramètres  $k_1$  et  $k_{3,i}$  (équations (III-1) et (III-3)). Observons que le paramètre  $k_{2,i}$ , qui définit quelle modalité de l'image couleur aura la portion la plus importante énergétiquement et quelle autre aura la portion la moins importante énergétiquement, est intuitivement défini dans le

paramètre  $k_{3,i}$  qui permet de définir les portions énergétiques à injecter dans chacune des bandes de l'image MS. Nous pouvons donc introduire l'information image dans ce paramètre  $k_{2,i}$ . Ce paramètre est redéfini convenablement avec sa définition. Rappelons que ce paramètre est défini par le rapport entre la  $i^{\text{ème}}$  surface commune entre la  $i^{\text{ème}}$  bande MS et la bande PAN et la moyenne de ces surfaces communes. Nous procédons, pour redéfinir ce paramètre  $k_{2,i}$ , d'une part, de remplacer son numérateur  $NPHiDTC$ , défini par le  $i^{\text{ème}}$  spectre commun, par la  $i^{\text{ème}}$  modalité correspondante(image), soit  $MS_{bi}$ , de MS sur-échantillonnée filtrée par le filtre passe bas à la fréquence de coupure pré-calculée (nous effectuons ce filtrage parceque cette surface, à substituer, correspond au spectre de l'image MS initiale et non plus au spectre, qui a été élargi par sur-échantillonnage, de l'image MS sur-échantillonnée) et, d'autre part, de remplacer son dénominateur qui est la moyenne de ces surfaces par l'image, soit  $PAN_b$ , résultante du filtrage passe bas de l'image PAN à la fréquence de coupure pré-calculée (cette dernière substitution est justifiée par le fait que la composante Intensité, définie par l'image moyenne des modalités R,G et B sur-échantillonnées et filtrées par un filtrage passe-bas, résultante de l'application de la Transformée IHS sur l'image MS est équivalente à l'image résultante au filtrage passe bas sur l'image PAN dans[3] ). Pour chaque  $i^{\text{ème}}$  modalité,  $k_{2,i}$  est alors redéfini comme étant une image remplie par des pixels de pondération, obtenue en divisant chaque valeur de pixel dans la  $i^{\text{ème}}$   $MS_{bi}$  par la valeur du pixel correspondant dans l'image  $PAN_b$  [83]:

$$k'_{2,i} = \frac{MS_{bi}}{PAN_b} \quad (\text{III-5})$$

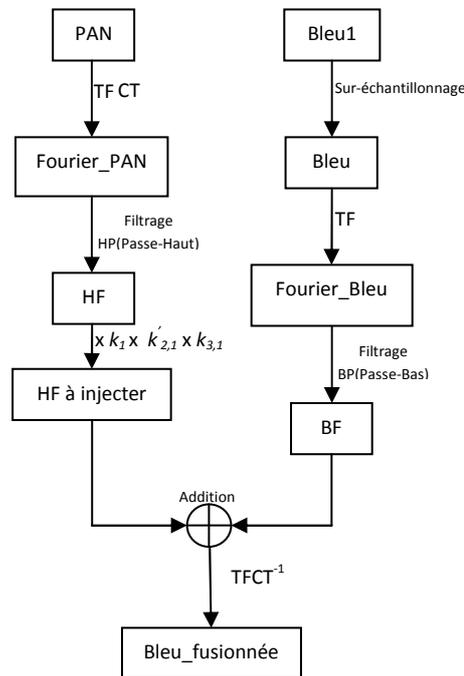
#### III-2-4 Algorithme FUFSER

La méthode proposée, basée sur le filtrage et le modèle d'injection décrits successivement dans les paragraphes III-2-2 et III-2-3, utilise l'algorithme que nous décrivons ci-dessous [83]:

- 1- Effectuer une TFCT sur l'image PAN et sur chacune des modalités de l'image MS sur-échantillonnée,
- 2- Appliquer un filtrage Passe-Haut sur la TF de l'image PAN (avec la fréquence de coupure pré-calculée –équation-I-10). Appliquer son filtrage complémentaire Passe-Bas sur la TF des différentes modalités de l'image MS pour ne garder que les fréquences spatiales initiales de l'image MS évitant d'éventuelles dégradations spectrales ou artéfacts lors de l'injection des HF.
- 3- Appliquer les pondérations (éq-III-1,3,5) sur les HF obtenues dans l'étape-2, comme indiqué à l'équation (III-4),

- 4- Ajouter chacune des portions énergétiques des HF pondérées obtenues dans l'étape-3 à la bande MS correspondante obtenue dans l'étape-2,
- 5- Effectuer la TFCT inverse sur les différentes bandes obtenues dans l'étape-4 pour aboutir aux modalités fusionnées.

Cet algorithme est schématisé sur l'organigramme de la figure-III-12 pour une seule modalité soit le Bleu (première modalité,  $i=1$  pour  $k_{2,i}$  et  $k_{3,i}$ ). Le raisonnement est le même pour les autres modalités :



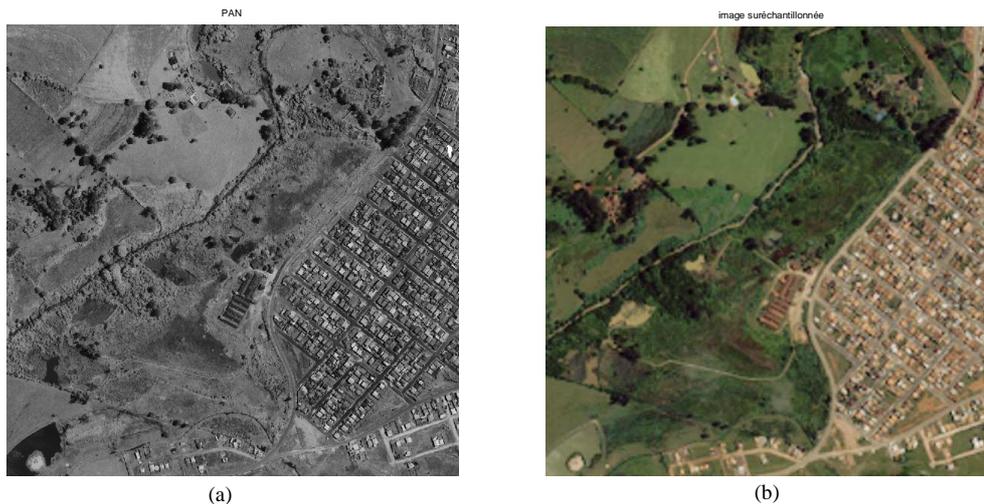
**Figure-III-12** Schéma synoptique de l'algorithme FUFSER.

L'approche que nous proposons permet au premier lieu de remédier à l'extraction non précise des détails spatiaux et permet d'extraire les vraies hautes fréquences spatiales ou détails spatiaux (à une fréquence près). Ensuite d'effectuer un filtrage (traitement) aux modalités MS sur-échantillonnées avant l'injection évitant toute éventuelle distorsion des signatures spectrales ou artefacts. Et enfin, permet une introduction plus juste de l'information image (caractéristiques physiques de l'objet) dans le modèle d'injection.

Une étude expérimentale et des comparaisons de la méthode que nous proposons avec celle basée sur la TF [35] et la WiSpeR [36], sont effectuées dans le paragraphe suivant montrant l'apport et le bien fondé de notre approche.

### III-3 Etude expérimentale

Afin de montrer l'intérêt des méthodes de fusion atteignant la résolution spatiale de l'image PAN tout en préservant les signatures spectrales de l'image MS, nous avons opté pour cette étude à des paires d'images de très haute résolution spatiale pour les deux satellites Ikonos et QuickBird dont leurs résolutions spatiales sont indiquées au tableau-I-1. La figure-III-13 montre une de ces paires d'images (la scène est de Guaxupé city, São Paulo state, Brazil) [82].



