

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
UNIVERSITE D'ORAN DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE USTO-MB



Faculté de Physique
Département de Génie Physique

Spécialité : Physique

Option : Rayonnement et matière

Thèse

Présentée par

Mme GHANIMA Djaouher

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences en physique

Thème

Comparatif de méthodes avancées pour la fusion d'images satellites

Soutenu le 13 Septembre devant la commission d'examen composée de:

<u>Qualité</u>	<u>Non et prénoms</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>
Président	Mr. BELASRI Ahmed	Professeur	USTO-MB
Rapporteur	Mr. BENABADJI Nouredine	Professeur	USTO-MB
Co-rapporteur	Mr. HASSINI Abdelatif	M.C.A	UNIV Oran-2
Examineur	Mr. BELKAID Nouredine	Professeur	USTO-MB
Examineur	Mr. BELAIDI Abdelkader	Professeur	E.N.P Oran
Examineur	Mme. LOUNIS Zoubida	Professeur	UNIV Oran-2

Année universitaire: 2014/2015

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur Benabadji, mon encadreur de la thèse, de m'avoir fait profiter de son expérience et de son savoir, ainsi que pour sa disponibilité et son écoute.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Hassini, mon co-encadreur, pour ses conseils et ses orientations essentielles à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier également tous les enseignants du laboratoire LAAR qui nous ont offert durant cette formation de doctorat, qualifiée d'excellente et très enrichissante, leur sérieux et leur professionnalisme.

Mes derniers remerciements mais non les moindres s'adressent à mes parents et mon marie qui m'ont apportés le soutien nécessaire pour mener à bien ce travail.

Résumé

La fusion d'images est la combinaison de deux ou de plusieurs images issues de différents capteurs afin de créer une nouvelle image contenant le maximum d'informations afin d'améliorer leurs interprétations thématiques.

Les satellites de type SPOT, Ikonos, IRS, MSG ou Quickbird fournissent des images possédant des caractéristiques différentes : D'une part, des images de basse résolution spectrale et de haute résolution spatiale et d'autre part, des images de caractéristiques opposées ; c'est-à-dire de haute résolution spectrale combinée à une basse résolution spatiale. De nombreuses applications nécessitent de combiner ces hautes résolutions spatiales et spectrales. Ce travail s'insère dans la synthèse d'images multispectrales à haute résolution au moyen de la fusion d'images.

Les images d'entrée sont, premièrement, décomposées en coefficients d'approximation et de détails, à l'aide des deux nouvelles méthodes (la transformée de Contourlet et la transformée de Shearlet) puis les coefficients de décomposition sont combinés et les nouvelles images sont obtenues par la transformée inverse des coefficients fusionnés. Des outils d'évaluations appuyés par une analyse visuelle et une analyse quantitative ont, tous les deux, démontré le gain enregistré par ces deux méthodes.

Comparativement aux méthodes de fusions traditionnelles, causant habituellement une certaine dégradation caractéristique aux images fusionnées, que ça soit une perte spectrale ou une distorsion de couleur, ces deux nouvelles méthodes ont donné des résultats meilleurs que la méthode basé sur la transformée en ondelettes (Algorithme à trous, Concept ARSIS), et les transformées en contourlettes et Shearlet, tout en préservant des contours lisses et assimilés aux images originales.

Mots clés : fusion d'images, résolution spatiale, Résolution spectrale, Algorithme à trous, Concept ARSIS, Contourlette, Shearlet.

Remerciements	1
Résumé	2
Table des matières	4
Table des figures	6
Introduction générale	8

Chapitre I (Généralités)

1. Introduction	9
2. Comment sont formées les images satellitaires ?	9
2.1 Champ Instantané Visuel	12
2.2 Résolution	12
2.3 Images multi-temporelles.....	13
2.4 Facteurs intervenant dans la formation des images.....	14
2.5 Distorsion géométrique des images	14
3. Capteurs.....	15
3.1 L'imagerie optique	15
3.1.1 Principaux satellites optiques.....	15
3.1.2 SPOT.....	17
3.1.3 LANDSAT.....	18
3.1.4 IRS.....	19
3.1.5 Caractéristiques des images MSG.....	19
4. Conclusion	22

Chapitre II (Fusion des images)

1. Introduction	23
2. Fusion des données.....	23
3. Définition de la fusion d'images	25
4. Applications de la fusion d'images	25
5. Objectifs de la fusion d'images	26
6. Situation de la fusion d'image	27
6.1 Plusieurs images du même capteur	27
6.2 Plusieurs images de capteurs différentes	27
6.3 Plusieurs informations extraites d'une même image.....	27
6.4 Image et autre source d'information.....	27
7. Exemples de fusion d'images	27
7.1 Cas des images panchromatiques (Pan) et multispectrales (MS)	27
7.2 Cas des images optiques et radar	30
8. Prétraitements	31
9. Qualité de fusion d'images	31
10. Conclusion	33

Chapitre III (Méthodes de fusion)

1. État de l'art.....	34
2. Méthode de la transformée en ondelettes.....	34
2.1 Ondelettes de Haar	38
2.2 Algorithme à trous	38
2.3 Méthode ARSIS	39
2.3.1. Couple M1.....	41
2.3.2. Couple M2.....	41

3. Les transformées directionnelles	42
3.1 Transformée de Radon	43
3.2 Ridgelets	43
3.3 Curvelets	43
3.4 Contourlets	44
3.5 Shearlet	45
3.6 Beamlets	46
3.7 Wedgelets	46
3.8 Bandelettes	46
3.9 Directionlets	46
3.10 Comparaison des différentes transformées.....	47
4. Représentation en contourlettes	48
4.1 La transformée en contourlettes non-sous-échantillonnée	50
4.1.1 Pyramide non-sous-échantillonnée	51
4.1.2 Bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnés	52
5. Principe de fusion avec la NSCT	55
6. Transformée de Shearlet.....	57
6.1 Transformée de Shearlet continu.....	57
6.2 Shearlet en cônes.....	58
6.3 Transformée de Shearlet discrète finie	59
7. Conclusion	62

Chapitre IV (Résultats et interprétation)

1. Introduction	63
2. Problématique	63
2.1 Méthodes utilisées	64
2.2 Description du site d'étude des images utilisées	64
2.2.1 Images du satellite IRS	64
2.2.2 Images du satellite MSG	65
2.3 La base de données	66
3. Présentation	69
3.1 Application sous le logiciel Builder C++	69
3.2 Application sous le logiciel Matlab.....	70
4. Fonctionnalités	73
4.1. Contourlettes	73
4.2. SHEARLET.....	76
5. Résultats de fusion pour le satellite MSG	78
5.1 Résultats pour le satellite MSG1.....	78
5.2 Résultats pour le satellite MSG2.....	78
6. Résultats de fusion pour le satellite IRS	79
7. Outils d'évaluation.....	82
7.1. Analyse visuelle	82
7.2. Analyse quantitative	83
8. Propriétés statistiques de chaque méthode	84
8.1 Pour le satellite MSG.....	84
8.2 Pour le satellite IRS	85
8.3 Pour le satellite IRS	85
9. Conclusion pour les méthodes utilisées	85
9.1 Rappel des précautions à prendre concernant la qualité d'une méthode	85
9.2. Les méthodes à base de la transformée d'ondelette	86
9.3. Les méthodes à base de la transformée directionnelle	86

CONCLUSION GENERALE	89
BIBLIOGRAPHIE	91
ANNEXES	

Table des figures

Figure 1 : Formation d'une image satellitaire numérique multi-spectrale, p5

Figure 2 : Spectre électromagnétique, p5

Figure 3 : Réflectance des surfaces visibles, p8

Figure 4 : Période de l'orbite Spot, **p11**

Figure 5 : les 12 bandes spectrales de SEVIRI, p15

Figure 6 : Répartition des bandes MSG sur le spectre électromagnétique, p15

Figure 7 : Niveaux de traitements de la fusion d'images, p18

Figure 8 : Exemple de fusion d'images panchromatique et multispectrales, **p23**

Figure 9 : Exemple de fusion d'images optiques et radar, **p24**

Figure 10 : Pyramide représentant une analyse multirésolution, p28

Figure 11 : Présentation d'une analyse multirésolution réalisée à l'aide de l'algorithme de Mallat, p29

Figure 12 : Principe de la fusion par la méthode des ondelettes, p31

Figure 13 : décomposition hiérarchique de l'information, p33

Figure 14 : Méthode ARSIS, p34

Figure 15 : schéma récapitulatif du couple IMM-HRIMM M1, **p35**

Figure 16 : Schéma récapitulatif du couple M₂, p36

Figure 17 : Exemples de fonctions de base pour la transformée de Radon, les ridgelets, les curvelets et les contourlets (de haut en bas), p39

Figure 18 : Représentation en ondelettes et en contourlettes des images, **p41**

Figure 19 : Un niveau d'analyse de la transformée en contourlette, **p42**

Figure 20 : Coefficients de décomposition en Contourlettees (3 niveaux, 8, 4, 2 orientations), **p43**

Figure 21 : Partitionnement du plan fréquentiel obtenu avec la NSCT, p44

Figure 22 : Pyramide de décomposition non sous échantillonnée à 3 niveaux, **p45**

Figure 23 : Bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées construits avec des bancs de filtres en éventail à deux-canaux, p46

Figure 24 : Filtres sur-échantillonnés par une matrice quinconce Q, p47

Figure 25 : Le bloc de diagramme de la NSCT, **p47**

Figure 26 : Coefficients de décomposition en NSCT (3 niveaux, 8 ; 4 ; 2 orientations), **p48**

Figure 27 : Concept de fusion d'image pour l'amélioration de résolution, **p49**

Figure 28 : Diagramme schématique de la fusion d'image en utilisant la NSCT, p50

Figure 29 : Diagramme de l'effet géométrique du décalage parabolique avec les paramètres a et s, p51

Figure 30 : Caractéristiques des ensembles C^h , C^v , C^\times et C^0 , p52

Figure 31 : la transformée de Shearlet dans le domaine de Fourier et du temps, 54

Figure 32 : **Les différentes méthodes utilisées pour la fusion, 58**

Figure 33 : (a) Image du capteur IRS-1C-PAN acquise le 18/06/1998 d'ORAN, (b) Image du canal 1, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97, p60

Figure 34 : Image du canal 2, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97, (b) Image du canal 3, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97, p60

Figure 35 : Images des canaux visibles C1, C2, C3 du satellite MSG1, p61

Figure 36: Composition colorée des canaux visibles, p61

Figure 37 : Image panchromatique du satellite MSG1, p61

Figure 38 : Images des canaux visibles C1, C2, C3 du satellite MSG2, p62

Figure 39 : Composition colorée des canaux visibles, p62

Figure 40 : Image panchromatique du satellite MSG2, p62

Figure 41 : Aperçu de l'application de fusion des images satellitaires, p63

Figure 42 : L'organigramme de l'interface, p64

Figure 43 : Aperçu de l'application de fusion des images satellitaires, p65

Figure 44 : Cheminement parcouru pour fusionner deux images, p66

Figure 45 : La décomposition de l'image du canal 1 par la transformée de Contourlet, p69

Figure 46 : (a) L'image originale du canal 1, (b) L'image reconstruite, p69

Figure 47: (a) L'image original du canal 1, (b) Coefficients de Shearlet (Détails de haute fréquence), (c) Shearlet (information de basse fréquence), (d) L'image reconstruite, p71

Figure 48: Principe d'application de la transformée en Shearlet, p71

Figure 49: Image fusionnée par modèle M1, Image fusionnée par modèle M2, p72

Figure 50: Image fusionnée par modèle M1, Image fusionnée par modèle M2, p72

Figure 51: Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode d'algorithme "A trous", (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode d'algorithme "A trous", p73

Figure 52: Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode d'algorithme "A trous", (d) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode de Shearlet, p73

Figure 53: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode de Shearlet, (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode de Shearlet, p74

Figure 54: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode du concept ARSIS (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode du concept ARSIS, p74

Figure 55: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode du concept ARSIS, (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode de Contourlette, (c) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode de Contourlette, (d) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode de Contourlette, p75

Figure 56: Schéma de comparaison entre les images sources et l'image fusionnée, p76

Introduction générale

Depuis le début des années 90, la disponibilité des satellites d'observation de la terre a considérablement augmenté. Dans le passé, seulement quelques images de résolutions spatiales et spectrales ou quelques modalités de données étaient disponibles. De nos jours, les résolutions spatiales disponibles sont de moins d'un mètre avec des résolutions spectrales de plus en plus fines.

Un des éléments clefs pour l'observation de la Terre et la connaissance de notre environnement est formé par les systèmes spatiaux. Ces satellites embarquent divers capteurs actifs (radars) ou passifs. Les capteurs qui nous intéressent sont les capteurs passifs dont la bande passante est située dans le visible et l'infrarouge. Ils peuvent présenter des caractéristiques très différentes. Les images délivrées par ces capteurs permettent la distinction des structures géométriques en fonction de la résolution spatiale. Certains capteurs sont capables d'intégrer l'énergie radiative incidente à l'entrée du capteur sur une large bande en longueur d'onde, et offrent donc peu d'information au niveau spectral, mais proposent en même temps une résolution spatiale élevée. En général, ce type d'images s'appelle « image panchromatique » (noté PAN ci-après). Au contraire, d'autres capteurs embarqués sur ces mêmes satellites travaillent sur des bandes beaucoup plus étroites du spectre ; ce sont les images multi spectrales (notées MS ci-après), ou hyper spectrales dans le cas où le nombre de bande pour un même capteur dépasse la vingtaine. Leur résolution spectrale est beaucoup plus élevée, mais c'est au prix d'une faible résolution spatiale.

Mais il devient difficile pour l'utilisateur de contrôler toute cette richesse d'information. Il peut choisir les données les plus représentatives pour son application et ne pas tirer profit de cette richesse. Il peut traiter toutes les données disponibles séparément. Mais l'attitude la plus intéressante serait de combiner l'ensemble des informations disponibles de la manière la plus efficace.

Comment manipuler ces différentes données, comment extraire la meilleure combinaison ? La fusion des images est l'une des réponses à la meilleure utilisation de cet ensemble de données de télédétection.

Pour résoudre le problème de la fusion, Tout d'abord nous avons commencés par des méthodes à base de la transformée en ondelette tel que, l'Algorithme à trous et le Concept ARSIS puis utilisant la notion de la transformée directionnelle (Contourlet, Shearlet).

L'objectif de la thèse est de contribuer à la compréhension du problème de la synthèse d'image à haute résolution par des traitements de fusion.

Cette thèse comporte quatre chapitres principaux qui décrivent le travail élaborés et qui a pour finalité la fusion des images satellitaire de résolution spatiale et spectrale différente.

Après cette introduction générale, nous passons au premier chapitre qui englobe les notions et les définitions générales sur les satellites d'observation de la terre et l'imagerie satellitaire.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la fusion d'image satellitaire de résolution spatiale et spectrale différente.

Le troisième chapitre présente les principales méthodes d'application de se fusionnement.

Nous abordons dans le quatrième chapitre l'étude expérimentale des différentes approches vues en chapitre trois plus les différents résultats obtenus ainsi que les interprétations adéquates.

Nous terminons par une conclusion qui contient une évaluation des travaux effectués et les perspectives pour leurs continuations.

Chapitre I

Généralités

1. Introduction

Comment les images se forment-elles ? Quels capteurs pouvons-nous rencontrer ? En premier lieu, il est important de présenter le contexte dans lequel s'inscrit le sujet de ce manuscrit de thèse. Nous allons décrire la formation des images satellitaires car elles sont la matière première de ce travail. La description du contenu des images traitées est une partie importante de ce chapitre. Dans quelques années, le développement des villes deviendra un sujet particulièrement important et nous aurons besoin d'un grand nombre d'informations pour pouvoir gérer les agglomérations en constante croissance. C'est la raison pour laquelle des outils informatiques sont développés pour gérer ce problème, notamment en ce qui concerne la télédétection et le traitement d'images pour détecter les objets importants par des modèles et des méthodes qui peuvent apporter une aide aux thématiciens. Dans cette brève introduction, nous essayerons de décrire la formation des images satellitaires, de montrer les caractéristiques principales des capteurs, surtout de ceux que nous allons utiliser au cours de ce manuscrit de thèse.

2. Comment sont formées les images satellitaires ?

Le développement de l'observation de la Terre depuis l'espace est récent mais considérable. Les instruments spatiaux sont nombreux et, par conséquent, leurs caractéristiques également. Par exemple, les résolutions spatiales et spectrales montrent de grandes différences d'un instrument à l'autre. Les images satellitaires sont un arrangement de données numériques, les pixels, disposées de telle façon que, visuellement, elles nous donnent l'information de ce qui se trouve sur une certaine scène (à support continu). Nous pouvons observer sur la figure 1.1, les éléments qui interviennent pendant la formation des images numériques multi-spectrales. Ces images sont formées d'une façon générale par un système capteur qui donne une représentation de la scène de la façon suivante :

- **Source d'énergie.** Elle envoie la radiation à la scène observée dont la nature peut être de type ondulatoire (électromagnétique ou acoustique) ou corpusculaire (neutrons, positrons, électrons).
- **Scène.** Elle est composée d'éléments basiques nommés champ instantanés et champs instantanés visuels. Chacun de ces champs interagit avec la source de radiation ce qui résulte en une émission d'énergie vers le capteur.
- **Capteur.** Le capteur suit une certaine trajectoire pour enregistrer le signal émis par la source d'énergie qui est réfléchi par la scène.
- **Filtres.** C'est ici que la séparation des différentes bandes d'énergie est faite.
- **Convertisseurs.** La nature des signaux est continue, c'est pour cela qu'une discrétisation est faite dans cette étape.
- **Image Numérique Multi-spectrale.** Il s'agit d'une simplification de la scène. Par la suite, nous notons l'image comme un ensemble S , une grille, composée de sites $s \in S$, la valeur qui est prise dans chaque site est $x_{s \in S}^{(n)} \in G$, où G est

l'ensemble des niveaux de gris, dans la plupart des cas [0,255]. Dans la suite de ce manuscrit, nous allons montrer comment ces valeurs sont acquises.

D'une façon générale, le fonctionnement est le suivant : à partir de l'émission d'une radiation vers la scène par la source d'énergie, une certaine quantité de cette énergie est réfléchi du fait de l'interaction avec un élément physique de la scène qui est nommé champ instantané visuel ; cette énergie est ensuite enregistrée par le capteur monté dans le satellite qui décrit une certaine trajectoire autour de la Terre, cette trajectoire est appelée orbite. L'énergie enregistrée est ensuite envoyée aux filtres ou ensembles de filtres pour être envoyée aux convertisseurs à des fins de discrétisation, pour finalement obtenir une image multi-spectrale. Ce signal va nous permettre de donner une valeur au pixel $x_{s \in S}^{(n)}$. Pour cela, nous rappelons les définitions suivantes :

Les signaux émis obéissent à l'équation générale :

$$c = v\lambda \quad (1)$$

Où c est la vitesse de la lumière (c'est une constante : 3×10^8 m/s), λ la fréquence et la longueur d'onde, celle-ci sera utilisée pour représenter la scène.

De façon générale, nous notons que le signal $E_r(\lambda)$, qui est détecté par le capteur, est un signal réfléchi à partir du signal incident E_i émis par la source, celui-ci s'écrit :

$$E_r(\lambda) = E_i(\lambda) - [E_a(\lambda) + E_t(\lambda)] \quad (2)$$

Où E_i est le signal émis par la source, E_a est le signal absorbé et E_t est le signal transmis, ces deux derniers signaux ne seront pas détectés par le capteur. Les matériaux qui composent la scène ont un comportement spécifique vis-à-vis de ces signaux. Les images satellitaires issues de la télédétection sont une représentation de la longueur d'onde du signal E_r enregistré par le capteur (figure 1.2). Le signal émis par la source est ensuite réfléchi et des dispositifs de détection dans le capteur enregistrent et échantillonnent le signal pour donner des valeurs de niveaux de gris. Chaque détecteur répond à une certaine longueur d'onde dans le cas de données multi-spectrales

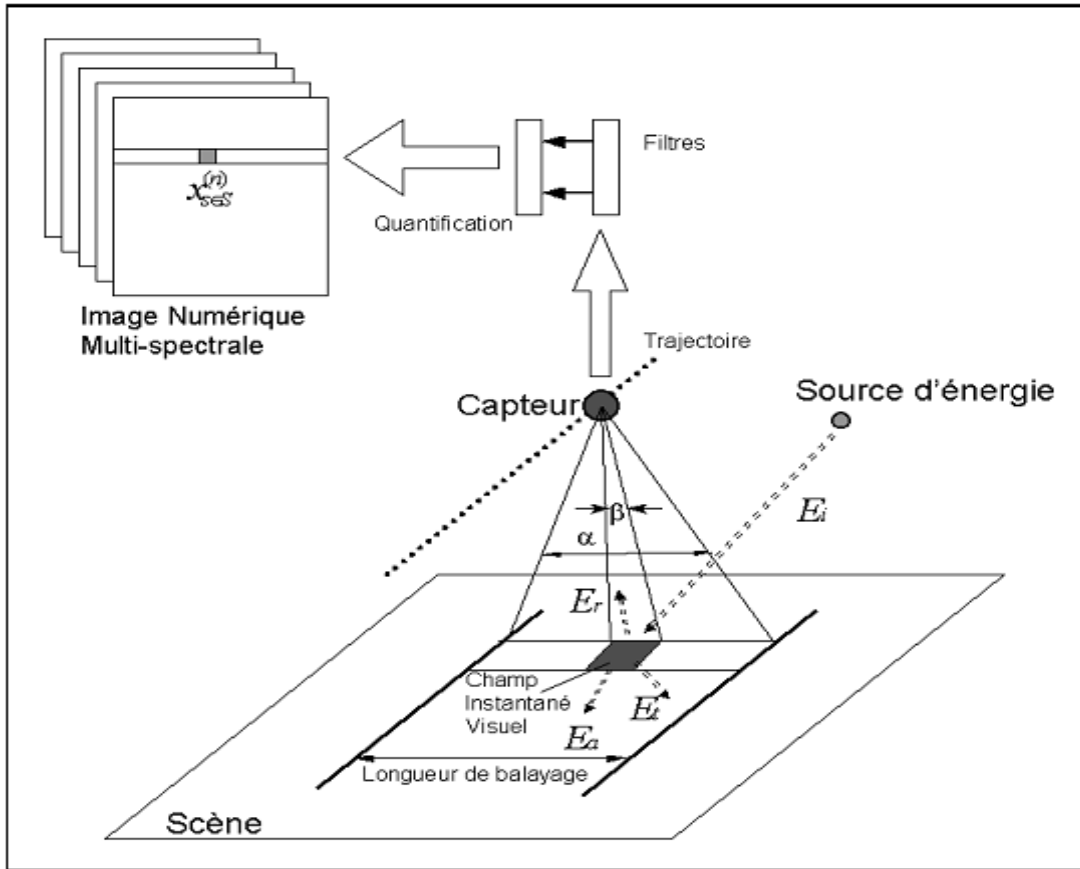


Figure. 1.1: Formation d'une image satellitaire numérique multi-spectrale.

