

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

THÈME

FUSION D'IMAGES SATELLITAIRES DE RESOLUTIONS SPATIALES DIFFERENTES

Préparé par :
Mr. Youssouf Kali-Kele GAIMI

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Etablissement	Qualité
M. BELHADJI Youcef	MCA	Univ.Tiaret	Président
M. ADDA BENATTIA Abderrahmene	MCB	Univ.Tiaret	Examineur 1
M. OTHMANI Redouane	MAA	Univ.Tiaret	Examineur 2
M. GHELLAB Abdelkader	MCB	Univ.Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2022 /2023

REMERCIEMENT

REMERCIEMENT

‘Louange à Allah et que la paix et la bénédiction soient sur Son Prophète et Messenger, Mohammed, ainsi que sur sa famille et ses Compagnons.’

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur BELHADJI Youcef pour avoir gracieusement accepté le rôle de président du jury de ce mémoire. Je tiens également à remercier Monsieur ADDA BENATTIA Abderrahmane et Monsieur OTHMANI Redouane pour leur disponibilité à servir de rapporteurs et pour leurs précieuses contributions en tant que membres du jury, ce qui est un grand honneur.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur GHELLAB Abdelkader Moustafa Radwan, mon encadrant, dont la disponibilité et l'empathie sans faille tout au long de ce projet m'ont profondément ému. Ses conseils et son soutien ont été inestimables, et je lui adresse mes plus chaleureux remerciements pour sa contribution à ce travail. Ses conseils avisés, ses concepts novateurs et son approche méthodique m'ont été extrêmement précieux au cours de ma de recherche de mémoire.

De plus, j'adresse mes sincères remerciements aux membres de ma famille, particulièrement à ma mère, mes frères et surtout à mes cousins qui ont toujours été une source d'encouragement et de soutien. Leur dévouement inébranlable à favoriser l'amour de l'apprentissage a joué un rôle déterminant dans mes activités académiques, et je n'aurais pas pu y parvenir sans leur influence.

Ma gratitude s'étend à mes professeurs et à mes amis dont les encouragements indéfectibles et le soutien moral ont joué un rôle indispensable pour rendre tout cela possible.

SOMMAIRE

RESUME i

LISTE DES FIGURES v

LISTE DES TABLEAUX vii

LISTE DES ABREVIATIONS viii

INTRODUCTION GENERALE 2

CHAPITRE I :

**ETAT DE L'ART DE LA FUSION D'IMAGES DE RÉOLUTIONS
SPATIALES DIFFÉRENTES**

I-1 Introduction 4

I-2 Objectifs de la fusion d'images..... 4

I-3 Problématique..... 5

I-4 Les méthodes de fusion d'images 8

I-4-1 méthodes de type projection-substitution..... 9

 I-4-1 La méthode IHS (Intensity, Hue, Saturation)..... 9

 I-4-1-1 La méthode IHS améliorée par le filtrage utilisant la
 transformée de Fourier 11

 I-4-2 La méthode basée sur ACP (Analyse en Composantes
 Principales)..... 12

I-4-2 méthodes de type contribution spectrale relatives..... 13

 I-4-2-1 La méthode Brovey..... 14

 I-4-2-2 La méthode Color Normalized 14

 I-4-2-3 La méthode P+XS 15

I-4-3 Les méthodes de transformations de type ARSIS..... 16

 I-4-3-1 La méthode de type ARSIS basée sur la Transformée de
 Fourrier..... 18

I-5- CONCLUSION..... 19

SOMMAIRE

CHAPITRE II :

ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSIONS CONSIDEREES

II-1 Introduction	22
II-2 Prétraitement.....	22
II-2-1 Le ré-échantillonnage des images	23
II-2-2 Le recalage des images	23
II-3 Les différentes méthodes d'évaluation de la qualité de l'image fusionnée	24
II-3-1 L'analyse qualitative	24
II-3-2 L'analyse quantitative.....	25
II-3-2-1 Le coefficient de corrélation	25
II-3-2-2 SCC (Coefficients de corrélation spatiale)	26
II-3-2-3 La mesure de l'indice de similitude structurelle	27
II-4 Résultats expérimentaux	28
II-4-1 La mesure qualitative.....	29
II-4-1-1 Analyse expérimentale qualitative de projection substitution..	30
II-4-1-2 Analyse expérimentale qualitative des méthodes contribution spectrale relative	31
II-4-2-3 Analyse expérimentale qualitative de la méthode d'ARSIS par injection.....	33
II-4-2 La mesure quantitative	35
II-4-2-1 Analyse quantitative entre la PAN et les MS fusionnées	35
II-4-2-2 Analyse quantitative entre les MS suréchantillonnées et les MS fusionnées	37
II-5 Conclusion	39

SOMMAIRE

CHAPITRE III :

Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

III-1 Introduction	42
III-2 Filtrage et la Fréquence de coupure	42
III-3 La méthode ARSIS proposée utilisant un modèle d'injection	43
III-3-1 Le modèle d'injection.....	43
III-4 Etude expérimentale.....	44
III-4-1 Analyse qualitative : comparaison entre la fusion utilisant TF et la fusion utilisant la TF plus le modèle d'injection.....	44
III-4-2 Analyse quantitative entre les modalités fusionnées et leurs modalités MS d'origine pour les deux méthodes considérées	46
III-4-2-1 Analyse quantitative entre la méthode de fusion utilisant la TF et la méthode de fusion utilisant la TF avec le modèle d'injection.....	47
III-4-2-2 Analyse quantitative entre les modalités fusionnées et leurs modalités MS d'origine pour les deux méthodes considérées	48
III-5 Conclusion	50
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	52
BIBLIOGRAPHIE	52

Résumé

ملخص

يتم ضمان مراقبة الأرض من خلال الأقمار الصناعية التي تحمل على متنها ، من ناحية ، مستشعرات **Panchromatic PAN** الحساسة عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية فهي اذن قادرة على تقديم صور شاملة ذات دقة مكانية عالية على حساب دقتها الطيفية (معلومات ملونة). من ناحية أخرى ، تحمل هذه الأقمار الصناعية نفسها مستشعرات **MS** متعددة الأطياف حساسة للنطاقات الأضيق من حيث الأطوال الموجية ، وبالتالي توفر صور **MS** (ألوان) ذات دقة طيفية عالية على حساب الدقة المكانية.

في نفس المشهد ، لدينا زوج من الصور: احادية الصبغة **Panchromatic** بدقة مكانية عالية و متعددة الصبغة **Multi-Spectral** بدقة طيفية عالية.

للحصول على أفضل خاصيتين في نفس الصورة ، الدقة المكانية والدقة الطيفية ، تصبح المشكلة اندماجًا بين صورة **PAN** وصورة **MS**.

في هذه الأطروحة، تم تنفيذ دراسة وضع لميدان دمج الصور متضمنا اشكالية و طرق دمج الصور في هذا المجال. بعد ذلك، تم تبرير اعتماد نوع من الأساليب وهو **ARSIS** (تحسين الدقة المكانية عن طريق حقن الهيكل) وتم اتباعه والتوصل إلى طريقة فعالة لدمج الصور.

Résumé

Summary

Earth observation is guaranteed by satellites carrying on their edges, on the one hand, Panchromatic PAN sensors sensitive over a wide band of wavelengths and able to deliver panchromatic images of high spatial resolutions to the detriment of their spectral resolutions (color information). On the other hand, these same satellites carry Multi-Spectral MS sensors sensitive to narrower bands in terms of wavelengths, thus delivering MS images (colors) of high spectral resolutions to the detriment of their spatial resolutions.

For the same scene, we therefore have a pair of images: Panchromatic with high spatial resolution and Multi-Spectral (color) with high spectral resolution.

To have in the same image the two best characteristics, spatial resolution and spectral resolution, the problem becomes the fusion between the PAN image and the MS image.

In this thesis, a state of the art on image fusion methods in this field has been carried out. Then, an adoption of a type of methods which is ARSIS (Improvement of the Spatial Resolution by Injection of Structure) was justified and followed to work out an effective method of fusion of images.

Résumé

Résumé

L'observation de la terre est garantie par des satellites portant à leurs bords, d'une part, des capteurs Panchromatiques PAN sensibles sur une large bande en longueurs d'onde et pouvant délivrer des images panchromatiques de hautes résolutions spatiales au détriment de leurs résolutions spectrales (information couleurs). D'autre part, ces mêmes satellites portent des capteurs Multi-Spectrales MS sensibles sur des bandes plus étroites en longueurs d'ondes délivrant ainsi des images MS (couleurs) de hautes résolutions spectrales au détriment de leurs résolutions spatiales.

Pour la même scène, on se trouve donc avec une paire d'images : Panchromatique de haute résolution spatiale et Multi-Spectrale (couleur) de haute résolution spectrale.

Pour avoir dans une même image les deux meilleures caractéristiques, résolution spatiale et résolution spectrale, le problème devient la fusion entre l'image PAN et l'image MS.

Dans ce mémoire, un état de l'art sur les méthodes de fusion d'images dans ce domaine a été mené. Ensuite, une adoption d'un type de méthodes qui est ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structure) a été justifiée et suivie pour élaborer une méthode efficace de fusion d'images.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Réponse spectrale relative du satellite Ikonos [7]	8
Figure 1.2 : Schéma de la méthode IHS [5]	10
Figure 1.3 : Une illustration schématique décrivant le concept de fusion utilisant l'analyse des composants principaux [15]	13
Figure 1.4 : pyramides multi-résolutions [7] [5]	17
Figure 1.5 : Concept ARSIS utilisant la TO [1]	18
Figure 1.6 : Diagramme de la fusion par FFT	19
Figure 2.1 : une Paire d'images Ikonos : (a) image PAN, (b) Image MS suréchantillonnée	29
Figure 2.2 : Portions des images PAN et MS : (a) portion de l'image PAN, (b) portion de l'image MS	30
Figure 2.3 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par IHS, (d) image fusionnée par ACP	31
Figure 2.4 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par Brovey, (d) image fusionnée par Color Normalized, (e) image fusionnée par P+XS (CNES)	33
Figure 2.5 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par ARSIS.....	36
Figure 3.1 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par la TF, (d) image fusionnée par la TF plus le modèle d'injection	45

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Sources d'images optiques satellitaires avec une résolution spatiale supérieure [8].....	7
Tableau 2.1 : Mesure quantitative, entre PAN et les bandes MS suréchantillonnées - à la fois avant et après la fusion -	36
Tableau 2.2 : les mesures quantitatives obtenues entre les modalités MS suréchantillonnées et les MS fusionnées, classées par type de méthode.	38
Tableau 3.1 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par la TF, (d) image fusionnée par la TF plus le modèle d'injection	47
Tableau 3.2 : Comparaison des données analytiques quantitatives entre la modalité PAN et les modalités MS fusionnées pour les deux méthodes considérées	49

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

PAN (A) : image Panchromatique

MS (B) : image Multispectrale

SPOT : Satellite de télédétection (Système Probatoire d'Observation de la Terre)

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

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales (Toulouse, France)

ACP (PCA) : Analyse en Composantes Principales (Principal Component Analysis)

PC : Principales Composantes

IHS : Intensity, Hue, Saturation

IHS^{-1} : IHS inverse

CN : méthode de couleurs normalisées (Color Normalized)

P+XS : méthode de fusion utilisant la modalité PAN et les deux premières bandes MS (XS1 et XS2)

TO : Transformée en Ondelettes

TO^{-1} : Transformée en Ondelettes inverse

MS_k, MS_i, XS_i : kième modalité MS ou ième modalité MS

N : Le nombre total des images MS.

R : Rouge G : Vert (Green)

B : Bleu

RGB (RVB) : espace de couleurs Rouge, Vert, Bleu (Red, Green, Blue)

PIR (NIR) : Proche InfraRouge

IR : Infrarouge

PUV : Proche UltraViolet

UV : UltraViolet nm : nanomètre (unité de mesure)

3D : espace à 3 Dimensions

TF : Transformée de Fourier

TF^{-1} : Transformée inverse de Fourier

LISTE DES ABREVIATIONS

FFT : Transformée de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform)

IFFT : Transformée de Fourier Rapide Inverse (Inverse Fast Fourier Transform)

FPB : Filtre Passe-Bas

FPH : Filtre Passe-Haut

HF : Hautes Fréquences

BF : Basses Fréquences

DN : Nombre Digital (Digital Number)

MSM : Multi Scale Models

MSM^{-1} : L'inverse du modèle MSM

IMM : Inter-Modality Model

HRIMM : High Resolution Inter-Modality Model

FR : Faible Résolution spatiale

HR : Haute Résolution spatiale

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée (Normalized Difference Vegetation Index)

fc : Fréquence de coupure

fe : Fréquence d'échantillonnage

fp : Fréquence maximale pour PAN

fms : Fréquence maximale pour MS

LRM : Low- Resolution Multispectral

HRP : High-Resolution Panchromatic

NPHi : Nombre de Photon de la ième bande MS

NPHiDTC : Nombre de Photons de la ième bande MS possibles détectées par le capteur PAN

CC : Coefficient de Corrélation

SCC : Coefficient de Corrélation Spatial

SSIM : Structural Similarity Index Measure

MSSIM : Mean Structural Similarity Index Measure

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La fusion d'images consiste à produire une nouvelle image qui conserve une partie de l'information contenue dans chacune des images originales. Les contraintes principales seront donc liées à l'obtention d'une image aisément interprétable.

Avec un ensemble d'images présentant différentes résolutions spatiales et spectrales, le domaine satellitaire pose un défi dans la différenciation des objets. Lorsqu'il y a une haute résolution spatiale mais une mauvaise résolution spectrale, ou vice versa, il devient de plus en plus difficile de discerner la nature des objets dans l'image. Notre objectif est d'obtenir une image fusionnée grâce à la combinaison de deux images capturées par deux capteurs sur le même satellite. Ce processus est connu sous le nom de fusion d'images satellitaires et est crucial pour obtenir une image avec des résolutions spatiale et spectrale élevées. C'est le point central de notre étude dans ce mémoire.

Notre travail est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre se penche sur la problématique de la fusion et sur la présentation des différentes méthodes de fusion d'images satellitaires utilisées, de type projection-substitution, de type contribution spectrales relatives, et les méthodes de transformations de type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures) avec, leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

Le chapitre deux traite l'examen expérimental des méthodes de fusion. Notre objectif est de mener des analyses qualitatives et quantitatives complètes du produit de fusion de chaque méthode, en les comparant et en les contrastant pour déterminer la plus appropriée avec des caractéristiques spatiales et spectrales supérieures, pour pouvoir lui apporter de l'amélioration dans le troisième chapitre.

Le dernier chapitre, se concentre sur la méthode de fusion efficace du chapitre précédent, telle que déterminée par notre évaluation. Des traitements supplémentaires seront appliqués pour en faire une nouvelle méthode plus efficace.

CHAPITRE 1 :

ETAT DE L'ART SUR LES DIFFERENTES

METHODES DE FUSION D'IMAGES

I-1 INTRODUCTION

La fusion d'images est le processus de fusion de deux images ou plus provenant de capteurs disparates pour produire une nouvelle image intégrée à la fois géométriquement et spectralement. L'objectif est d'extraire un maximum d'informations de chaque image originale tout en préservant leurs propriétés individuelles, améliorant ainsi l'interprétation thématique globale de l'image fusionnée pour la majorité des utilisateurs [2] [5].

Initialement, la fusion d'images satellitaires était une application militaire utilisée à des fins telles que la surveillance des océans, la défense aérienne et le renseignement sur le champ de bataille. Cependant, le secteur civil n'a pas tardé à utiliser cette technologie dans des domaines tels que la surveillance maritime et terrestre, ainsi que la surveillance atmosphérique. Ces applications ont été particulièrement utiles dans des domaines tels que les champs agricoles, le développement urbain et la surveillance du trafic routier [7] [5]. Au fil du temps, diverses méthodes ont été étudiées pour améliorer la lisibilité de telles images.

Dans ce premier chapitre nous allons présenter quelques-unes des différentes méthodes de fusion d'images satellitaires existante avec, leurs caractéristiques, les avantages et les inconvénients.