**Figure-III-13** Image Ikonos : (a) Modalité Panchromatique, (b) Composition RGB des modalités MS.

Pour évaluer la qualité d'une méthode de fusion, on devrait comparer l'image résultante de la fusion avec l'image idéale ayant la résolution spatiale de l'image PAN et la résolution spectrale de l'image MS. Tant que cette image idéale n'existe pas, les auteurs, pour la méthode WiSpeR [36], ont préféré de travailler sur des images dégradées spatialement (sous échantillonnées). Donc, avant le processus de fusion, les images QuickBird2 ; PAN et MS utilisées par les auteurs [36] et qui avaient successivement des résolutions spatiales de 0.7m et de 2.8m, ont été dégradées à 2.8m et à 11.2m successivement. De cette façon, l'image à 2.8m, fusionnée entre la paire d'images dégradées, peut être comparée avec l'image idéale (image MS d'origine, non dégradée spatialement, de 2.8m). Cependant, en sous échantillonnant les images PAN et MS, celles-ci ne deviennent plus correspondantes aux réponses des senseurs bien que celles-ci ont été introduites pour définir les portions énergétiques à injecter dans l'image MS. De ce fait, nous n'admettons pas à ce sous échantillonnage pour l'évaluation de notre approche.

La comparaison est tout d'abord visuelle, c'est ce qu'on appelle évaluation qualitative et ensuite quantitative basée sur la comparaison des caractéristiques spectrales et spatiales des images PAN, MS et MS après fusion :

A- *Evaluation de la qualité spectrale :*

En plus du critère de mesure MSSIM utilisé dans le chapitre précédent, on utilise, pour cette évaluation d'autres indicateurs quantitatifs décrits ci-dessous.

- **Coefficients de Corrélation CC :** calculé entre chaque modalité de l'image fusionnée et sa modalité correspondante dans l'image MS. On souhaite que ces coefficients soient les plus proches possibles de 1.

B- *Evaluation de la qualité spatiale :*

Une fusion spatialement efficace doit ramener les détails spatiaux de la MS à ceux que devrait observer un capteur Multi Spectral ayant la résolution spatiale de la PAN.

Pour mesurer la distorsion spatiale due à la fusion, les images résultantes par notre approche, par celle basée sur la TF [35] et par la méthode WiSpeR [36] sont comparées avec l'image PAN.

D'abord, l'information de détails spatiaux présente dans chacune des 02 images à comparer est extraite utilisant un filtre Laplacien (filtre dérivateur permettant l'extraction des contours et de détails spatiaux).

Ensuite, sont calculés les Coefficients de Corrélation Spatiale (SCC) entre les deux détails spatiaux extraits des deux images à comparer par le filtre Laplacien. Plus le SCC est important indique plus les 02 images comparées comportent des détails spatiaux corrélés.

Le filtre de Laplacien suivant est utilisé [36]:

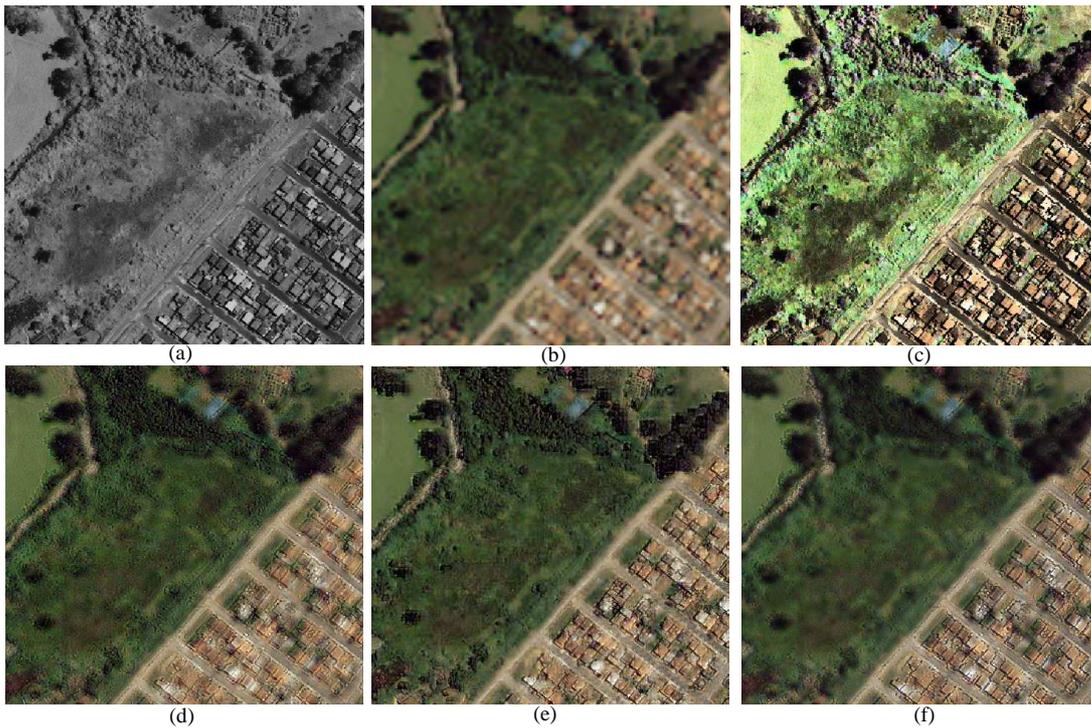
$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

**Evaluation qualitative et quantitative :**

La figure-III-14 présente une portion spatiale représentative du résultat de fusion de la paire d'images Ikonos de la figure-III-13 en comparant les résultats obtenus par la méthode de fusion utilisant la TF[35], par la méthode que nous proposons, par la méthode WiSpeR [36] et par la Transformée en IHS.

Il est visible, à partir de la figure-III-14, que la méthode que nous proposons présente de satisfaisantes résolutions spatiale et spectrale avec aucune distorsion spectrale ou spatiale visuellement décelables tandis que pour les autres méthodes, chacune présente visuellement de satisfaisante résolution spatiale en se référant à l'image PAN mais présente chacune des distorsions spectrales (dégradations de couleurs par rapport à l'image MS initiale) comme il est visible pour la

IHS et moins visible pour celle utilisant la TF [35] et pour la méthode WiSpeR [36] qui présentent un léger flou sur l'image. Cette dégradation spectrale est due, pour la méthode utilisant la TF [35], à l'injection de la même portion énergétique dans chacune des modalités couleur et qui affecte légèrement les contours au niveau de l'image fusionnée. Tandis que cette dégradation est due, pour la méthode WiSpeR [36], aux biais de la DWT et au modèle d'injection utilisé par la méthode, comme il a été expliqué au chapitre précédent.



**Figure-III-14** Portion spatiale représentative des résultats de fusion : (a) image PANchromatique, (b) composition RGB de l'image MS d'origine, (c) fusion par IHS, (d) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (e) fusion par WiSpeR [36], (f) fusion par la méthode proposée FUFSE.

Ce flou (ou lissage qui peut être décrit comme un filtrage passe bas) affecte et la couleur et surtout les contours de l'image fusionnée pour la méthode basée sur la TF [35] et la WiSpeR [36] en se référant successivement à l'image MS et à l'image PAN de la figure-III-14.

L'intérêt de la netteté de contours d'images a été démontré pour fin de classification et de reconstruction [30].

La figure-III-15 traite un autre exemple d'une paire d'images Ikonos à de riches contrastes (variété urbanisme, végétal, etc.) et de larges dynamiques (images codées sur 11bits) en comparant entre la méthode proposée FUFSE, celle basée sur la TF [35] et la méthode WiSpeR [36].



**Figure-III-15** Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.

Nous pouvons remarquer sur la figure-III-15 que la méthode proposée FUFSER présente plus de détails par rapport à la méthode basée sur la TF [35]. Des endroits indiqués par des flèches rouges dans figure-III-15-c montrent le manque de contours et de détails par rapport à l'image obtenue par la FUFSER dans la figure-III-15-e. Ce manque de détails est dû à l'injection identique énergétiquement des HF spatiales dans les différentes modalités MS ce qui induit un flou sur l'image. Le flou résulte en générale suite à un filtrage affectant une partie des HF (filtrage passe bas). La méthode WiSpeR (figure-III-15-d) présente une satisfaisante restitution des structures spatiales et préserve la résolution spectrale de l'image MS mais présente un flou global, affectant surtout les contours du produit de la fusion.