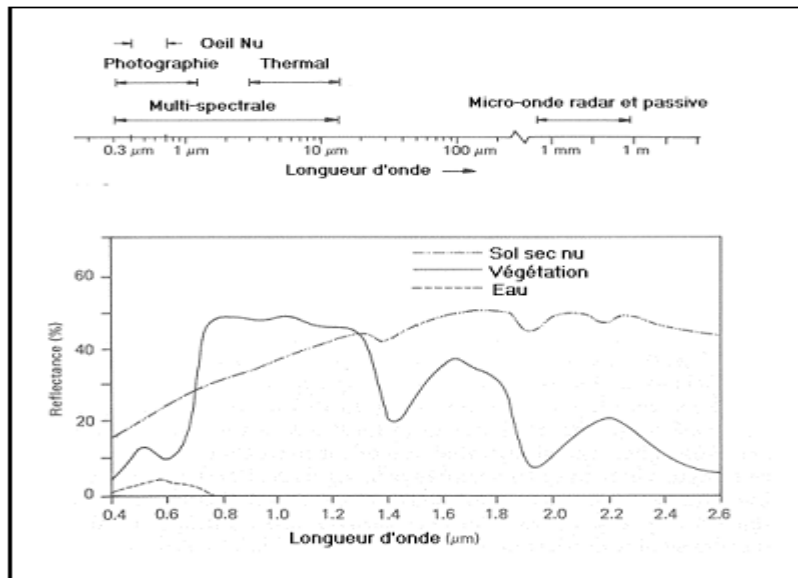


Figure. 1.2: Spectre électromagnétique (extrait de [Lillesand et Kiefer, 1979]).

La signature spectrale, figure 1.2, de certains types de terrain est importante à noter car les différents types de sols n'ont pas la même réponse, c'est une caractéristique qui a été utilisée pour classifier les images satellitaires. La végétation est un exemple de sols qui ont une réponse variée dans le spectre électromagnétique [Mathieu, 1994].

Le but du satellite et la capacité des capteurs sont cruciaux pour choisir l'orbite, celle là est déterminée par l'altitude, l'orientation et la rotation par rapport à la Terre. Par exemple, les satellites géostationnaires ont une altitude de 36000 km en se déplaçant à une vitesse correspondant à celle de la Terre pour enregistrer toujours le même endroit de la surface terrestre ; c'est le cas des satellites de communication.

D'autres satellites suivent une orbite qui va du Nord au Sud ou à l'inverse, cela en combinaison avec la rotation de la Terre peut nous amener à l'observation d'une grande partie de la surface terrestre. L'orbite est appelé quasi-polaire car il y a une inclinaison par rapport au méridien. En général, les orbites quasi-polaires suivent un parcours héliosynchrone pour observer chaque région de la surface terrestre à la même heure locale solaire. De cette manière la similitude des conditions d'illumination solaire est assurée. Dans ce contexte, il faut souligner que le passage du satellite donne lieu à la nomination ascendante ou descendante.

2.1 Champ Instantané Visuel

Un autre élément important de la figure 1.1, est le champ visuel, noté α , qui correspond à l'angle nécessaire pour enregistrer la scène. Si cet angle est grand, alors la distorsion géométrique est également grande.

Dans ce contexte, il faut tenir compte du champ instantané visuel, noté β , qui dans l'image numérique correspond au pixel.

2.2 Résolution

D'une façon générale, La résolution spatiale est donnée par la taille du pixel. La résolution radiométrique est l'étendue des valeurs discrètes correspondant à la luminosité. La résolution temporelle, utilisée pour des projets spécifiques, n'est que la mesure de la fréquence d'obtention d'une même donnée. La résolution spectrale représente les données prises dans une certaine longueur d'onde.

- **Résolution spatiale.** La taille de la région observée est déterminée par la distance entre la cible et le capteur. Le détail de l'image est aussi déterminé par le même facteur. Plus le capteur s'éloigne, plus la région observée est grande. Le problème reste dans le détail que l'on peut observer. La résolution spatiale est donc une fonction du plus petit élément qu'il est possible de détecter.
- **Résolution spectrale.** La résolution spectrale est la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Lorsque la résolution spectrale est fine, alors les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.
- **Résolution radiométrique.** Les caractéristiques radiométriques décrivent l'information contenue dans une image par la sensibilité d'un capteur au signal émis par la scène. La résolution radiométrique décrit donc la capacité de reconnaissance des différences dans l'énergie électromagnétique.

- **Résolution temporelle.** Le temps que prend le satellite pour enregistrer le même endroit dans les mêmes conditions : horaires, conditions d'illumination, etc., est la résolution temporelle. Le satellite, dans ce cas, a effectué un cycle orbital complet.

La résolution spatiale d'un capteur dépend principalement de son champ instantané visuel (CIV). Comme nous l'avons remarqué dans le paragraphe précédent, les images de télédétection sont composées d'une matrice d'éléments appelés pixels. Le pixel est donc le plus petit élément d'une image. Les images sont dites à résolution "grossière" lorsque seuls les grands éléments sont visibles ; en opposition, les images à résolution "fine ou élevée" permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Par exemple, les véhicules ne sont pas détectés à une résolution de 10m mais une résolution de 2,5m est suffisante ; par contre pour les identifier une résolution d'environ 50cm est nécessaire, finalement si une description est nécessaire une résolution plus fine de 10cm est souhaitée.

La distinction des classes de caractéristiques et de détails dans une image peut se faire par la comparaison entre leurs différentes réponses sur un ensemble de longueurs d'onde. Des classes telles que l'eau et la végétation sont larges et la séparation est faite par l'utilisation d'un grand intervalle de longueurs d'onde. En opposition, la séparation de différents types de roches nécessite d'un intervalle de longueurs d'onde plus fin.

Lorsque le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue, la résolution radiométrique est fine. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible est nommée plage dynamique.

2.3 Images multi-temporelles

Un des avantages de la télédétection satellitaire est sa capacité à obtenir de l'information d'une même région de la Terre à des temps différents. Les images multi-temporelles peuvent être comparées pour détecter les changements de caractéristiques spectrales ; par exemple, ceci est très utile pour étudier des changements tels que la croissance urbaine.

2.4 Facteurs intervenant dans la formation des images

Dans un autre ordre d'idées, nous pouvons noter l'intervention d'un ou la combinaison de plusieurs facteurs lors de la formation des images, à savoir :

- **La géométrie.** Elle nous indique la projection d'un point de la scène sur l'image ; il existe essentiellement deux projections : (1) la projection perspective qui nous indique le point d'une scène dans la direction indiquée quand il passe par l'origine et (2) la projection orthographique où le point de la scène à son équivalent dans la direction perpendiculaire.
- **La réflectance des surfaces visibles.** Sur la figure 1.3, nous pouvons voir qu'il existe deux types de réflecteurs : (1) Spéculaire et (2) diffus. Dans le cas idéal, le

réflecteur spéculaire reflète tout le signal et le réflecteur diffus correspond à une surface Lambertienne.

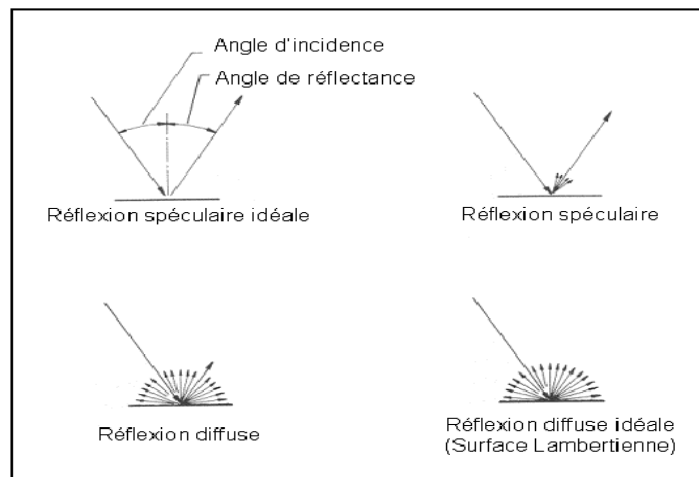


Figure. 1.3: Réflectance des surfaces visibles (à partir de [Lillesand et Kiefer, 1979]).

2.5 Distorsion géométrique des images

Les images issues de la télédétection présentent un problème, nommé distorsion géométrique, qui peut se présenter sous plusieurs formes. Étant donné que la télédétection a pour but de représenter la surface tridimensionnelle correspondant à la surface de la Terre sur une image bidimensionnelle, les distorsions inhérentes ont différentes formes et dépendent de l'acquisition des données. Quelques facteurs sont : un effet de perspective de l'optique du capteur, le mouvement du système de balayage, le mouvement et la stabilité de la plate-forme, l'altitude, le relief de la surface, la rotation de la Terre et sa courbure.

3. Capteurs

L'enregistrement de l'énergie réfléchie est fait par un capteur installé sur une plate-forme distante de la cible à observer. Les plateformes peuvent être situées près de la surface terrestre (avion par exemple) ou éloignées de la surface terrestre (satellite par exemple), ce qui entraîne dans ce dernier cas des distorsions dues au milieu que le signal traverse.

Nous avons besoin de la connaissance des sources d'information pour atteindre à l'objectif de ce travail et obtenir la description du milieu urbain que nous voulons détecter. Dans un premier temps, les capteurs peuvent être classés en :

Capteur Actifs qui mesure l'énergie retournée à partir d'une transmission faite par eux même. Les capteurs actifs sont alors émetteurs et récepteurs en même temps, c'est-à-dire source et capteur sont inclus dans le dispositif. Notamment, nous pouvons compter dans ce groupe les capteurs qui utilisent le radar.

Capteur Passifs qui mesurent l'énergie réfléchie ou émise par une source externe. Il y a des capteurs qui mesurent l'énergie du soleil réfléchi et travaillant dans le domaine de l'ultraviolet, du visible et du proche infrarouge. D'autres capteurs mesurent l'énergie

émise par la terre même, c'est à dire qu'ils travaillent sur la zone thermique des longueurs d'onde.

3.1 L'imagerie optique

L'imagerie optique utilise une source d'énergie externe, c'est la raison pour laquelle ce type de capteurs rentre dans la catégorie des capteurs passifs. Dans le spectre électromagnétique, figure 1.2, l'imagerie optique utilise le domaine visible et infrarouge.

3.1.1 Principaux satellites optiques

Dans le tableau 1.1, nous donnons un classement des satellites optiques, nous pouvons apprécier qu'il s'agisse de quelques uns des satellites les plus performants pour lesquels on mentionne les résolutions et la longueur de balayage.

Satellite	Capteurs	Résolution	Largeur Balayage
METEOSAT-2 (ESA) 1981	PAN	2.5 km	Le disque terrestre
	IR	5km	
TIROS (NOAA-i) AVHRR/2	MS (5 bandes)	1.1 km	2700 km
RESURS-01 MSU-SK	MS (4 bandes)	170 m	600 km
	IR Thermique	600 m	
LANDSAT 5 TM6 (USA) 1984	MS(6 bandes)	30 m	172 km
LANDSAT 5 MSS (USA) 1984	MS(8 bandes)	80 m	172 km
	IR thermique	120 m	
LANDSAT 7 ETM+ (USA) 1999	PAN	15 m	185 km
	MS (6 bandes)	30 m	
	IR thermique	60 m	
SPOT 1,2,3 (France,Belgique,Suède)	MS (3 bandes)	20 m	60-80km
	PAN	10 m	
SPOT 4 (France,Belgique,Suède)	MS (4 bandes)	20 m	60-80km
	PAN	10 m	
	Végétation	1km	
IRS-C (Inde) 1995	PAN	5.8 m	70 km
	LISS (3 bandes)	23 m	142 km
	WiFS	70 m	148 km
	WiFS MS	188 m	774 km
IKONOS (USA) 1999	PAN	1m	11 km
	MS(4bandes)	4m	
EROS A (Israël) 2001	PAN	1.8 m	12.5 km
QUICKBIRD(USA) 2001	PAN	61 cm	16.5 km
	MS (4 bandes)	2.44 m	
SPOT5 (France,Belgique,Suède) 2002	PAN	2.5 - 5 m	60 km
	MS (4 bandes)	10 m	
ORBVIEW3 (USA) 2003	PAN	1m	8km
	MS (4 bandes)	4m	
CARTOSAT (IRS-P5) Inde 2003	PAN	2.5 m	30-27km
EROS B (Israël) 2003	PAN	85 cm	16 km
Pleiades HR (France) 2006	PAN	70cm-1m	20-40km
	MS (4 bandes)	2.8 - 4 m	

Tableau. 1.1: Comparaison de capteurs optiques.

3.1.2 SPOT

Le système SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre (www.spot.fr)) est une série de satellites d'observation de la Terre qui a été conçue et lancée par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) en France, avec l'aide de la Belgique et de la Suède.

Tous les satellites SPOT sont en orbite héliosynchrone polaire à une altitude de 830 km, ce qui produit un passage périodique de 26 jours, cf. figure 1.4. Les satellites SPOT (sauf SPOT5) ont deux balayeurs multibandes HRV (Haute Résolution Visible) à barrettes, qui peuvent être opérés indépendamment ou simultanément. Chaque HRV peut capter en mode Panchromatique (une seule bande) et offre une excellente résolution spatiale de 10 m. Ils peuvent aussi capter en mode multi-bande (trois bandes) qui offre une résolution spatiale de 20 m.

Les bandes de sensibilité spectrale sont différentes suivant les 3 canaux et Panchromatique :

- Canal XS1, λ_1 : 0,50 à 0,59 μm (vert).
- Canal XS2, λ_2 : 0,61 à 0,68 μm (rouge).
- Canal XS3, λ_3 : 0,79 à 0,89 μm (proche infrarouge).
- Panchromatique : λ_p : 0,51 à 0,73 μm (du vert au rouge).

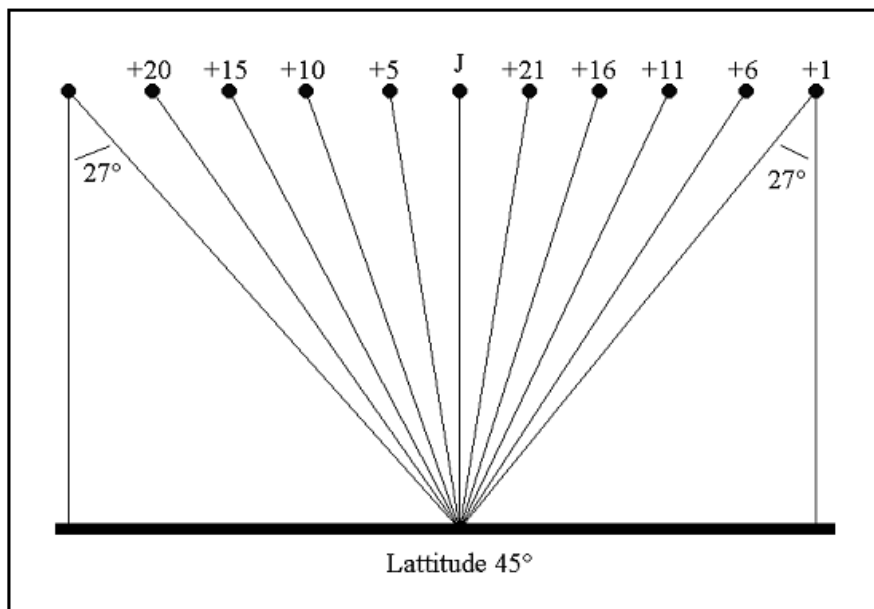


Figure. 1.4: Période de l'orbite Spot.

Les images SPOT ont la particularité d'être formées par la juxtaposition de lignes enregistrées à des instants différents. Cela diffère de la formation d'une image aérienne, qui fait l'acquisition d'une image de façon instantanée à partir d'un système optique homogène sur une surface bidimensionnelle. Ce type d'exploitation est dit "à balayage" (en anglais "push-broom"). Il est un peu plus complexe, puisque pendant l'acquisition des lignes, le satellite évolue sur sa trajectoire en oscillant légèrement. La géométrie de ces images dépend du capteur optique et de l'orbite.

Parmi les avantages de système SPOT par rapport aux autres capteurs, nous pouvons mentionner : La résolution spatiale fine, les données de trois bandes multi-spectrales qui

sont utiles pour l'affichage des images en fausse couleur et qui peuvent être améliorées par la bande Panchromatique ; plus le miroir inclinable qui permet l'acquisition de couples stéréos.

Des applications de SPOT sont la cartographie urbaine et la dérivation d'information topographique (modèle numérique de terrain, MNT) à partir des données satellitaires, ainsi que d'autres applications dans des domaines qui nécessitent des images fréquentes, tels que l'arboriculture et l'agriculture.

3.1.3 LANDSAT

Le premier satellite d'observation LANDSAT-1, qui a été lancé par la NASA en 1972, était connu à l'origine sous le nom ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite). Ce satellite avait pour but d'observer les parties nonhabitées de la Terre. Le programme Landsat est sous la responsabilité de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), depuis 1983.

Le système Landsat possède une combinaison de capteurs ayant des domaines spectraux dédiés pour l'observation de la Terre, une bonne résolution spatiale et une ample couverture du globe. Tous les satellites Landsat ont été placés en orbite héliosynchrone polaire. Les trois premiers satellites (Landsat-1 à Landsat-3) se situaient à une altitude de 900 km tandis que les derniers orbitent à une altitude approximative de 700 km.

Les satellites Landsat portent plusieurs capteurs comme les systèmes de caméras RBV (Return Beam Vidicon), le système MSS (Multi Spectral Scanner), et plus tard, le TM (Thematic Mapper). Le MSS capte le rayonnement électromagnétique de la surface de la Terre provenant de quatre bandes spectrales. Chaque bande possède une résolution spatiale de 60 sur 80 mètres, et une résolution radiométrique de 6 octets (ie. 64 valeurs numériques). Le MSS capte le rayonnement avec un balayeur mécanique qui utilise un miroir oscillant. Six lignes de balayage peuvent être recueillies simultanément avec chaque balayage d'est en ouest du miroir. La limite de résolution spatiale du TM est de 30 m pour toutes les bandes, sauf l'infrarouge thermique qui est de 120 m. Toutes les bandes sont enregistrées sur une étendue de 256 valeurs numériques (8 octets). Le capteur TM apporte plusieurs améliorations : une meilleure résolution spatiale et radiométrique, des bandes spectrales plus étroites, sept bandes spectrales par rapport à quatre pour le MSS, et une augmentation du nombre de détecteurs par bandes (seize pour les bandes non thermiques par rapport à six pour MSS). Seize lignes de balayage sont captées simultanément pour chaque bande spectrale non thermique (quatre pour les bandes thermiques). Ces lignes sont captées simultanément à l'aide d'un miroir oscillant qui balaie à l'aller (de l'ouest vers l'est) et au retour (de l'est vers l'ouest) du miroir.

Les données des capteurs TM et MSS sont utilisées pour plusieurs applications comme la gestion des ressources, la cartographie et la surveillance de l'environnement.

3.1.4 IRS

Les satellites IRS (Indian Remote Sensing Satellite) sont une combinaison des caractéristiques des capteurs de Landsat MSS et TM et du capteur HRV de SPOT.

Le satellite IRS-1C a été lancé en décembre 1995, avec trois capteurs : Panchromatique à une bande (PAN), le capteur à quatre bandes LISS-III (Linear Imaging Self-Scanning Sensor) de résolution moyenne, et le capteur à deux bandes WiFS (Wide Field of View) de faible résolution. Ce satellite a les mêmes applications que SPOT (PAN), Landsat (LISS-III) et AVHRR-NOAA (WiFs), ce qui fait de lui un capteur assez performant. [Oscar VIVEROS CANCINO, 2003]

3.1.5 Caractéristiques des images MSG

L'instrument principal, le radiomètre imageur SEVIRI, transmet des images de l'hémisphère terrestre tous les quatre d'heure dans douze bandes spectrales différentes. SEVIRI fournit des images avec une résolution spectrale, spatiale, et temporelle très poussés.

A titre de comparaison, les capteurs Météosat la première génération ne disposaient que de trois canaux spectraux et transmettaient les images du globe toutes les trente minutes. La résolution spatiale est également améliorée, puisqu'elle est de 3 Km pour les bandes multispectrales (contre 5Km pour la première génération) et de 1Km pour le canal visible haute résolution HRV (contre 2,5Km auparavant). Les performances de SEVIRI permettent aux météorologistes de décrire plus précisément les processus atmosphériques.

Les 11 premiers canaux de SEVIRI effectuent une rotation complète du disque terrestre toutes les 15 minutes. Le pas d'échantillonnage est approximativement de 3Km au point sous le satellite. Ce pas détermine la résolution des images prises dans tous ces canaux. Le 12^{ème} canal de SEVIRI avec une grande résolution dans le visible (HRV) a une résolution nominale d'approximativement Nord-Sud et une partie seulement de dimension Est- Ouest. Les images sont aussi transmises toutes les 15 minutes. La figure.1.5 [E-cours] montre des images prises dans les douze canaux de l'instrument SEVIRI.

La table 1.2 [EUMETSAT, 2005] donne les caractéristiques et les objectifs principaux des 12 canaux de l'imagerie SEVIRI. La figure.1.6 présente l'ensemble des douze bandes spectrales de MSG depuis les longueurs d'onde du visible jusqu'à l'infrarouge thermique. La figure donne la répartition des bandes MSG sur le spectre électromagnétique.