I-2 Objectifs de la fusion d'images

L'objectif principal des techniques de fusion consiste à améliorer la résolution spatiale de l'image Multi-Spectrale(MS). Fusionner des images sans aucune distorsion spectrale ou spatiale n'est en aucun cas une tâche facile. Plusieurs méthodes sont présentées pour le faire, mais chacune est avantageuse en fonction de la situation donnée. Différents scénarios nécessitent différentes procédures. Par exemple, la méthode de fusion utilisée dans le secteur de la cartographie océanique sera sans doute différente de celle utilisée dans la recherche sur l'urbanisation. Les objectifs typiques de la fusion d'images sont [5, 24] :

- Clarté de l'image
- Précision améliorée de la radiométrie
- Génération de deux ensembles de données en stéréo
- Augmentation des traits
- Catégorisation améliorée
- Identifier les altérations au fil du temps
- Distances de pontage

I-3 PROBLEMATIQUE

Pour initier une fusion, des aides visuelles telles que des images satellitaires sont impératives. Cependant, l'obtention de ces images nécessite le déploiement de satellites. Pour déterminer la pertinence et les avantages potentiels de la fusion, il est crucial d'aborder les points suivants :

- Quelle est la raison d'être de la fusion d'images satellitaires ?
- Quels défis ont été rencontrés ?
- Quelles sont les options de résolution disponibles ?

Les progrès des techniques de fusion ont été stimulés par l'introduction de satellites d'observation de la Terre équipés de plusieurs systèmes de détection tels que SPOT et Landsat, ainsi que de technologies à haute résolution telles que le radar, Ikonos et Quickbird. Ces innovations ont permis d'observer l'intégralité de la planète sur tout le spectre électromagnétique avec une résolution inférieure au mètre dans le domaine optique. Avec des intervalles rapprochés entre les observations, la quantité d'informations capturées est considérablement augmentée à l'application de signatures spectrales aux bandes de chaque pixel tout au détriment de la résolution spatiale [30].

Les images sont capturées par des capteurs montés sur des satellites, généralement avec 1 à plusieurs bandes correspondant à des longueurs d'onde variables et invisible. La résolution du capteur est proportionnelle au coût, mais la mise en œuvre accrue de la signature spectrale a permis une capture de données plus rentable. Les capteurs peuvent être classés en capteurs passifs et actifs. Des capteurs passifs, souvent sous la forme de caméras optiques, analysent le rayonnement émis par l'objet ciblé. Des capteurs actifs, tels que des radars, scrutent la réflexion du rayonnement de leurs propres émissions. Les capteurs produisent deux types d'images : l'image panchromatique (PAN) et l'image multispectrale (MS) [22] [13] [5] [28].

La fonctionnalité du capteur imite étroitement celle de la pupille de l'œil humain. Lorsqu'elle est exposée à une lumière à faible énergie (rayonnement), la pupille se dilate, et lorsqu'elle est confrontée à une lumière vive, elle se contracte lentement pour s'adapter au flux lumineux. De même, les pupilles des capteurs sont préconçus à large ou étroite ouverture selon la largeur de leur bande passante (de la bande de couleur) sur laquelle ils sont sensibles, influençant de manière significative à la fois les caractéristiques et directement la résolution spatiale des images capturées [7].

Afin d'observer la Terre, les premiers satellites, lancés dans l'espace, capturaient des images aux caractéristiques spatiales satisfaisantes mais aux caractéristiques spectrales médiocres, communément appelées images panchromatiques (en niveau de gris). Bien

que ces images présentent une netteté satisfaisante, elles sont limitées au niveau de gris correspondant à une large bande de sensibilité (la lumière blanche) permettant ainsi de réduire les pupilles à travers lesquelles voient les capteurs ce qui se traduit par des pixels au sol plus petits. Au fil du temps, de nouveaux satellites ont été lancés avec des capacités distinctes de leurs prédécesseurs. Ces satellites offrent une résolution spectrale élevée, mais leur résolution spatiale est faible, ce qui donne des images Multi-Spectrales MS.

Malheureusement, les satellites ne fournissent qu'une image au détriment de l'autre. Pour mieux interpréter une image, les résolutions spatiale et spectrale doivent être de haute qualité. Cependant, chaque capteur se concentre sur différents aspects d'un phénomène, et les images qu'ils capturent n'offrent que des perspectives partielles.

Pour relever le défi, deux solutions potentielles ont été identifiées. La proposition initiale est de concevoir un capteur capable de fournir simultanément des images à haute résolution spectrale et spatiale, par l'augmentation de la sensibilité du capteur MS pour permettre de réduire sa pupille à une faible énergie de rayonnement, mais, une telle innovation bien qu'elle soit techniquement réalisable, coûterait plus chère et engendre d'autres contraintes, de poids/la puissance de propulsion de la fusée lors du lancement et d'encombrement dans les canaux lors de la communication des images au sol, notamment une multiplication par 16, à titre d'exemple, de la capacité de stockage pour un satellite comme Ikonos à quatre bande MS (4 bande fois un facteur d'augmentation de la résolution spatiale égal à 4 pour atteindre celle de la PAN). De plus au prix et aux contraintes, la mise en œuvre de cette solution nécessiterait l'abandon des satellites PAN et MS en fonctionnement, ce qui entraînerait un gaspillage inacceptable.

La deuxième approche implique la fusion d'images. Ce processus implique d'accéder à des images de résolutions différentes des deux satellites PAN et MS, ou d'un seul satellite équipé à la fois de capteurs PAN et MS, et de les fusionner pour générer une nouvelle image haute résolution spatiale et spectrale [24]. Contrairement à la solution précédente, cette méthode est plus simple et plus économique, car elle permet aux satellites de rester opérationnels. Cela implique l'utilisation d'un logiciel avec un programme pour fusionner les images de manière transparente. [7]

Un récepteur satellitaire sensible à large bande constitue le capteur panchromatique, capturant à la fois le rayonnement visible et infrarouge. En revanche, les systèmes d'imagerie MS enregistrent le rayonnement lié aux plages de longueurs d'onde plus étroites de chaque bande, divergeant des systèmes d'imagerie PAN.

Le tableau 1.1 révèle que chaque satellite présente des bandes spectrales qui fonctionnent dans une plage de rayonnement spécifique, empêchant ainsi tout spectre

d'interférer avec un autre. Cependant, il existe une exception dans la bande panchromatique, qui est sensible à une gamme plus large de longueurs d'onde qui inclut même l'infrarouge, grâce à ses capteurs très performants. Notamment, cette bande offre une meilleure résolution spatiale au sol que toutes les modalités multispectrales combinées. Mais, malgré ses performances exceptionnelles, le capteur PAN manque d'un aspect colorimétrique, ce que les modalités MS ont comme avantage [24]. Les limites de bande pour chaque capteur sont clairement illustrées à la figure 1.1.

Le tableau ci-dessous, décrit les caractéristiques d'une poignée de satellites, en tenant compte à la fois des deux aspects panchromatique et multi-spectral [8] :

Satellite	Altitude (km)	Revisit time (day)	Orbit inclination	Image swath	Launch Date	Multispectral bands range (µm)				Pan	Max Resolution
						B	G	R	NIR		
Ikonos	681	2-3	98.1°	13.8 km	September 24, 1999	0.45 – 0.52	0.52 – 0.60	0.63 – 0.69	0.76 – 0.90	0.45-0.90	4.00 m
											0.82 m
QuickBird	482, 450	2-3	98°	18 km	October 18, 2001	0.45 – 0.52	0.52 – 0.60	0.63 – 0.69	0.76 – 0.90	0.45-0.90	2.44 m
											0.61 m
Orbview-3	470	2-3	98.2°	8 km	June 26, 2003	0.45 – 0.52	0.52 – 0.60	0.625 – 0.695	0.76 – 0.90	0.45 – 0.90	4.00 m
											1.00 m
Resurs-DK1	330, 500	6	64.8° – 70.4°	4.7 – 28.3 km	June 15, 2006	-	0.50 – 0.60	0.60 – 0.70	0.70 – 0.80	0.58 – 0.80	1.50 m
											0.90 m
KompSat-2	685	3	98°	15km	July 28, 2006	0.45 – 0.52	0.52 – 0.60	0.63 – 0.69	0.76 – 0.90	0.50 – 0.90	4.00 m
											1.00 m
WorldView-1	496	1.7	98°	17.6 km	September 18, 2007	-	-	-	-	0.40 – 0.90	-
											0.50 m
GeoEye-1	684	2	98°	15.2 km	September 6, 2008	0.45 – 0.51	0.51 – 0.58	0.655 – 0.69	0.78 – 0.92	0.45 – 0.80	1.65 m
											0.41 m
WorldView-2*	770	1	98°	17.25 km	October 8, 2009	0.45 – 0.51	0.51 – 0.58	0.63 – 0.69	0.77 – 0.895	0.45 – 0.80	1.85 m
											0.46 m
Pleiades-1	694	1	98°	20 km	December 16, 2011	0.43 – 0.55	0.49 – 0.61	0.60 – 0.72	0.75 – 0.95	0.48 – 0.83	2.00 m
											0.50 m

Tableau 1.1 : Sources d'images optiques satellitaires avec une résolution spatiale supérieure [8].

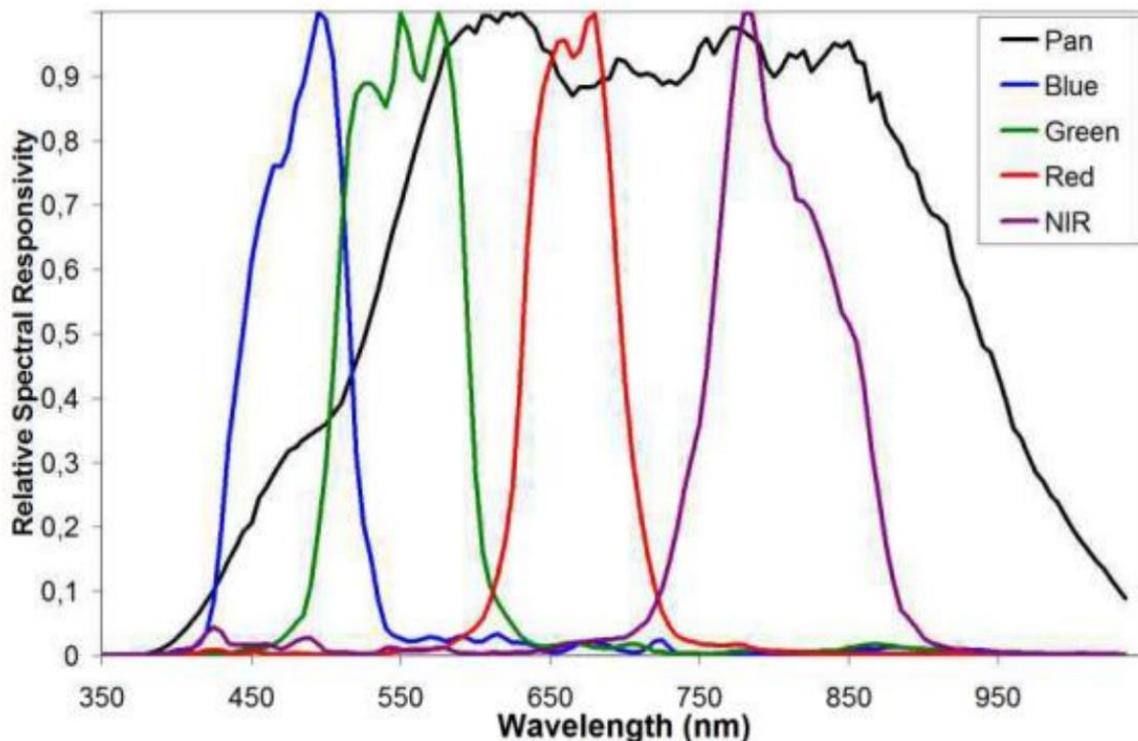


Figure1.1 : Réponse spectrale relative de satellite Ikonos [7]

I-4 LES METHODES DES FUSION D'IMAGES

Des sources académiques ont suggéré de nombreuses approches pour obtenir une image fusionnée plus complète qu'une image originale, à la fois en termes de géométrie et de sémantique. Chavez [42], Ranchin T et Wald L [40], entre autres chercheurs [7] [5], ont globalement classé ces méthodes en trois types : domaine spectral, domaine spatial et techniques à l'échelle de l'espace. L'objectif principal de ces méthodes est de générer une image qui peut être comprise sans effort par la plupart des utilisateurs, et cela reste le défi central.

Elles ont été réparties en trois catégories distinctes :

- méthodes de type projection-substitution,
- méthodes de contribution spectrales relatives,
- méthodes de transformations de type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures).

Pour une mise en œuvre efficace, il n'est considéré que des paires d'images PAN-MS du même satellite (recalées) ou déjà soumises à un processus de recalage (pour les paires PAN-MS issues de satellites différents ou prise à des dates différentes) [5] [2].

I-4-1 Méthodes de type projection-substitution

Les techniques de fusion pour la projection-substitution adoptent une approche vectorielle, synthétisant simultanément toutes les modalités MS. L'image d'une scène est composée de différents enregistrements dans différents canaux spectraux correspondant aux caractéristiques du satellite d'observation, comme Ikonos ou SPOT. La mesure dans laquelle ces images se ressemblent est déterminée par la présence ou l'absence d'informations identiques. L'objectif principal de la projection est d'obtenir une représentation améliorée de l'espace image MS, obtenue en modifiant l'espace lui-même. Cette représentation vise à simplifier les informations en révélant les images MS et en réduisant la redondance. Un composant unique de cette approche isole les structures spatiales d'images multispectrales des informations relatives aux couleurs. L'hypothèse de la méthode est que ces structures sont apparentées à celles de la modalité PAN ou une modalité A en fonction de PAN. Pour remplacer, l'aspect structurel des images MS, A doit être converti en une fonction panchromatique dépendante de l'image.

Plus tard, nous approfondirons deux techniques qui reposent sur la transformation d'images à haute résolution spectrale d'un espace à un autre. L'objectif est de séparer les particularités spatiales des particularités spectrales [15] [14].

- La méthode IHS (Intensity, Hue, Saturation) et
- la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales).

I-4-1-1 La méthode IHS (Intensity, Hue, Saturation)

On utilise fréquemment la technique de fusion basée sur l'IHS pour obtenir des résultats satisfaisants. Cette technique consiste à transformer l'image multi-spectrale spatialement sur-échantillonnée (pour avoir la même définition que la PAN et être manipulable ensemble avec la PAN) de l'espace Rouge Vert et Bleu (RGB) à l'espace IHS, dans lequel la composante d'intensité est remplacée par l'image panchromatique. Ensuite, une transformation spatiale inverse est exécutée pour obtenir une image multispectrale fusionnée à haute résolution spatiale [15] [1].

La méthode IHS, qui signifie intensité, teinte et saturation, est une technique de conversion d'espace colorimétrique utilisée pour déterminer la longueur d'onde (teinte), la saturation et la luminosité globale (intensité) prédominantes d'une couleur. Bien qu'il existe de nombreuses formules qui suivent les mêmes principes, la transformée IHS est une méthode de séparation spatio-spectrale largement utilisée. Il divise les informations spectrales en composantes H et S, tandis que la composante I contient les données spatiales. Pour mieux comprendre ce processus, on se reporte à

la Figure 1.2 qui illustre les principales étapes du schéma de fusion IHS standard [10] [11] [14] [8].