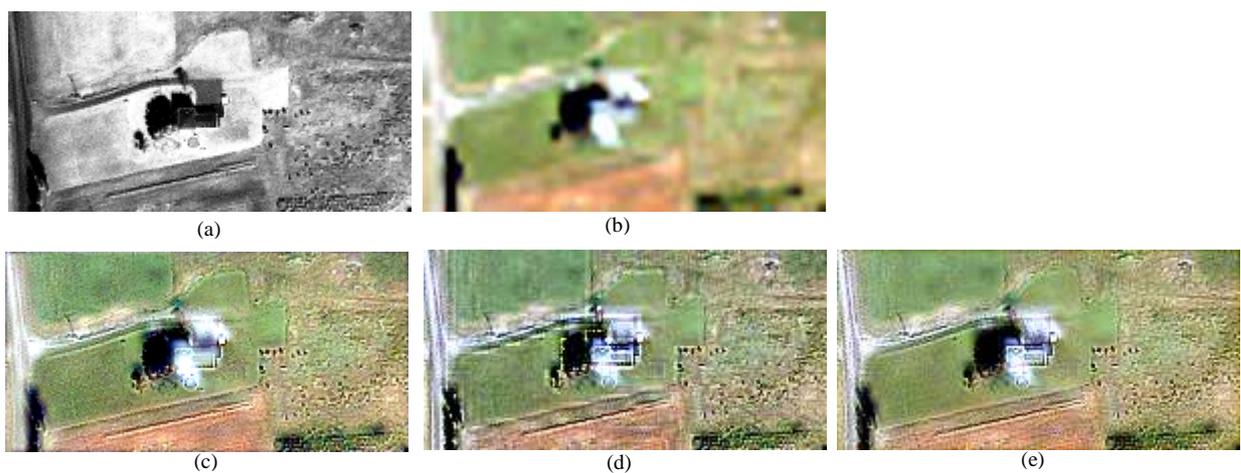
De même que pour la figure-III-15, les figures-III-16-19 traitent d'autres paires PAN-MS des satellites Ikonos et Quickbird montrant l'efficacité de la méthode FUFSER proposée atteignant la résolution spatiale de l'image PAN et préservant la qualité spectrale de l'image MS comparativement aux deux méthodes de type ARSIS [35], [36].



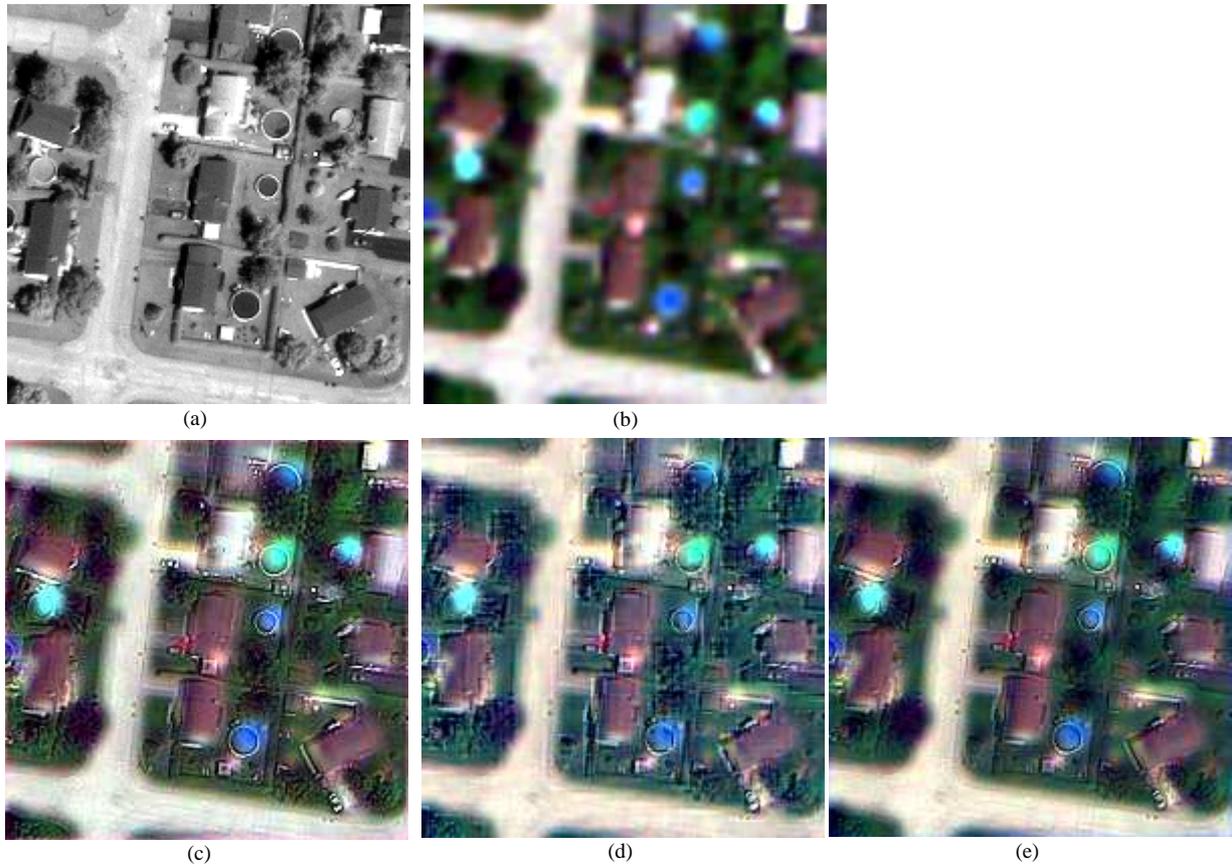
**Figure-III-16** Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS suréchantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.



**Figure-III-17** Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS suréchantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSE.



**Figure-III-18** Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSE.



**Figure-III-19** Fusion d'une paire d'image Quickbird de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSE.

Les figures-III-16-19, de même que les figures-III-14-15, montrent que la méthode proposée FUFSE présente une restitution satisfaisante de la résolution spatiale de la PAN tout en préservant la qualité spectrale de l'image MS. Tandis que la méthode utilisant la TF [35] présente un léger flou affectant notamment les contours de l'image fusionnée. Cependant la méthode WiSpeR [36] présente un flou globale sur l'image fusionnée.

Pour une confirmation de l'évaluation qualitative (visuelle) par une évaluation quantitative, une étude statistique comparant la méthode que nous proposons avec la méthode utilisant la TF [35] et la méthode WiSpeR [36] est résumée au tableau-III-1.

Pour une évaluation quantitative de la qualité spectrale de fusion de la paire d'images de la figure-III-13, le tableau-III-1 présente une comparaison entre modalités couleurs avant et après fusion par différentes méthodes :

Méthode		B	G	R	PIR
Méthode-1 TF [35]	Corrélation	0.74	0.78	0.84	0.86
	MSSIM	0.33	0.38	0.37	0.50
Méthode-2 WiSpeR [36]	Corrélation	0.9547	0.8468	0.8839	0.8903
	MSSIM	0.9736	0.9164	0.9126	0.9078
Méthode-3 proposée FUFSER	Corrélation	0.9632	0.8887	0.9010	0.9593
	MSSIM	0.9886	0.9610	0.9592	0.9636

**Tableau-III-1** Statistiques entre les modalités fusionnées et leurs modalités correspondantes d'origine pour différentes méthodes.

A partir du tableau-III-1, généralement, la méthode-3 présente de meilleures performances que les deux méthodes 1 et 2. Les coefficients de corrélation montrent que la méthode proposée FUFSER préserve plus de couleur de l'image MS pendant l'amélioration de sa résolution spatiale, conformément à l'évaluation qualitative, comparativement aux méthodes-1 et 2. Soulignons de ce tableau, par exemple, la modalité Bleu de l'image MS fusionnée qui se corrèle avec la modalité Bleu initiale avec 74% pour la méthode-1 [35] et avec 96% pour la méthode FUFSER, disons de 22% d'amélioration par rapport à la méthode basée sur la TF.

Ainsi, sur le même tableau, les indices MSSIM de similarités de structures entre modalités (couleurs), montrent que la méthode que nous proposons assure plus de similarités entre les modalités initiales et fusionnées et donc moins de distorsions spectrales. Prenons, par exemple, la modalité Verte qui est similaire à la modalité Verte initiale avec 38% pour la méthode-1 utilisant la TF [35], avec 96% pour la méthode que nous proposons et avec 92% pour la méthode WiSpeR [36], donc FUFSER apporte une amélioration spectrale de 58% par rapport à la méthode basée sur la TF et de 4% par rapport à la méthode WiSpeR [36] pour cet exemple.