Canal	Appellation	Longueur d'onde centrale (μm)	Objectif principal
C1	VIS 0.6	0.635	Surface, nuages, champs de vent
C2	VIS 0.8	0.81	Surface, phase du nuage
C3	NIR 1.6	1.64	Surface, phase du nuage
C4	IR 3.9	3.90	Surface, phase du nuage
C5	WV 6.2	7.25	Vapeur d'eau, nuages à haute altitude, instabilité atmosphérique
C6	WV 7.3	7.35	Vapeur d'eau, instabilité atmosphérique
C7	IR 8.7	8.70	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C8	IR 9.7	9.66	Ozone
C9	IR 10.8	10.80	Surface, nuages, champs de vent, instabilité atmosphérique
C10	IR 12.0	12.00	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C11	IR 13.14	13.40	Hauteur des Cirrus
C12	HRV	0.4-1.1 μm	Surface, nuages

Tableau. 1.2: Caractéristiques et objectifs principaux des 12 canaux de prise d'image de SEVIRI

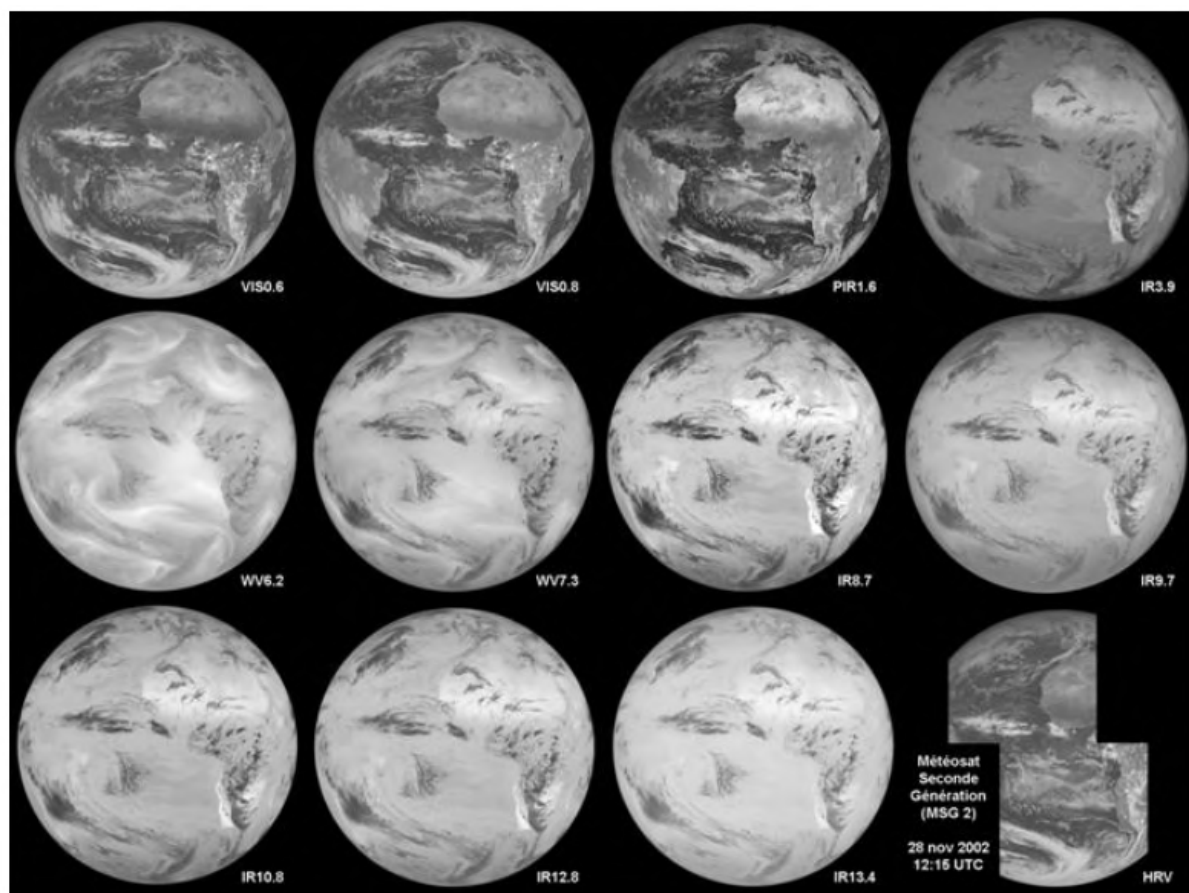


Figure. 1.5 : les 12 bandes spectrales de SEVIRI

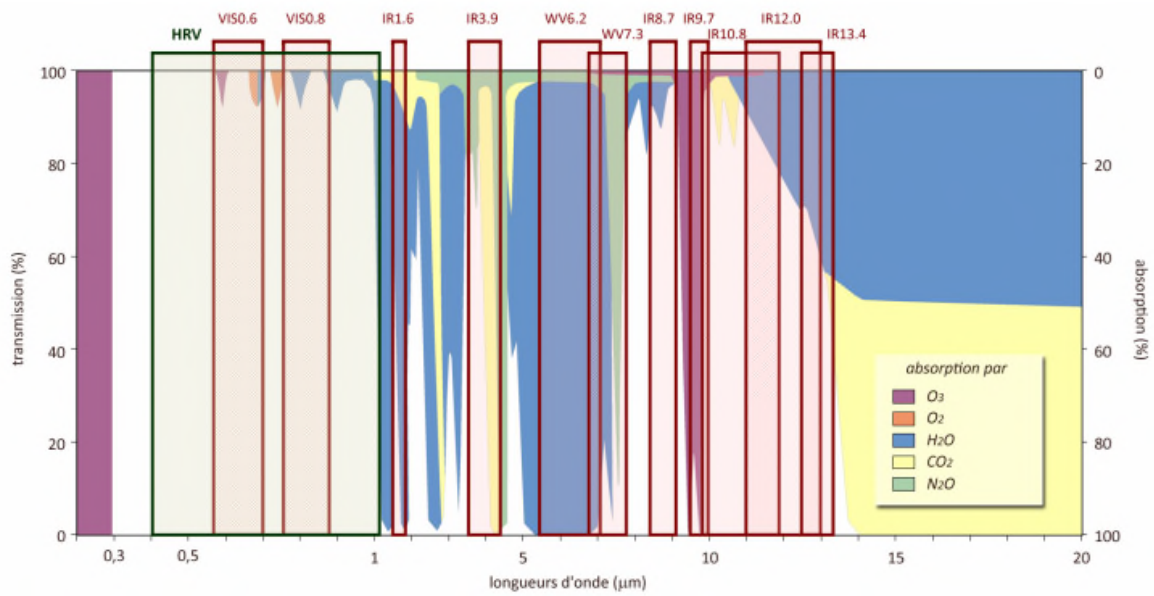


Figure.1 .6 : Répartition des bandes MSG sur le spectre électromagnétique

Conclusion

La télédétection satellitaire permet de produire des images qui, en quelque sorte, sont des photos prises à haute altitude. Cette information (image) est enregistrée et numérisée.

Chapitre II

Principe de fusion d'images

1. Introduction :

Avec l'avènement des satellites d'observation de la Terre transportant des systèmes de détection multiples (SPOT, Landsat par exemple) ou des systèmes à résolution spatiale élevée (radars, SPOT, Ikonos, Quickbird, etc.), le développement des techniques de fusion à finalité visuelle s'est intensifié.

En Europe, un groupe d'intérêt spécial dénommé "Data Fusion" a été créé en 1996. Ce groupe contribue à une meilleure compréhension et l'utilisation de la fusion des images dans le domaine de l'observation de la terre en organisant des réunions régulières de ses membres et en abordant des principes fondamentaux de fusion de données dans la télédétection. Une série de conférences internationales biennuelles appelée "Fusion of Earth Data – merging point measurements, raster maps and remotely sensed images" ont été lancées en 1996 dans le but de passer en revue ce champ de recherche et aider la communauté scientifique à bien comprendre les avantages de la fusion des images dans le domaine d'observation de la terre.

2. Fusion des données :

La fusion de données est la discipline qui cherche à combiner des informations obtenues de différents systèmes dans le but d'effectuer des inférences à partir de ces observations. La fusion de données est analogue aux capacités cognitives de l'être humain à intégrer divers stimuli à partir de différents sens (vue, ouïe, odeur, goût, toucher) pour l'inférence de connaissances sur le monde externe.

Par exemple, la reconnaissance d'une personne qu'on n'a pas vue depuis longtemps peut impliquer l'évaluation de différents facteurs tels la forme générale de la figure, des caractéristiques visuelles distinctes (nez proéminent, couleur des cheveux, etc.) ou la tonalité de la voix. Plusieurs des techniques développées pour la fusion de données tentent d'émuler l'habileté des êtres humains à effectuer la fusion.

La fusion de données est un domaine en émergence avec des applications variées. Historiquement, la plupart des techniques de fusion de données ont été développées pour des applications militaires : la surveillance des océans, la défense aérienne, le renseignement sur les champs de bataille et l'identification de cibles. La technologie est maintenant largement utilisée dans des applications non militaires telles que l'acquisition de données, le contrôle automatisé, la surveillance d'équipements complexes et la robotique.

La fusion peut se pratiquer à trois moments différents du travail (Fig. 1). Soit au niveau du pixel (fusion des pixels), soit au niveau des caractéristiques après une segmentation (fusion des objets extraits de l'image), soit au niveau décisionnel lors de la phase finale de la segmentation (fusion des objets extraits et identifiés) [Pohl et Van Genderen, 1998].

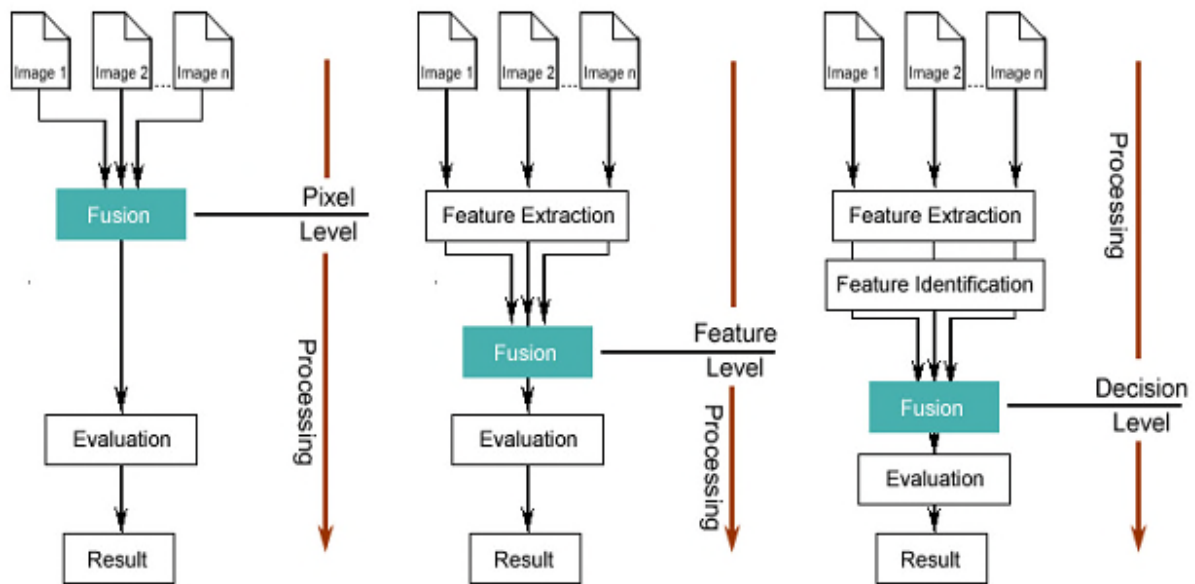


Figure. 2.1 : Niveaux de traitements de la fusion d'images [Pohl et Van Genderen, 1998]

Pour effectuer la fusion au niveau du pixel, les capteurs doivent être identiques (par ex., plusieurs caméras infrarouges) ou commensurables (par ex., images infrarouges et images radar).

Pour la fusion au niveau des caractéristiques, un vecteur d'attributs est extrait à partir de la sortie de chaque capteur. Ces vecteurs d'attributs sont ensuite combinés (fusionnés) et une déclaration d'identification est ensuite effectuée sur la base de ce vecteur conjoint. Les outils utilisés pour la déclaration d'identification comprennent les techniques statistiques (par ex., analyse de regroupements), les réseaux de neurones, les techniques structurelles et à base de connaissances.

Dans la fusion au niveau des décisions (ou niveau des déclarations), chaque capteur effectue de façon indépendante un estimé ou une déclaration de la scène observée. Ces estimations sont ensuite combinées via un procédé de fusion. Les techniques de fusion de déclarations incluent les méthodes de votation, l'inférence bayésienne et la théorie de Dempster-Shafer (Théorie de l'évidence).

Dans notre cas, la fusion aura pour but d'affiner la précision spatiale de l'image multispectrale, de préciser et de faciliter la photo-interprétation des images, il est donc plus approprié de la réaliser au niveau du pixel.

3. Définition de la fusion d'images :

Il existe plusieurs définitions de la fusion d'images dans le champ de la télédétection. On définit généralement la fusion d'images comme la combinaison de deux ou de plusieurs images différentes pour former à l'aide d'un algorithme une nouvelle image [Pohl et Van Genderen, 1998].

Le but de la fusion d'images est d'intégrer une information complémentaire à partir d'une multitude d'images pour créer une image fortement instructive, qui serait plus appropriée à la perception visuelle humaine et aux tâches de traitement par ordinateur. Cette technique est particulièrement utile lorsqu'on veut combiner des images de différentes modalités.

La procédure de fusion comprend généralement deux étapes. D'une part, les images doivent être superposables, ce qui implique leur géoréférenciation par une correction géométrique et un rééchantillonnage approprié. La deuxième étape correspond à la fusion proprement dite.

4. Applications de la fusion d'images :

Le champ d'application de la fusion d'images est potentiellement vaste. Dans le contexte du rehaussement d'images, elle a pour tâche principale de réunir au sein d'une image, l'information provenant de différentes sources imagées (images multisources). La procédure de fusion doit avant tout être considérée comme une technique d'assistance à l'interprétation visuelle. Pour des besoins de zonage ou de traitements numériques, la combinaison d'informations multisources procède d'une autre démarche. Pour des fins d'analyse visuelle, on souhaite habituellement une image la plus riche possible. On retrouve parmi les domaines d'applications :

-L'aide à la navigation :

Permettre aux pilotes par exemple de voler dans de mauvaises conditions de visibilité (telles que le brouillard ou la forte pluie). Les hélicoptères sont équipés de plusieurs capteurs d'imagerie, qui peuvent être consultés par le pilote. Une suite typique de capteurs inclut un capteur de lumière basse et un capteur infrarouge pour les images thermiques. Dans la configuration actuelle, le pilote peut choisir un des deux capteurs à observer dans son affichage. Une amélioration possible est de combiner les deux sources d'images dans une seule image fusionnée qui contient l'information appropriée des deux dispositifs imageurs.

- Photos prises en dehors du focal (out-of-focus) :

En raison de la faible profondeur focale des lentilles optiques (particulièrement ceux avec de longues profondeurs focales) il n'est souvent pas possible d'obtenir une image qui contient tous les objets appropriés. Une possibilité pour surmonter ce problème est de prendre plusieurs photos avec différents points focales et de les fusionner ensemble dans une seule image qui finalement contient les régions focalisées de toutes les images d'entrée.

- L'imagerie Médical :

Avec le développement de nouvelles méthodes d'imagerie dans le diagnostic médical, se pose la nécessité d'une véritable combinaison de tous les ensembles de données

d'images disponibles. Exemples de dispositifs d'imagerie, la tomographie par ordinateur (CT) ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

- La télédétection :

La télédétection est une application typique de la fusion d'image : Les modules à balayage spectraux modernes recueillent jusqu'à plusieurs centaines de bandes spectrales qui peuvent être visualisées et traitées individuellement, ou qui peuvent être fusionnées en une seule image, en fonction de la tâche d'analyse d'image.

La fusion peut se pratiquer lors d'applications les plus diverses :

- Établir et mettre à jour une carte topographique.
- Étudier les occupations du sol.
- Aider à la décision dans l'agriculture et la foresterie.
- Surveiller les inondations, les neiges et les glaces.
- Améliorer les capacités d'interprétation et de lisibilité.

La fusion des images vise à intégrer différentes informations dans le but d'extraire une information supplémentaire. Ces informations peuvent provenir de plusieurs capteurs, ou peuvent être multi-temporels ou bien de résolutions spatiales différentes. Les objectifs de la fusion d'images dépendent principalement des sujets spécifiques de recherches et de la disponibilité des images sources.

5. Objectifs de la fusion d'images :

Les objectifs les plus communs de la fusion d'images sont :

- Netteté de l'image
- Amélioration de la précision radiométrique
- Création d'ensembles stéréo de données
- Augmentation des caractéristiques
- Amélioration de la classification
- Détection de changement dans le temps
- Franchissement des écarts

6. Situation de la fusion d'image : [I. BLOCH, H. MAÎTRE]

Selon les applications, les problèmes de fusion peuvent se produire dans des situations différentes, dans lesquelles les types d'informations ne sont pas les mêmes. Les principales situations de fusion en traitement d'images sont les suivantes.

6.1 Plusieurs images du même capteur :

Il s'agit par exemple de plusieurs canaux du même satellite. Les données sont alors relativement homogènes car elles correspondent à des mesures physiques similaires.

6.2 Plusieurs images de capteurs différentes :

C'est le cas le plus fréquent où les principes physiques différents des capteurs permettent d'avoir des points de vue complémentaires sur la scène. Il peut s'agir d'image IRS, SPOT etc. L'hétérogénéité est alors beaucoup plus importante, les différents capteurs ne concernant pas le même aspect du phénomène. Les images donnent chacune une vision partielle et ne sont informatives sur les caractéristiques auxquelles elles ne sont pas dédiées.

6.3 Plusieurs informations extraites d'une même image:

Il s'agit de situation dans lesquelles on extrait divers types d'informations d'une image à l'aide de plusieurs détecteurs, opérateurs, classifieurs, etc..., qui s'appuient sur des caractéristiques différentes des données, cherchant à extraire des objets différents, rendant ainsi les informations à fusionner souvent très hétérogènes. Les informations extraites peuvent concerner le même objet (fusion de détecteur de contour par exemple) où des objets différents et on cherche alors une interprétation globale de la scène et une cohérence entre les objets. Elles peuvent être de niveaux différents.

6.4 Image et autre source d'information:

Par autre source d'information, on entend par exemple un modèle, qui peut être soit particulier comme une carte, soit générique comme un atlas anatomique, des bases de connaissances, des règles, des informations issues d'experts, etc. Les informations sont à nouveau de types très différents à la fois dans leur nature et dans leur représentation initiale.

7. Exemples de fusion d'images :

7.1 Cas des images panchromatiques (Pan) et multispectrales (MS) :

La technologie d'affichage et d'impression permet la représentation simultanée de trois bandes spectrales à l'aide des trois couleurs fondamentales : RVB pour un système additif et CMJ pour un système soustractif. Pour des raisons de rapidité de la mesure notamment, les images de télédétection actuelles sont soit spectralement riches, soit spatialement détaillées. Le principe des techniques de fusion d'images consiste donc à combiner la richesse spectrale d'une composition colorée de trois bandes avec la haute résolution spatiale d'une image monobande, souvent panchromatique.

Les images satellitaires riches en information spectrale sont toujours faibles en résolution spatiale. Par contre, à l'inverse, les images à haute résolution spatiale présentent une information radiométrique de faible qualité liée à leur caractère panchromatique. Dès lors, il apparaît intéressant de combiner ces deux types d'images pour réaliser des images composites offrant à la fois une bonne résolution spatiale et spectrale. L'image résultante gardera les propriétés spectrales de l'image de basse résolution tout en intégrant les détails spatiaux de l'image de haute résolution.

L'avantage de manipuler des images multispectrales possédant une très haute résolution spatiale a déjà été démontré, par exemple pour la classification [Gonzalez et al.

1996] [Tsagaris et al. 2005] [Huang et al. 2003] [Byeungwoo et Landgrebe 1999], la détection de cibles [Fillipidis et al. 2000], la cartographie de la voirie [Couloignier et al. 1998], l'étude du développement des zones urbaines [Zhang et Wang 2002] [Sengupta et al. 2004] ou encore la prospection archéologique [Ricchetti 2004]. Il est bien sûr possible de distinguer de larges zones dans une image MS ou Pan dès lors qu'elles possèdent des caractéristiques très distinctes, comme la surface de l'océan par rapport à la zone côtière, ou une exploitation agricole par rapport à une région très urbanisée. Par contre, il devient nettement plus difficile de distinguer des espaces végétaux ou minéraux très hétérogènes, sans considérer leurs signatures spectrales. L'information de « couleurs » favorise la distinction des différentes régions de l'image grâce à des nuances jusqu'alors invisibles dans l'image Pan initiale en niveaux de gris. Par conséquent, si l'on peut utiliser ces contenus spectraux tout en profitant d'une meilleure résolution spatiale, l'identification des objets d'une scène sera enrichie et plus précise [Cornet et al. 2004].

Il est alors légitime de se demander pourquoi les constructeurs n'ont pas directement construit des capteurs capables de délivrer des images à hautes résolutions spatiale et spectrale. Ces notions sont contradictoires d'un point de vue technique ; plus la bande spectrale d'acquisition d'un capteur est large, plus le flux lumineux incident sur un pixel de l'image est grand. L'ouverture de la pupille d'entrée peut alors être réduite, la taille des pixels est alors plus faible et donc l'image présente une meilleure résolution spatiale. Par contre, une bande beaucoup plus étroite du spectre limite le nombre de photons absorbés par le capteur généralement CCD pour Charged-Coupled Device, qui se traduit en français par DTC pour Dispositif à Transfert de Charge et donc l'énergie incidente sur chaque cellule. Le temps d'intégration doit donc être plus grand que précédemment pour pouvoir délivrer un rapport signal sur bruit et une dynamique similaires. Comme le vecteur spatial bouge, cette augmentation du temps d'intégration entraîne une augmentation de la taille du pixel, expliquant la résolution spatiale plus faible.

Pour réduire le temps d'intégration, une solution serait l'augmentation de la sensibilité des détecteurs. Mais la limitation est tout d'abord financière, puisque construire des capteurs plus sensibles coûte cher. Outre la limitation budgétaire, d'autres contraintes sont imposées par la plateforme satellite en terme d'espace, de poids, de puissance, de rayonnement électromagnétique, mais aussi des objectifs de mission (orbite), de la fusée pour le lancement, etc. En admettant que les capteurs soient en mesure de délivrer des images MS de résolution spatiale atteignant celle du Pan, deux autres problèmes vont se poser ; la capacité de stockage sur la plate-forme et la bande passante du canal de transmission sont limitées. Prenons l'exemple du satellite Ikonos ou Quickbird : ces satellites possèdent quatre bandes MS. Si la résolution spatiale de ces images était augmentée d'un facteur 4 pour rejoindre celle du Pan, leur taille serait multipliée par 16, soit 16 fois plus de données à stocker et à transmettre au sol.

A cet égard, la recherche s'est principalement orientée ces dernières années vers des procédures permettant d'incorporer l'information spatiale de l'image ayant la meilleure résolution, tout en préservant l'information spectrale de l'image multi-bande.