Les étapes suivantes décrivent le processus de fusion via cette méthode :

1. Ré-échantillonnage des images multi-spectrales à la taille spatiale de l'image haute résolution PAN ;
2. Les images MS sont soumises à l'application de transformation IHS.
3. L'histogramme de l'image haute résolution est analysé et mis en contraste avec celui de l'image d'intensité. L'image haute résolution est ensuite utilisée pour remplacer l'image d'intensité.
4. Application de la transformée en IHS inverse

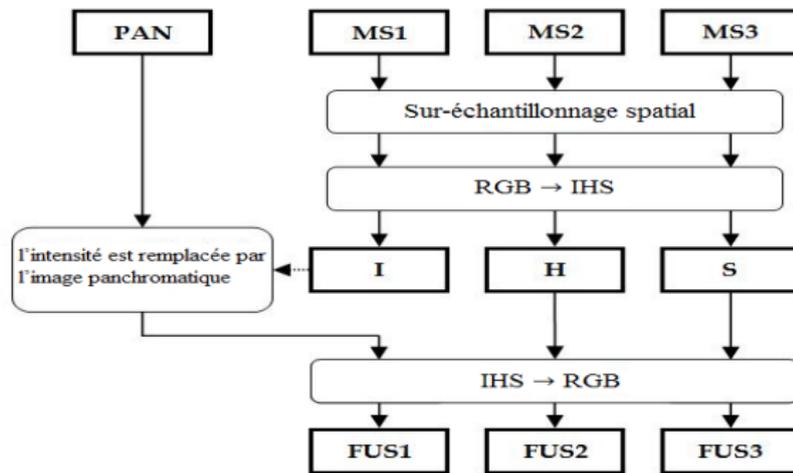


Figure 1.2 : Schéma de la méthode IHS [5]

Les expressions suivantes comprennent ce modèle [2] [11] :

La conversion de l'espace RGB en IHS est réalisée grâce à un système d'équations, habilement utilisé pour réaliser la transition matricielle :

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

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right), v_1 \neq 0 \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

v_1 et v_2 Sont deux variables intermédiaires.

On obtient ainsi la Transformée inverse IHS⁻¹ par l'équation suivante où la composante I doit être substitué par la PAN avant de procéder à la transformée inverse pour retourner aux bandes RGB fusionnées :

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

Si cette technique est intéressante pour présenter des données spatiales, son inconvénient réside dans sa restriction à l'imagerie multispectrale à trois bandes, comme le soulignent les sources [10], [7] et [14].

L'importance d'estimer correctement l'intensité (I) devient évidente lorsque l'on considère l'impact d'une substitution complète sur les distorsions radiométriques. Les distorsions proviennent des différences entre l'image PAN et l'intensité I, qui affectent les signatures spectrales en modifiant les amplitudes des basses fréquences spatiales présentes dans les images MS, une technique de filtrage appliquée à l'image PAN pourrait réduire ces distorsions radiométriques. Cette technique ajoute de manière sélective les informations manquantes au composant Intensité, avant la substitution, éliminant efficacement tout chevauchement. [7] [24]

Pour ce faire, une séquence de filtrage passe-haut et passe-bas utilisant la transformée de Fourier doit être mise en œuvre à la fois sur l'image PAN et sur les modalités de la composante Intensité I, avant de procéder au processus de substitution.

I-4-1-1-1 La méthode IHS améliorée par le filtrage utilisant la transformée de Fourier

En utilisant la transformée de Fourier, il est possible de compléter les parties manquantes d'une image MS avec seulement une bande de hautes fréquence spatiales de l'image PAN correspondante. Au lieu de remplacer entièrement la composante I, cette approche consiste à remplacer uniquement sa partie haute fréquence par celle de la composante PAN. Cependant, il est nécessaire d'appliquer les filtres passe-haut et passe-bas de manière complémentaire à la fois à la composante d'intensité I et à l'image PAN. Ensuite, transformée inverse est calculée à partir de I partiellement

substitué avec H et S. Cette technique est décrite en détail dans les références [7] et [23].

Ces deux méthodes IHS et IHS améliorée par la TF restent limitées à trois bandes RGB. Les autres bandes dans le domaine invisible telle que l'infra rouge et l'ultraviolet sont négligées et ne font pas objet de fusion alors qu'elles sont d'une grande utilité comme dans des situations de faible visibilité.

I-4-2 La méthode basée sur ACP

En matière d'imagerie multi-spectrale et hyper-spectrale, l'analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais) surpasse l'IHS en termes de nombre de modalités traitées. La méthode PCA, également appelée technique Karhunen-Loeve, sert de formule mathématique qui diminue la dimensionnalité des données tout en optimisant la qualité des bandes originales avec des composants principaux minimaux. Grâce à une transformation linéaire, il déplace l'espace multi-spectral vers l'espace des vecteurs propres des données pour plus de précision.

Les N composantes principales acquises sont perpendiculaires entre elles, signifiant aucune corrélation linéaire entre elles. La totalité de la variance des N images initiales est répartie entre les N composantes PCA. La première composante acquiert la plus grande partie de cette variance, tandis que les composantes suivantes reçoivent une proportion progressivement décroissante de la variance [14] [7] [25].

En appliquant la technique PCA à une image hyper ou multi-spectrale avec sur-échantillonnage spatial, la composante principale initiale PC1 assimile toutes les données partagées des bandes d'entrée, ainsi que les informations spatiales [15]. Pendant ce temps, les composants principaux suivants collectent les informations spatiales distinctes de chaque bande, produisant de nouveaux composants principaux non corrélés. Ensuite, la bande panchromatique remplace la première composante principale (PC1). Par la suite, une transformation inverse est exécutée pour revenir à l'espace d'origine, ce qui donne de nouvelles bandes MS infusées avec les informations spatiales du PAN, qui ont été assimilées dans ces nouvelles bandes. Figure 1.3 illustre un schéma synoptique pour cette méthode.

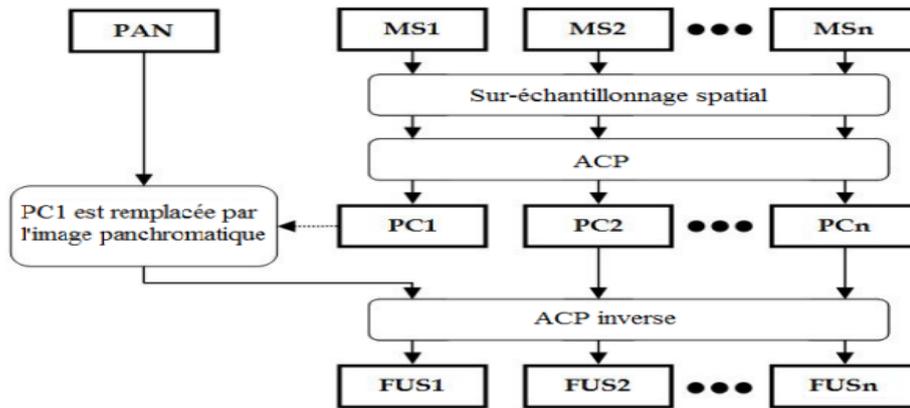


Figure 1.3 Une illustration schématique décrivant le concept de fusion utilisant l'analyse des composants principaux [15].

L'analyse PCA s'est avérée utile pour extraire les détails de la couverture terrestre à partir d'images satellites en réduisant la dimensionnalité des données tout en conservant le plus d'informations des bandes d'origine. L'un de ses avantages est la possibilité de standardiser les données, permettant le traitement de signaux avec une large gamme de dynamiques, sans biais vers une dynamique spécifique. Il permet également de traiter plus de trois bandes spectrales. Cependant, l'inconvénient est qu'il peut introduire une distorsion radiométrique importante dans le processus [15] [12].

I-4-2 Méthodes de type contribution spectrales relatives

Pour obtenir des images fusionnées, les bandes spectrales sont combinées linéairement, la combinaison dépendant de la similitude entre la plage spectrale des bandes PAN et MS. Les méthodes telles que P+XS et celles basées sur la transformée de Brovey entrent dans cette catégorie. Pour les procédures impliquant une contribution spectrale relative et leur mise en œuvre, une hypothèse essentielle de linéarité ; est que les détails spatiaux de l'image PAN sont modulés dans les images MS par multiplication de chaque bande MS ré-échantillonnée par le rapport de l'image PAN correspondante à la somme de toutes les bandes MS.

$$A_1 = \sum_{k=1}^N \alpha_k \beta_k \quad \text{avec } k = \{1 \dots N\} \quad (I-3)$$

La valeur des pondérations de bande α_k , qui sont utilisées pour la fusion, dépend de la méthode de fusion spécifique utilisée. Pour déterminer la pondération la plus appropriée, la proportion de la réponse spectrale pour la $K_{i\text{ème}}$ modalité MS est

comparée à celle de la modalité PAN. Le résultat souhaité de ces techniques de fusion est d'améliorer les hautes fréquences spatiales dans chaque modalité MS suréchantillonnée en appliquant une fonction liée à la modalité PAN [14] [1] [7] [8].

I-4-2-1 La méthode de Brovey

Nommée d'après son créateur, la méthode Brovey est une technique simple de fusion d'images qui repose sur la transformation de chromaticité pour maintenir les contributions spectrales relatives de chaque pixel. De toutes les méthodes de contribution spectrale, Brovey est la plus simple, avec des coefficients β_k fixes de 1. En prenant un produit pixel à pixel de la modalité MS rééchantillonnée à basse résolution et d'un terme de fonction de modalité PAN haute résolution, divisé par le somme des modalités MS suréchantillonnées, une image fusionnée MS_{k_0} est obtenue (Eq I-4). Cependant, cette méthode ne respecte pas la propriété de cohérence, ce qui entraîne une distorsion importante des couleurs dans l'image finale de synthèse, comme indiqué dans plusieurs études [1] [7] [14] [8].

$$MS_{k_0} = (MS_{k_1})^{interp_0} \frac{PAN}{\sum_{k=1}^N (MS_{k_1})^{interp_0}} \quad (I-4)$$

PAN : Image panchromatique

MS_{k_1} : Modalité de l'image multispectrale correspondante suréchantillonnée

N : Le nombre total des images MS.

La distorsion radiométrique est un problème courant lors de la fusion d'images en raison du manque d'ajustement de leurs moyennes et de leur dynamique, ce qui entraîne une perte de cohérence. Cependant, les dernières versions de cette méthode ont corrigé ce défaut en fusionnant la moyenne des modalités avec celle de la même modalité avant fusion, comme proposé par [7]. Par exemple, la méthode Color Normalized proposée par Vrabel en 1996 offrait une approche raffinée de la méthode de Brovey, en particulier pour $N=3$ [1].

I-4-2-2 La méthode Color Normalized

Dans le cas où $N = 3$ modalités MS (Eq I-5), cette approche particulière présente une version améliorée de la méthodologie Brovey :

$$MS_{k_0} = \frac{3((MS_{k_1})^{interp_0} + 1)(PAN + 1)}{3 + \sum_{k=1}^N (MS_{k_1})^{interp_0}} - 1 \quad (I-5)$$

PAN : Image panchromatique

MS_{k_1} : Modalité de l'image multispectrale correspondante rééchantillonnée

N : Le nombre total des images MS.

Les valeurs de niveaux de gris occupent une place d'importance uniforme. Lors de la transmission visuelle d'une expression, il est impératif que la dynamique des images reste cohérente. En utilisant des constantes de faible valeur, le problème de la division par zéro peut être contourné, garantissant un fonctionnement fluide [14] [7].

I-4-2-3 La méthode P+XS

L'agence spatiale française (CNES) a proposé la méthode de fusion P+XS pour l'imagerie satellitaire SPOT à une résolution de 10 m. La méthode repose sur l'hypothèse que les images PAN et MS sont prises par le même appareil. Sur la base du demi-pic des bandes XS_1 et XS_2 correspondant à la bande panchromatique, la méthode sur-échantillonne XS_3 , qui est faiblement corrélé à la bande panchromatique. Étant donné que deux instruments SPOT identiques peuvent capturer simultanément des images MS et PAN, la méthode est viable. La corrélation entre les images MS et PAN constitue la base de la méthode P+XS [8] [1] [7] [19].

La synthèse des images de synthèse XS_1 et XS_2 est réalisée grâce à des formules (Eq6) spécifiques, indépendantes de la troisième modalité MS XS_3 . Les auteurs, cependant, créent l'image XS_3 en dupliquant les pixels de la bande XS_3 . Il est essentiel de noter que la méthode P+XS diffère des méthodes précédentes, car elle utilise des luminances dérivées de l'application d'une fonction d'étalonnage aux niveaux de gris [14], au lieu de travailler uniquement avec des niveaux de gris.

La méthode de fusion de la méthode PX-S est la suivante :

$$XS_1 = \frac{2.PAN.MS_R}{MS_R + MS_G} \quad XS_2 = \frac{2.PAN.MS_G}{MS_R + MS_G} \quad (I-6)$$

Le principal avantage de l'utilisation des techniques IHS, Brovey et P+XS est qu'elles améliorent considérablement la qualité visuelle des éléments structurels dans les images. Ces méthodes sont généralement acceptées comme satisfaisantes pour la plupart des applications liées à la cartographie et peuvent identifier efficacement des cibles ou des phénomènes spécifiques (Yocky, 1996) [34]. Cependant, l'inconvénient de ces approches est qu'elles ont tendance à fausser les propriétés radiométriques. Il en résulte des altérations des signatures spectrales, c'est-à-dire des variations de couleur dans les modalités MS synthétisées (Wald, 2002) [36]. Pellemans et al. (1993) [35] soulignent que de telles méthodes ne conviennent pas à la surveillance de la végétation en raison de la distorsion radiométrique résultant de basses fréquences non cohérentes des modalités MS originales (Shi et al, 2005) [37] [1].

I-4-3 Le concept d'ARSIS (ou Les méthodes de transformations de type ARSIS)

Le concept d'ARSIS (Enhancement of Spatial Resolution by Injection of Structures) est basé sur l'idée que les images multi-spectrales (MS) à basse résolution spatiale ne manquent que d'informations à haute fréquences spatiales [1]. ARSIS consiste à identifier et à extraire des structures avec des fréquences spatiales dans une plage spécifique pour combler les lacunes.

Ce type de méthodes, dit ARSIS, utilise une transformée permettant de passer du domaine spatiale vers le domaine des fréquences spatiales. Différents travaux, dans la littérature, utilisent différentes transformées telle que la TF, la Transformée en Ondelettes (TO) et d'autres transformées [19], [39]. De plus, les méthodes de type ARSIS, après extractions des structures, manquantes dans les bandes MS, à partir de l'image PAN ne procèdent pas à les injecter identiquement aux différentes bandes MS afin d'éviter toute distorsion spectrale (radiométrique) due à l'injection de la même énergie dans toutes les bandes MS mais procèdent plutôt à définir (calculer) des pondérations permettant de distribuer énergétiquement, adéquatement, les détails spatiaux (hautes fréquences spatiales). Pour définir ces pondérations, plusieurs approches, dans la littérature sont utilisées. Généralement, ces pondérations sont définies à partir des réponses spectrales des senseurs fournissant ces images et en analysant les différents niveaux/échelles (cas de la TO). Ce processus de distribution des énergies HF spatiales sur les différentes modalités MS s'appelle le modèle d'injection.

Afin d'illustrer ce type ARSIS, l'analyse par la TO sera utilisée. Utilisant une image PAN de haute résolution spatiale et une image MS de résolution spatiale inférieure, la méthode ARSIS utilisant l'analyse multi-résolution et la transformée en ondelettes

pour extraire les détails de la première et les intégrer dans la seconde. Cette technique améliore les structures de l'image spatialement supérieure et les injecte dans chaque image MS. La notion d'analyse multi-résolution, telle que présentée par Mallât en 1989[38], permet de représenter une image à travers une série d'approximations, chacune à une résolution progressivement plus grossière [26].

L'idée d'analyse multi-résolution est mieux décrite à travers une pyramide (Figure 1.4) qui présente des images haute résolution et basse résolution spatiale. La base de la pyramide présente l'image originale, tandis que ses niveaux successifs possèdent ses approximations à des résolutions progressivement plus grossières. Au sommet de la pyramide, l'approximation est condensée à un seul pixel. Les bases de la pyramide ont des longueurs différentes qui sont proportionnelles au rapport de leurs résolutions spatiales. L'objectif de la méthode est de compléter la pyramide basse résolution avec des détails de la pyramide haute résolution, ce qui est accompli grâce à ses coefficients d'ondelettes qui ont des informations sur les structures d'échelle entre les résolutions RHR et RBR. La fonction de la méthode ARSIS est de n'inclure que les petites structures manquantes dans l'image basse résolution sans altérer les structures existantes. L'objectif est de générer une image MS artificielle de qualité supérieure, possédant des caractéristiques statistiques similaires à l'image MS primaire. Il doit être exempt d'artéfacts altérant l'image [16] [18] [17].