Pour une évaluation spatiale de la qualité de l'image fusionnée, le tableau-III-2, montre une comparaison entre la méthode proposée, la méthode WiSpeR [36] et celle basée sur la TF [35] en calculant le MSSIM entre les modalités couleurs et la modalité PAN avant et après fusion.

Méthode	B	G	R	PIR
Avant fusion	0.21	0.27	0.22	0.36
Méthode FT [35]	0.73	0.87	0.77	0.88
Méthode WiSpeR [36]	0.9105	0.9519	0.9360	0.9406
Méthode proposée (FUFSER)	0.9055	0.9474	0.9304	0.9468

**Tableau-III-2** Indexe MSSIM entre les modalités MS et la modalité PAN avant et après fusion pour différentes méthodes.

Ce tableau montre que la méthode que nous proposons assure plus de similarités structurales entre l'image PAN et l'image MS fusionnée et assure donc une meilleure résolution spatiale. Comme nous le constatons pour les différentes modalités MS. Prenons, par exemple, la modalité Rouge qui est similaire de 77% avec l'image PAN pour la méthode basée sur la TF [35], de 93% pour la méthode proposée et pour la méthode WiSpeR.

Pour la comparaison de la méthode proposée FUFSER avec la WiSpeR, nous avons utilisé plusieurs (dizaine) paires d'images Ikonos à de riches contrastes (variété urbanisme, végétal, etc.) et de larges dynamiques (images codées sur 11bits) en calculant les moyennes résultantes des indicateurs quantitatifs.

Pour cela, le tableau-III-3 présente une comparaison entre la méthode FUFSER que nous proposons et la WiSpeR en calculant les coefficients de corrélation CC entre les modalités MS et les modalités MS fusionnées, les coefficients de corrélation spatiale SCC entre l'image PAN et les modalités MS, l'indexe MSSIM entre l'image PAN et les modalités MS et inter-modalités d'images MS et MS fusionnée.

Méthode	Indicateurs quantitatifs	B	G	R	PIR
WiSpeR[36]  Moyenne des indicateurs quantitatifs calculés sur dix paires d'images Ikonos de 11 bits	CC inter-modalités MS et MS fusionnée	0.9283	0.8083	0.8303	0.8634
	SCC entre l'image PAN et chacune des modalités MS fusionnée	0.7938	0.8091	0.8094	0.8054
	MSSIM entre l'image PAN et chacune des modalités MS fusionnée	0.7438	0.7501	0.7492	0.9290
	MSSIM inter-modalités MS et MS fusionnée	0.7951	0.7720	0.7811	0.9285
Méthode proposée, FUFSER  Moyenne des indicateurs quantitatifs calculés sur dix paires d'images Ikonos de 11 bits	CC inter-modalités MS et MS fusionnée	0.9623	0.8979	0.9122	0.9187
	SCC entre l'image PAN et chacune des modalités MS fusionnée	0.8982	0.9157	0.9074	0.9135
	MSSIM entre l'image PAN et chacune des modalités MS fusionnée	0.8961	0.9348	0.9289	0.9323
	MSSIM inter-modalités MS et MS fusionnée	0.9818	0.9467	0.9502	0.9497

**Tableau-III-3** Etude statistique sur les produits de fusion résultant des deux méthodes WiSpeR [36] et FUFSER.

Notant, du tableau-III-3, que la FUFSER présente un CC supérieur que celui présenté par WiSpeR, nous constatons de l'ordre des Coefficients de Corrélation CC calculés pour les deux méthodes que chacune préserve les signatures spectrales de l'image MS pendant l'amélioration de sa résolution spatiale. Ceci est grâce aux modèles d'injection, utilisé par chacune des deux méthodes, adaptant énergétiquement les détails spatiaux à injecter dans chaque modalité de l'image MS permettant ainsi d'éviter les distorsions spectrales dues à l'injection de la même portion énergétique dans toutes les modalités MS.

Le même tableau indique que les coefficients SCC et MSSIM entre PAN-MS fusionnée présentés par la méthode proposée FUFSER (de l'ordre de 90%) sont supérieurs à ceux présentés par la méthode WispeR [36] (de l'ordre de 80%). Ceci indique que plus de détails spatiaux de l'image PAN sont présents dans l'image fusionnée obtenue par FUFSER que dans celle obtenue par WiSpeR [36].

En plus, le tableau-III-3 indique un indice MSSIM inter-modalités MS-MS fusionnée de l'ordre de 95% pour la méthode proposée FUFSER et de l'ordre de 80% pour la WiSpeR [36]. Ceci indique que la FUFSER préserve les signatures spectrales de l'image MS en améliorant sa résolution spatiale plus efficacement que la méthode WiSpeR [36].

Ces dégradations spectrales et spatiales pour la WiSpeR, comparativement à la FUFSER, sont dues aux causes suivantes, expliquées au paragraphe I-2-3-2-2:

- L'extraction non précise des détails spatiaux par la TO (fréquence de coupure) [35], [3], [45], [46],
- les modalités MS qui ne sont pas traitées (filtrées) par WiSpeR avant injection,
- pour introduire l'information image dans le modèle d'injection, la substitution, non acceptée physiquement, du seulement le dénominateur d'un rapport (quotient) par une quantité de type différent.
- La façon d'appliquer les filtres Passe-Bas et Passe-Haut pour décomposer l'image, par la TO, en détails et approximation, exclusivement, ou bien, sur les lignes de l'image (ou de l'approximation d'un niveau spatial donné) ou sur les colonnes de celle-ci. Ces détails résultants de cette manière d'appliquer les filtres, ne présentent pas les vraies hautes fréquences spatiales qui devraient être extraits en appliquant des filtres spatiaux (fenêtres spatiales traitant les lignes et les colonnes conjointement).

D'après cette étude expérimentale, nous déduisons que la méthode que nous proposons FUFSER est plus performante que la méthode basée sur la TF [35] et ceci grâce à l'utilisation d'un modèle permettant de définir les portions énergétiques à injecter dans chacune des modalités MS.

Ainsi, la méthode que nous proposons est plus performante que la WiSpeR [36] et ceci revient essentiellement, comme il a été expliqué dans ce chapitre, aux facteurs suivants :

- au premier lieu, en utilisant la TF, ceci permet de remédier à l'extraction non précise des détails spatiaux et permet d'extraire les vraies hautes fréquences spatiales ou détails spatiaux.
- Ainsi la méthode que nous proposons permet une introduction plus juste de l'information image dans le modèle d'injection.

- Et en fin, la méthode que nous proposons effectue un filtrage aux modalités MS sur-échantillonnées avant l'injection évitant toute éventuelle distorsion des signatures spectrales.

### **III-4- Conclusion**

Ce chapitre propose une méthode basée sur le filtrage dans le domaine des fréquences tout en introduisant les réponses spectrales des capteurs pour la fusion d'images satellitaires. La méthode proposée s'est basée sur l'étude critique des travaux de ses prédécesseurs pour préserver les éléments essentiels et s'affranchir à leurs limitations.

A partir de l'analyse visuelle des images obtenues après fusion, il est clair que la méthode proposée apporte la résolution spatiale de l'image PAN à l'image MS tout en gardant la résolution spectrale de cette dernière et n'introduit aucune dégradation spectrale ou artefact. Ceci revient essentiellement d'une part, à l'utilisation de la TF ce qui permet de remédier à l'extraction non précise des détails spatiaux, d'extraire les vraies hautes fréquences spatiales ou détails spatiaux et de traiter les modalités MS sur-échantillonnées d'une façon à éliminer leurs fréquences de même nature que celles à y injecter évitant ainsi toute éventuelle distorsion spectrale ou artefact. D'autre part, cela revient à l'utilisation d'un modèle utilisant les réponses des senseurs pour définir les portions énergétiques des détails spatiaux à injecter dans chacune des modalités MS évitant toute dégradation des signatures spectrales.

La méthode FUFSER proposée a été comparée à ses prédécesseurs, spécialement les deux méthodes de type ARSIS [35] et [36]. A partir de l'évaluation qualitative et de l'analyse statistique, la méthode proposée présente de meilleures performances spatiales et spectrales que ses prédécesseurs.