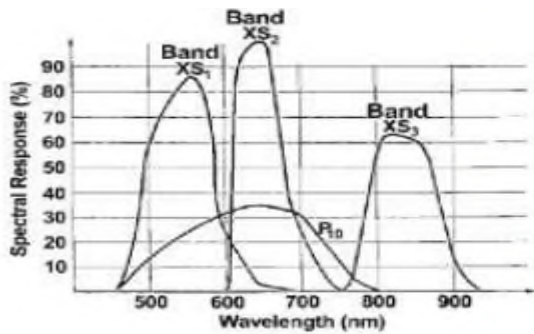
Exemple :



(a) Image MS



(a) Image Pan



(c) Caractéristiques spectrales des bandes



(d) Image de fusion

Figure. 2.2 : Exemple de fusion d'images panchromatique et multispectrales

7.2 Cas des images optiques et radar :

La disponibilité des images de la Terre, provenant de nombreux capteurs optiques (visible et infrarouge) et radar, permet d'étendre nos connaissances du milieu et de mieux appréhender nos décisions sur le paysage terrestre étudié. En effet, la complémentarité des sources d'informations offre une meilleure interprétation de la zone d'étude considérée. Ainsi, les capteurs optiques sont sensibles à la signature spectrale des objets et fournissent des images qui renseignent sur la végétation et l'occupation du sol, tandis que le capteur radar est sensible à la géométrie des cibles et fournit une image qui renseigne sur la topographie, la rugosité et le contenu en humidité du sol. Cette complémentarité d'informations a conduit la communauté scientifique au développement de méthodes de fusion permettant d'injecter l'information radar dans les images optiques [Pohl and van Genderen, 1998]. Nous pouvons distinguer pour cela deux principales approches. La première consiste à fusionner des images multispectrales avec l'image radar et repose sur l'utilisation de l'espace des couleurs [De Sève et al., 1996] [Haack and Slonecker, 1994] [Harris and Murray, 1990] [Rast et al., 1991] [Yésou et al., 1993] [Welch et Ehlers, 1988]. Par contre, la deuxième approche concerne la fusion des images panchromatiques et radar, et repose sur l'utilisation du filtre passe-haut [Pohl and van

Genderen, 1998] ou la transformation en ondelettes [Mangolini et al., 1993] [Mangolini, 1994]. L'objectif principal d'une telle application est la détection d'une information qui n'est pas extractible en considérant seulement une des deux modalités. Les points lumineux introduits dans la figure 3.c correspondent à des dispositifs synthétiques : maison métallique, voiture, antenn...

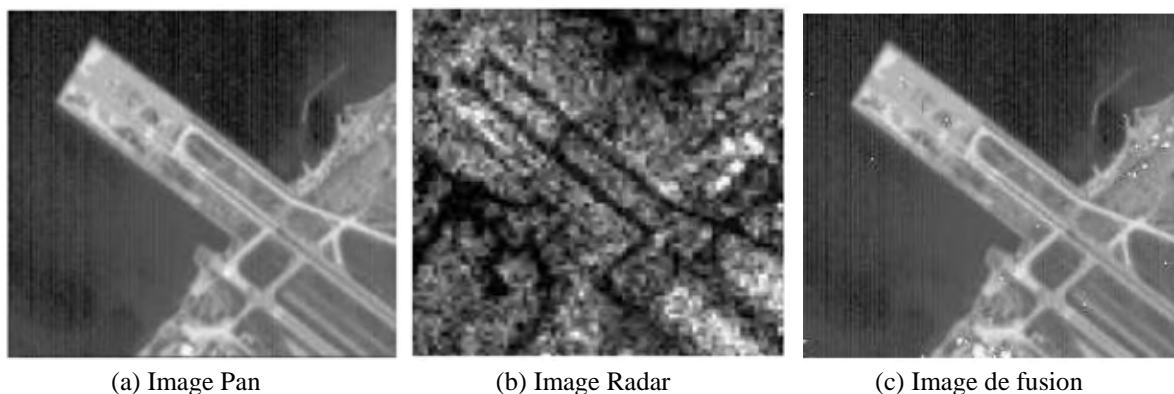


Figure. 2.3 : Exemple de fusion d'images optiques et radar

8. Prétraitements :

Il n'y a généralement pas de prétraitement particulier pour pouvoir réaliser une fusion d'images, il est néanmoins recommandé que les corrections - géométrique et radiométrique - de l'image soient effectuées avant la fusion sur les images individuelles [Pohl et Van Genderen, 1998], car après celle-ci la contribution de chaque capteur ne peut plus être distinguée ou quantifiée et par conséquent ne peut plus être traitée en conséquence. Pour ce qui est de la fusion d'images SPOT 5 XS et P, celles-ci n'étant pas prises avec le même angle de visée, les corrections doivent obligatoirement être effectuées avant la fusion.

L'orthorectification doit être de très haute précision, le géocodage doit être parfaitement identique entre les différentes scènes (au pixel près), ceci afin d'éviter d'éventuelles distorsions au niveau des couleurs dans l'image fusionnée et fausser ainsi la classification. Afin d'obtenir le calage le plus proche possible entre les deux images, la méthode de corrélation, qui consiste à redresser l'image MS à partir de l'image P orthorectifiée, est le plus souvent recommandée [Bontemps, 2004].

9. Qualité de fusion d'images :

L'hypothèse de base sur laquelle reposent les méthodes de fusion est la similitude de l'état de la réalité mesuré dans les deux types d'images à fusionner. D'un point de vue théorique, les deux images doivent rendre compte de la même portion d'espace, à un même moment et pour un même domaine spectral. Si la première condition est une évidence relativement aisée à satisfaire, les deux autres restreignent considérablement le champ d'application.

Dans la pratique, on doit admettre une certaine flexibilité face à ces deux contraintes sévères. Sauf dans le cas d'images produites simultanément par deux systèmes de détection installées sur la même plate-forme (systèmes aéroportés, HRV de SPOT, ETP de Landsat, etc.), il est impossible de garantir la simultanéité des prises de vue. On admettra donc que la situation de fusion est favorable d'un point de vue temporel si l'état des objets au sol et les conditions atmosphériques et d'illumination sont suffisamment stables entre les deux dates. Il s'agit enfin de garantir que les valeurs de luminance de l'image monobande injectée correspondent au domaine spectral mesuré dans l'image multispectrale. Une correspondance parfaite est rarement possible, mais il faudra garantir que cette injection ne se substitue pas à la luminance mesurée dans chacune des bandes spectrales. Dans ce cas, les effets de dégradation de l'information spectrale pourraient être démesurés par rapport à l'ajout du détail spatial produit. La sensibilité à cet égard varie d'une méthode de fusion à l'autre.

De plus, le résultat de la fusion est sensible à la variété des thèmes présents dans la scène acquise par le capteur du satellite. Par exemple, les vagues à la surface de l'océan ou les haies rectilignes des exploitations agricoles ne sont pas résolues à des résolutions de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de mètres. Ces structures ne sont résolues que sur une plage étroite en fréquence spatiale. La résolution caractéristique d'une région correspond à une bande de fréquence spatiale qui dépend de la taille des objets présents.

Ainsi, un procédé de fusion appliqué à une zone homogène d'un point de vue radiométrique telle que de larges exploitations agricoles, des régions désertiques ou un océan, a de fortes chances d'être très performant. Par contre, à résolution spatiale identique, fusionner les zones urbaines ou les petites parcelles agricoles font partie des cas les plus difficiles. De telles scènes exhibent un grand nombre d'objets de tailles très différentes qui s'intersectent. Par conséquent, comme le spectre de ces paysages est beaucoup plus complexe, le processus de fusion a une probabilité plus importante de donner des résultats plus médiocres.

L'utilisateur veut naturellement produire une image de bonne qualité. Cependant, la notion de qualité des produits de fusion est difficile à appréhender puisque chaque acteur possède sa propre vision de la définition d'une image fusionnée de bonne qualité. Par exemple, un utilisateur qui souhaite procéder à un post-traitement de type classification ou segmentation, n'aura pas les mêmes critères d'évaluation du produit fusionné qu'un autre utilisateur appliquant un algorithme de détection de cible.

Ceci-dit, pour la fusion au niveau pixel dans lequel nous nous plaçons, il existe quelques conditions génériques qui peuvent être imposées dans les résultats de fusion :

- 1) L'image fusionnée doit préserver toutes les informations pertinentes contenues dans les images source aussi étroitement que possible.

2) Le processus de fusion ainsi qu'aucune autre étape ultérieure de traitement d'images ne doivent introduire des objets indésirables ou artefacts, qui peuvent tromper l'observateur humain.

3) Dans l'image fusionnée, les caractéristiques non pertinentes et les bruits doivent être supprimés à un degré maximum.

La qualité de fusion se rapporte à la qualité spatiale et spectrale des images. Les méthodes de fusion d'image visent à augmenter la résolution spatiale des images multispectrales tout en préservant leur contenu spectral original. Le contenu spectral est très important pour la photo-interprétation et la classification des objets. Il existe une multitude de méthodes de fusion, nous passons en revue quelques unes dans le chapitre suivant.

10. Conclusion :

Vu ces situations et la limitation d'application de la fusion d'image, nous avons choisi un cas qui dépend des images disponibles, telle que la fusion d'image d'un même capteur acquise aux mêmes dates. Dans le chapitre suivant, nous illustrons les différentes méthodes d'application de la fusion d'images.

Chapitre III

Les méthodes de fusion d'images

1. État de l'art :

Plusieurs méthodes de fusion d'images ont été proposées dans la littérature. Les méthodes de fusion d'images existantes peuvent être classifiées dans plusieurs groupes. Chavez [Chavez et al. 1991] les a classifiées en techniques du domaine spectrales, techniques du domaine spatiales et techniques de l'espace échelle. Ranchin et Wald [Ranchin T. et Wald L. 2000] les ont classifiées dans trois groupes : méthodes de projection et de substitution, méthodes à contribution spectrales relatives et celles concernant le concept d'ARSIS. Toutes ces méthodes supposent que les images sont corrigées géométriquement et calibrées radiométriquement.

Un passage en revue des techniques de fusion, édité en 1998 dans le journal international de la télédétection "International Journal of Remote Sensing", a référencé approximativement 150 exposés académiques sur la fusion d'image. Depuis 1998, d'autres documents scientifiques sur la fusion d'image ont encore été édités tout en améliorant la qualité de fusion et réduisant la distorsion d'image. Parmi les centaines de variantes des techniques de fusion d'image, nous citons ci-dessous les principales et les plus populaires des méthodes.

2. Méthode de la transformée en ondelettes :

Cette méthode utilise l'information spatiale de la bande Pan pour simuler des images MS. La simulation des images MS se fait grâce à l'utilisation de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution. Cette analyse a été introduite par Mallat (1989). Cet outil mathématique permet de calculer des approximations successives d'une même image à des résolutions spatiales de plus en plus grossières. Elle peut être représentée par une pyramide (Figure. 3.1) dont la base est l'image originale et dont les différentes approximations sont les différents étages de la pyramide. La limite théorique de cette analyse est une image d'un pixel qui représenterait la moyenne de l'image de départ.

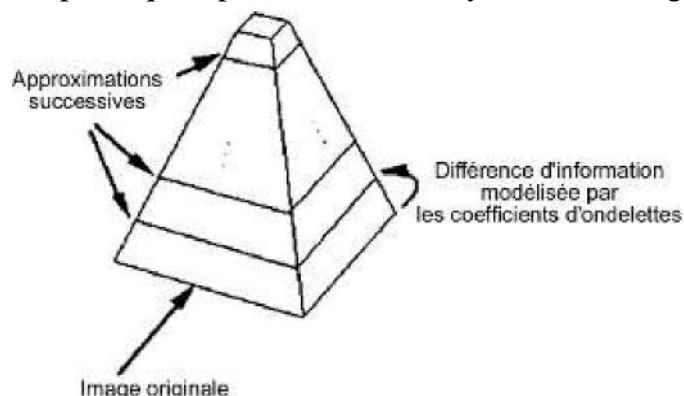


Figure. 3.1 : Pyramide représentant une analyse multirésolution

La différence d'information existant entre deux approximations successives est modélisée par des coefficients d'ondelettes calculés à partir de la transformée en ondelettes. Les bases d'ondelettes sont construites par dilatations et translations d'une fonction unique, appelée ondelette-mère. Le signal, ou l'image, est décomposé dans cette

base et une représentation temps-fréquence (pour un signal) ou espace-échelle (pour une image) est obtenue. Cette opération d'analyse faisant appel à la transformée en ondelettes est inversible et à reconstruction exacte. Ainsi à partir d'une approximation de l'image d'origine (un étage de la pyramide) et des images de coefficients d'ondelettes (représentant la différence d'information entre deux approximations successives), il est possible de reconstruire exactement l'image d'origine.

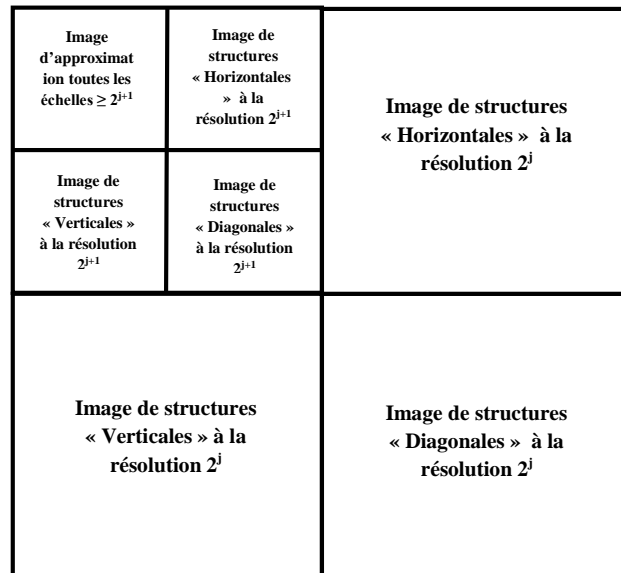


Figure. 3.2 : Présentation d'une analyse multirésolution réalisée à l'aide de l'algorithme de Mallat [Ranchin T. 2005]

L'application des ondelettes et de la fonction d'échelle s'effectue pour les images de manière séparable en lignes puis en colonnes. La dilatation de l'ondelette et de la fonction d'échelle est obtenue par sous-échantillonnage de l'image originale. Les approximations successives de l'image originale sont appelées image de contexte. La première approximation contient toutes les échelles dont la taille est supérieure à la moitié de celle de l'image d'origine.

Les trois images de coefficients d'ondelettes contiennent les échelles comprises entre la résolution de l'image originale et celle de la première image d'approximation dans les directions : diagonale, verticale et horizontale. La figure. 3.2 représente la décomposition de l'information d'une image à l'aide de l'algorithme de Mallat.

La méthode de fusion en utilisant la transformée en ondelettes comporte quatre étapes :

1. Egalisation de l'histogramme de l'image HR (Haute Résolution) à celui du canal BR (Basse Résolution).
2. Transformation en ondelettes de l'image HR de manière à produire quatre nouvelles images à la même résolution que l'image BR; trois de ces images contiennent l'information de structure de l'image HR à injecter, elles sont codées par les coefficients d'ondelettes et correspondent en fait à des filtres passe-haut directionnels; la quatrième image, un filtre passe-bas, correspond à l'image HR rééchantillonnée à la résolution du canal BR.

3. Référenciation géométrique du canal BR par rapport à l'image HR.

4. Transformation en ondelettes inverse appliquée au canal BR, afin de produire un néo-canal spectral HR simulée

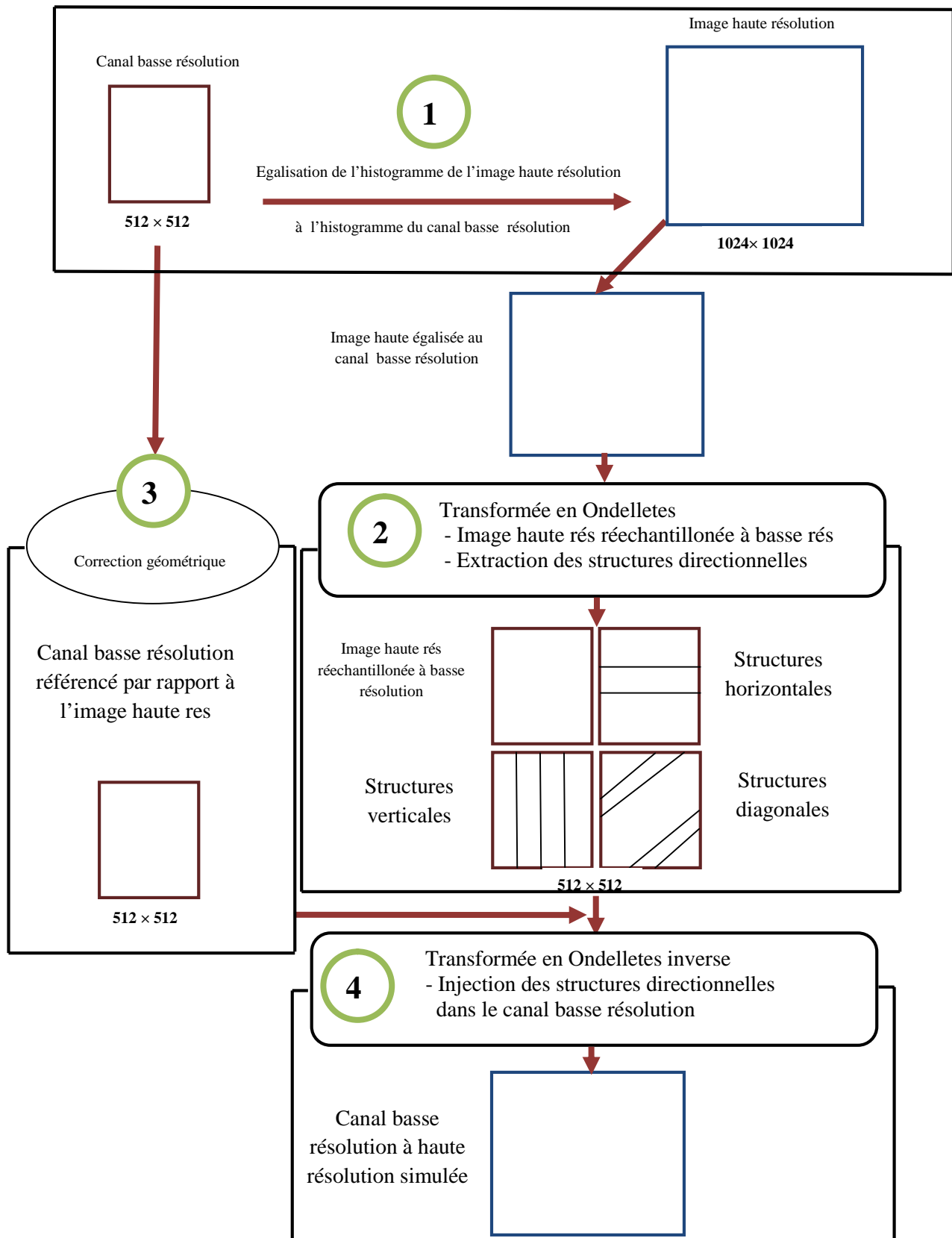


Figure. 3.3 : Principe de la fusion par la méthode des ondelettes [Garguet et al, 1996]

2.1 Ondelettes de Haar

La première ondelette a été proposée par Haar (1909). L'intérêt de cette base d'ondelettes est la grande simplicité des filtres associés donc de l'algorithme de calcul.

a) Décomposition suivant la base de Haar

Les filtres [Truchetet, 1998] associés à la décomposition sont :

$$\tilde{h}(n) = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \quad \tilde{g}(n) = \left[-\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{Eq.III.1}$$

b) Reconstruction suivant la base de Haar

Les filtres [Truchetet, 1998] associés à la reconstruction sont :

$$h(n) = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \quad g(n) = \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right] \quad \text{Eq.III.2}$$

2.2 Algorithme à trous

L'algorithme à trous est plus souple dans la mesure où les familles d'ondelettes ne sont ni orthogonales ni biorthogonales. Une seule image non directionnelle de coefficients d'ondelettes par résolution est produite. Cette image aura la même taille que l'image originale car on n'a pas à faire de décimation [Ranchin, 1993]. Un filtre isotrope est utilisé. Il ne privilégie aucune direction et possède les coefficients suivants :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{16} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} \end{bmatrix}$$

Dans cet algorithme, une seule fonction d'échelle est utilisée. L'approximation de l'image originale, est obtenue par filtrage et l'image de coefficients d'ondelettes est obtenue par soustraction de l'image originale et l'approximation. Cet algorithme permet d'obtenir à chaque échelle une approximation et une image de détails non-directionnelle. Pour obtenir la dilatation de l'ondelette, un zéro est ajouté entre chacun des coefficients d'ondelettes. Ainsi, aucun sous-échantillonnage de l'image n'est appliqué et toutes les images obtenues ont la même taille. la reconstruction est obtenue par sommation de la dernière approximation obtenue et de toutes les images de coefficient d'ondelettes calculées.

2.3 Méthode ARSIS :

ARSIS est l'acronyme de «Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures». Cette méthode développée conjointement par l'Aérospatiale et l'Ecole des mines de Paris [T. Ranchin, 1993] [T. Ranchin et L. Wald, 1997] [Mangolini, 1994] permet, dans un ensemble d'images de résolutions spatiale et spectrale différentes, d'amener les images ayant une moins bonne résolution spatiale à la meilleure résolution spatiale disponible dans l'ensemble des données. Cependant, la qualité spectrale des images dont on améliore la résolution spatiale est préservée. Les images obtenues peuvent être utilisées à d'autres fins que la simple visualisation et ainsi améliorer, par exemple, la précision des classifications réalisées sur les images multibandes originales. Cette méthode s'appuie sur la transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution.

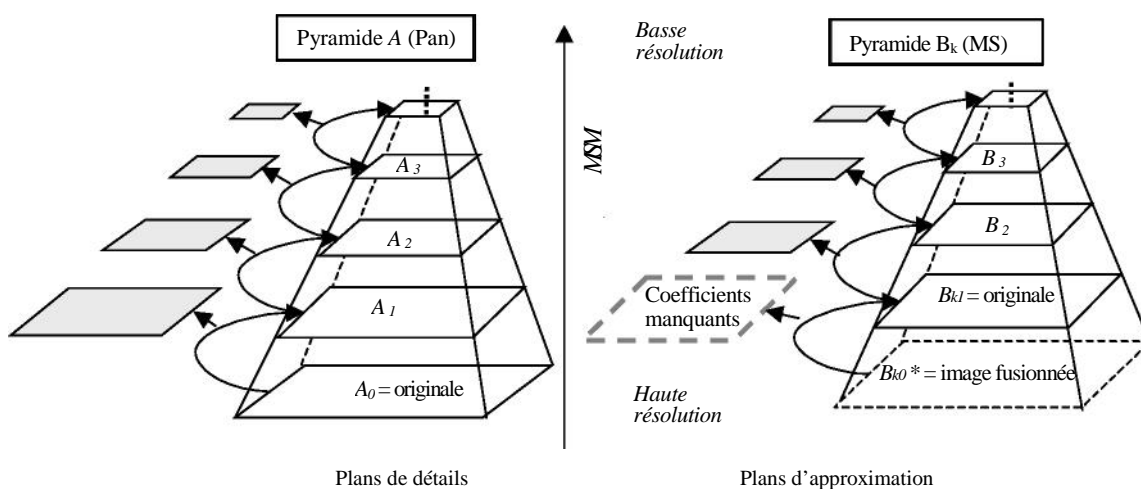


Figure. 3.4 : décomposition hiérarchique de l'information.

Avec A_h : l'image à haute résolution spatiale (h la résolution spatiale originale de A).

B_l : l'image multispectrale (l la résolution spatiale originale de B où $l < h$).

B_{*h} : est l'image synthétique proche de la réalité.