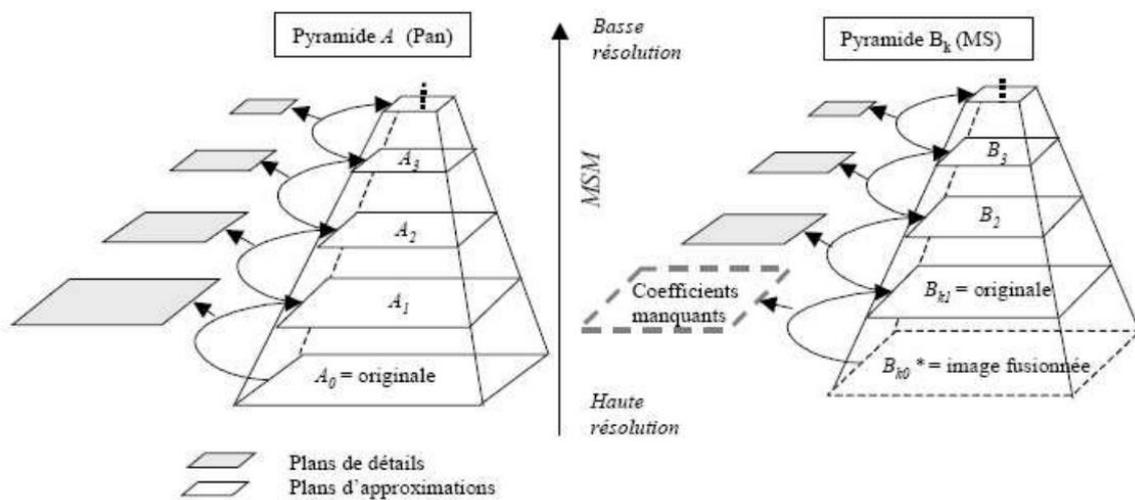


Figure 1.4 : pyramides multi-résolutions [7] [5]

Trois catégories distinctes de modèles ARSIS peuvent être dérivées de ces étapes ci-dessous [21] :

- La classe MSM (Modèles Multi-échelles) traite les descriptions hiérarchiques des contenus spatiaux A et B à l'aide de transformations basées sur des modèles

multi-échelles telles que les transformées en ondelettes, les pyramides de Laplace généralisées, etc. MSM fournit une (ou plusieurs) images de détail représentant les hautes fréquences spatiales et une image d'approximation contenant les basses fréquences de l'image. C'est-à-dire que ce type de MSM^{-1} doit être réversible pour synthétiser des informations à haute fréquence ;

- La classe IMM entre en jeu lors de la recherche de similitudes entre les images A et B ;
- La classe HRIMM est responsable du calcul des plans de détail manquants pour les images B. La synthèse des images fusionnées nous ramène au premier modèle inverse MSM^{-1} ;

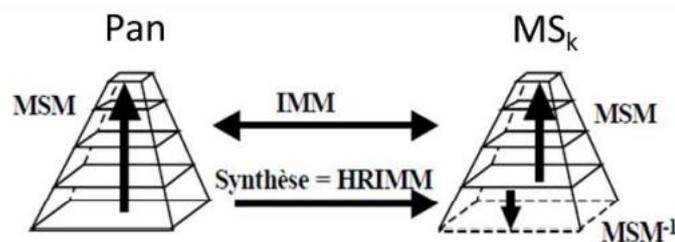


Figure 1.5 : Concept ARSIS utilisant la TO [1]

I-4-3-1 Méthode de type ARSIS basée sur la Transformée de Fourier

Comme toujours, l'image MS est floue en raison de sa faible résolution spatiale, et c'est l'image PAN qui détient les informations cruciales. Les structures des hautes fréquences (HF) de la modalité PAN en sont responsables. En appliquant un filtre passe-haut sur l'image panchromatique, la HF peut être extraite et ajouté aux modalités d'image MS

Afin d'injecter les données des HF dans l'image MS, un suréchantillonnage par interpolation est nécessaire. L'objectif est d'atteindre la même définition spatiale que l'image PAN, tout en évitant l'introduction de distorsion spectrale due à l'injection de fréquences en excès. Les deux images PAN et MS sont ensuite respectivement soumises à un des filtres passe-haut et passe-bas complémentaires à une fréquence de coupure f_c adaptée à la résolution spatiale de l'image MS initiale. Selon le théorème de Nyquist, la fréquence de coupure f_c de ces filtres doit correspondre à la faible résolution spatiale initiale de l'image MS [1] [7] :

$$f_c = \text{freq}_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \tag{I-7}$$

Où:

Δx : fait référence à la taille de chaque pixel en mètres ou représente la période spatiale d'échantillonnage.

$f_c = \text{freq}_{\max}$: La fréquence spatiale maximale de l'image MS et qui doit être au même temps la fréquence de coupure des deux filtres complémentaires afin de ramener les hautes fréquences spatiales manquante dans la MS à partir de la PAN.

La méthode ARSIS, qui utilise la transformée de Fourier, est illustrée dans la figure ci-dessous :

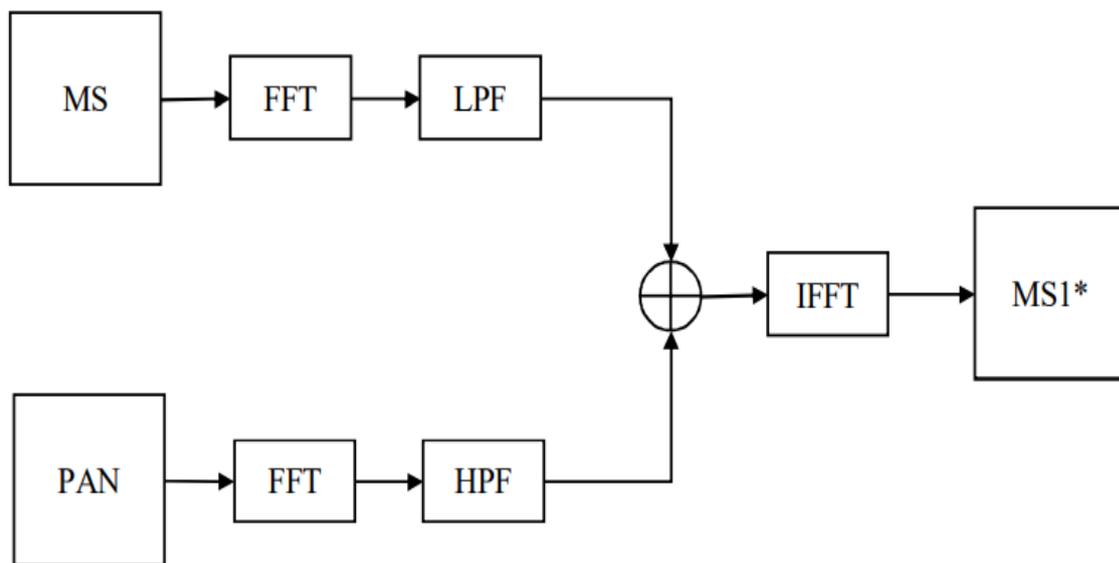


Figure 1.6 : Diagramme de la fusion par FFT

I-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'état de l'art de la fusion d'images satellitaires, présenté trois types de méthodes de fusion qui permettent de fusionner des images multi-spectrales de faible résolution spatiale ayant de haute résolution spectrale avec des images ayant de faible résolution spectrale au profit de leurs hautes résolution spatiale et qui sont les images PAN. En commençant par le problème en question, nous nous sommes penchés ensuite sur une sélection de méthodes actuellement employées. Chacune de ces techniques offre l'avantage d'une meilleure qualité visuelle, notamment en ce qui concerne les structures de l'image. Notamment, les

méthodes IHS, Brovey, P+XS et ARSIS se sont avérées produire des images avec une qualité géométrique satisfaisante.

Bien que les méthodes mentionnées ci-dessus offrent certains avantages, elles présentent un inconvénient notable, à savoir la distorsion radiométrique. Cette distorsion entraîne une modification des couleurs des modalités MS en cours de synthèse, impactant les signatures spectrales. La distorsion provient des altérations des basses fréquences spatiales des modalités MS originales, ce qui finalement affecte leur propriété de cohérence. Cependant, les méthodes ARSIS contournent ce problème grâce à l'utilisation de filtres complémentaires de la Transformée de Fourier. Il en résulte la restauration des signatures spectrales et l'absence de distorsion dans les modalités MS synthétisées.

Le chapitre 2 se concentre sur la mise en œuvre et l'analyse critique des différentes méthodes décrites au chapitre 1. L'objectif est de sélectionner une technique de fusion efficace et de l'améliorer davantage dans le prochain chapitre de ce mémoire.

CHAPITRE 2 :

ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

II-I Introduction

Nous avons, dans le chapitre précédent abordé ‘l’état de l’Art de la fusion d’image satellitaire’, inventorié les différents types des méthodes avec leurs défauts et prérogatives. Ce qui nous permettra, dans ce chapitre qui suit, de faire une analyse profonde et détaillée de chaque méthode citée précédemment. Nous avons mis en œuvre entre autre :

- Les méthodes de type projection-substitution
 - La méthode IHS « Intensity Hue Saturation » et
- Les méthodes de type contribution spectacle relative
 - La méthode de Brovey,
 - La méthode CN « Color Normalized » et
 - La méthode P+SX,
- La méthode de type ARSIS
 - La fusion utilisant la transformée de Fourier

Sur la base d’une analyse qualitative ou dite visuelle ainsi que, partant de l’indisponibilité de l’image idéale, d’un ensemble spécifique de mesures quantitatives faisant appel à des critères statistiques, nous procéderons à une comparaison de chaque méthode par rapport à d’autre à travers une étude descriptive des résultats d’images combinés fournis par chaque méthode.

II-2 Prétraitement

Notons que, les images brutes n’ont généralement pas les mêmes paramètres (taille, références, etc.), il est donc primordial de faire quelques traitements sur les images pour optimiser et contrer les risques d’erreur possible avant la fusion. Prétraitement comme son nom l’indique est l’étape avant le traitement, l’étape pendant laquelle les images brutes sont nettoyées et structurées en vue de l’étape du traitement. Pendant cette phase, les données brutes sont vérifiées afin de trouver d’éventuelles erreurs. Le but est d’extraire de l’image les données de mauvaise qualité (redondances et les incohérences), d’éviter l’apparition des problèmes susceptibles dans une démarche de fusion d’images individuelles (tels que le changement de conditions atmosphériques, de paysage entre les deux acquisitions, le problème lieu au recalage entre les deux images). Il est donc nécessaire de corriger géométriquement et radio-métriquement l’image avant la fusion et créer les données de haute qualité afin de garantir la qualité des images fusionnées [7] [17].

Le prétraitement nécessaire à la fusion se fait en deux étapes :

II-2-1 Le ré-échantillonnage des images

La fusion d'images ne peut être effectuée en manipulant deux images à résolutions spatiales différentes. Pour surmonter cette limitation, un prétraitement qui est le ré-échantillonnage est utile, qui consiste à ajuster les dimensions en pixels d'une image en diminuant (sous-échantillonnage) ou en augmentant (sur-échantillonnage) sa taille. Dans ce cas, le sur-échantillonnage est l'objectif, car il implique l'ajout de pixels par interpolation à une image. En sur-échantillonnant les images MS, il devient possible d'obtenir une résolution qui correspond à celle des images PAN. Cela permet une fusion d'images réussie.

II-2-2 Le recalage des images

Le problème de recalage est la contrainte de superposition des images à fusionner, même si les images sont sur-échantillonnées, du fait des différences géométriques entre les images fusionnées. La source de cette difficulté réside dans des capteurs qui ne sont pas forcément sur la même plate-forme. Ces images doivent donc être préalablement corrigées pour obtenir une image corrigée géométriquement, afin que chaque point puisse être superposé à sa carte planaire correspondante. Pour qu'il y ait une vraie correspondance physique entre les pixels, la qualité de la fusion va donc dépendre de cette correction géométrique entre les deux images. Ce qui fait que le recalage des images est une étape majeure avant d'effectuer la fusion.

En dehors de ces étapes, on peut également mentionner le prétraitement suivant [1] :

- La correction atmosphérique se produit lorsque l'atmosphère agit comme un filtre entre la surface de la Terre et les capteurs de la plate-forme, modifiant par la suite les résultats (par exemple la luminosité) de l'image reçue ;
- La différence entre le moment de l'acquisition et la date à laquelle les images ont été prises est un autre critère important pour sélectionner les images à fusionner. Si l'intervalle de temps entre la prise des images d'entrée est trop long, l'image fusionnée peut être corrompue. Par conséquent, il est recommandé de combiner les images avec la même date d'enregistrement pour éviter les différences de phénologie, de climat, etc. Des incohérences peuvent survenir qui interfèrent avec les compositions colorées.
- Le rapport entre les résolutions spatiales des images d'entrée ; afin d'améliorer la qualité de l'image fusionnée, il existe une certaine limite de rapport. Sinon,

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

l'image fusionnée sera dégradée si cette limite est dépassée. Cette limite est notée R_{Res} , le rapport de résolution est le suivant [1] :

$$R_{Res} = \frac{FR}{HR} \quad \text{II.1}$$

Avec :

FR : faible résolution spatiale (taille du pixel au sol) ;

HR : haute résolution spatiale (taille du pixel au sol).

En faisant le choix des images à fusionner, il est préférable de respecter un ratio inférieur à 5

Lors de la sélection des images à fusionner, il est préférable de respecter un rapport inférieur à 5. En effet, la sélection d'une valeur plus grande, qui correspond à une plus grande différence de résolution spatiale des images, entraînerait deux résultats négatifs. Premièrement, cela rendrait la fusion des images arbitraire, et deuxièmement, cela conduirait à un agencement non sélectif des valeurs spectrales dans l'image fusionnée [2].

II-3 Les méthodes d'évaluation de la qualité de l'image fusionnée

Afin d'évaluer l'efficacité des techniques de fusion d'images, il est crucial d'évaluer la qualité de l'image résultante. En règle générale, la qualité est mesurée en comparant l'image fusionnée à une image de référence idéale, bien que cela ne soit pas toujours possible en raison de l'inaccessibilité. Dans de tels cas, des techniques de mesures quantitatives statistiques sont employées. Le processus d'évaluation prend en compte divers paramètres, notamment la résolution spatiale et spectrale, le contraste, la visibilité et la qualité des données. Pour évaluer l'image, différentes méthodes peuvent être employées, classées en deux aspects.

- La mesure qualitative repose sur des méthodes visuelles, mettant l'accent sur les aspects subjectifs de l'analyse des données.
- La mesure quantitative est la composante numérique reposant sur des mesures statistiques.

II-3-1 L'analyse qualitative

En matière d'analyse qualitative, la subjectivité règne en maître. L'expérience, les connaissances et même l'acuité visuelle jouent un rôle dans les critères d'évaluation, ce

qui entraîne des incertitudes potentielles et des résultats variés. Bien que cette approche ne soit pas toujours efficace, l'analyse visuelle peut rapidement éclairer des problèmes tels que les distorsions spectrales et les zones floues dans les images fusionnées. Pour effectuer une analyse qualitative, il faut comparer l'image fusionnée avec les modalités multispectrales et les images panchromatiques d'origine, tant qu'elles sont accessibles.

II-3-2 L'analyse quantitative

Afin d'assurer l'objectivité de leur analyse, les méthodes statistiques sont utilisées pour évaluer les images fusionnées plutôt qu'une analyse qualitative subjective. Il existe deux approches de l'analyse quantitative : l'approche de l'image de référence et l'approche de l'image sans référence : cas de l'image fusionnée, cette dernière étant l'objet de leur étude. Dans cette approche, des méthodes statistiques telles que le coefficient de corrélation (CC), coefficient de corrélation spatial (SCC), l'indice de similarité structurelle (SSIM : structural similarity index measure), et la moyenne des indices locaux de similarité structurelle (MSSIM : Mean structural similarity index measure) sont utilisées pour évaluer la qualité de l'image. On va se baser sur les critères d'évaluation les plus couramment utilisés pour effectuer une analyse quantitative sur les images fusionnées produites par différentes méthodes de fusion [24] [8].

Les deux types de mesures, qualitative et quantitative, sont nécessaires et indispensables dans l'évaluation de la qualité de fusion. Souvent, les deux résultats évoluent dans le même sens en termes de la satisfaction ou non du produit de la fusion. Dans les cas où les deux types de mesure se contredisent, une justification à cet égard doit être menée.