### IV Conclusion générale :

Dans cette thèse, un état de l'art sur la fusion d'images satellitaires a été présenté. Nous montrons qu'il existe trois types de méthodes. De chaque type nous avons étudié et simulé quelques méthodes. Cela nous a permis de mettre en relief les avantages et inconvénients de chaque type de méthodes. Partant de cela une nouvelle méthode a été proposée permettant d'éviter les biais inhérents aux autres méthodes.

Il existe des contraintes de dissimilitudes locales entre les capteurs de haute et de basse résolution qui, lors d'une fusion de type projection-substitution ou de type contribution spectrale relative, devaient présenter des allures semblables vis-à-vis les hypothèses de départ des deux types afin de pouvoir conserver l'information spectrale de la MS. Ces deux types correspondent à des méthodes globales, ils ne sont pas en mesure de proposer une solution lorsque les contenus spatiaux des deux images considérées ne sont localement pas corrélés [4]. Ainsi, une approche de fusion manipulant et les images et leurs capteurs, afin d'adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection, aurait sûrement réduit les effets de ces contraintes et cela en essayant de préserver les caractéristiques qui définissent le contenu de la bande spectrale à synthétiser tout en augmentant la résolution spatiale de l'image. C'est ce qu'on appelle « la propriété de cohérence ». Cette propriété de cohérence est respectée par les méthodes de types ARSIS qui adaptent les détails spatiaux extraits de l'image PAN aux modalités MS avant de procéder à l'injection.

Conformément à la description ci-dessus et d'après l'étude statistique et comparative effectuée dans le chapitre (II), les méthodes de type ARSIS, en présentant une préservation des signatures spectrales de l'image MS en améliorant sa résolution spatiale, permettent de surpasser les méthodes des deux types : projection-substitution et contribution spectrale relative qui présentent une augmentation notoire de la qualité visuelle au niveau des structures spatiales présentes dans les images. Cependant, leur défaut majeur est la distorsion radiométrique qui a pour incidence une modification plus ou moins importante des signatures spectrales des images MS synthétisées. Ainsi, nous avons opté pour le type ARSIS.

Cependant, les méthodes de type ARSIS dépendent de la qualité de la réponse fréquentielle du filtre utilisé pour dissocier les différentes fréquences spatiales du spectre et au

modèle conçu pour adapter les détails spatiaux aux modalités MS avant de procéder à l'injection. Ainsi les méthodes de ce type peuvent présenter des artéfacts tels que les rebonds.

De ce fait, nous avons proposé, dans le dernier chapitre, une méthode de fusion de type ARSIS, basée sur le filtrage dans le domaine des fréquences, utilisant la Transformée de Fourier, tout en introduisant les réponses spectrales des capteurs. La méthode proposée est basée sur l'étude critique des travaux antérieurs pour préserver les éléments essentiels et s'affranchir à leurs limitations.

La TF est utilisée pour extraire les HF spatiales de l'image PAN et pour traiter les modalités de l'image MS avant l'injection. En plus, cette méthode utilise les caractéristiques du capteur pour élaborer un modèle d'injection permettant de distribuer énergétiquement les HF spatiales sur les différentes modalités MS.

A partir de l'analyse visuelle des images obtenues après fusion, il est clair que la méthode proposée apporte la résolution spatiale de l'image PAN à l'image MS tout en gardant la résolution spectrale de cette dernière et n'introduit aucune dégradation spectrale ou artéfact. Ceci revient essentiellement d'une part à l'utilisation de la TF : elle permet d'améliorer la précision dans l'extraction des détails spatiaux (hautes fréquences spatiales ou détails spatiaux). Elle permet aussi un traitement adéquat des modalités MS sur-échantillonnées. Un modèle utilisant les réponses des capteurs a été utilisé. Il définit les portions énergétiques des détails spatiaux à injecter dans chacune des modalités MS évitant toute dégradation des signatures spectrales.

La méthode proposée FUFSER (*image FUSion method based on the Fourier Transform using the Sensor's Response*) a été comparée aux autres méthodes et particulièrement aux deux méthodes de type ARSIS [35] et [36]. L'analyse qualitative (visuelle) des produits de fusion a montré que la méthode proposée FUFSER possède une bonne résolution spatiale de la PAN tout en préservant la qualité spectrale de l'image MS alors que celle obtenue par [35] présente un léger flou affectant notamment les contours de l'image fusionnée. La méthode WiSpeR [36] présente un flou globale sur l'image fusionnée. Nous avons aussi procédé à une analyse quantitative qui confirme l'observation qualitative. Ceci s'explique par le fait que l'approche par la TF permet une meilleure précision fréquentielle dans l'extraction que la TO. Contrairement à la WiSpeR, utilisant la Transformée en Ondelettes T.O [19] ne permet pas

une extraction précise des HF spatiales à injecter dans les modalités de l'image MS. Car la Transformée en Ondelettes T.O décompose l'image en des niveaux spatiaux décroissant des détails spatiaux les plus fins jusqu'au niveau d'approximation. Et pour extraire les HF à injecter dans les modalités de l'image MS en utilisant la TO, on ne coupe plus à une fréquence de coupure précise mais à toute une bande de fréquence (à un niveau spatial). Ce qui engendre, soit une injection d'une partie de hautes fréquences spatiales qui ne devraient pas être injectées dans les modalités MS causant une injection de fréquences qui existent. De plus, le modèle d'injection que nous avons élaboré est plus adéquat. L'évaluation qualitative et quantitative que nous avons effectuée montre l'efficacité de l'approche que nous avons proposée.

## References

- [1] Li Ming Wu Shunjun, "A New Image Fusion Algorithm Based on Wavelet Transform", *Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'03)* 0-7695-1957-1/03 \$17.00 © 2003 IEEE.
- [2] Cunjun Li, Liangyun Liu, Jihua Wang, Chunjiang Zhao, Renchao Wang, "Comparison of Two Methods of the Fusion of Remote Sensing Images with Fidelity of Spectral Information", 0-7803-8742-2/04/\$20.00 (c) 2004 IEEE.
- [3] Yangrong Ling, Manfred Ehlers, E. Lynn Usery, Marguerite Madden, "FFT-enhanced HIS transform method for fusing high-resolution satellite images", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61 (2007) 381–392.
- [4] Claire THOMAS, 'Fusion d'images de résolutions spatiales différentes', *Thèse, Ecole des Mines de Paris, décembre 2006*.
- [5] Mohamed Bassam BEN TICHA, 'Fusion de données satellitaires pour la cartographie du potentiel éolien offshore', *Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, novembre 2007*.
- [6] M. Beaulieu, S. Foucher, L. Gagnon, « Multi-Spectral Image Resolution Refinement using Stationary Wavelet Transform », 0-7803-7929-2/03/\$17.00 (C) 2003 IEEE.
- [7] Myungjin Choi, Rae Young Kim, Myeong-Ryong Nam, and Hong Oh Kim, "Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Images Using the Curvelet Transform", *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 2, NO. 2, APRIL 2005*.
- [8] Thierry Ranchin, "Remote sensing and image fusion methods: A comparison", 142440469X/06/\$20.00 ©2006 IEEE.
- [9] Konstantinos G., Nikolako po Ulos "Comparison of nine fusion techniques for very high resolution Data", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 74, No. 5, May 2008, pp. 647–659*.
- [10] Francis X.J. Canisius, Hugh Turrall, "Fusion Technique to Extract Detail Information from Moderate Resolution Data for Global Scale Image Map Production", *Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment – Information for Risk Management and Sustainable Development – November 10-14, 2003 Honolulu, Hawaii*.
- [11] Yifan Zhang, StMIEEE, Mingyi He, Muyun Weng, Changyun Wen, SeMIEEE, and Sylvain Leroy, "Multi-spectral and Panchromatic Image Fusion based on Local Information Entropy and its Distribution Property", 0-7803-9514-X/06/\$20.00 ©2006 IEEE.
- [12] Andrea Garzelli and Filippo Nencini, Luciano Alparone, Bruno Aiazzi and Stefano Baronti, « Pan Sharpening of Multispectral Images: A Critical Review and Comparison », 0-7803-8742-2/04/\$20.00 (C) 2004 IEEE.
- [13] Li-Hong Qia, Li-Zhong Peng, Wei Guo, Wei-Tao Yuan, "A NOVEL IMAGE FUSION ALGORITHM BASED ON 2D EMD AND HIS", *Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, 12-15 July 2008*.
- [14] Lucien Wald, Thierry Ranchin, « The ARSIS Concept in Image Fusion: an Answer to Users Needs », 2003 © ISIF.