La figure ci-dessus (Figure. 3.4) illustre cette approche dans le cas d'une description pyramidale de l'information. L'information manquante dans la pyramide B et devant y être injectée se situe dans la partie basse manquante de la pyramide B. C'est seulement cette information qui est nécessaire pour synthétiser l'image B_{*h} . Si l'on translate le bas de la pyramide A directement dans la pyramide B et que l'on reconstruit l'image synthétique B_{*h} elle ne sera pas équivalent à "ce que devrait voir le capteur B s'il avait la résolution spatiale du capteur A". Afin d'améliorer la qualité des images synthétiques, une transformation de l'information fournie par la représentation multi-échelle de l'image A en information nécessaire à la synthèse de l'image B, doit être effectuée [Ranchin T. 2005].

La méthode ARSIS permet de synthétiser des images MS-HR à la résolution spatiale Pan tout en préservant la qualité spectrale des images MS originales. Le schéma de cette méthode est présenté à la figure ci-dessous (Figure. 3.5) :

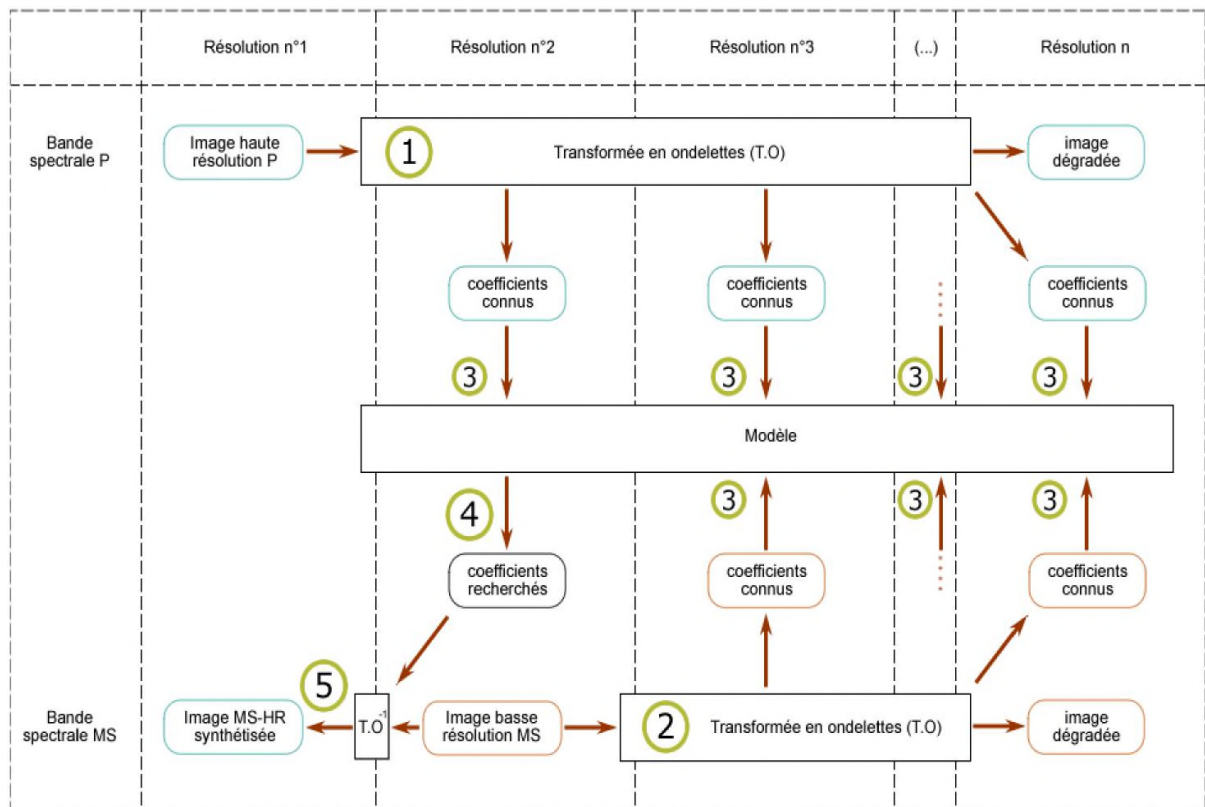


Figure. 3.5 : Méthode ARSIS

La méthode de fusion en utilisant la méthode ARSIS comporte les opérations suivantes :

1. Une analyse multirésolution utilisant la transformée en ondelettes est appliquée à l'image Pan, des approximations de cette image sont calculées.
2. Les différences d'information entre les approximations successives de l'image originale sont modélisées par les coefficients d'ondelettes. De manière similaire, l'image MS est décomposée et ses approximations sont calculées.
3. Un modèle de transformation des coefficients d'ondelettes de l'image Pan vers les coefficients d'ondelettes de l'image MS pour une résolution spatiale donnée est calculé.
4. Ce modèle est alors inféré et appliqué à l'image de coefficients d'ondelettes Pan représentant la différence d'information entre l'image Pan et son approximation.
5. Cette opération permet de calculer les coefficients d'ondelettes nécessaires à la synthèse de l'image MS-HR. Cette synthèse s'effectue par reconstruction (inverse de l'analyse) à partir des coefficients d'ondelettes synthétisés et de l'image originale MS.

Notons qu'il existe différents modèles de fusion de type ARSIS, nous pouvons citer les deux suivant :

2.3.1. Couple M1

Ce couple ne procède pas à une estimation de paramètres (absence d'*IMM*) [Ranchin et Wald 2000]. *M1* se résume à un *HRIMM* simple correspondant à la fonction identité.

L'image MS à $res0$ est donc directement synthétisée en introduisant sans pré-traitement le premier plan de détails disponible dans la pyramide A , $D_{A,0-1}$:

$$D_{Bk,0-1} = D_{A,0-1} \quad \text{Eq.III.3}$$

La Figure. 3.6 schématise l'implantation de ce couple :

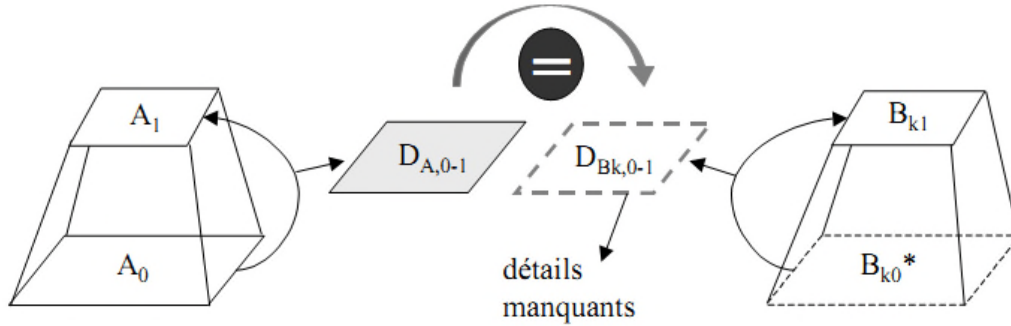


Figure. 3.6: schéma récapitulatif du couple IMM-HRIMM M1.

2.3.2. Couple M2

Pour une modalité donnée, il existe une forte relation affine entre les détails de l'image A et ceux de B pour des échelles supérieures à $res1$ [Ranchin et Wald 2000]. On admet que cette relation reste inchangée avec le changement d'échelle $res1-res0$ ($IMM = HRIMM$). Cette hypothèse est moins exigeante que celle qui impose une forte corrélation entre A et B_k pour les méthodes de projection et de substitution.

$M2$ cherche à définir une relation de type affine, basée sur l'ajustement des moyennes et des variances des premiers plans de détails disponibles simultanément dans les deux pyramides ($D_{A,1-2}$ et $D_{Bk,1-2}$). L'histogramme du plan de détail $D_{A,1-2}$ est adapté à celui de $D_{Bk,1-2}$. L' IMM se définit de la manière suivante :

$$D_{Bk,1-2} = f_2(D_{A,1-2}) = aD_{A,1-2} + b \quad \text{Eq.III.4}$$

Avec a et b :

$$a = \frac{\sqrt{v(D_{Bk,1-2})}}{\sqrt{v(D_{A,1-2})}} \quad \text{Eq.III.5}$$

$$b = m(D_{Bk,1-2}) - am(D_{A,1-2}) \quad \text{Eq.III.6}$$

Où m et v définissent les opérateurs de moyenne et de variance. a et b seront différents pour chaque modalité. Pour le $HRIMM$, les détails manquants sont alors déterminés par :

$$D_{Bk,0-1} = f_1(D_{A,0-1}) = aD_{A,0-1} + b$$

Et donc ici $f_1 = f_2$, c'est-à-dire que $IMM = HRIMM$. La figure si dessous explique le principe des couples $M2$.

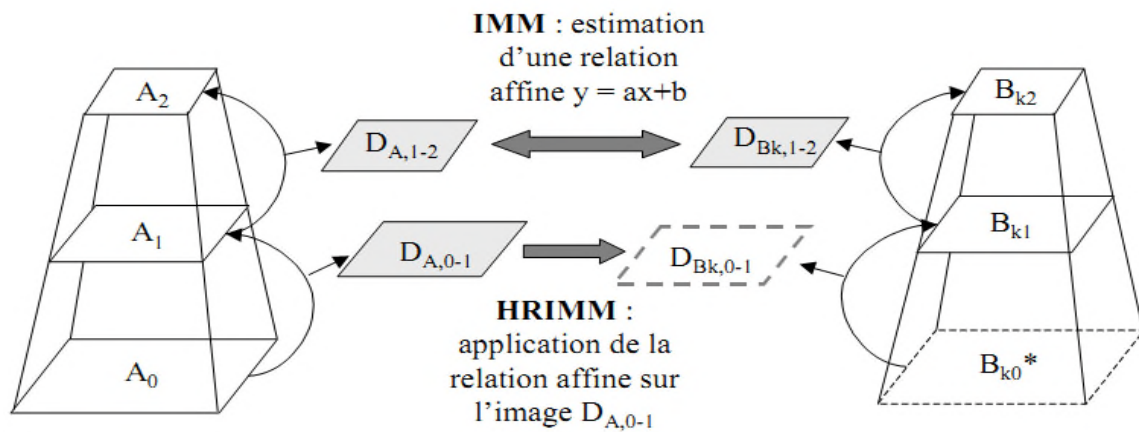


Figure. 3.7 : Schéma récapitulatif du couple M_2

3. Les transformées directionnelles :

Dans le cas des images, pour des raisons de simplicité et d'efficacité, les ondelettes ont souvent été utilisées de manière séparable sur les axes horizontal et vertical. Il en résulte une décorrélation partielle de l'image, qui se traduit par la présence de nombreux coefficients de forte énergie le long des contours. Il peut sembler intéressant de chercher une transformée qui résolve ce problème en filtrant directement le long des contours de l'image.

De plus, il a été reconnu qu'une représentation efficace d'image doit tenir compte de la structure géométrique très répandue dans les scènes naturelles. En ce sens, plusieurs schémas de représentation ont récemment été proposés. Il s'agit notamment des schémas adaptatifs tels que des wedgelets et des bandelettes et les non adaptatifs tels que des curvelets et des contourlettes.

Basées sur cette observation, de nombreuses transformées orientées, discrètes ou continues, ont été conçues [Friedrich et al, 2005]. Certaines reposent sur des bancs de filtres directionnels fixes analysant l'image à des échelles, positions et orientations données. D'autres suivent une approche adaptative décrite par un modèle géométrique donnant explicitement la direction d'analyse locale. Nous allons dans ce chapitre faire un tour d'horizon des transformées directionnelles existantes, en les situant les unes par rapport aux autres.

3.1 Transformée de Radon :

La transformée de Radon [Radon J., 1917] consiste à projeter l'image sur un certain nombre d'orientations en intégrant l'image le long de la direction orthogonale à la projection, puis à réaliser la transformée de Fourier de ces projections. La reconstruction s'obtient en plaçant, pour chaque orientation de projection choisie, les coefficients de Fourier obtenus le long de cette même orientation, dans le domaine fréquentiel. On obtient l'image reconstruite en

effectuant ensuite une transformée de Fourier 2D inverse. La reconstruction parfaite pour cette transformée continue s'obtient pour un nombre de projections infini, parcourant l'ensemble des orientations possibles. La transformée de Hough [Duda R. O. et Hart P. E., 1972] est un cas particulier de transformée de Radon pour une image à valeurs binaire, et s'utilise principalement pour la reconnaissance de formes.

3.2 Ridgelets :

Les ridgelets (dite : “crêtelettes“) [Candes E. J., 1998] forment une extension naturelle de la transformée de Radon pour un nombre limité de directions, en se basant sur des fonctions d'ondelettes pour contrôler la précision en orientation et garantir la reconstruction parfaite. Cette famille est constituée de lignes d'orientation variable et dont la largeur dépend du support de l'ondelette choisie. Donoho [Donoho D. L., 1998], a proposé une famille de ridgelets fenêtrées sous le nom d'orthoridgelets. Ce fenêtrage implique une discrétisation en orientation pour une seule échelle donnée. La transformée en ridgelets est non-redondante, nécessitant toutefois d'avoir une image carrée dont la taille est un nombre premier.

3.3 Curvelets :

La transformée en curvelet (dite : “courbelettes“) a été proposée par Candes et Donoho [Candes E. J. et Donoho D. L., 1999]. Cette transformée se dérive des ridgelets multi-échelles. Une première décomposition permet d'obtenir une analyse multi-échelles en sous-bandes. Ces sous-bandes sont ensuite analysées par une transformée en orthoridgelets. Ces éléments suivent une loi de changement d'échelle parabolique, bien adaptée à l'approximation des courbes. L'ondelette utilisée pour construire les orthoridgelets est l'ondelette de Meyer tandis que la fonction d'échelle de Lemarié est utilisée pour la représentation des basses fréquences. Cette transformée a été utilisée avec succès dans le cadre du débruitage. Elle a été utilisée également avec succès dans la fusion des images par [Myungjin C. et al, 2005], en utilisant le concept d'ARSIS et la transformée en curvelet.

3.4 Contourlets :

Conçue directement dans le domaine discret, la transformée en contourlettes a été proposée dans [Do M. et Vetterli M., 2001] [Do M. N. et Vetterli M., 2003]. Cette transformée repose sur des filtres en éventails itérés pour l'analyse directionnelle et une pyramide laplacienne pour l'analyse multirésolution. Elle apporte une analyse similaire à la transformée en curvelets, tout en ayant l'avantage d'être très peu redondante et moins complexe. L'analyse multirésolution est effectuée à l'aide des filtres d'ondelette. Contrairement à la reconstruction classique de la pyramide laplacienne, l'opérateur de

reconstruction utilisé est l'opérateur transposé de l'opérateur d'analyse, qui correspond approximativement à l'opérateur pseudo-inverse car ces filtres sont quasi-orthogonaux. Un sous-échantillonnage sur lattice quinconce permet d'itérer ce banc de filtres pour obtenir les sous-bandes directionnelles sans redondance additionnelle. Ce filtrage est par ailleurs réalisable de manière séparable après décomposition polyphase. Nous reviendrons plus en détails sur cette transformée dans la section suivante.

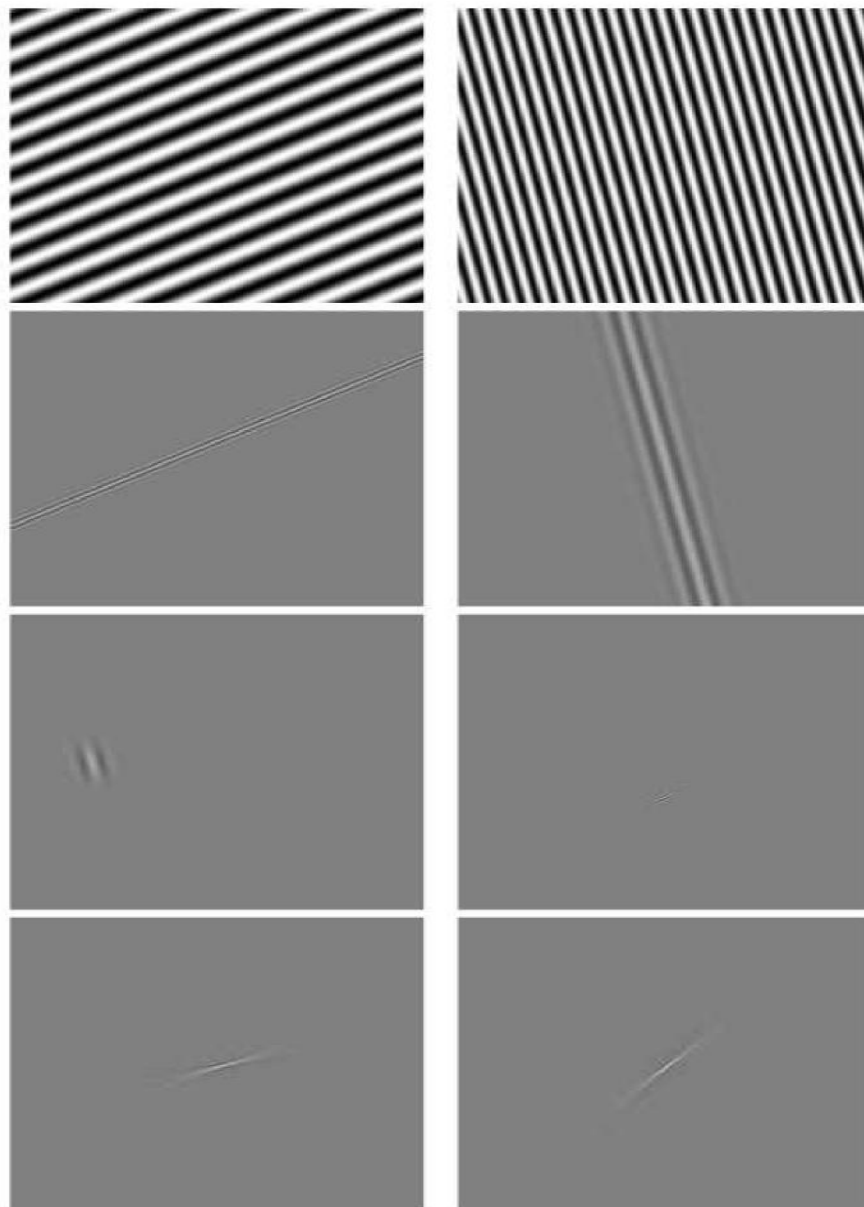


Figure. 3.8: Exemples de fonctions de base pour la transformée de Radon, les ridgelets, les curvelets et les contourlets (de haut en bas).

3.5 Shearlet :

La transformée en brushlets a été proposée par Meyer et Coifman dans [Meyer F. G. et Coifman R. R., 1997]. Elle donne un partitionnement adaptatif du plan fréquentiel offrant plus de flexibilité que les paquets d'ondelettes en s'affranchissant de la contrainte de séparabilité. Il est alors possible de

représenter un motif orienté à l'aide d'un seul coefficient. La décomposition est effectuée en appliquant successivement des opérateurs de fenêtrage à l'image suivis chacun d'une transformée de Fourier. La reconstruction s'obtient alors en effectuant la transformée inverse de chaque composante puis en appliquant l'opérateur de fenêtrage dual et en sommant finalement chaque contribution.

3.6 Beamlets :

La décomposition en beamlets [Donoho D. L., 2000] considère un partitionnement de l'image en quadtree, puis effectue une transformée de Radon dans chaque bloc. Les coefficients de beamlets sont liés par une relation multiéchelle, où chaque beamlet à un niveau donné est décomposée en trois beamlets connexes au niveau suivant. Cette transformée permet d'approximer les courbes dans les images et d'en extraire les contours par sélection dans le graphe de connexité des beamlets.

3.7 Wedgelets :

La décomposition en wedgelets [Donoho D. L., 1999] représente une image par un quad-tree dans lequel chaque bloc est séparé en deux régions d'intensité différentes par une ligne. Elle est donc, en quelque sorte, duale à la décomposition en beamlets en considérant les intégrales de l'image de chaque côté du segment représentant le contour plutôt que l'intégrale le long du segment. Cette transformée a été généralisée en dimension plus élevée sous le nom de surflets [Chandrasekaran V. et al, 2004]. Enfin, les platelets [Willett R. M. et Nowak R. D., 2002] sont une extension des wedgelets considérant un modèle affine de l'intensité des régions des deux côtés du segment de contour.

3.8 Bandelettes :

La transformée en bandelettes repose sur un modèle géométrique explicite de l'image pour effectuer une analyse orientée le long des contours. Une première approche [Pennec E. et Mallat S., 2000], consiste à représenter les contours par des courbes paramétriques le long desquelles une ondelette séparable est déformée. Une seconde approche [Pennec E. et Mallat S., 2003] considère un champ d'orientations plutôt qu'un nombre restreint de courbes. Ce champ, représenté sous forme de quad-tree, indique l'orientation locale à l'intérieur de blocs de l'image. La complexité principale de cette transformée réside dans la recherche du champ d'orientation et l'optimisation débit-distorsion pour répartir le débit entre les différentes informations.

3.9 Directionnels :

Une transformée discrète à échantillonnage critique appelée transformée en directionnels est présentée dans [Vetterli M. et al 2004] [Velisavljevic V. et al 2005]. Un filtrage séparable est effectué le long de deux directions d'analyse

correspondant aux vecteurs de base d'une lattice, dont le déterminant donne le nombre de sous-bandes. Cette technique fournit une analyse anisotrope de l'image, bien adaptée aux images à forte structure géométrique.

3.10 Comparaison des différentes transformées :

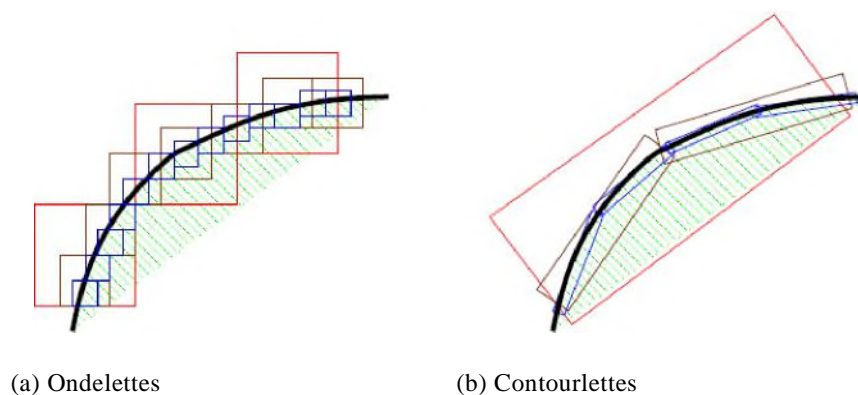


Figure. 3.9: Représentation en ondelettes et en contourlettes des images

Parmi l'ensemble de ces transformées directionnelles, seul un nombre restreint a été appliqué à la fusion des images. Les transformées orientées ont cependant une meilleure capacité à représenter les contours de l'image, permettant d'obtenir une distorsion plus faible que les transformées non orientées pour le même nombre de coefficients. La figure 11 montre comment les contourlettes peuvent représenter des contours lisses avec moins de coefficients comparée aux ondelettes.

Les premières transformées directionnelles à avoir vu le jour sont les transformées de Radon et la transformée en cortex, cependant ces transformées sont définies dans le domaine continu, donc non adaptée aux images numériques. Les approches discrètes fournissant la meilleure sélectivité directionnelle sont la transformée en contourlettes et la transformée de Shearlet [Vivien C., 2005].