II-3-2-1 Le coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation (CC), est un calcul global pour l'image entière. La similarité des structures de petite taille entre les pixels fusionnés et originaux peut être déterminée à l'aide du coefficient de corrélation, qui est un indice quantitatif largement utilisé. Ce coefficient est essentiel pour indiquer l'intégrité spectrale qui existe entre chaque bande de la référence et l'image affinée. Cependant, il convient de noter que le coefficient de corrélation n'est peut-être pas la meilleure option pour une discrimination subtile des éventuels artefacts de netteté, car il est insensible au gain et au biais constants entre deux images.

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

Le coefficient de corrélation entre l'image fusionnée et l'image originale est donné par la formule suivante [10] :

$$CC(A, B) = \frac{\sum_{mn}(A_{mn}-\bar{A})(B_{mn}-\bar{B})}{\sqrt{(\sum_{mn}(A_{mn}-\bar{A})^2)(\sum_{mn}(B_{mn}-\bar{B})^2)}} \quad \text{II-2}$$

Où \bar{A} et \bar{B} indiquent les valeurs moyennes de jeu de donnée correspondant, et le résultat de cette équation indique la similarité entre les petites structures de l'image originale (A) et l'image fusionnée (B). Lorsque le coefficient de corrélation est proche de 1 c'est-à-dire qu'il y a une forte similarité et par contre, pour un coefficient de corrélation proche de zéro désigne une faible similarité [8] [10].

II-3-2-2 SCC (Coefficients de corrélation spatiale)

Pour évaluer la qualité spatiale d'une image fusionnée, ses informations spatiales détaillées doivent être comparées à celles de l'image MS haute résolution de référence. Seules quelques métriques quantitatives ont été trouvées dans la littérature pour évaluer la qualité spatiale des images fusionnées [8]. Les coefficients de corrélation spatiale sont des indicateurs qui permettent de mesurer la similarité entre les valeurs d'une variable dans différentes zones géographiques. Ils sont utilisés en géostatistique pour l'analyse spatiale des données [33].

Pour évaluer les similitudes entre les détails spatiaux, un filtre dérivateur est appliqué aux images, puis le CC entre les images résultantes est calculé. Cette grandeur est aussi appelée coefficient de corrélation spatiale SCC. Les auteurs dans [7] et [8] ont utilisé le filtre Laplacien donné par :

$$F = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{II-3}$$

Les coefficients de corrélation élevés entre l'image filtrée fusionnée et l'image filtrée de référence (SCC) indiquent que la plupart des informations spatiales de l'image de référence ont été incorporées pendant le processus de fusion. La valeur idéale est 1.

II-3-2-3 La mesure de l'indice de similitude structurelle

Le système de mesure SSIM (Structural Similarity Index Measure) est une méthode qui combine la comparaison de trois paramètres : luminosité, contraste et structure (contour), et peut être appliqué localement sur fenêtre 8×8 pour avoir le MSSIM. Les auteurs dans [32] soutiennent que le choix de la taille de la fenêtre est la principale critique de cette mesure, car il existe un compromis entre les grandes et les petites tailles de fenêtre. En effet, les grandes fenêtres ne sont pas propices à une bonne localisation des petites distorsions, qui finissent par être indétectables. Par conséquent, ces petites déformations ne peuvent pas être mesurées. D'un autre point de vue, les petites fenêtres parviennent à mesurer de petites déformations, mais ne permettent pas d'avoir des mesures plus importantes [4]. De ce fait, il est sage d'effectuer les deux mesures : SSIM pour la mesure globale et MSSIM sur petites fenêtres 8x8 pour la mesure locale.

L'expression qui définit l'indice de similarité structurelle (SSIM) est [7] :

$$SSIM(A, B) = \frac{(2\bar{A}\bar{B}+C_1)(2\sigma_{AB}+C_2)}{(\bar{A}^2+\bar{B}^2+C_1)(\sigma_A^2+\sigma_B^2+C_2)} \quad \text{II-4}$$

Où

\bar{A} et \bar{B} : Les moyennes de chacune des images originale (A) et fusionnée (B).

σ_A et σ_B : sont respectivement les variances de A et de B. Et

σ_{AB} : La covariance de A et B.

Lorsque

$(\bar{A}^2 + \bar{B}^2)$ Ou/et $(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)$ se rapprochent de zéro [23], C_1 et C_2 Sont des variables introduites pour stabiliser la division, lorsque $\bar{A}^2 + \bar{B}^2$ et $\sigma_A^2 + \sigma_B^2$ sont proche de 0. Les deux variables sont décrites par les équations suivantes, dont K_1 et K_2 sont significativement inférieures à un et L, désigne la plage dynamique et équivaut à 255 pour les images codées sur 8 bits.

$$C_1 = (K_1L)^2 \quad \text{Et} \quad C_2 = (K_2L)^2 \quad \text{II-5}$$

En analysant 3 facteurs distinctifs - perte de corrélation, distorsion de luminance et distorsion de contraste - l'indice SSIM mesure la différence entre deux images [24].

Pendant ce temps, l'indice MSSIM (Mean Structural Similarity Index Measure) est calculé sur la base des imgettes créées par division de fenêtre.

$$\text{MSSIM} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \text{SSIM}(A, B) \quad \text{II-6}$$

L'image est divisée en N imgettes.

II-4 Résultats expérimentaux

Ce segment des résultats expérimentaux se concentre sur une évaluation comparative des techniques de fusion. Notre analyse commencera par une évaluation qualitative suivie d'une mesure quantitative des images fusionnées de chaque méthode.

En matière d'analyse, il existe deux approches principales : qualitative et quantitative. Le premier repose sur l'observation de l'utilisateur, tandis que le second se base sur une évaluation de mesure de similarité utilisant des critères statistiques tels que le CC, SCC, SSIM et MSSIM.

L'image PAN sera comparée avec :

- L'image PAN sera comparée avec chaque bande sur-échantillonnée de l'image MS originale avant la fusion et Chaque bande suréchantillonnée de l'image MS fusionnée afin de mesurer l'apport des détails spatiaux à l'image MS et donc l'amélioration de sa résolution spatiale ;
- L'amélioration de la résolution spatiale de l'image MS causerait des distorsions spectrales (couleurs) et une mesure de cette distorsion doit donc être effectué entre chaque bande sur-échantillonnée de l'image MS originale avec sa bande correspondante de l'image MS fusionnée ;

Le satellite Ikonos a fourni deux images de la ville de Guaxupé, Sao Paulo, Brésil, illustrées à la figure 2.1. La première image, (a), PAN, bénéficie d'une résolution de 1 m. Pendant ce temps, la deuxième image, (b), MS présente une résolution de 4 m [24] [7].

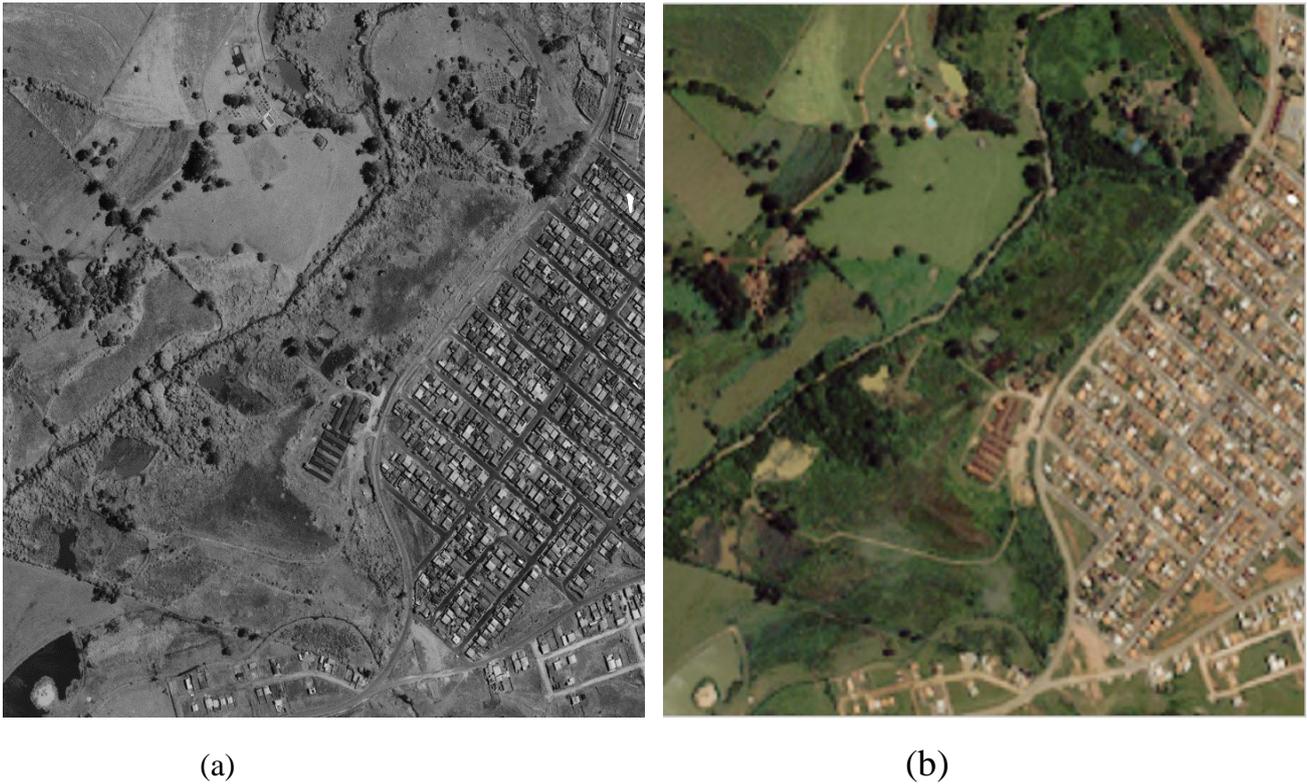


Figure 2.1 : Une Paire d'images Ikonos : (a) image PAN, (b) Image MS sur-échantillonnée.

II-4-1 La mesure qualitative

Le duo d'images de la figure 2.1 souffre d'une perte de résolution spatiale en raison de sa taille d'affichage non relative. Cependant, pour comparer l'image fusionnée avec des modalités multispectrales à l'image panchromatique d'origine, nous devons réduire la taille de l'image tout en omettant des sections insignifiantes. En limitant notre analyse aux seules parties pertinentes de l'image, y compris les plantes et les infrastructures, nous pouvons mieux scruter les détails et les concepts colorimétriques.



(a)

(b)

Figure 2.2 : Portions des images PAN et MS : (a) portion de l'image PAN, (b) portion de l'image MS

Pour chaque image combinée, nous remplacerons l'image complète par ses composants spatialement tronquées afin de bien réaliser les analyses qualitatives.

II-4-1-1 Analyse expérimentale qualitative de projection-substitution

La figure 2.3-c confirme que la méthode IHS, appliquée à une image MS fusionnée, améliore drastiquement sa résolution spatiale mais se fait au détriment de la résolution spectrale. Comme le montre la Figure 2.3-b, les informations de couleur sont déformées par rapport à l'image MS. Cela est principalement dû à la substitution entière entre les composants PAN et I, bien que les fréquences spatiales communes partagées avec l'image MS suréchantillonnée aient dû être éliminées avant la substitution.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.3 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par IHS

II-4-1-2 Analyse expérimentale qualitative des méthodes contribution spectrale relative

Les figures-2.4-c, d, e fournissent une représentation visuelle de la dégradation spectrale subie par l'image MS fusionnée obtenue par des méthodes de contribution spectrale relative telles que Brovey, CN et P+XS. Ces méthodes supposent une linéarité entre les images multi-spectrale et panchromatique, ce qui entraîne des

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

résultats sous-optimaux dans la plupart des cas. Cependant, le CNES a utilisé avec succès la méthode P+XS, spécifiquement développée pour SPOT1-4, avec une base de données qui vérifie l'hypothèse de la méthode, la rendant plus adaptée à des scénarios spécifiques [7].

Au premier regard sur l'image réalisée par la méthode de Brovey (figure 2.4-c), il est évident que sa résolution spectrale a été fortement déformée. En effet, le contraste visuel sur toute son unité a été augmenté à un degré extrême. Pour contrer ce problème, une solution a été proposée dans [2], qui consiste à soustraire l'intensité de l'image MS de l'image PAN avant d'appliquer la méthode de fusion Brovey.

D'autre part, l'image créée à l'aide de la méthode Color Normalized (figure 2.4-d) présente des caractéristiques uniques qui diffèrent de celles de la méthode Brovey. Bien qu'il y ait encore une certaine distorsion spectrale notable due à une augmentation significative de la luminosité, les objets sont plus visibles, ce qui les rend plus faciles à distinguer. De plus, cette méthode offre une résolution spatiale plutôt acceptable car même les plus petits détails peuvent être clairement observés.

S'agissant de l'image produite par P+XS (CNES) dans la figure 2.4-e présente une teinte rougeâtre sur les infrastructures et les routes due à l'omission de la troisième modalité MS dans l'équation de fusion. Bien que cette modalité n'ait pas été utilisée, elle ne doit pas être ignorée car elle a été suréchantillonnée. Cependant, le suréchantillonnage en soi n'est pas une méthode de fusion crédible conduisant à un résultat visuel médiocre. Quoi qu'il en soit, la résolution spatiale de l'image est louable.



(a)

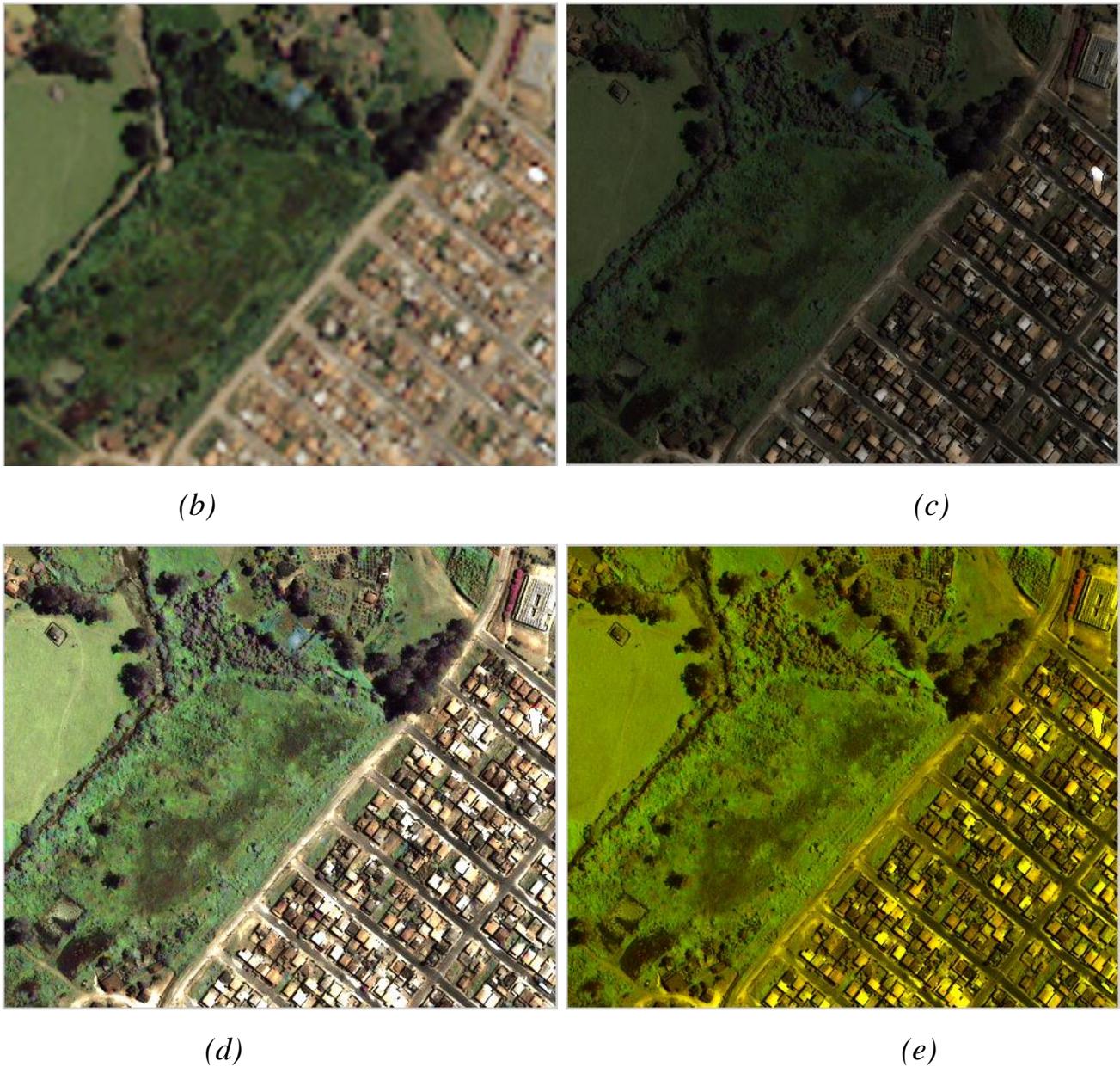


Figure 2.4 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par Brovey, (d) image fusionnée par Color Normalized, (e) image fusionnée par P+XS (CNES)

II-4-1-3 Analyse expérimentale qualitative de la méthode d'ARSIS par injection

Nous trouvons le résultat de cette méthode satisfaisant, malgré une légère distorsion spectrale, surtout par rapport aux autres techniques employées précédemment. Grâce au processus de filtrage complémentaire qui évite toute dégradation spectrale ou spatiale, et à l'utilisation de TF pour un filtrage adéquat des bandes souhaitées, le résultat est nettement amélioré tant spatialement et spectralement. Néanmoins, de

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

légères distorsions des signatures spectrales peuvent être perçues et qui sont due à l'injection de la même quantité énergétique des HF spatiales dans toutes les bandes MS.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.5 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par ARSIS

II-4-2 La mesure quantitative

Dans la phase d'analyse quantitative de notre étude, nous avons comparé les attributs spectraux et spatiaux des images PAN, MS et MS fusionnées.