- [15] Wen Cao, Bicheng Li, Yong Zhang. “A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform”. *IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing 2003*; 976-980 Nanjing.
- [16] Davis, C.H. ; Wang, X., « Urban Land Cover Classification from High Resolution Multi-Spectral IKONOS Imagery », *Proceedings of IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS'02, 24-28 June 2002, Vol. 2, pages:1204- 1206.*
- [17] Maria Gonzalez-Audicana, José Luis Saleta, Raquel Garcia Catalan, and Rafael Garcia “Fusion of MultiSpectral and Panchromatic Images Using Improved HIS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition”, *IEEE Transaction on GeoScience and Remote Sensing, Vol. 42, NO. 6, June 2004.*
- [18] Jian Wang, Changhui Xu, Jixian Zhang, and Zhengjun Liu “An EMD-HIS model for high resolution image fusion”, *Proc. SPIE, Vol. 6752, 675209 (2007); DOI:10.1117/12.760475.*
- [19] Amolins, K.; Zhang, Y.; Dare, P., “Wavelet-based image fusion techniques – an introduction, review and comparison”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 62, issue 4, p. 249-263, September 2007.*
- [20] Tu, T.M.; Su, S.C.; Shyu, H.C.; Huang, P.S., “A new look at IHS-like image fusion methods, Information Fusion”, *Vol. 2, Issue 3, September 2001, Pages 177-186.*
- [21] Tsai, V.J.D., “Frequency-Based Fusion of Multiresolution Images”, *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS '05, 25-29 July, Vol. 6, page(s): 3916- 3919.*
- [22] Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W., “Remote Sensing and Image Interpretation”. 2<sup>nd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- [23] Wang, Z.; Bovik, A.C.; Sheikh, H.R.; Simoncelli, E.P., “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity”, *IEEE Transactions on Image Processing, Volume 13, Issue 4, April 2004 Page(s):600 – 612.*
- [24] Garzelli, A., “Possibilities and limitations of the use of wavelets in image fusion”, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS '02, 24-28 June 2002, Vol. 1, page(s): 66- 68.*
- [25] V. S. Raptis, R. A. Vaughan, T. Ranchin, and L. Wald, “Assessment of different data fusion methods for the classification of an urban environment,” in *Proc. 2nd Conf. “Fusion of Earth Data: Merging Point Measurements, Raster Maps and Remotely Sensed Images”, T.Ranchin and L.Wald, Eds., Sophia Antipolis, France, Jan. 28–30, 1998, pp. 167–182.*
- [26] L. Wald and T. Ranchin, “Data fusion for a better knowledge of urban areas,” in *Proc. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Rome, Italy, Nov. 8–9, 2001, pp. 127–132.*

- [27] V. K. Shettigara, "A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 58, pp. 561–567, 1992.
- [28] A. Fanelli, A. Leo, and M. Ferri, "Remote sensing images data fusion: A wavelet transform approach for urban analysis," in *Proc. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Rome, Italy, Nov. 8–9, 2001*, pp. 112–116.
- [29] D. Vaiopoulos, K. Nikolakopoulos, and G. Skianis, "A comparative study of resolution merge techniques and their efficiency in processing image of urban areas," in *Proc. IEEE/ ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Rome, Italy, Nov. 8–9, 2001*, pp. 270–274.
- [30] Y. Zang and R. Wang, "Multi-resolution and multi-spectral image fusion for urban object extraction," in *Proc. 20th ISPRS Congr.*, 2004, pp. 960–966.
- [31] Yesou H, Besnus Y, Rolet Y. "Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery-A contribution to the study of Geological structures". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 1993; 48(5): 23-36*.
- [32] Ehlers M. Multisensor, "image fusion techniques in remote sensing". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 1991; 46: 1930*.
- [33] D. D. Kishore, R. K. Gopal, and A. Prakash, "Improvement of effective spatial resolution of thermal infrared data for urban land use classification," in *Proc. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Rome, Italy, Nov. 8–9, 2001*, pp. 332–336.
- [34] Firouz Abdullah Al-Wassai, N.V. Kalyankar, Ali A. Al-Zuky, "The IHS Transformations Based Image Fusion" . *Computer Vision and Pattern Recognition, 19 July 2011, 1107.3348*.
- [35] Juliana G. Denipote Stela V. Paiva, « A Fourier Transform- based Approach to Fusion High spatial Resolution Remote Sensing Images », 978-0-7695-3476-3/08 \$ 25.00 © 2008 IEEE.
- [36] Xavier Otazu, Maria Gonzales-Audicana, Octavi Fors, and Jorge Nùñez, « Introduction of Sensor Spectral Response Into Image Fusion Methods. Application to Wavelet-Based Methods », 0196-2892/\$ 25.00 © 2005 IEEE.
- [37] J. Nuñez, X. Otazu, O. Fors, A. Prades, V. Pala, and R. Arbiol, "Multiresolution- based image fusion with additive wavelet decomposition," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, no. 3, pp. 1204–1211, May 1999.
- [38] Zhang, Y., "Problems in the Fusion of Commercial High-Resolution Satellite Images as well as Landsat 7 Images and Initial Solutions, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)", *GeoSpatial Theory, Processing and Applications, Volume 34, Part 4, Ottawa, July 2002*.
- [39] D. A. Yocky, "Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform," *J. Opt. Soc. Amer. A.*, vol. 12, pp. 1834–1841, Sep. 1995.

- [40] Claire Thomas, 'Fusion d'images de résolutions spatiales différentes', *Thèse, Ecole des Mines de Paris, décembre 2006.*
- [41] Myungjin Choi, Rae Young Kim, Myeong-Ryong Nam, and Hong Oh Kim, "Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Images Using the Curvelet Transform", *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, Vol. 2, No. 2, April 2005.
- [42] Tsai, V.J.D., "Evaluation of Multiresolution Image Fusion Algorithms", *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, IGARSS '04, 20-24 Sept., Vol. 1, page(s): 3665- 3667.*
- [43] Wang Jian, Zhang Jixian, and Liu Zhengjun "EMD Based Multi-scale Model for high Resolution Image Fusion", *Geo-Spatial Information Science 11(1):31-37, DOI 10.1007/s11806-007-0150-9, Vol. 11, ISSUE 1, March 2008.*
- [44] D. Vaiopoulos, K. Nikolakopoulos, and G. Skianis, "A comparative study of resolution merge techniques and their efficiency in processing image of urban areas," in *Proc. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas, Rome, Italy, Nov. 8–9, 2001*, pp. 270–274.
- [45] M. González-Audícana, X. Otazu, O. Fors, and A. Seco, "Comparison between the Mallat's and the 'à trous' discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 26, no. 3, pp. 597–616, Feb. 2005.
- [46] M. González-Audícana, X. Otazu, O. Fors, R. García, and J. Núñez, "Fusion of different spatial and spectral resolution images: Development, application and comparison of new methods based on wavelets," in *Proc. Int. Symp. Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Sep. 2002, pp. 228–237.
- [47] T.-M. Tu, P. S. Huang, C.-L. Hung, and C.-P. Chang, "A fast Intensity- Hue-Saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery," *IEEE. Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 1, no. 4, pp. 309–312, Oct. 2004.
- [48] L. Wald, T. Ranchin, and M. Mangolini, "Fusion of satellite images of different spatial resolution: Assessing the quality of resulting images," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 63, pp. 691–699, Jun. 1997.
- [49] P. S. Chavez, Jr, S. C. Sides, and J. A. Anderson, "Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 57, no. 3, pp. 295–303, 1991.
- [50] Pascal Sirguey, Renaud Mathieu, Yves Arnaud, Muhammad M. Khan, and Jocelyn Chanussot, "Improving MODIS Spatial Resolution for Snow Mapping Using Wavelet Fusion and ARSIS Concept," *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 5, NO. 1, JANUARY 2008.*
- [51] Zhi Huang Xianchuan Yu, Guian Wang Zhongni Wang, "Application of Several Non-negative Matrix Factorization-based Methods in Remote Sensing Image Fusion," *Fifth*

*International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. 978-0-7695-3305-6/08 \$25.00 © 2008 IEEE.