Ce qui en fait des bonnes candidates pour son application à la fusion d'images.

La plupart des transformées discrètes présentées ici considèrent soit des approches dans le domaine de Fourier, comme la transformée en Shearlet, soit des filtrages séparables dans le domaine spatial comme le cas de la transformée de Contourlettes.

Notre objectif étant d'investiguer le potentiel de la transformée en contourlet non sous échantillonnée (NSCT) et la transformée de Shearlet dans l'amélioration des résultats de la fusion d'image satellitaire, nous commencerons par donner une représentation de la transformée en contourlettes, puis la transformée de Shearlet.

4. Représentation en contourlettes :

La transformée en contourlettes telle qu'elle a été introduite par Minh Do et Martin Vetterli [Do M. et Vetterli M., 2001] [Do M. N. et Vetterli M., 2003], est un schéma de décomposition d'images, qui fournit une représentation éparsée des

données aussi bien aux résolutions spatiales que fréquentielles. Une décomposition d'image en contourlettes est construite en combinant successivement deux étages de décomposition distincts : une décomposition multi-échelle suivie d'une décomposition directionnelle.

La décomposition multi-échelle est effectuée au moyen d'une pyramide laplacienne redondante. L'analyse directionnelle s'effectue ensuite au moyen des bancs de filtres directionnels à échantillonnage critique appliqué à chaque sous-bande de la pyramide laplacienne excepté la sous-bande de basse fréquence (Fig. 13).

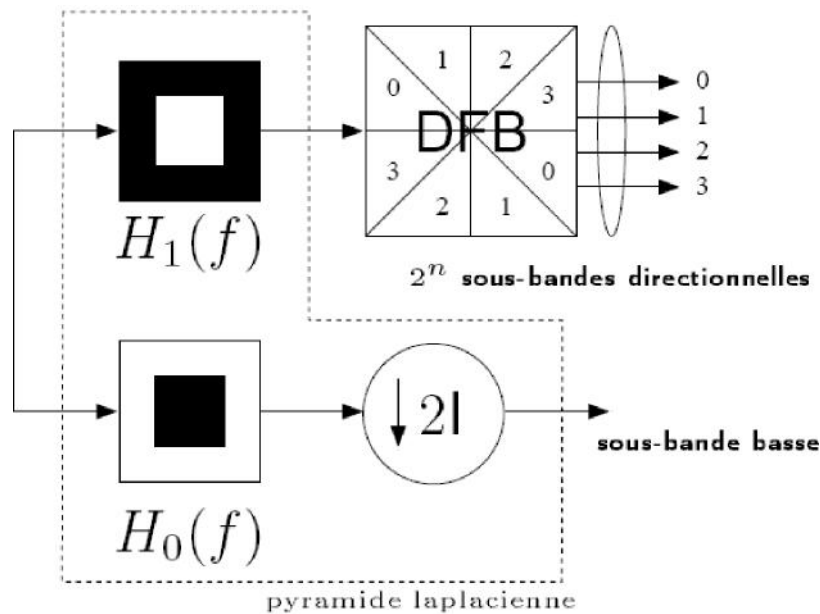


Figure. 3.10: Un niveau d'analyse de la transformée en contourlette.

La transformée en contourlettes est à reconstruction parfaite et son degré de redondance est relativement faible. Comparée à la transformée en Ondelette discrète, la transformée en contourlettes avec sa propriété de sélectivité directionnelle (ou orientée) conduit à des améliorations et à de nouveaux potentiels pour les applications de traitement d'image.

En effet, les contours fins sont mieux représentés puisque des expérimentations ont déjà clairement montré que les contours lisses sont représentés de manière efficace par quelques coefficients contourlettes localisés dans la bande à orientation appropriée [Do M. et Vetterli M., 2001] [Do M. N. et Vetterli M., 2003].

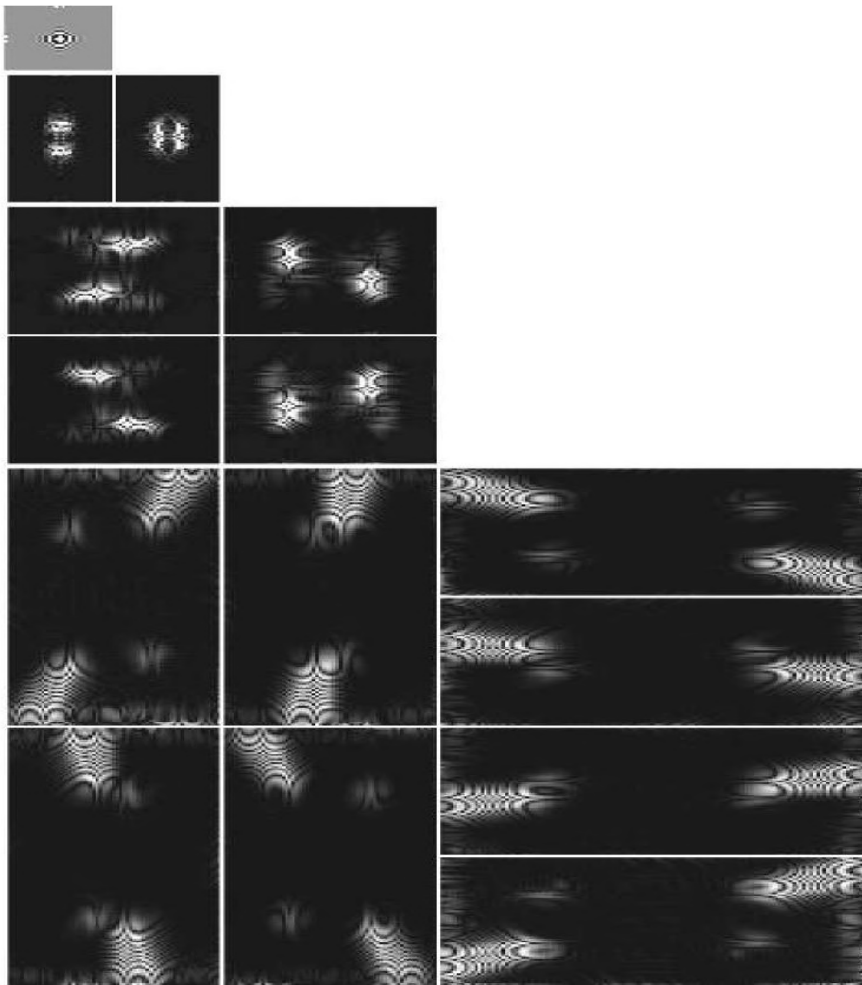


Figure. 3.11: Coefficients de décomposition en Contourlettes (3 niveaux,8,4,2 orientations)

Un filtre passe-bas d'analyse H_0 est appliqué sur le signal puis celui-ci est sous-échantillonné par M pour en obtenir une représentation basse résolution. Ce signal d'approximation est alors sur-échantillonné par M puis filtré par le filtre passe-bas de synthèse G_0 pour obtenir un signal dégradé de même résolution que le signal d'origine. L'erreur haute fréquence introduite par les filtrages et les ré-échantillonnages est alors calculée en soustrayant le signal dégradé au signal d'origine. On obtient alors après cette étape d'analyse un signal d'approximation de résolution inférieure et un signal d'erreur de résolution identique au signal d'origine.

En raison de ce sur-échantillonnage et du sous-échantillonnage présents dans la pyramide laplacienne et les bancs de filtres directionnels, la transformée en contourlettes n'est pas invariante au décalage (en anglais *shift-invariant*).

Un système est dit invariant au décalage ou invariant par translation, si les coefficients de décomposition ou les images résultats sont de même taille. Cette propriété préserve mieux l'intégrité de l'image et l'est souhaitable dans les applications de traitement d'images, telles que la détection de contours, la fusion des images, etc. Dans le domaine fréquentiel, elle est dite ainsi lorsqu'une entrée $x(n)$ produit une sortie $y(n)$ et une entrée $x(n+m)$ produit une sortie $y(n+m)$.

Cette propriété n'est donc pas présente dans la transformée en contourlettes à cause de la décimation à la sortie de chaque niveau de décomposition et en résulte des artefacts. De plus, le fait de considérer un banc de filtres fixe à échantillonnage critique pour l'analyse directionnelle implique de réaliser un compromis entre la précision sur la localisation spatiale des contours et la résolution en direction des filtres d'analyses.

D'autre part, la sélectivité réduite introduit une réponse non négligeable des filtres directionnels en dehors de leur domaine fréquentiel idéal. Ceci se traduit en la présence d'aliasing indésirable dans les sous-bandes directionnelles. L'ensemble de ces points contribue à la dégradation des performances en fusion des images des contourlettes.

4.1 La transformée en contourlettes non-sous-échantillonnée :

Nous introduisons ici la transformée en contourlettes non-sous-échantillonnée, en anglais *NonSubsampled Contourlet Transform* (NSCT). Introduite récemment par Cunha, Zhou, et Do [Cunha A. L et al, 2006], elle est construite en combinant une décomposition pyramidale non sous échantillonnée et des bancs de filtres directionnels non sous échantillonnés.

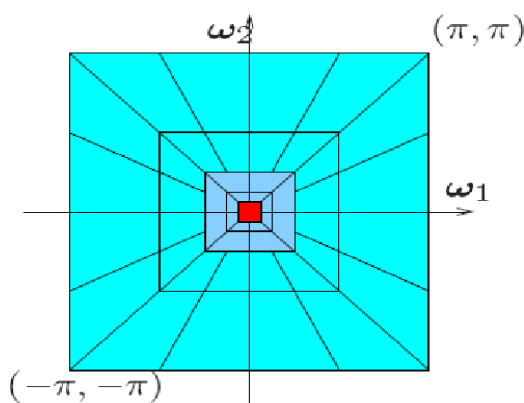


Figure. 3.12: Partitionnement du plan fréquentiel obtenu avec la NSCT.

C'est une décomposition multidirectionnelle, invariante au décalage et multi-échelle qui conduit à des améliorations et à de nouveaux potentiels pour les applications de traitement d'images. L'abandon de la condition d'indépendance linéaire offre la possibilité d'un décalage invariant (shift-invariant), une propriété cruciale dans plusieurs applications. Par exemple, dans le débruitage des images (denoising) par seuillage, le manque de cette propriété provoque le phénomène de pseudo-Gibbs autour des singularités.

La NSCT est une version discrète, donc adaptée aux images numériques, qui se base sur l'utilisation des bancs de filtres pyramidaux directionnels. Comparée à la transformée en Ondelettes discrète qui donne des contours discontinus, la NSCT avec sa propriété de sélectivité directionnelle donne des contours lisses assimilés à

l'image originale et permet de capturer les structures géométriques intrinsèques des images naturelles.

La construction de la NSCT peut être ainsi divisée en deux parties : une structure pyramidale non-sous-échantillonnée qui assure la propriété de multi-échelle et une structure de bancs de filtres directionnels, en anglais *directional filter bank* (DFB) non sous échantillonnée qui assure la propriété de multidirectionnelle. Nous décrivons dans ce qui suit chaque partie en détail.

4.1.1 Pyramide non-sous-échantillonnée :

Différente de la transformée en coutourlettes, l'étape de décomposition multi-échelle de la NSCT est réalisée par une structure de filtrage invariante au décalage, qui réalise une décomposition de sous-bande semblable à celle de la pyramide laplacienne, en employant des bancs de filtres bidimensionnels non-sous-échantillonnées à deux-canaux.

En raison du non sous échantillonnage dans la pyramide de décomposition, la sous-bande passe-bas n'a aucun crénelage de fréquence, le crénelage peut arriver lorsqu'on redimensionne une image vers une résolution différente de la résolution de numérisation. Il s'ensuit un effet de pixellisation, ou *aliasing*, sur les bordures entre objets, plus ou moins marqué. De plus, même la largeur de bande du filtre passe-bas est plus grande que celle utilisée par les contourlettes. Par conséquent, la NSCT a de meilleures caractéristiques fréquentiels que la transformée en contourlettes.

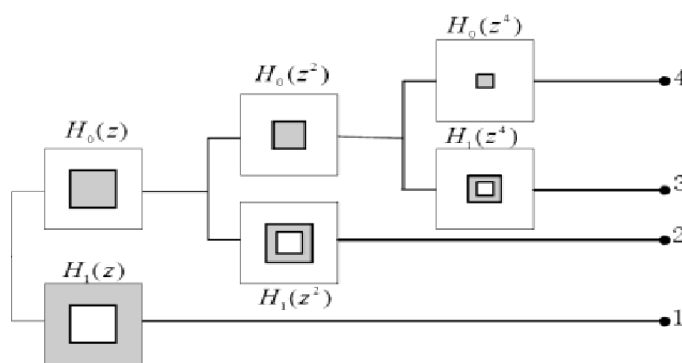


Figure. 3.13: Pyramide de décomposition non sous échantillonnée à 3 niveaux.

$H_0(z)$ est un filtre passe-bas et $H_1(z) = 1 - H_0(z)$. La condition de reconstruction parfaite est donnée par : $H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) = 1$. Ou $G_0(z)$ et $G_1(z)$ sont des filtres passe-bas et passe-haut.

La figure 16 donne la décomposition de la pyramide non-sous-échantillonnée à 3 niveaux. La pyramide transforme l'image en une suite de niveaux passe-haut et un

niveau passe-bas. Les pyramides non-sous-échantillonnées sont construites en itérant des bancs de filtres non-sous-échantillonnées. Les filtres des niveaux ultérieurs sont obtenus en sur-échantillonnant les filtres du premier niveau. Ceci donne la propriété de multi-échelle sans besoin de concevoir des filtres additionnels. La condition de reconstruction parfaite est ainsi plus facile à satisfaire qu'avec un échantillonnage critique (exemple : contourlettes, directionlettes...), et permet de concevoir des filtres meilleurs.

4.1.2 Bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées :

Après la décomposition en sous-bandes passe-haut et passe-bas par la pyramide non-sous-échantillonnée, les bancs de filtres directionnels (DFB) non sous échantillonnées décomposent la sous-bande passe-haut en plusieurs sous-bandes directionnelles, en appliquant de manière appropriée des filtres bidimensionnels non sous échantillonnées à deux-canaux de type quinconce pour décomposer chaque niveau passe-haut en un nombre de bandes directionnelles, capturant ainsi des informations directionnelles ou orientées.

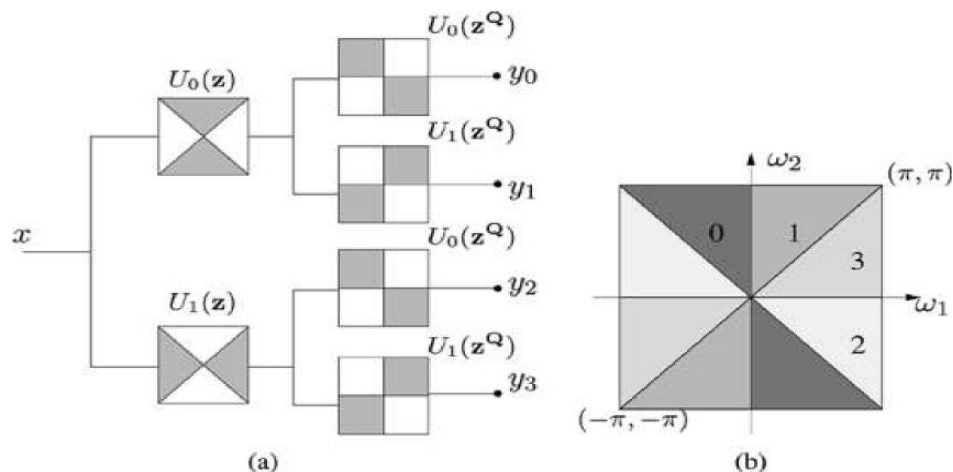


Figure. 3.14: Bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées construits avec des bancs de filtres en éventail à deux-canaux.

Les bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnée sont une version invariante par translation (*shift-invariant*) des bancs de filtres directionnels à échantillonnage critique de la transformée en contourlettes. Ils sont construits en éliminant le sous-échantillonnage et le sur-échantillonnage dans chaque banc de filtres à deux-canaux de la structure arborescente de la DFB et en sur-échantillonnant les filtres respectifs. Cela aura comme résultat un arbre composé de bancs de filtres non-sous-échantillonnées à deux-canaux.

La décomposition directionnelle est obtenue en réitérant les bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées. Tous les niveaux ultérieurs sont par la

suite sur-échantillonnés par une matrice quinconce afin de compenser le non-sous-échantillonnage.

Les réponses fréquentielles de deux (2) filtres sur-échantillonnés est donné par la figure 18, et la cascade d'analyse est montrée dans la figure 17 (a), où des bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnés à quatre-canaux sont construits avec des bancs de filtres en éventail à deux-canaux. Nous obtenons par la suite une division fréquentielle à quatre-directions comme montré dans la figure 17 (b).

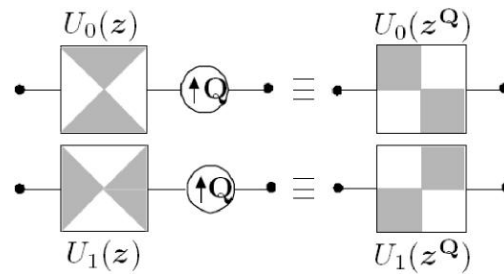


Figure. 3.15: Filtres sur-échantillonnés par une matrice quinconce Q

La NSCT est ainsi construite en combinant la pyramide non-sous-échantillonnées et les bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées, tel que montré dans la figure 19. La pyramide non-sous-échantillonnée fournit une décomposition multi-échelle en divisant l'entrée en sous-bande passe-bas et passe-haut, et les bancs de filtres directionnels non-sous-échantillonnées fournissent une décomposition directionnel en divisant la sous-bande passe-haut en plusieurs sous-bandes directionnels. Ce schéma peut être répété sur la sous-bande passe-bas, à la sortie de la pyramide non-sous-échantillonnée.

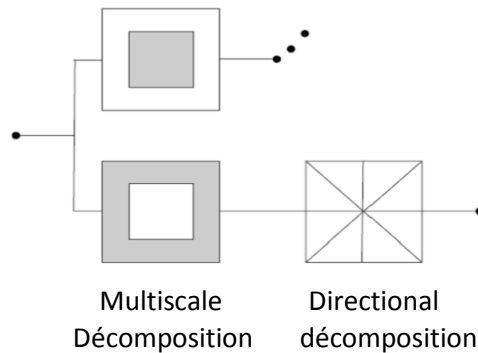


Figure. 3.16: Le bloc de diagramme de la NSCT

Le noyau de la NSCT est les bancs de filtres non-sous-échantillonnées inséparables à deux-canaux. Il est plus facile et plus flexible de concevoir les bancs de filtres nécessaires qui mènent à une transformée en contourlettes non-sous-échantillonnée, avec une meilleure sélectivité et régularité fréquentiel, quand cela est comparé à la transformée en contourlettes. Les éléments de structure de la NSCT sont d'autant réguliers et symétriques.

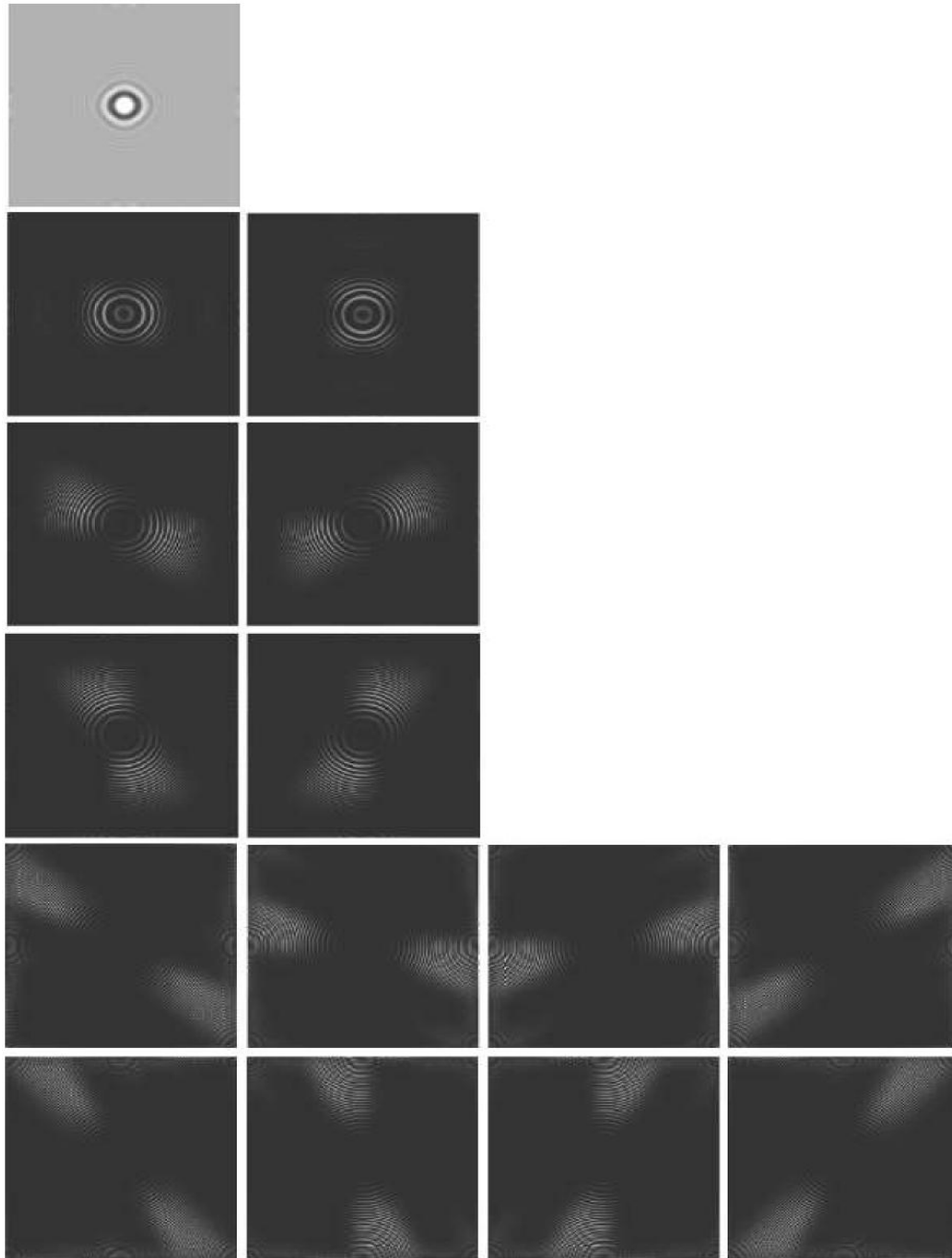


Figure. 3.17: Coefficients de décomposition en NSCT (3 niveaux, 8 ; 4 ; 2 orientations)

5. Principe de fusion avec la NSCT :

En télédétection, la fusion d'images est le plus souvent utilisée pour produire des compositions colorées à partir de deux images d'une région donnée, l'une ayant une résolution spatiale élevée, l'autre étant une image multibande de résolution moins élevée, mais riche en information spectrale. A cet égard, la recherche s'est principalement orientée ces dernières années vers la fusion d'images multi-résolution. Le but de ce type de fusion est d'obtenir des images multi-bandes qui préservent à la fois l'information spatiale essentielle de l'image

haute résolution (Pan) et l'information spectrale des canaux à basse résolution (MS).