Pour recueillir des données, nous avons créé des tableaux avec des résultats dérivés de diverses mesures quantitatives, telles que CC, SCC, SSIM et MSSIM. Cependant, l'analyse ne s'est pas limitée à une partie tronquée de l'image. Au lieu de cela, nous avons considéré l'intégralité de l'image fusionnée pour garantir des résultats complets. Cette approche nous permettra de mener à bien les analyses qualitatives et quantitatives.

II-4-2-1 Analyse quantitative entre l'image PAN et les images MS avant et après la fusion

Les résultats des méthodes analytiques quantitatives sont illustrés dans le tableau-2-1, qui affiche les mesures entre les modalités MS et la PAN fusionnées avant et après fusion. Avant la fusion, les indices SCC et CC entre l'image PAN et l'image MS suréchantillonnée sont relativement faibles, indiquant une différenciation significative entre la PAN et les diverses modalités MS en termes, respectivement, de caractéristiques spatiales et spectrales.

Cela a été en outre mis en évidence par les faibles valeurs de leur indice SSIM, mais au niveau des modalités NIR il y'a une corrélation positive faible entre les deux variables $CC_{pan-NIRF}=0.5679$ $SSIM_{pan-NIRF}=0.5882$. Le SSIM effectue une mesure globale de similitude concrétisée par l'évaluation de perte de corrélation, distorsion de luminance et distorsion de contraste tandis que le critère MSSIM le fait localement sur des imagerie.

Les données pour les mesures quantitatives, qui, pour l'image PAN avec chaque modalité MS fusionnée - à la fois avant et après la fusion - en fonction du type de méthode, se trouvent dans le tableau 2.1 ci-dessous.

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

		calcul				
		inter-modalités	CC	SCC	SSIM	MSSIM
PAN-MS suréchantillonnées (Avant la fusion)		$pan - M_{RS}$	0.1951	0.1386	0.3302	0.8769
		$pan - M_{GS}$	0.3307	0.1475	0.4699	0.8916
		$pan - M_{BS}$	0.2184	0.1366	0.3718	0.8736
		$pan - M_{NIRS}$	0.5679	0.1481	0.5882	0.8947
Projection-Substitution	Les méthodes					
	IHS	$pan - M_{RF}$	0.9404	0.9971	0.8238	0.9638
		$pan - M_{GF}$	0.8877	0.9952	0.7654	0.9461
		$pan - M_{BF}$	0.9018	0.9940	0.6311	0.8993
		$pan - M_{NIRF}$	-	-	-	-
	BROVEY	$pan - M_{RF}$	0.7098	0.9134	0.5209	0.8739
		$pan - M_{GF}$	0.8093	0.9334	0.5541	0.8773
		$pan - M_{BF}$	0.7206	0.9066	0.3759	0.8330
		$pan - M_{NIRF}$	0.7805	0.8737	0.6593	0.9012
contribution Spectrale Relative	CN	$pan - M_{RF}$	0.7113	0.9103	0.6498	0.9519
		$pan - M_{GF}$	0.8206	0.9369	0.7522	0.9668
		$pan - M_{BF}$	0.7381	0.9197	0.7321	0.9525
		$pan - M_{NIRF}$	0.7805	0.8728	0.5793	0.9226
ARSIS	P+XS	$pan - M_{RF}$	0.7099	0.9229	0.7075	0.9462
		$pan - M_{GF}$	0.8168	0.9439	0.8130	0.9620
		$pan - M_{BF}$	0.7232	0.9181	0.6674	0.9189
		$pan - M_{NIRF}$	0.5679	0.1481	0.5882	0.8947
TF	$pan - M_{RF}$	0.6844	0.9924	0.7183	0.9837	
	$pan - M_{GF}$	0.8159	0.9958	0.8443	0.9901	
	$pan - M_{BF}$	0.7774	0.9683	0.7735	0.9680	
	$pan - M_{NIRF}$	0.8313	0.9819	0.8285	0.9911	

Tableau 2.1 : Mesure quantitative, entre PAN et les bandes MS suréchantillonnées - à la fois avant et après la fusion - .

Selon le tableau 2.1, la méthode IHS de type projection-substitution produit des résultats remarquablement exceptionnels et rationnels pour la qualité spatiale. Cela est principalement dû à la substitution complète de la composante d'intensité (I) de

l'image PAN, ce qui entraîne une résolution spatiale plus élevée. La modalité NIR, cependant, n'a pas été prise en compte car la matrice de transformation de modèle géométrique IHS est limitée à seulement trois bandes. Le tableau 2.1 montre également que les $CC_{pan-RF}=0.9404$, $SCC_{pan-RF}=0.9971$ produits par la modalité Rouge sont significativement plus élevés que les autres types de méthodes. En revanche, le type de contribution spectrale relative, ont presque des valeurs de CC identiques avec des différences mineures, illustré par la méthode P+XS, a un $CC_{pan-RF}=0.7099$, $SCC_{pan-RF}=0.9229$, tandis que le type ARSIS utilise le TF $CC_{pan-RF}=0.6844$ et $SCC_{pan-RF}=0.9924$. Cela indique que l'image fusionnée IHS a une meilleure résolution spatiale et plus de détails spatiaux que les autres méthodes.

Contrairement à l'analyse qualitative qui conclue une dégradation des images fusionnées pour les méthodes de types Contribution Spectrales Relatives (Brovey, CN et P+XS). Sur le tableau 2-1, les méthodes de type contribution spectrale relative affichent une forte similarité entre les modalités MS fusionnées et l'image PAN lors de l'analyse de leur similarité structurelle (SSIM), cette contradiction se justifie par le fait de dégradation uniformément et globalement répartie sur l'image fusionnée ce qui se traduit par un SSIM proche de 1. Pour pouvoir distinguer quantitativement ce type de dégradations globales (sous forme d'un film perçue sur l'image entière), on fait appel à une mesure locale des similarités concrétisée par le MSSIM et qui donnent des mesures amies avec l'analyse visuelle pour les méthodes présentant des dégradations spectrales.

Il est important de reconnaître que la méthode TF de type ARSIS présente une similitude structurelle supérieure par rapport à la fois au type projection-substitution et au type de contribution spectrale relative. Cela est vrai pour les quatre modalités, R, G, B et NIR. Par exemple, $MSSIM_{pan-NIRF}=0.9911$, $MSSIM_{pan-GF} = 0.9901$, $MSSIM_{pan-RF}=0.9837$ $MSSIM_{pan-BF}=0.9680$, qui dépassent tous les valeurs des autres méthodes. Ces résultats suggèrent que le filtrage et l'injection de détails spatiaux au cours du processus d'extraction ont réussi.

II-4-2-2 Analyse quantitative entre les MS suréchantillonnées et les MS fusionnées

Afin de mesurer la dégradation des signatures spectrales lors de l'amélioration de la résolution spatiale de l'image MS, les données présentées dans le tableau 2-2 comprennent des mesures quantitatives obtenues en comparant les modalités MS suréchantillonnées et les MS fusionnées, classées par type de méthode.

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

Type des méthodes	Les méthodes	calcul			
		inter-modalités	CC	SSIM	MSSIM
Projection-Substitution	IHS	M_{RS-Rf}	0.3717	0.4271	0.9168
		M_{GS-Gf}	0.1148	0.3099	0.9054
		M_{BS-Bf}	0.2635	0.4480	0.9070
		M_{NIR_s-NIRf}	-...	-...	-...
contribution Spectrale Relative	BROVEY	M_{RS-Rf}	0.7587	0.5167	0.8878
		M_{GS-Gf}	0.7480	0.5489	0.8899
		M_{BS-Bf}	0.7558	0.5723	0.9027
		M_{NIR_s-NIRf}	0.9158	0.6063	0.8902
	CN	M_{RS-Rf}	0.7666	0.7366	0.9143
		M_{GS-Gf}	0.7496	0.6838	0.9087
		M_{BS-Bf}	0.7555	0.7115	0.9301
		M_{NIR_s-NIRf}	0.9249	0.8406	0.9205
P+XS	M_{RS-Rf}	0.7560	0.7671	0.9313	
	M_{GS-Gf}	0.7369	0.7527	0.9306	
	M_{BS-Bf}	0.7476	0.7845	0.9486	
	M_{NIR_s-NIRf}	1	1	1	
ARSIS	TF	M_{RS-Rf}	0.6651	0.7114	0.8869
		M_{GS-Gf}	0.6314	0.6942	0.8981
		M_{BS-Bf}	0.5661	0.6536	0.8953
		M_{NIR_s-NIRf}	0.7701	0.7912	0.8993

Le tableau 2.2 : les mesures quantitatives obtenues entre les modalités MS suréchantillonnées et les MS fusionnées, classées par type de méthode.

A partir du tableau-2-2, pour toutes les méthodes présentant des dégradations spectrales plus ou moins significatives, d'une méthode à l'autre. De type projection-substitution ou de type contribution spectrale relative qui injecte la modalité PAN dans son intégralité lors de la substitution ou du calcul linéaire résulte une qualité spatiale meilleure (tableau-2-1 et analyse qualitative) mais cette substitution/calcul entier(e) vient modifier les énergies des basses fréquences spatiales communes entre la PAN et la MS ce qui dégrade la qualité spectrale au niveau de l'image fusionnée. Les

coefficients de corrélations CC viennent conformément avec cette dégradation des signatures de couleurs attendue. Mais le critère SSIM, en donnant des mesures proches de 1 (tableau 2-2), contredit cette mesure des CC. Cela se justifie par le fait que le SSIM est un critère de mesure globale et ne peut distinguer une telle dégradation répartie uniformément sur toute l'image. C'est bien pour cela que le MSSIM est utilisé afin d'enlever l'ambiguïté sur cette contradiction lorsqu'il vient conformément aux CC (tableau 2-2) et à l'analyse qualitative.

La méthode de type ARSIS utilisant un filtrage complémentaire sur les modalités PAN et MS réussit un non recouvrement des fréquences spatiales communes garantissant ainsi une amélioration de la qualité spatiale de la MS tout en préservant ses signatures spectrales. Néanmoins, cause de légères dégradations spectrales (tableau 2-2) dues à l'injection de la même quantité énergétique des HF spatiales dans toutes les modalités MS.

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse descriptive, expérimentale et argumentative est menée sur trois types de fusion : projection-substitution, contribution spectrale relative et ARSIS.

D'après les études menées dans ce chapitre, les analyses ont montré que les méthodes IHS du type projection-substitution offrent des avantages distincts. Ce premier type projection-substitution, améliore considérablement la structure spatiale, améliore la qualité visuelle globale et présente une résolution spectrale satisfaisante bien qu'elle soit dégradée. Cependant, la distorsion de rayonnement reste un inconvénient important, car elle affecte les caractéristiques spectrales des modalités Multi-spectrales synthétisées. La modification des basses fréquences spatiales dans les modalités Multi-Spectrales d'origine entraîne une perte de cohérence (radiométrique). Ces changements des énergies des basses fréquences spatiales sont causés par l'injection complète de modalité PAN.

Les méthodes Brovey, CN et P+XS, du deuxième type contribution spectrale relative, suppose qu'il existe une relation linéaire entre les modalités MS et les modalités l'image PAN. Cependant, cette hypothèse est souvent non vérifiée, et une tentative d'amélioration de la résolution spatiale en combinant des images PAN avec des images MS via une combinaison linéaire peut souvent entraîner une défaillance des couleurs.

La troisième méthode du type ARSIS utilisant des transformées, notamment la TF dans notre cas, pour séparer les fréquences spatiales hautes et basses dans les

CHAPITRE-II ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE FUSION CONSIDEREES

modalités couleur et panchromatique, qui sont ensuite incorporées dans les modalités MS. Avec l'aide d'un filtrage complémentaire entre les modalités PAN et MS, cette technique empêche le chevauchement des spectres lors de l'injection, minimisant ainsi la dégradation spectrale tout en améliorant la qualité spatiale de MS.

Après avoir effectué une analyse comparative des trois méthodes de fusion d'images, nous avons décidé de nous concentrer sur la méthode ARSIS dans le prochain chapitre. Cela est dû à son potentiel d'amélioration des distorsions spectrales mineures qui se produisent lorsque la même quantité d'énergie haute fréquence (HF) est injectée dans toutes les modalités de couleur. Notre objectif dans le chapitre suivant est de remédier à ce problème avec la mise en œuvre de modèles d'injection qui répartiront les énergies spatiales HF de manière appropriée entre les différentes modalités MS.

CHAPITRE : III

**Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en
introduisant un modèle d'injection**

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

III-1 Introduction

Après avoir examiné les résultats du chapitre précédent, nous avons déterminé que la méthode de fusion de type ARSIS (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures) utilisant la TF, donnait des résultats spatiaux supérieurs par rapport aux autres méthodes de fusion, malgré quelques distorsions spectrales mineures. Cette détermination était basée sur l'observation que les techniques de projection-substitution et de contribution spectrale relative compromettent considérablement la résolution spectrale.

Afin de remédier au problème de distorsions spectrales (dégradation des couleurs) dues à l'injection de la même énergie des HF spatiales dans toutes les modalités MS, nous proposons une amélioration de la méthode de fusion de type ARSIS qui utilise la transformée de Fourier et cela en définissant un modèle d'injection permettant de définir des matrices de pondérations pour chacune des modalités MS à appliquer aux HF spatiales extraites de l'image PAN avant de procéder à l'injection. Le modèle d'injection que nous proposons utilise l'information « image » au niveau de différentes modalités MS et PAN ainsi qu'au niveau de différentes bandes de fréquences spatiales afin de définir les matrices de pondérations.

Rappelons que, toutes les techniques de type ARSIS de fusion d'images satellites impliquent l'extraction de structures ou d'informations à haute résolution spatiale de l'image PAN et leur incorporation dans chacune des modalités MS. Cela se fait en préservant au maximum les caractéristiques spectrales de l'image MS, ce qui se traduit par un rehaussement spatial comparable à celui de l'image PAN.