[52] Zhenhua Li and Henry Leung, "Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using a Restoration-Based Method," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 47, No. 5, May 2009.

[53] Leigh A. Johnston and Vikram Krishnamurthy, "An Improvement to the Interacting Multiple Model (IMM) Algorithm," *IEEE transactions on signal processing*, Vol. 49, No. 12, December 2001.

[54] Zhang Guang-yuan, Wang Fu-jun, Wei Zhen-sheng, "Interacting Multiple Model Algorithm Used In Multi-Sensor Fusion System," *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI'2007*. 1-4244-1135-1/07/\$25.00 ©2007 IEEE.

[55] H. Hariharan, A. Koschan, B. Abidi, A. Gribok, and M.A. Abidi, "Fusion of visible and infrared images using empirical mode decomposition to improve face recognition," in *Proc. IEEE International Conference on Image Processing ICIP2006, Atlanta, GA*, pp. 2049-2052, October 2006.

[56] Elena Console, Bassel Solaiman, "PROBLEMS AND PERSPECTIVES IN THE HIGH RESOLUTION DATA FUSION," Vol. 6. 0-7803-6359-0. 2000 IEEE.

[57] Heng Chu, De-gui Teng, Ming-quan Wang, "Fusion of remotely sensed images based on subsampled contourlet transform and spectral response," *2009 Urban Remote Sensing Joint Event*. 978-1-4244-3461-9/09/\$25.00 ©2009 IEEE.

[58] A.G. Mahyari M. Yazdi, "Fusion of panchromatic and multispectral images using temporal Fourier transform," *IET Image Process*, 2010, Vol. 4, Iss. 4, pp. 255–260 doi: 10.1049/iet-ipr.2009.0104.

[59] Rokhmatuloh, Ryutaro TATEISHI, Ketut Wikantika, Khairul Munadi and Mohammed Aslam M, "Study on the Spectral Quality Preservation Derived from Multisensor Image Fusion Techniques between JERS-1 SAR and Landsat TM Data," 0-7803-7929-2/03/\$17.00 (C) 2003 IEEE.

[60] Qiang Zhou, Peng Gong, Ziqi Guo, Caixia Liu, Wei Fu, Baogang Zhang, "A simplified image fusion technique with sensor spectral response," *IGARSS 2010*. 978-1-4244-9566-5/10/\$26.00 ©2010 IEEE.

[61] Qi Bing, Jun Lu, Zhang Jing, "A Novel Image Enhancement Algorithm based on Information Fusion," *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*. 978-0-7695-3336-0/08 \$25.00 © 2008 IEEE, DOI 10.1109/CSSE.2008.1314.

[62] Zhihui Wang, Yang Tie, Yueping Liu, "Design and Implementation of Image Fusion System," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)*. 978-1-4244-7237-6/10/\$26.00 ©2010 IEEE.

- [63] Hui Li, Youzhi Zheng, « Image Fusion Algorithm Using Pyramidal Empirical Mode Decomposition », *2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*. 978-0-7695-3745-0/09 \$25.00 © 2009 IEEE. DOI 10.1109/HIS.2009.38.
- [64] Bin Yang, Fengmei Sun, Shutao Li, “Region-Based Color Fusion Method for Visible and IR Image Sequences,” *978-1-4244-2316-3/08/\$25.00 ©2008 IEEE*.
- [65] Aziza BERRADA, Dong-Chen et Denis Morin, « Identification des piscines à l’aide d’une image Ikonos : Cas de la ville de Sherbrooke (Québec),» *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 239-249.
- [66] Stéphanie Lhomme, Dong-Chen He et Denis Morin, « Évaluation de la qualité d’une image Ikonos pour l’identification du Bati en milieu, » *Télédétection*, 2003, vol. 3, n° 5, p. 457–466.
- [67] María González-Audícana, Xavier Otazu, Octavi Fors, and Jesús Alvarez-Mozos, “A Low Computational-Cost Method to Fuse IKONOS Images Using the Spectral Response Function of Its Sensors,” *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, Vol. 44, No. 6, June 2006.
- [68] Kazi A. Kalpoma and Jun-ichi Kudoh, “Image Fusion Processing for IKONOS 1-m Color Imagery,” *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, Vol. 45, No. 10, October 2007.
- [69] S. Li et al., “Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion,” *Informat. Fusion (2010)*, doi:10.1016/j.inffus.2010.03.002.
- [70] A. Toet, M.A. Hogervorst, S.G. Nikolov, J.J. Lewis, T.D. Dixon, D.R. Bull, C.N. Canagarajah, “Towards cognitive image fusion. Information Fusion,” *11(2010) 95–113*, doi:10.1016/j.inffus.2009.06.008.
- [71] S. Yang, M. Wang, L. Jiao, “Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Based on Support Value Transform and Adaptive Principal Component Analysis,” *Information Fusion (2010)*, doi: 10.1016/j.inffus.2010.09.003.
- [72] Yin Chen , Rick S. Blum, “A new automated quality assessment algorithm for image fusion,” *Image and Vision Computing* 27 (2009) 1421–1432.
- [73] Q. Guo, S. Liu, “Performance analysis of multi-spectral and panchromatic image fusion techniques based on two wavelet discrete approaches,” *Optik-Int. J. Light Electron Opt.* (2010), doi:10.1016/j.ijleo.2010.06.008.
- [74] YANG Xiao-Hui, JIAO Li-Cheng, “Fusion Algorithm for Remote Sensing Images Based on Nonsampled Contourlet Transform,” *Acta Automatica Sinica*, Vol. 34, No. 3 March 2008, doi: 10.3724/SP.J.1004.2008.00274.
- [75] T. Achalakul and N. Wattanapongsakorn, “Performance and Reliability Modeling for a Parallel Image Fusion System,” *Mathematical and Computer Modelling* 39 (2004) 61-73. doi: 10.1016/S0895-7177(03)00394-7.

[76] Ryan King, David Hamilton, “Augmented virtualised reality—Applications and benefits in remote handling for fusion,” *Fusion Engineering and Design* 84 (2009) 1055–1057, doi:10.1016/j.fusengdes.2009.02.031.

[77] Youcef Chibani, Amrane Houacine, « Redundant versus orthogonal wavelet decomposition for multisensor image fusion, » *Pattern Recognition* 36 (2003) 879 – 887.

[78] Chen Shao-hui , Su Hongbo, Zhang Renhua, Tian Jing, “Fusing remote sensing images using à trous wavelet transform and empirical mode decomposition,” *Pattern Recognition Letters* 29 (2008) 330–342.

[79] Thierry Ranchina, Bruno Aiazzib, Luciano Alparonec, Stefano Barontib, Lucien Wald, “Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 58 (2003) 4 – 18.

[80] Man Wang, Jie-Lin Zhang, Dai-Yong Cao, “Fusion of Multispectral and Panchromatic satellite images based on HIS and Curvelet Transformations,” *Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Beijing, China, 2-4 Nov. 2007*.

[81] Yangrong Ling, Manfred Ehlers, E. Lynn User, Marguerite Madden, “FFT-enhanced IHS transform method for fusing high-resolution satellite images,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61 (2007) 381–392. Doi:10.1016/j.isprsjprs.2006.11.002.

[82] GeoEye, IKONOS Imagery Products Guide, Available at:<[http://www.geoeye.com/whitepapers\\_pdfs/GeoEye\\_IKONOS\\_Product\\_Guide\\_v17.pdf](http://www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/GeoEye_IKONOS_Product_Guide_v17.pdf)>, access: May 3, 2008.

[83] Abdelkader M. R. Ghellab; Mohamed F. Belbachir “Efficient image fusion method based on the Fourier transform by introducing sensor spectral response “, *J. Appl. Remote Sens.* 7 (1), 073552 (May 29, 2013); doi: 10.1117/1.JRS.7.073552.

[84] A.M.R.Ghellab, M.F. Belbachir «Etude comparative des Approches de Fusion d’images satellitaires de type Projection-Substitution et de type Contribution Spectrale Relative ». *Les premières Journées de Mathématiques et Applications de Mila JMAM’2013, Mila, Algérie, les 19, 20 et 21 Octobre 2013*.

[85] A.M.R.Ghellab, M.F.Belbachir, « A study and improvement of an algorithm for images coding using Bidimensional Empirical Mode Decomposition BEMD». *ISPA’2009*, du 19 au 21 octobre 2009 à l’université de Mostaganem-Algérie.