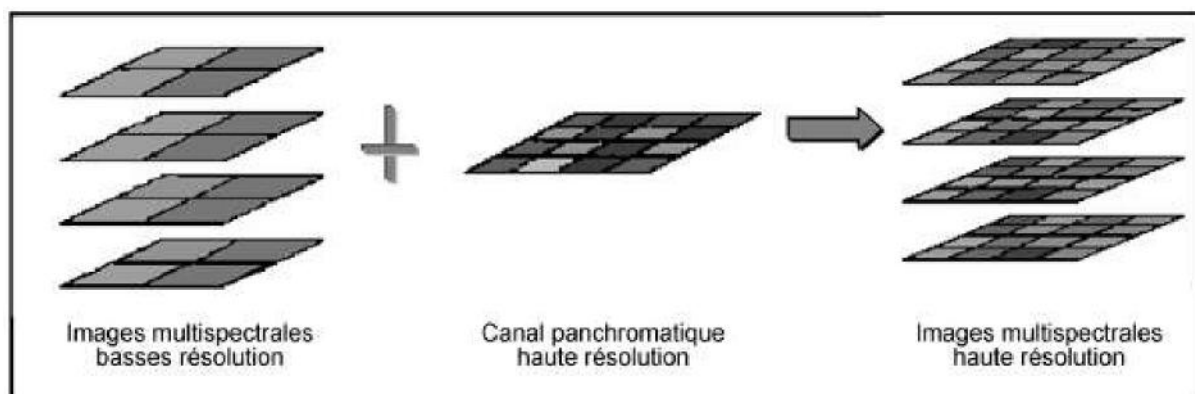


Figure. 3.18: Concept de fusion d'image pour l'amélioration de résolution [Hill et al., 1999]

Nous présentons dans ce qui suit le principe de cette fusion d'images en utilisant la transformée en courrouettes non-sous-échantillonnée (NSCT). La NSCT peut donner une représentation optimale asymptotique des bords et des contours dans l'image en vertu de ses caractéristiques de bonne multi-résolution, d'invariance au décalage, et de haute directionnalité.

Les images d'entrée sont premièrement décomposées, puis les coefficients de décomposition sont combinés et la nouvelle image est obtenue par la NSCT inverse des coefficients fusionnés. La méthode de fusion en utilisant la méthode NSCT comporte les opérations suivantes :

1. Décomposition de l'image basse résolution multi spectrale (A) et l'image haute résolution panchromatique (B) pour obtenir les coefficients de décomposition de la NSCT.
2. Fusion des coefficients d'approximation et de détails de l'image A et B en utilisant la règle de fusion suivante :

$$Coef_{Fus}^{s,d}(i, j) = \begin{cases} Coef_A^{s,d}(i, j) & Si \ |Coef_A^{s,d}(i, j)| \geq |Coef_B^{s,d}(i, j)| \\ Coef_B^{s,d}(i, j) & Si \ non \end{cases} \quad Eq.III.7$$

Ou s, d correspondent respectivement au niveau de décomposition et à la direction.

Et i, j la position dans l'image.

3. Appliquer la transformée NSCT inverse aux coefficients d'approximation et de détail fusionnés pour reconstruire l'image résultat.

Les images d'entrées A et B doivent bien entendu être de taille identique et ré-échantillonnées au préalable pour avoir la même résolution spatiale. La figure. 3.19 est le diagramme schématique de la méthode de fusion proposée. La première étape consiste à calculer les coefficients d'approximation (Basse échelle) et de détails (Hautes échelles) de la NSCT pour les images A et B, puis d'appliquer la règle de fusion approprié pour fusionner les coefficients. Enfin, d'appliquer la transformée NSCT inverse pour avoir l'image fusionnée.

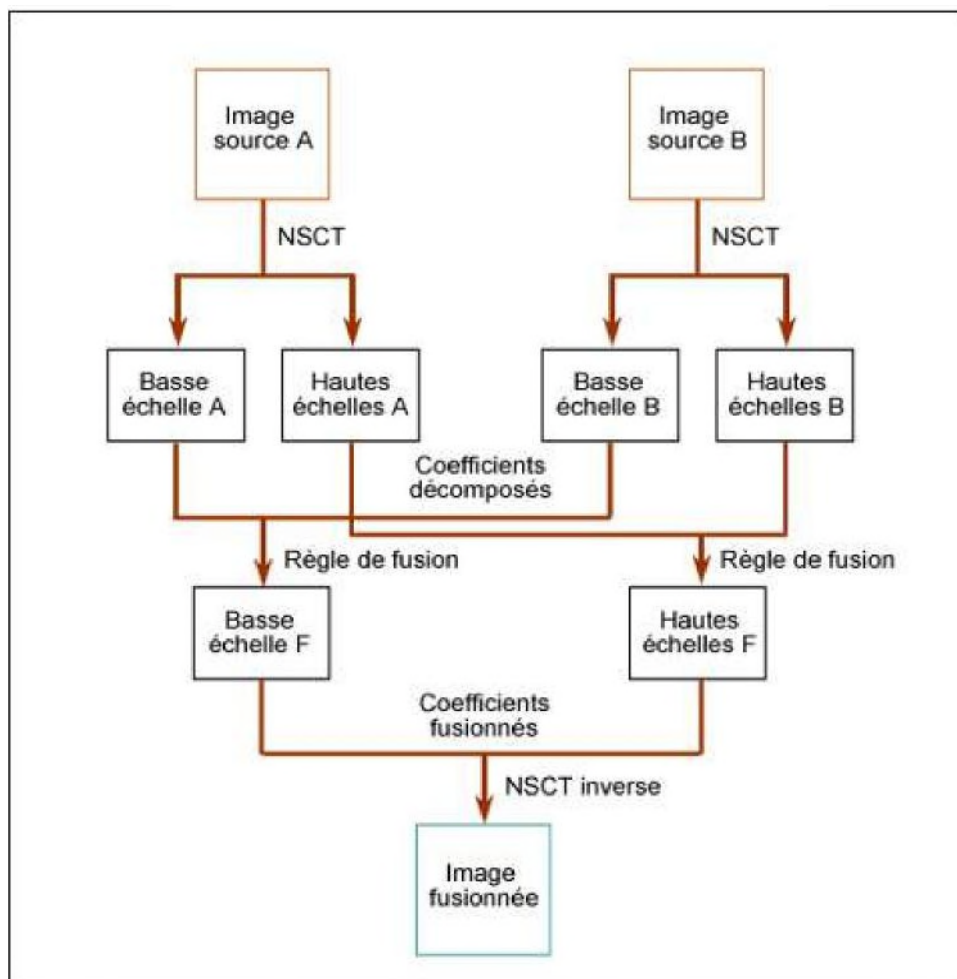


Figure. 3.19: Diagramme schématique de la fusion d'image en utilisant la NSCT

6. Transformée de Shearlet

Le but de cette section est de fournir une brève introduction de la transformée de Shearlet discrète finie. En premier, nous décrivons la transformée de shearlet continue dans R^2 et cônes. Alors nous fournissons une discrétisation de la transformée de shearlet sur un domaine fini.

6.1 Transformée de Shearlet continu

La construction de la transformée de shearlet continue basée sur des matrices de mise à l'échelle parabolique, une matrice de dilatation A_a et matrice shear S_s définies par.

$$A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix}, a \in \mathbb{R}^+, S_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, s \in \mathbb{R}$$

Eq.III.8

La transformée de Shearlet avec une dilatation de la matrice A_a et S_s de la fonction $\psi \in L_2(\mathbb{R})$ définie par $\psi_{a,s,t}$.

La figure suivante illustre l'effet géométrique du décalage parabolique avec les paramètres a et s .

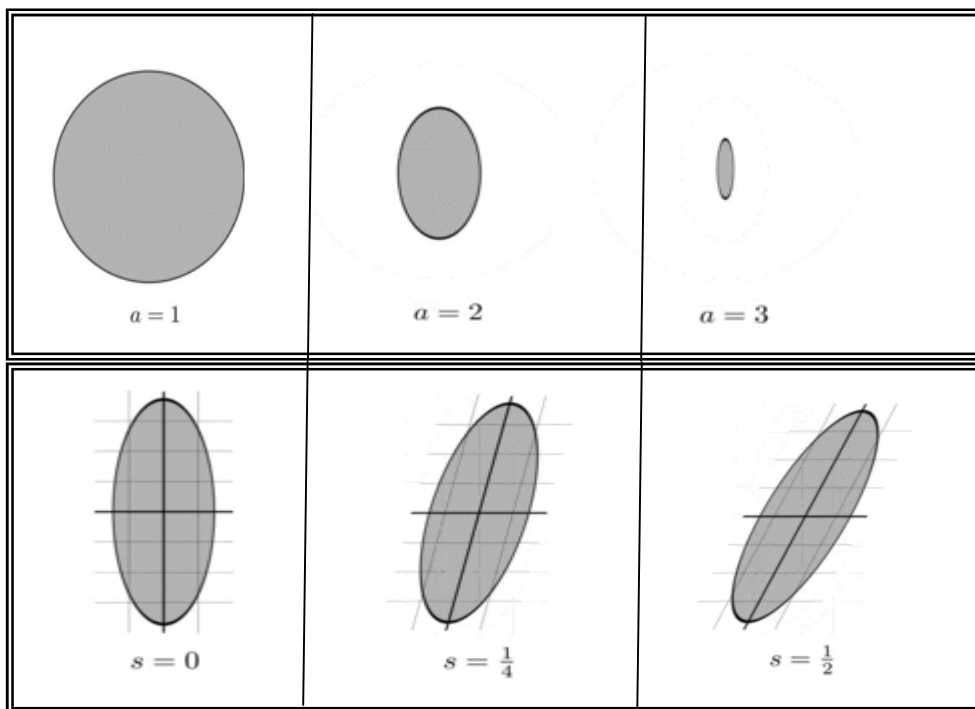


Figure.3.20 : Diagramme de l'effet géométrique du décalage parabolique avec les paramètres a et s .

Pour $\psi \in L_2(R)$ la transformée de shearlet continue générée par $\psi_{a,s,t}$ est alors définie comme :

$$\psi_{a,s,t}(x) = a^{-\frac{3}{4}} \psi(A_a^{-1} S_s^{-1}(x-t)) \quad \text{Eq.III.9}$$

On utilisant la transformée de Fourier ou $F : L_2(R^2) \rightarrow L_2(R^2)$ donnée par l'équation suivante :

$$F f(w) = \hat{f}(w) := \int_{R^2} f(t) e^{-2\pi i \langle w,t \rangle} dt \quad \text{Eq.III.10}$$

On obtient :

$$\hat{\psi}_{a,s,t}(w) = a^{-\frac{3}{4}} e^{-2\pi i \langle w,t \rangle} \hat{\psi}(a w_1, \sqrt{a}(s w_1 + w_2)) \quad \text{Eq.III.11}$$

La transformée de Shearlet continue $S H_\psi(f)$ de la fonction $f \in L_2(R)$ définie par :

$$S H_\psi(f)(a, s, t) := \langle f, \psi_{a,s,t} \rangle = \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{a,s,t} \rangle \quad \text{Eq.III.12}$$

6.2 Shearlet en cônes

Pour obtenir une bonne sélectivité directionnelle shearlet en cônes, on définit les cônes horizontaux et verticaux par les deux équations suivantes :

$$C^h = \left\{ (w_1, w_2) \in R^2 : |w_1| \geq \frac{1}{2}, |w_2| < |w_1| \right\} \quad \text{Eq.III.13}$$

$$C^v = \left\{ (w_1, w_2) \in R^2 : |w_2| \geq \frac{1}{2}, |w_2| > |w_1| \right\} \quad \text{Eq.III.14}$$

Où C^\times sont l'intersection des deux cônes et C^0 la « basse fréquence partie ».

$$C^\times = \left\{ (w_1, w_2) \in R^2 : |w_1| \geq \frac{1}{2}, |w_2| \geq \frac{1}{2}, |w_1| = |w_2| \right\} \quad \text{Eq.III.15}$$

$$C^0 = \left\{ (w_1, w_2) \in R^2 : |w_1| < 1, |w_1| < 1, |w_2| < 1 \right\} \quad \text{Eq.III.16}$$

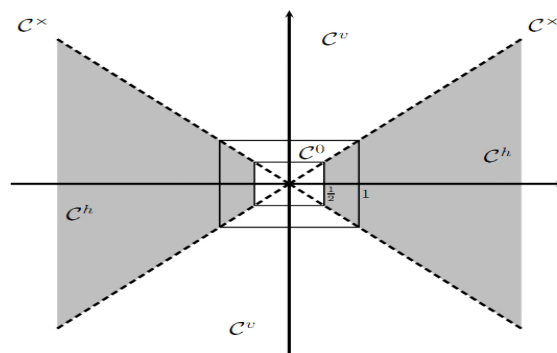


Figure. 3.21: Caractéristiques des ensembles C^h , C^v , C^\times et C^0

A partir de cette figure on note que pour n'importe quel ensemble $C^k, k \in \{h, v, \chi\}$, nous définissons une fonction de caractéristique xc^k , laquelle est égale à 1 pour $w \in C^k$ et 0 autrement, shearlet en cônes est définie par :

$$\hat{\psi}^h(w_1, w_2) = \hat{\psi}_1(w_1) \hat{\psi}_2\left(\frac{w_2}{w_1}\right) xc^h \quad \text{and} \quad \hat{\psi}^v(w_1, w_2) = \hat{\psi}_1(w_2) \hat{\psi}_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right) xc^h \quad \text{Eq.III.17}$$

6.3 Transformée de Shearlet discrète finie

Pour la transformée de shearlet discrète, on considère l'image digitale comme fonction échantillonnée sur la grille par le nombre d'échelle j_0 défini dans les deux équations suivantes :

$$\frac{1}{N} z = \frac{1}{N} \{(m_1, m_2) : m_i = 0, \dots, N-1, i = 1, 2\} \quad \text{Eq.III.18}$$

$$j_0 = \left\lfloor \frac{1}{2} \log_2 N \right\rfloor \quad \text{Eq.III.19}$$

Nous discrétisons les paramètres d'échelle, shear et translation, pour obtenir la transformée de Shearlet discrète :

$$a_j = 2^{2j} = \frac{1}{4^j}, j = 0, \dots, j_0 - 1 \quad \text{Eq.III.20}$$

$$s_{j,k} = k 2^{-j}, -2^j \leq k \leq 2^j \quad \text{Eq.III.21}$$

$$t_m = \frac{m}{N}, m \in z \quad \text{Eq.III.22}$$

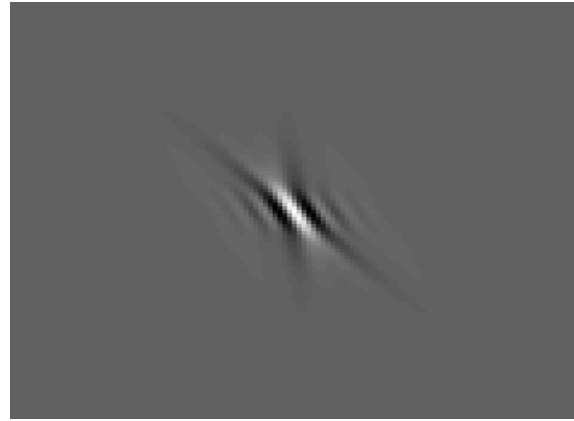
Avec ces paramètres, notre shearlets devient:

$$\psi_{j,k,m}(x) := \psi_{a_j, s_{j,k}, t_m}(x) = \psi\left(A_{a_j}^{-1} S_{s_{j,k}}^{-1}(x - t_m)\right) \quad \text{Eq.III.23}$$

Comparé au shearlet continue définie dans Eq. (17), nous mettons le facteur $a^{-\frac{3}{4}}$ dans le domaine de Fourier nous obtenons:

$$\hat{\psi}_{j,k,m}(w) = \hat{\psi}\left(A_{a_j}^T S_{s_{j,k}}^T w\right) e^{-2\pi i \langle w, t_m \rangle} = \hat{\psi}_1\left(4^{-j} w_1\right) \hat{\psi}_2\left(2^j \frac{w_2}{w_1} + k\right) e^{-2\pi i \langle w, m \rangle / N}, w \in \Omega \quad \text{Eq.III.24}$$

Où: $\Omega := \left\{ (w_1, w_2) : w_i = -\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, \dots, \left\lceil \frac{N}{2} \right\rceil - 1, i = 1, 2 \right\}$



(a) Shearlet dans le domaine de Fourier

(b) Shearlet dans le domaine de temps (zoomée)

Figure. 3.22: la transformée de Shearlet dans le domaine de Fourier et du temps.

Par définition nous avons $a \leq 1$ et $|s| \leq 1$. Par conséquent nous voyons que nous avons seulement une coupe fermée due aux limites du cône pour $|k| = 2^j$ où $|s| = 1$. Pour les deux cônes, nous avons pour $|s| = 1$ deux demi-shearlets avec un intervalle à la ligne d'intersection. Aucune shearlet n'est définie sur la ligne d'intersection C^\times . Pour obtenir plein de shearlets à la ligne d'intersection nous collons les trois parties ensemble, donc, nous définissons pour $|k| = 2^j$ une somme de shearlets :

$$\hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} = \hat{\psi}_{j,k,m}^h + \hat{\psi}_{j,k,m}^v + \hat{\psi}_{j,k,m}^\times \quad \text{Eq.III.25}$$

Nous définissons la transformée de shearlet discrète comme :

$$SH(f)(k, j, l, m) = \begin{cases} \langle f, \phi_m \rangle & \text{for } k = 0 \\ \langle f, \psi_{j,l,m}^k \rangle & \text{for } k \in \{h, v\} \\ \langle f, \psi_{j,l,m}^{h \times v} \rangle & \text{for } k = \times, |l| = 2^j \end{cases} \quad \text{Eq.III.26}$$

Où $j = 0, \dots, j_0 - 1, -2^j + 1 \leq k \leq 2^j - 1$

Et $m \in z$.

La transformée de shearlet peut se rendre compte efficacement en appliquant la transformée de Fourier discrète `fft2` et sa transformée inverse `ifft2` qui calculent avec $o(N^2 \log N)$ les opérations arithmétiques:

$$\hat{f}(w) = \sum_{m \in z} f(m) e^{-2\pi i \langle w, m \rangle / N}, w \in \Omega \quad \text{Eq.III.27}$$

$$f(m) = \frac{1}{N^2} \sum_{w \in \Omega} \hat{f}(w) e^{-2\pi i \langle w, m \rangle / N}, m \in z \quad \text{Eq.III.28}$$

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{N^2} \langle \hat{f}, \hat{g} \rangle \quad \text{Eq.III.29}$$

A l'aide de la formule Plancherel d'Eq. (29), la transformée de shearlet discrète peut être calculé pour $k = h$ comme suit:

$$SH(f)(h, j, k, m) = \langle f, \psi_{j,k,m}^h \rangle = \frac{1}{N^2} \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{j,k,m}^h \rangle = \frac{1}{N} \sum_{w \in \Omega} \hat{\psi}(4^{-j} w_1, 4^{-j} k w_1 + 2^{-j} w_2) \hat{f}(w_1, w_2) e^{-2\pi i (w, m) / N} \quad \text{Eq.30}$$

$$= \text{iff}t 2(\hat{g}_{j,k})$$

$$= \text{iff}t 2(\hat{\psi}(4^{-j} w_1, 4^{-j} k w_1 + 2^{-j} w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) \quad \text{Eq.III.31}$$

Pour le cône vertical $k = \nu$, nous obtenons :

$$SH(f)(\nu, j, k, m) = \text{iff}t 2(\hat{\psi}(4^{-j} w_2, 4^{-j} k w_2 + 2^{-j} w_1) \hat{f}(w_1, w_2)) \quad \text{Eq.III.32}$$

Et pour la partie de la ligne d'intersection avec $|k| = 2^j$ nous utilisons shearlet collée et on obtient:

$$SH(f)_{\nu^{h \times \nu}}(j, k, m) = \text{iff}t 2(\hat{\psi}^{h \times \nu}(4^{-j} w_1, 4^{-j} k w_1 + 2^{-j} w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) \quad \text{Eq.III.33}$$

Finalement, pour le filtre passe-bas avec:

$$\hat{g}_0(w_1, w_2) := \hat{\phi}(w_1, w_2) \hat{f}(w_1, w_2)$$

La transformée peut être obtenue semblable comme avant :

$$SH_{\phi}(f)(m) = \langle f, \phi_m \rangle$$

$$= \frac{1}{MN} \langle \hat{f}, \hat{\phi}_m \rangle$$

$$= \text{iff}t 2(\hat{\phi}(w_1, w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) \quad \text{Eq.III.34}$$

La transformée de shearlet complets est la combinaison de l'équation (31) et (34). Nous résumons :

$$\left\{ \begin{array}{ll} SH(f)_{(k,j,l,m)} = \text{iff}t 2(\hat{\phi}(w_1, w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) & \text{for } k = 0 \\ SH(f)_{(k,j,l,m)} = \text{iff}t 2(\hat{\psi}(4^{-j} w_1, 4^{-j} k w_1 + 2^{-j} w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) & \text{for } k = h, |l| \leq 2^j - 1 \\ SH(f)_{(k,j,l,m)} = \text{iff}t 2(\hat{\psi}(4^{-j} w_2, 4^{-j} k w_2 + 2^{-j} w_1) \hat{f}(w_1, w_2)) & \text{for } k = \nu, |l| \leq 2^j - 1 \\ SH(f)_{(k,j,l,m)} = \text{iff}t 2(\hat{\psi}^{h \times \nu}(4^{-j} w_1, 4^{-j} k w_1 + 2^{-j} w_2) \hat{f}(w_1, w_2)) & \text{for } k \neq 0, |l| \leq 2^j \end{array} \right. \quad \text{Eq.III.35}$$

7. Conclusion :

L'objectif de notre travail était de comparer des méthodes de fusion basée sur l'analyse multirésolution tel que (l'algorithme à trous, le concept ARSIS) et l'analyse multidirectionnelle (contourlet, Shearlet), pour obtenir des images de synthèse à haute résolution spatiale. En effet, la fusion au niveau pixel des images panchromatique et multi spectrales a permis de synthétiser des images de la même résolution spatiale que l'image panchromatique tout en conservant le contenu spectral des images multi spectrales originales.