III-2 Filtrage et la Fréquence de coupure

Les fréquences spatiales les plus basses (approximation et régions uniformes dans l'image) se distinguent typiquement par leur grande amplitude par rapport aux hautes fréquences. Par conséquent, le filtrage a deux objectifs : extraire les informations nécessaires manquantes et traiter les modalités d'image MS sur-échantillonnées avant qu'elles ne soient injectées. Le suréchantillonnage est crucial pour garantir que l'image MS ait la même définition spatiale que l'image PAN afin qu'elles puissent être traitées ensemble. Cependant, le seul résultat souhaité de cette opération de sur-échantillonnage est de donner à l'image MS la même définition spatiale que celle de la PAN, et toute information en excès ajoutée par suréchantillonnage est jugée indésirable pour la fusion. Une fois qu'il a été établi que la seule information qui manque à l'image MS, par rapport à l'image PAN, est celle des HF spatiale, une marche à suivre serait la fusion d'images PAN-MS basée sur le filtrage. Pour ce faire, un ensemble de méthodes est mis en œuvre pour extraire les informations manquantes par filtrage et les injecter ensuite dans les modalités de l'image MS.

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

Prenons les images fournies par le satellite Ikonos. Ces images ont une résolution spatiale de 1 m et 4 m pour PAN et MS, respectivement. Selon le théorème de Nyquist, équation (III-1), la fréquence maximale pour PAN est $f_p = 0,5$ cycles/m et la fréquence maximale pour les bandes MS est de $f_{ms} = 0,125$ cycles/m.

$$freq_max = \frac{1}{2\Delta x} \quad (III-1)$$

Où Δx est la taille du pixel en mètre (ou c'est la période d'échantillonnage).

Pour extraire les HF spatiales de la PAN et pour éliminer les HF spatiales, ajoutées par sur-échantillonnage, des modalités MS, deux filtres complémentaires, passe-Haut et passe-bas, sont à appliquer respectivement aux images PAN et MS à la fréquence de coupure $f_c = (\text{fréquence maximale de la PAN}) / 4 = (\text{fréquence maximale de la MS}) = 0,125$ cycles/m ou 1/4 de la plage de fréquences en fréquences normalisées. [7]

III-3 La méthode ARSIS proposée utilisant un modèle d'injection

La méthode de fusion utilisant la TF consiste à isoler les hautes et basses fréquences spatiales (BF) d'une image en appliquant deux filtres complémentaires sur la paire d'image PAN-MS à une fréquence de coupure prédéterminée.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de fusion utilisant un modèle d'injection. L'objectif de ce modèle est de distribuer, différemment et d'une façon adaptative, l'énergie des HF spatiales extraites de l'image PAN sur les modalités MS. Cette distribution d'énergie permettrait de préserver la signature spectrale (couleur) originale de chaque pixel de l'image MS lors de l'apport des détails spatiaux de la PAN à la MS (injection des HF spatiales). Ceci est réalisé en exploitant l'information de l'image PAN-MS dans différentes bandes de fréquences spatiales pour définir, pour chaque bande MS, une matrice de coefficients qui pondèrent les Haute Fréquences spatiales.

III.3.1 Le modèle d'injection

Rappelons qu'il existe dans la littérature certaines méthodes de fusion utilisant des modèles d'injections définis à partir de l'information « image » et des caractéristiques des « senseurs » fournissant la paire d'image [7] et d'autres n'utilisant que l'information image [17]. Voici le modèle proposé utilisant l'information « image » de la paire d'image PAN-MS :

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

$$MS_{Fi} = (MS_i)^{interp_0} + FP \frac{(MS_i)^{interp_0}}{LPN} \quad (III-2)$$

Avec :

MS_{Fi} : $i^{\text{ème}}$ modalité fusionnée

$(MS_i)^{interp_0}$: $i^{\text{ème}}$ Modalité de l'image multi spectrale sur-échantillonnée et filtrée par le filtre passe-bas à la fréquence de coupure prédéfinie (équation III-1).

LPN : sont les basses fréquences spatiales de la PAN extraites à la fréquence de coupure prédéfinie (équation III-1).

FP : sont les HF spatiales de l'image PAN extraites à la fréquence de coupure prédéfinie (équation III-1).

Ce modèle repose sur une relation linéaire (pondérations) calculées entre les fréquences spatiales communes entre la paire PAN-MS et qui sont les basses fréquences afin de les appliquer sur les HF Spatiales manquantes de la MS sous l'hypothèse que la relation entre les HF spatiales des deux images PAN-MS serait la même calculée entre leurs Basses fréquences spatiales.

III-4 Etude expérimentale

Suite à l'explication initiale de la méthode d'ARSIS avec le modèle d'injection, elle a été effectivement employée. Pour évaluer son efficacité dans le cadre de la fusion d'images panchromatiques (Pan) et multispectrales (MS), nous procéderons à une évaluation des performances. Plus précisément, nous utiliserons la méthode ARSIS avec transformée de Fourier (FT) comme point de référence, compte tenu de son statut de méthode la plus efficace dans le chapitre précédent. La première comparaison entre ces deux méthodes reposera sur l'analyse qualitative qui implique l'observation d'images fusionnées (la composante visuelle) tandis que la seconde se portera sur des critères de mesure quantitatifs et vue que l'image idéale à reconstruire n'existe pas, la mesure sera de caractères statistiques (moyenne, corrélation, variance..etc.).

III-4-1 Analyse qualitative : comparaison entre la fusion utilisant TF et la fusion utilisant la TF plus le modèle d'injection

Les résultats de fusion comparés sont obtenus à l'aide de deux méthodes de fusion de type ARSIS. La figure 3.1 présente une sélection de portions spatiales représentatives des

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

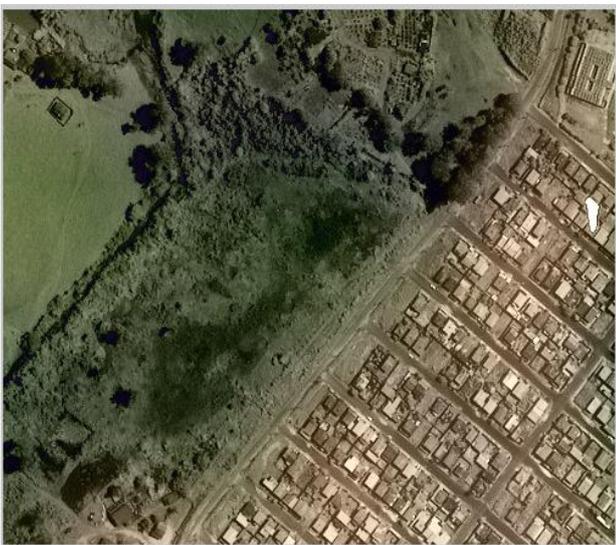
résultats, l'une utilisant TF seul et l'autre utilisant TF en combinaison avec le modèle d'injection.



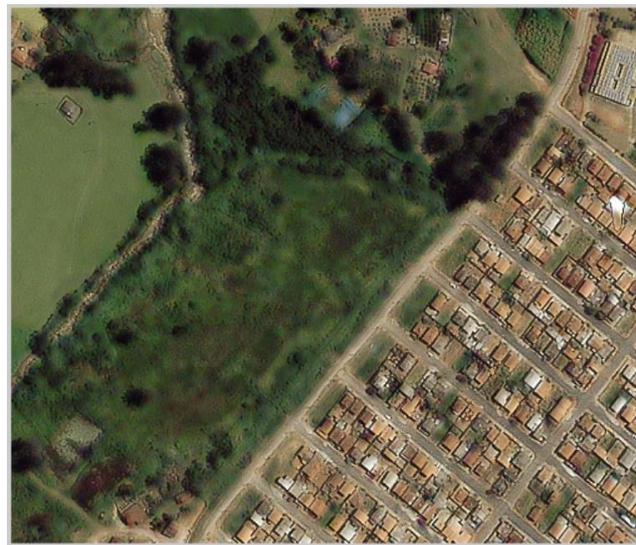
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.1 : Fusion d'images : (a) image PAN, (b) image MS suréchantillonnée, (c) image fusionnée par la TF, (d) image fusionnée par la TF plus le modèle d'injection

Après un examen visuel, il devient évident que les compositions colorées ont une ressemblance plus fidèle à l'image MS pour la méthode FT utilisant un modèle d'injection (figure-3-1-d) comparativement à celle utilisant la TF (figure-3-1-c). Cette préservation de la

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

couleur résulte de l'utilisation du modèle d'injection qui a permis de distribuer d'une façon adaptative les HF sur les modalités MS évitant ainsi toute dégradation de la couleur due à l'injection identiques des HF spatiales dans toutes les modalités MS.

La technique de fusion ARSIS, lorsqu'elle est mise en œuvre avec la méthode TF, produit des images fusionnées supérieures en termes de qualité spatiale et spectrale. Bien qu'une certaine dégradation spectrale soit observée, l'œil nu a du mal à discerner la différence entre cette méthode (représentée à la figure 3.1-c) et la nouvelle méthode ARSIS améliorée par le modèle d'injection (figure 3.1-d). Cependant, une observation attentive de ces images révèle certaines zones qui indiquent l'existence de dissemblances entre elles.

La figure 3.1 révèle aussi que la méthode que nous suggérons (figure 3.1-d) fournit des résolutions spatiales et spectrales qui sont à la fois acceptables et exemptes de toute preuve perceptible de distorsion, tandis que la méthode ARSIS avec TF (figure 3.1-c) produit une résolution spatiale satisfaisante. Cependant, cette méthode souffre d'une distorsion spectrale qui se manifeste par une dégradation des couleurs par rapport à l'image MS (figure 3.1-b) d'origine telle qu'observée visuellement dans l'image PAN (figure 3.1-a). La raison de cette dégradation spectrale est l'injection d'une même portion d'énergie dans chacune des modalités couleur par la méthode ARSIS utilisant la FT, qui provoque aussi de légères altérations des contours de l'image fusionnée.

Notons que l'amélioration de la méthode de fusion TF de type ARSIS peut ne pas entraîner de changements notables visibles à l'œil humains, même si l'approche est jugée plus efficace. Certaines modifications ne peuvent être perceptibles que par des machines, qui peuvent différencier différentes zones avec une plus grande précision. Il est important de souligner que cela concerne les techniques de vision artificielle telle que la reconnaissance spatiale, qui est utilisée dans la cartographie de précision et l'observation des champs agricoles.

III-4-2- Analyse quantitative

On ne peut pas simplement supposer que la qualité spectrale des images fusionnées à partir d'un modèle d'injection estimé est égale à celle des images MS d'origine. Le bon sens veut qu'à mesure que la résolution s'améliore, les erreurs de modélisation augmentent, à moins que l'objet lui-même ne présente des caractéristiques structurelles qui ne sont visibles qu'à des échelles plus élevées. Cela présente un défi lors de l'évaluation de la qualité des images fusionnées en utilisant uniquement la qualité spectrale. La qualité de l'estimation n'est pas nécessairement une fonction linéaire de la résolution, et elle peut être supérieure ou inférieure à l'original. Pour clarifier cela, l'analyse d'image quantitative utilise des formules mathématiques (CC, SCC, SSIM et MSSIM), qui peuvent identifier des différences subtiles entre deux images qui peuvent ne pas être visibles à l'œil nu. Ces variations sont déterminées

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

par traitement d'image et sont évaluées à l'aide de critères d'évaluation quantitatifs pour mesurer le degré de similitude entre les deux images.

III-4-2-1 Analyse quantitative entre la méthode de fusion utilisant la TF et la méthode de fusion utilisant la TF avec le modèle d'injection

Les critères d'évaluation quantitatifs utilisent les mesures statistiques telles que le coefficient de corrélation (CC), coefficient de corrélation spatial (SCC), l'indice de similarité structurelle (SSIM : structural similarity index measure), et la moyenne des indices locaux de similarité structurelle (MSSIM : Mean structural similarity index measure) sont utilisées pour évaluer la qualité de l'image, ont donné deux tableaux. Pour comparer les données du chapitre 2 de la méthode TF aux résultats produits par la nouvelle méthode avec le modèle d'injection.

Le tableau 3.1 fournit des données pour une évaluation spatiale qui permet une comparaison entre l'image PAN et les modalités MS individuelles pour les deux méthodes de fusion analysées.

Type des méthodes	Les méthodes	calcul				
		inter-modalités	CC	SCC	SSIM	MSSIM
ARSIS, la méthode utilisant la :	TF	$pan - M_{RF}$	0.6844	0.9924	0.7183	0.9837
		$pan - M_{GF}$	0.8159	0.9958	0.8443	0.9901
		$pan - M_{BF}$	0.7774	0.9683	0.7735	0.9680
		$pan - M_{NIRF}$	0.8313	0.9819	0.8285	0.9911
	TF plus modèle d'injection	$pan - M_{RF}$	0.4647	0.8854	0.5285	0.9339
		$pan - M_{GF}$	0.6028	0.9121	0.6723	0.9522
		$pan - M_{BF}$	0.4924	0.8919	0.5583	0.9242
		$pan - M_{NIRF}$	0.7151	0.9007	0.6928	0.9494

Tableau 3.1 Comparaison des données analytiques quantitatives entre la modalité PAN et les modalités MS fusionnées pour les deux méthodes considérées.

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

On remarque dans le tableau 3.1 que les coefficients de corrélation entre l'image PAN et les bandes colorées sont plus élevés avec la méthode ARSIS utilisant la TF qu'avec la méthode ARSIS utilisant le modèle d'injection. Bien qu'il y ait un léger impact sur la résolution spatiale lors de la manipulation de l'injection, cela ne compromet pas la qualité globale. En comparant les coefficients de corrélation et les valeurs d'indice SSIM des modalités PAN et les bandes de couleurs, nous observons que la fusion basée sur la TF donne des valeurs élevées avec une différence entre les deux qui peut être estimée de "0.1 à 0.3" selon la bande considérée. La raison possible de cette variation pourrait être la plus faible ressemblance des formations mineures entre les bandes.

Les coefficients de corrélation spatiale (SCC) et la moyenne des indices locaux de similarité structurelle (MSSIM) employées dans cette étude et qui sont des critères de mesure plus locaux comparativement à CC et à SSIM. SCC et MSSIM montrent des résultats satisfaisants se rapprochant de la valeur idéale de 1, indiquant ainsi que les dégradations spectrales sont très minimes dans les deux méthodes présentées. Les résultats suggèrent que le filtrage et l'injection de détails spatiaux au cours du processus d'extraction ont réussi, malgré la faible dégradation spatiale de la méthode ARSIS utilisant le modèle d'injection. Cependant, il y a une légère diminution de la similarité(SSIM) pour la méthode améliorée par le modèle d'injection, qui peut être attribuée aux différences dans les structures présentes dans cette bande par rapport à celles de la bande panchromatique.

III-4-2-2 Analyse quantitative entre les modalités fusionnées et leurs modalités MS d'origine pour les deux méthodes considérées

Le tableau 3.2 fournit une évaluation spectrale en comparant les modalités MS fusionnées de l'image combinée avec leurs homologues d'origine pour chacune des deux méthodes de fusion qui ont été analysées.

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

Type des méthodes	Les méthodes	Calcul			
		inter-modalités	CC	SSIM	MSSIM
ARSIS, la méthode utilisant la :	TF	M_{RS-Rf}	0.6651	0.7114	0.8869
		M_{GS-Gf}	0.6314	0.6942	0.8981
		M_{BS-Bf}	0.5661	0.6536	0.8953
		M_{NIR_S-NIRf}	0.7701	0.7912	0.8993
	TF plus modèle d'injection	M_{RS-Rf}	0.8625	0.8760	0.9482
		M_{GS-Gf}	0.8386	0.8618	0.9474
		M_{BS-Bf}	0.8556	0.8873	0.9643
		M_{NIR_S-NIRf}	0.9435	0.9483	0.9526

Tableau 3.2 : Données analytiques quantitatives entre les modalités fusionnées et leurs modalités MS d'origine pour les deux méthodes considérées.

En comparant le tableau 3.1 au tableau 3.2, il devient évident que les coefficients de corrélation entre les bandes colorées sont nettement plus élevés dans la méthode ARSIS qui utilise la TF plus le modèle d'injection, par opposition à la méthode ARSIS qui utilise uniquement TF.