[86] A.M.R.Ghellab, M.F.Belbachir, « Etude et amélioration d’un algorithme de codage d’images utilisant la BEMD (*Bidimensional Empirical Mode Decomposition*)». *CGE’06, 6ème édition de la conférence sur le génie Electrique*, 13 et 14 avril 2009 à l’Ecole Militaire Polytechnique d’Alger.

[87] A.M.R.Ghellab, M.F.Belbachir, « Proposition d’un algorithme de codage utilisant la Décomposition Modale Empirique (EMD) ». *JETIM’08 Journées d’Études Algéro-Françaises en Imagerie Médicale* 22,23 et 24 novembre 2008. BLIDA, Algérie.

## Liste des figures

<i>Indice de la Figure</i>	<i>Intitulé de la figures</i>	<i>Page</i>
I-1	Décomposition hiérarchique de l'information.	17
I-2	Les trois classes de modèles du concept ARSIS.	18
I-3	Schéma synoptique de la DWT.	21
I-4	DWT de deux niveaux d'une image PAN du satellite Ikonos.	22
I-5	Les SRF des senseurs du satellite Ikonos.	23
I-6	Réponses spectrales normalisées des canaux bleu, vert, rouge, PIR et Pan pour le satellite Ikonos, en fonction des longueurs d'ondes incidentes.	28
I-7	Illustration du phénomène d'inversion de contraste sur une paire d'images PAN-MS délivrée par Ikonos: (a) image PAN (1 m), (b) modalité rouge de l'image MS de 4 m, sur-échantillonnée à 1 m (par opérateur bicubique), (c) extraits d'une ligne particulière dans les deux modalités, présentant une importance (pente) de contraste inversée de l'objet par rapport à son environnement dans les deux images.	30
II-1	Image Ikonos : (a) Modalité Panchromatique, (b) Composition RGB des modalités MS	33
II-2	Fusion d'images : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par PCA, (e) image fusionnée par la méthode de Brovey, (f) image fusionnée par la méthode CN, (g) image fusionnée par la méthode P+XS.	35
II-3	Fusion d'images : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].	37
II-4	Fusion d'images de 11bits d'entropie : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].	39
II-5	Fusion d'images Quickbird de 11bits d'entropie : (a) Image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par la méthode utilisant la TF [35], (e) image fusionnée par la méthode WiSpeR [36].	41
III-1	Un pixel de 4m d'une modalité MS divisé en 16 pixels de 1m, pour sur-échantillonnage.	46
III-2	Paire d'images PAN-MS : (a) image PAN, (b) image MS, (c) image MS sur-échantillonnée.	48
III-3	La ligne en milieu d'images en niveau de gris.	48
III-4	Spectres d'amplitude de la ligne en milieu pour :(a) l'image PAN, (b) Modalité Rouge de l'image MS, (c) Modalité Rouge de l'image MS sur-échantillonnée, (d) Zoom (agrandissement) sur la partie étendue du spectre de la modalité rouge par le sur-échantillonnage.	49
III-5	Spectre d'amplitude de l'image PAN de la figure-III-2.	51
III-6	Fréquences spatiales manquantes dans MS : (a) Spectre d'amplitude	52

	de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS.	
III-7	Comparaison entre la PAN et la MS pour la bande de fréquences spatiales commune (basses fréquences) : (a) Spectre d'amplitude de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS, (c) spectre d'amplitude de la modalité Vert de l'image MS, (d) spectre d'amplitude de la modalité bleu de l'image MS.	53
III-8	Comparaison entre la PAN et la MS sur-échantillonnée : (a) Spectre d'amplitude de l'image PAN, (b) spectre d'amplitude de la modalité Rouge de l'image MS sur-échantillonnée, (c) spectre d'amplitude de la modalité Vert de l'image MS sur-échantillonnée, (d) spectre d'amplitude de la modalité bleu de l'image MS sur-échantillonnée.	55
III-9	Schéma synoptique du filtrage dans le domaine fréquentiel.	56
III-10	Réponses fréquentielles des filtres: (a) Passe-Haut idéal, (b) Passe-Bas idéal, (c) Passe-Haut de Hanning, (d) Passe-Bas de Hanning.	57
III-11	Réponses spectrales des bandes des senseurs du satellite Ikonos.	58
III-12	Schéma synoptique de l'algorithme FUFSER.	62
III-13	Image Ikonos : (a) Modalité Panchromatique, (b) Composition RGB des modalités MS.	63
III-14	Portion spatiale représentative des résultats de fusion : (a) image PANchromatique, (b) composition RGB de l'image MS d'origine, (c) fusion par IHS, (d) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (e) fusion par WiSpeR [36], (f) fusion par la méthode proposée FUFSER.	65
III-15	Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.	66
III-16	Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS suréchantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.	67
III-17	Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS suréchantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.	68
III-18	Fusion d'une paire d'image Ikonos de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.	68
III-19	Fusion d'une paire d'image Quickbird de dynamique de 11 bits : (a) image PAN, (b) composition RGB de l'image MS sur-échantillonnée, (c) fusion par la méthode basée sur la TF [35], (d) fusion par la méthode WiSpeR [36], (e) fusion par la méthode proposée FUFSER.	69

## Liste des tableaux

<i>Indice du tableau</i>	<i>Légendes des tableaux</i>	<i>Page</i>
I-1	Systèmes d'observation de la Terre les plus utilisés, délivrant des images à différentes résolutions spatiales.	9
II-1	Indexe MSSIM entre les modalités fusionnées et leurs modalités correspondantes d'origine pour différentes méthodes.	42
II-2	Indexe MSSIM entre les modalités MS et la modalité PAN avant et après fusion pour différentes méthodes.	43
III-1	Statistiques entre les modalités fusionnées et leurs modalités correspondantes d'origine pour différentes méthodes.	70
III-2	Indexe MSSIM entre les modalités MS et la modalité PAN avant et après fusion pour différentes méthodes.	71
III-3	Etude statistique sur les produits de fusion résultant des deux méthodes WiSpeR [36] et FUFSER.	72

**Nomenclature**

A ou Pan : image panchromatique

B ou MS : image Multi-Spectrale

MS<sub>i</sub>, B<sub>i</sub> ou XS<sub>i</sub>: i<sup>ème</sup> modalité de l'image MS

MIR : Moyen Infra Rouge

PIR : Proche Infra Rouge

R : Rouge

G : Vert (*Green*)

B : Bleu

<sub>0</sub> : haute résolution spatiale

<sub>1</sub> : basse résolution spatiale

<sup>interp0</sup> : ré-échantillonnée par interpolation à la haute résolution

$f_c$  : fréquence de coupure

*freq\_max* : fréquence spatiale maximale dans une image

HF : Hautes Fréquences

TO : Transformée en Ondelettes

TF : Transformée de Fourier

PCA : Analyse en Composantes Principales

EMD : décomposition Modale Empirique

IHS : Transformation dans l'espace (*Intensity, Hue, Saturation*)

CN : méthode de couleurs normalisées

P+XS : méthode de fusion utilisant la bande P (PAN) et les deux premières bandes (XS<sub>1</sub> et XS<sub>2</sub>)

ARSIS : type de fusion ; Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures

MSM : *Multi-Scale Models*

MIM : *Inter Modality Model*,

HRIMM : *High Resolution IMM*

MSM : l'inverse du modèle MSM<sup>-1</sup>

DWT : *Discret wavelet Transform*

CA : Composante d'Approximation d'une image suite à l'application de la TO

cH : composante de détail Horizontal d'une image suite à l'application de la TO

cV : composante de détail Vertical d'une image suite à l'application de la TO

cD : composante de détail Diagonal d'une image suite à l'application de la TO

WiSpeR : méthode de fusion ; *Window Spectral Response*

SSIM : *Structural Similarity*,

MSSIM : *Mean Structural Similarity*

HP : filtre Passe-Haut

BP : filtre Passe-Bas

TFCT : Transformation de Fourier à Court Terme

SRF : *Spectral Response Functions*

FUFSER : Méthode proposée ; *image FUSion method based on the Fourier Transform using the SEnsor's Response*

CC : Coefficient de Corrélation

SCC : Coefficients de Corrélation Spatiale