Selon les données présentées dans le tableau 3.2, les valeurs des coefficients de corrélation démontrent que la méthode proposée est plus efficace pour préserver les informations spectrales, comme l'a confirmé le tableau d'étude qualitative menée ci-dessus. Par exemple, lors de l'analyse des modalités vertes et bleues, le coefficient de corrélation pour la méthode basée sur TF est $CC_{GS-GF}=0.6314$ pour la modalité verte de l'image MS fusionnée, alors qu'il est $CC_{GS-GF}=0.8386$ pour la méthode TF plus le modèle d'injection - une amélioration de "0,2072" par rapport à la méthode basée sur TF. De même, pour la modalité bleue, le coefficient de corrélation est de $CC_{BS-BF}=0.5661$ pour la méthode TF, alors qu'il est de $CC_{BS-BF}=0.8556$ pour la méthode basée sur TF plus le modèle d'injection. Cela marque une

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

avancée notable par rapport à la modalité verte "0.2895 " de l'approche basée sur la TF. En ce qui concerne la modalité PIR, la méthode basée sur TF et le modèle d'injection TF plus affichent des coefficients de corrélation de $CC_{NIRS-NIRF}=0.7701$ et $CC_{NIRS-NIRF}=0.9435$ respectivement, par rapport à la modalité PIR d'origine. La différence entre ces deux valeurs est négligeable à "0.1724". Une analyse plus approfondie de la modalité PIR à l'aide des indices SSIM indique que la méthode améliorée basée sur TF a donné une valeur de $SSIM_{NIRS-NIRf}=0.9483$ tandis que la méthode basée sur TF a donné $SSIM_{NIRS-NIRf}=0,7912$. La différence entre ces deux valeurs est de "0.1571", l'utilisation du modèle d'injection en combinaison avec la méthode TF entraîne des performances spectrales supérieures par rapport à la méthode TF.

Nous avons examiné les indices SSIM et MSSIM des similitudes structurelles entre les modalités de couleur de deux méthodes basées sur TF dans le même tableau. La méthode améliorée basée sur TF a démontré une plus grande similitude entre les modalités fusionnées et originales. Par exemple, la modalité fusionnée affichait un score de similarité de $SSIM_{RS-Rf}=0.7114$ et $MSSIM_{RS-Rf}=0.8869$ avec la modalité rouge d'origine dans la méthode basée sur TF. Cependant, la méthode améliorée basée sur TF a donné un score de similarité de $SSIM_{RS-Rf}=0.8760$ et $MSSIM_{RS-Rf}=0.9482$ indiquant une différence pour $SSIM_{RS-Rf}=0.1646$, et pour $MSSIM_{RS-Rf}=0.0613$. Notre méthode proposée démontre des similitudes plus élevées entre les modalités initiales et fusionnées, comme indiqué par les indices MSSIM de similitudes. De plus, il offre une amélioration spectrale par rapport à la méthode basée sur TF.

III-5 Conclusion

Ce chapitre commence par aborder la principale contrainte de la technique de fusion à base de la TF soulignée dans le chapitre précédent. Bien que la méthode de fusion utilisant la TF surpasse à la fois les méthodes de substitution par projection et de contribution spectrale relative, elle présente l'inconvénient de provoquer une dégradation spectrale lors de l'amélioration spatiale de l'image MS.

Nous avons présenté une nouvelle approche de fusion de type ARSIS basée sur TF qui ne s'appuie que l'information de l'image, pour résoudre les problèmes de distorsion des couleurs dans les images fusionnée, pouvant résulter de l'injection de la même quantité d'énergie hautes fréquences dans toutes les bandes MS. Pour ce faire, cette méthode utilise

CHAPITRE-III Proposition d'une méthode de fusion de Type ARSIS en introduisant un modèle d'injection

un modèle d'injection pour calculer les pondérations et ajuste l'énergie des détails spatiaux extraits de la PAN de manière à différencier pour chaque modalité MS avant l'injection.

En comparant les aspects qualitatifs et quantitatifs des deux méthodes, l'analyse des résultats expérimentaux indique que l'approche suggérée produit les images fusionnées les plus supérieures en termes de CC, SSIM et MSSIM. Il était évident que l'utilisation de la TF avec le modèle d'injection s'est avérée plus efficace pour réduire les distorsions spectrales qui se produisaient lorsque la même quantité d'énergie spatiale HF était injectée à travers diverses modalités MS. En conséquence, cette méthode proposée en utilisant un modèle d'injection a permis de remédier à la dégradation spectrale due à l'injection identique pour toute les bandes MS. Ainsi, la méthode proposée a permis une restitution entière de la couleur dégradée au niveau du produit de fusion par la méthode TF tout en causant, en se référant à cette dernière, de légères dégradations spatiales non perçues visuellement et légèrement décelables par les critères de mesure statistiques.

CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce mémoire est de combiner des images satellitaires prises à différentes résolutions spatiales et spectrales adaptées aux besoins spécifiques du domaine d'application.

Pour commencer, nous avons présenté l'état de l'art en matière de fusion d'images satellitaires et exploré diverses méthodes de fusion, en soulignant leurs caractéristiques, avantages et inconvénients distincts.

Dans nos recherches, nous avons examiné diverses méthodes utilisées dans le traitement d'images. Ceux-ci incluent le type de projection-substitution, avec des exemples tels que la méthode IHS et la méthode ACP. De plus, nous avons examiné le type de contribution spectrale relative et exploré la méthode P+XS, la méthode Brovey et la méthode CN. Enfin, nous nous sommes penchés sur les méthodes de type ARSIS, qui incluent celles basées sur la transformée de Fourier. Notre analyse a impliqué une explication de chaque méthode, ainsi qu'une compréhension globale de leurs mécanismes opérationnels.

Notre processus d'évaluation a impliqué l'évaluation qualitative et quantitative de chaque méthode. Qualitativement, nous avons observé que les techniques de projection-substitution et de contribution spectrale relative entraînaient une dégradation spectrale significative, tandis que les méthodes ARSIS fournissaient une meilleure résolution spatiale avec des dégradations spectrales mineures. Cependant, comme les évaluations qualitatives peuvent être subjectives, nous avons également utilisé des mesures quantitatives de caractère statistique vue que l'image idéale à laquelle on devrait se comparer n'existe pas. Ainsi des indices tels que CC, SCC, MSSIM et SSIM ont été utilisés pour détecter les degrés de ressemblance et de similitude entre les images. Ces critères, de mesure statistique et quantitative, nous ont permis d'évaluer plus précisément l'efficacité de chaque méthode.

Pour évaluer la qualité des images fusionnées, nous avons analysé les résultats analytiques de différents points finaux à travers des tableaux. Ces tableaux comparaient la modalité PAN avec chaque modalité originale et fusionnée de l'image MS, ainsi que chaque modalité MS originale avec sa modalité MS de l'image fusionnée. Ce faisant, nous avons obtenu une perspective objective sur la qualité des images fusionnées qui ont soutenu nos observations qualitatives. Notre enquête de type ARSIS n'a impliqué l'étude expérimentale que sur la méthode de fusion basée sur la transformée de Fourier, qui a donné des résultats analytiques quantitatifs très satisfaisants sur les plans spectral et spatial par rapport à d'autres méthodes. Néanmoins, nous devons encore nous efforcer d'améliorer cette méthode pour minimiser les dégradations spectrales mineures que nous avons observées.

L'un des défis rencontrés lors de l'utilisation des méthodes de fusion d'images satellitaires est la distorsion des couleurs des images fusionnées, ce qui entrave l'analyse thématique. Pour remédier à cette dégradation, nous avons développé une méthode de fusion de type ARSIS ; la FT tout en utilisant un modèle d'injection proposé. Le modèle d'injection proposé a permis de pondérer, différemment et d'une façon adaptative à chaque modalité MS, les HF spatiales extraites de la PAN avant de procéder à l'injection ce qui a pu remédier à la dégradation

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

spectrale due à l'injection de la même portion d'énergie des HF dans toutes les modalités MS (cas de la méthode utilisant la TF sans modèle d'injection).

Perspectives :

Ce travail pourrait subir les améliorations suivantes :

- Effectuer un filtrage local par TFCT pour éviter les dégradations globales obtenues en utilisant la TF appliquée entièrement sur l'image ce qui perd toute localité spatiale des fréquences (compromis espace-fréquence),
- Réaliser une interface graphique facilitant l'accès au système de fusion,
- Soumettre le produit de la fusion à d'autres applications de traitements d'images nécessitant les deux bonnes résolutions spectrale et spatiale dans une même image telle que l'observation des champs agricoles et la cartographie de précision pour fin de classification et prise de décision.

Référence

Référence

- [1] Diogone Sylla, « Fusion de données provenant de différents capteurs satellitaires pour le suivi de la qualité de l'eau en zones côtières. Application au littoral de la région PACA », Thèse de Doctorat, Université de Toulon, 2014.
- [2] Fabrice MULLER, Stanislas DE BÉTHUNE, «LA FUSION D'IMAGES», Bulletin de la Société Géographique de Liège, 38, 2000/1, 79-94
- [3] Idrissa COULIBALY, «Détection du réseau routier à partir des images satellitaires à la suite d'une catastrophe majeure», mémoire en vue d'obtention de diplôme de maîtrise, école de technologie supérieure université du Québec, 2013
- [4] Sascha Klonus, Manfred Ehlers, «Performance of evaluation methods in image fusion », 12th International Conference on Information Fusion, Seattle, WA, USA, Institute for Geoinformatics and Remote Sensing, July 6-9, 2009.
- [5] GHANIMA Djaouher, «Comparatif de méthodes avancées pour la fusion d'images satellites », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2015.
- [6] Ayoub TAMIM, «Segmentation et classification des images satellitaires : application à la détection des zones d'upwelling côtier marocain et mise en place d'un logiciel de suivi spatio-temporel», Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ MOHAMMED V, Rabat, 2015, N° d'ordre : 2793.
- [7] Ghellab Abdelkader Moustafa Radwane, « Fusion d'images multi-spectrales et panchromatiques : application en télédétection satellitaire », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2015.
- [8] Miloud Chikr El-Mezouar. , « Fusion d'images en télédétection satellitaire. », Environmental Engineering. INSA de Rennes ; Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2012.
- [9] BENALI Abdelali, «Identification de zones urbaines à partir d'images satellitaires multi-spectrales. », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2019.
- [10] S. Massout, N. Habili, N. Ouarab, Y. Smara, «Etude comparative de méthodes de fusion d'images satellitaires », Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2009, Faculté d'Électronique et d'Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

Référence

- [11] Yves Cornet, Christophe Schenke, Stanislas de Béthune, Marc Binard et Fabrice Muller, «Stratégies de fusion d'images P/XS basées sur les principes colorimétriques et l'Egalisation de Statistiques Locales », Bulletin SFPT n°169 (2003-1).
- [12] Javier Estornell, Jesus M. Martí-Gavila, M. Teresa Sebastia, Jesus Mengual, «Principal component analysis applied to remote sensing », Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, Volumen 6(2), No. 7, 2013.
- [13] Olivier Pony, Xavier Descombes, Josiane Zerubia, « Classification d'images satellitaires hyperspectrales en zone rurale et périurbaine. », [Rapport de recherche] RR-4008, INRIA. 2000, pp.64.
- [14] Claire Thomas., «Fusion d'images de résolutions spatiales différentes. » Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [15] Fatima Zohra Benhalouche, « Méthodes de démêlage et de fusion des images multispectrales et hyperspectrales de télédétection spatiale. », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018.
- [16] M. Beaulieu, S. Foucher, L. Gagnon, « Multi-Spectral Image Resolution Refinement using Stationary Wavelet Transform », Conference Paper · August 2003, Centre de Recherche Informatique de Montréal.
- [17] Marc Mangolini, « Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. », Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, 1994.
- [18] Mohamed Bassam Ben Ticha, « Fusion de données satellitaires pour la cartographie du potentiel éolien offshore. », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007.
- [19] Thierry Ranchin, « Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection. », Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, 1993.
- [20] Ranchin T., Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Wald L., « Image fusion. The ARSIS concept and some successful implementation schemes. », ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, 4-18., 2003.
- [21] IAS SRI WAHYUNI, « Multi-focus image fusion using local variability », Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2018.
- [22] Xavier Otazu, María González-Audícana, Octavi Fors, and Jorge Núñez, « Introduction of Sensor Spectral Response Into Image Fusion Methods. Application to Wavelet-Based Methods », IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No.10, October 2005.

Référence

- [23] M. Chikr ElMezouar, F. Meskine, N. Taleb, K. Kidiyo, « Une méthode de fusion d'images multi-spectrales et Panchromatiques, basée IHS, efficace par considération de la réponse spectrale du capteur Wordview-2.», Laboratoire Réseaux de Communication, Architecture et Multimédia (RCAM), Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbes, 19 mai 2015.
- [24] NDUWAYO Jules, KONATE Diarhy Mocktar, « fusion d'images de résolutions spatiales différentes : application en télédétection satellitaire» mémoire de Master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2020.
- [25] J. EDWARD JACKSON, «A User's Guide To Principal Components », QA278.5.J27 199, 519.5'354-dc20 ISBN 0-471-62267-2.
- [26] Thierry Ranchin, Lucien Wald MINES, Marc Mongolini, « The ARSIS method : a general solution for improving spatial resolution of images by the means of sensor fusion », fusion of Earth Data, Cannes, France ,6-8 ferbruary 1996, Groupe Teledetection et modelisation, centre d'entreprise, Ecole des mines de Paris.
- [27] Nassim Abbas, Abdenour Bouakache, Radja Khedam & Aichouche Belhadj-Aissa, «Fusion/Classification D'images Satellitaires Par le modèle Hybride De Dezert Smarandache», Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Conference Paper · May 2009.
- [28] Nadia AKDIM, «Introduction à la Télédétection Spatiale (Principes de bases, Traitement & Applications) », Cours de master 2016-2017, Université Cadi Ayyad, April 2017.
- [29] OUARAB Nadia, MASSOUT Samia, SMARA Youcef, «Fusion d'images satellitaires : Méthodes et Applications », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [30] Mauricio Labrador García, Juan Antonio Évora Brondo, Manuel Arbelo Pérez, « Satellites pour la Télédétection appliquée à la gestion territoriale », Département de l'Agriculture, de l'Élevage, de la Pêche et des Eaux du Gouvernement des Canaries, TF 433-2012, May 2012.
- [31] A. BELHADJ-AISSA, NASSIM ABBAS, «Fusion et classification d'images satellitaires multi-échelles multi-temporelles dans un cadre markovien en utilisant l'approche évidentielle », Rapport de Mini-projet de Première année post-graduation, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2007.
- [32] Frédéric MORAIN-NICOLIER, Jérôme LANDRÉ, Su RUAN, «Détection d'objet par mesure de dissimilarités locales », Université de Reims Champagne-Ardenne, centre de Recherche en STIC (CReSTIC), janvier 2009.

Référence

- [33] Sébastien Oliveau, « Autocorrélation spatiale : leçons du changement d'échelle », Dans L'Espace géographique 2010/1(Vol. 39), pages 51 à 64
- [34] Yocky D. A., « Multiresolution Wavelet Decomposition I Me Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data. » Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 62 (9), pp. 1067–1074. 1996.
- [36] Wald L., (2002), « Data Fusion : Definitions and Architectures : Fusion of Images of Different Spatial Resolutions. » Presses des MINES.
- [35] Pellemans A. H. J. M., Jordans R. W. L. et Allewijn R., «» Merging Multispectral and Panchromatic SPOT Images with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor.» Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 59 (1), pp. 81–87, 1993.
- [37] Shi W., Zhu C., Tian Y. et Nichol J., (2005), «Wavelet-Based Image Fusion and Quality Assessment. » International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 6 (3), pp. 241–251.
- [38] Mallat, « A theory for multiresolution signal decomposition : The wavelet representation, », IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 11, no. 7, pp. 674–693, 1989
- [39] RANCHIN T., « Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection. », Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, Sophia Antipolis, inédit. 1993.
- [40] Ranchin T. et Wald L., « Fusion of high spatial and spectral resolution images : the ARSIS concept and its implementation. », Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n°1, p. 4-18. 2000.
- [41] RICHARDS J.A., « Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation. »Remote Sensing of Environment, 16(1), 35-46, 1984
- [42] Chavez P.S., S.C. Sides et J.A. Anderson,. « Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and SPOT Panchromatic », Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, n°3, p. 265-303, 1991.
- [43] R.V.G.Anjaneyulu, A.Krishna prasad, K.Srinivasa Murthy, C.V.Rao, B.Gopala Krishna, « PAN Sharpening using relative spectral response of sensor for CARTOSAT-1 PAN and RESOURCESAT LISS-4 MX DATA », The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-5, 2018.