Chapitre IV

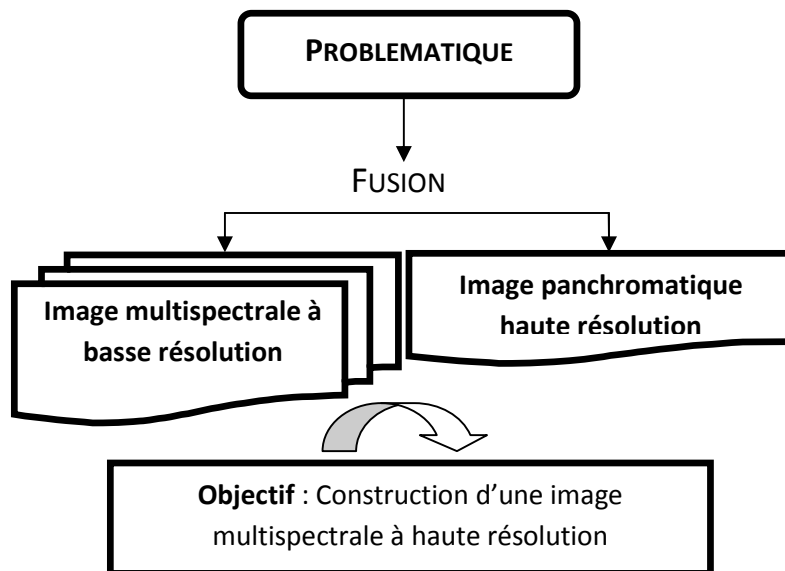
Résultats et interprétation

1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter les résultats que nous avons obtenus par l'application des différentes méthodes de fusion étudiées dans le chapitre III, ainsi que les différents algorithmes utilisés dans notre logiciel.

2. Problématique

L'organigramme suivant résume notre problématique en introduisant ce que nous avons comme données au début et ce que nous devons obtenir comme résultats.



Les images obtenues par les différents capteurs des systèmes d'observation de la Terre ont des caractéristiques différentes, notamment en ce qui concerne le nombre de bandes spectrales et la résolution (taille des pixels). En général, ces deux paramètres sont mutuellement exclusifs: les images fournissant la meilleure résolution spatiale n'ont qu'une seule bande spectrale (celle du visible, dite panchromatique) et les données multispectrales ne sont disponibles qu'avec des résolutions spatiales relativement moins importantes.

Dans ce contexte, nous proposons d'étudier des méthodes de fusion permettant de combiner ou d'intégrer des images panchromatiques et des images multispectrales à résolutions spatiales différentes. En effet, le processus permet de traiter l'image à haute résolution spatiale (celle du capteur panchromatique) afin d'extraire les détails et de les injecter dans les images à faible résolution spatiale (celle du capteur multispectral) pour avoir, en fin de traitement, des images multispectrales à haute résolution spatiale. [12]

2.1 Méthodes utilisées :

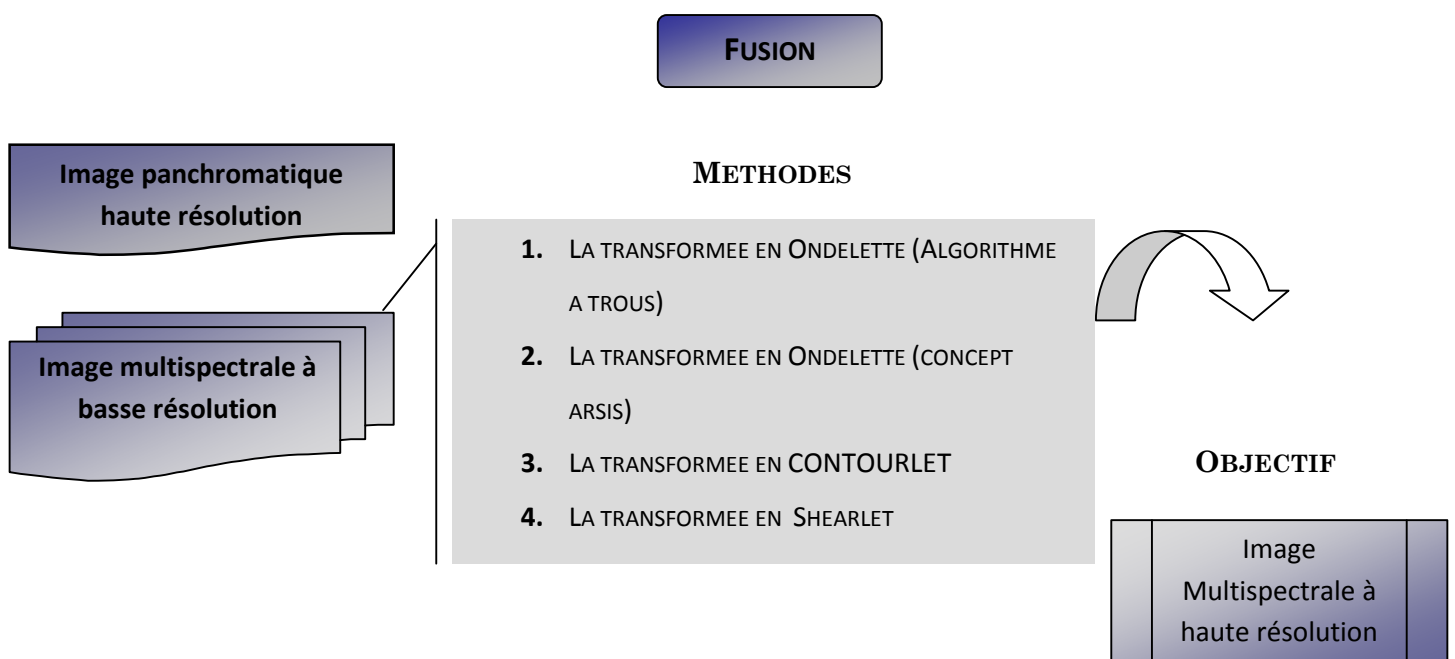


Figure. 4.1: Les différentes méthodes utilisées pour la fusion

2.2 Description du site d'étude des images utilisées :

Dans cette thèse nous avons utilisé les images issues du satellite IRS-1C (fusion entre les images du capteur LISS-III et PAN) et du satellite MSG (fusion entre les images des canaux Vis0.6, VIS0.8, Vis1.6) et l'image du canal HRV).

Les caractéristiques de ces deux satellites sont données dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Images du satellite IRS :

La zone d'étude est la région d'Oran, située au nord-ouest de l'Algérie. Nous avons utilisé les images de cette zone issues du capteur LISS-III et PAN du satellite IRS-1C ; les caractéristiques de ces images sont données dans les tableaux 1 et 2.

<i>Satellites</i>	<i>Capteur</i>	<i>No. Of bands</i>	<i>Resolution Spatial (m)</i>	<i>Band width (mm)</i>	<i>combinaisons possibles</i>
	<i>LISS-III</i>	<i>4</i>	<i>23.5</i>	Band 1: 0.52 0.59	
				Band 2: 0.62 0.68	
<i>IRS-1C & 1D</i>				Band 3: 0.77 0.86	<i>LISS-III+PAN</i>
			<i>70.5</i>	Band 4: 1.55 1.70	
	PAN	1	5.8	Band 1: 0.5 0.75	

Table.4 .1 : Ensembles des données disponibles et ces combinaisons possibles pour la fusion d'image.

	IRS-1C-PAN	IRS-1C-LISS-III
Date of scene	18/06/98	04/04/97
Swath width (km)	70	142
resolution Spatial (m)	5.8	23.5

Table.4. 2 : Détails de données utilisé

2.2.1 Images du satellite MSG :

Les caractéristiques et les objectifs principaux des 12 canaux de prise d'images de SEVIRI sont résumés dans le tableau suivant :

Canal	Autre appellation	La longueur d'onde centrale (μ m)	Objectif principal
C1	VIS 0,6	0,635	Surface, nuages, champs de vent
C2	VIS 0,8	0,81	Surface, nuages, champs de vent
C3	NIR 1,6	1,64	Surface, phase du nuage
C4	IR 3,9	3,90	Surface, nuages, champs de vent
C5	WV 6,2	6,25	Vapeur d'eau, nuage à haute altitude, instabilité atmosphérique
C6	WV 7,3	7,35	Vapeur d'eau, instabilité atmosphérique
C7	IR 8,7	8,70	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C8	IR 9,7	9,66	Ozone
C9	IR 10,8	10,80	Surface, nuages, champs de vent, instabilité atmosphérique
C10	IR 12,0	12,00	Surface, nuages, instabilité atmosphérique
C11	IR 13,4	13,40	Hauteur des cirrus, instabilité atmosphérique
C12	HRV	0,4-1,1	Surface, nuages

Table.4. 3 : Les caractéristiques et les objectifs principaux des 12 canaux d'images de SEVIRI.

Parmi des 12 canaux d'imageries de SEVIRI, les plus utilisées sont les visibles c'est-à-dire : C1, C2, C3, HRV :

C1	Vert -Rouge	0,635	0,56-0,71	3km
C2	Proche infrarouge	0,810	0,74-0,88	3km
C3	Infrarouge de courtes L-O	1,640	1,50-1,78	3km
C12	HRV	-	0,40-1,10	1km

Table.4.4 : MSG SEVIRI : bandes spectrales 1, 2,3 et 12

2.3 La base de données :

Notre base de données est constituée d'une image Panchromatique à haute résolution spatiale et trois images Multispectrales de basse résolution spatiale.

Pour le satellite IRS-1C :

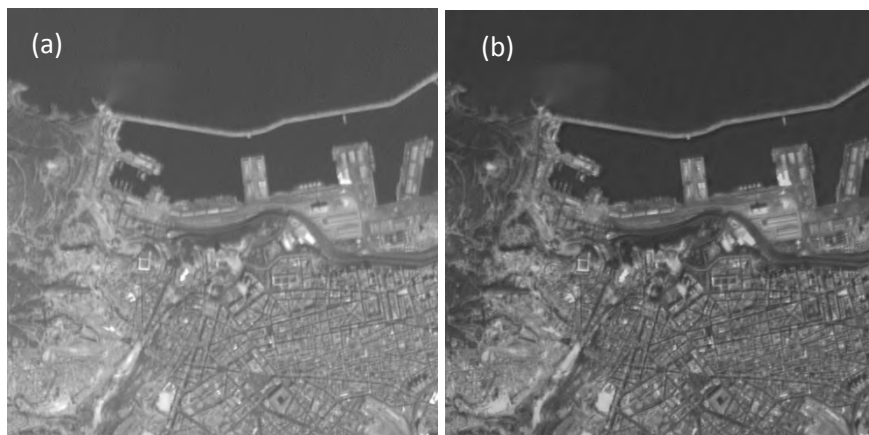


Figure. 4.2: (a) Image du capteur IRS-1C-PAN acquise le 18/06/1998 d'ORAN, (b) Image du canal 1, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97.

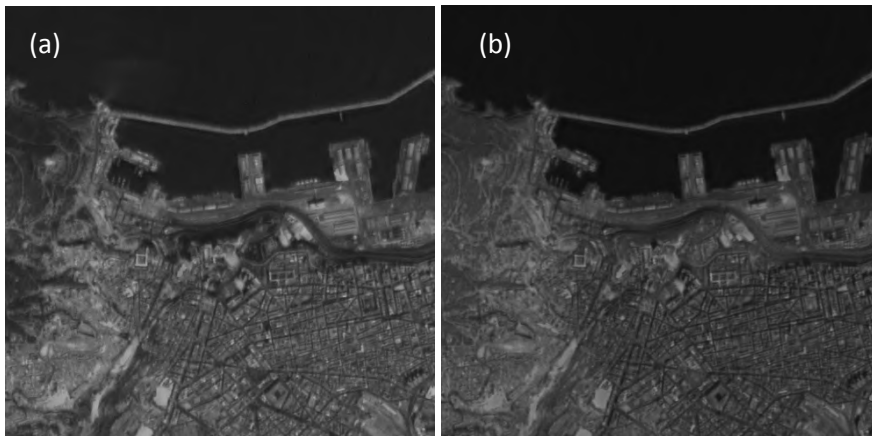


Figure. 4.3: (a) Image du canal 2, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97, (b) Image du canal 3, capteur IRS-1C-LISS-III acquise le 04/04/97.

Pour le satellite MSG 1 :

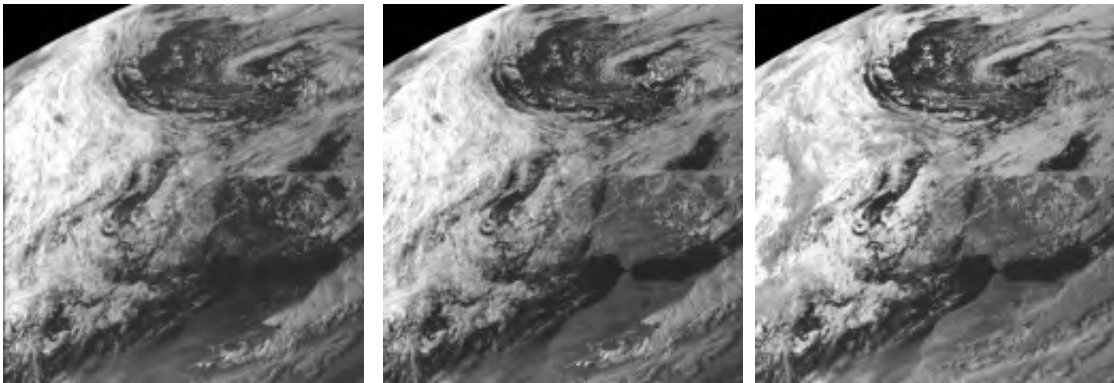


Figure. 4.4: Images des canaux visibles C1, C2, C3 du satellite MSG1



Figure. 4.5: Composition colorée des canaux visibles

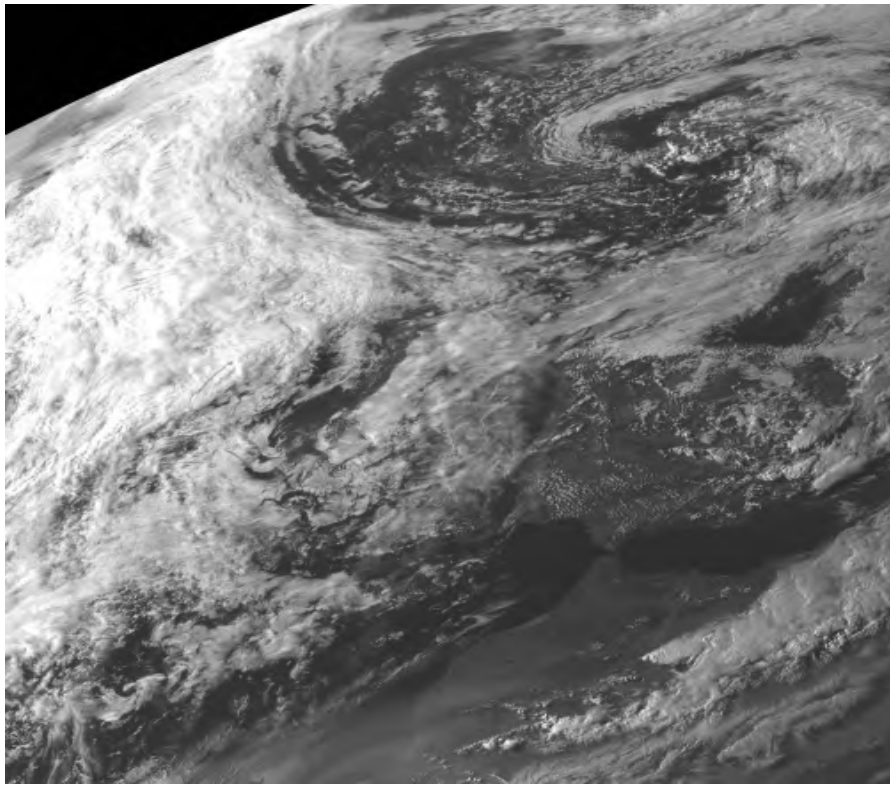


Figure. 4.6: Image panchromatique du satellite MSG1

Pour le satellite MSG 2:

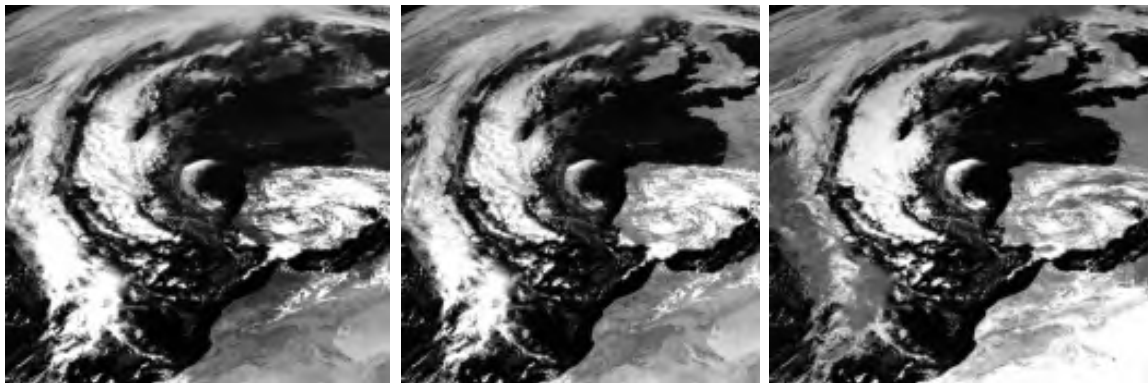


Figure. 4.7: Images des canaux visibles C1, C2, C3 du satellite MSG2

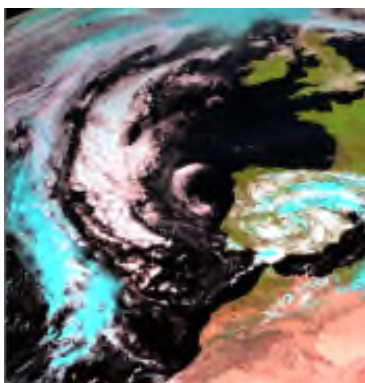


Figure. 4.5: Composition colorée des canaux visibles

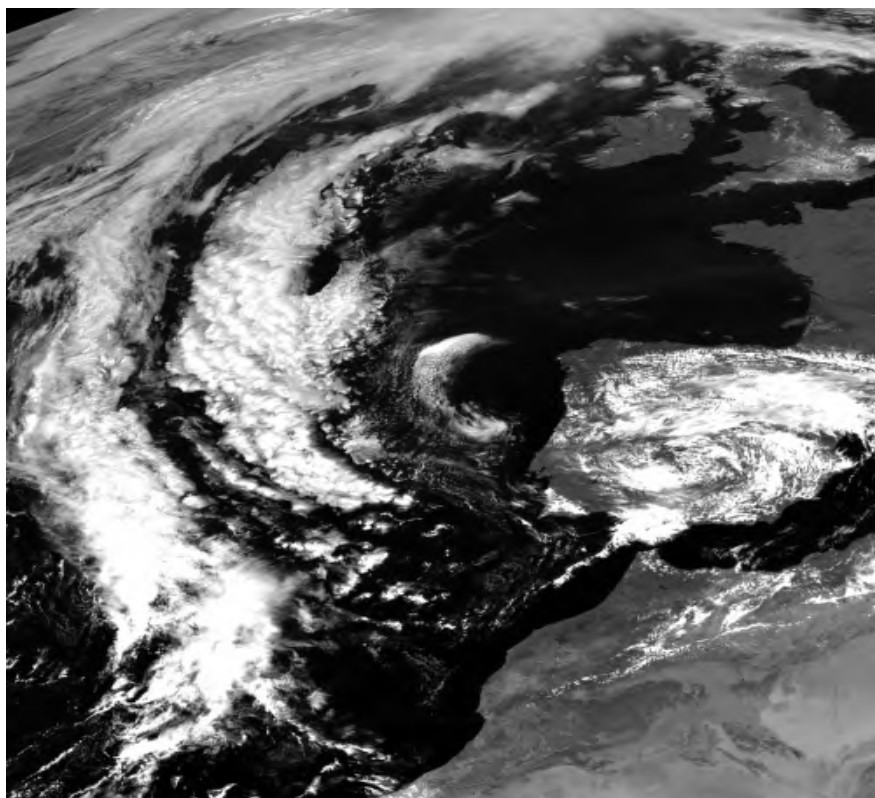


Figure. 4.9: Image panchromatique du satellite MSG2

3. Présentation :

Afin d'implémenter le processus de fusion d'images, nous avons développé deux applications, une application sous le logiciel Builder C++ pour les méthodes à base de la transformée d'ondelette (Algorithme à trous, Concept ARSIS) et une autre application sous le logiciel Matlab, version 10 pour les méthodes à base de la transformée directionnelle (Contourlet, Shearlet).

3.1 Application sous le logiciel Builder C++

Dans cette application, nous avons développé une interface en C++ builder, sous Windows, présenté par la figure suivante.

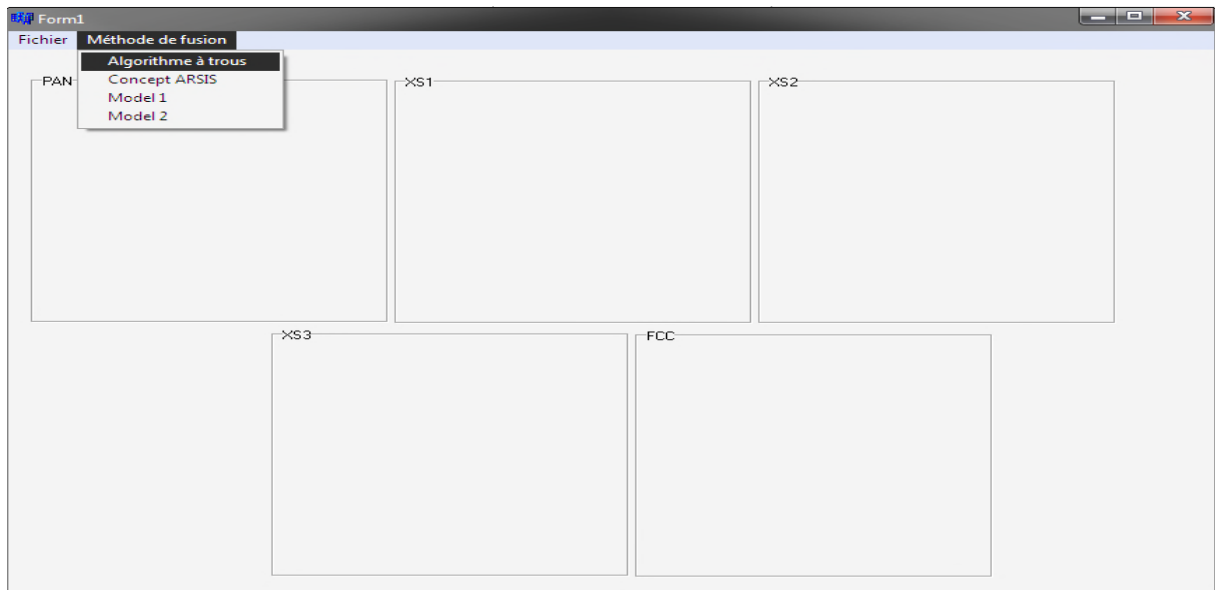


Figure. 4.10: Aperçu de l'application de fusion des images satellitaires

Les étapes de cette interface sont illustrées dans l'organigramme suivant :

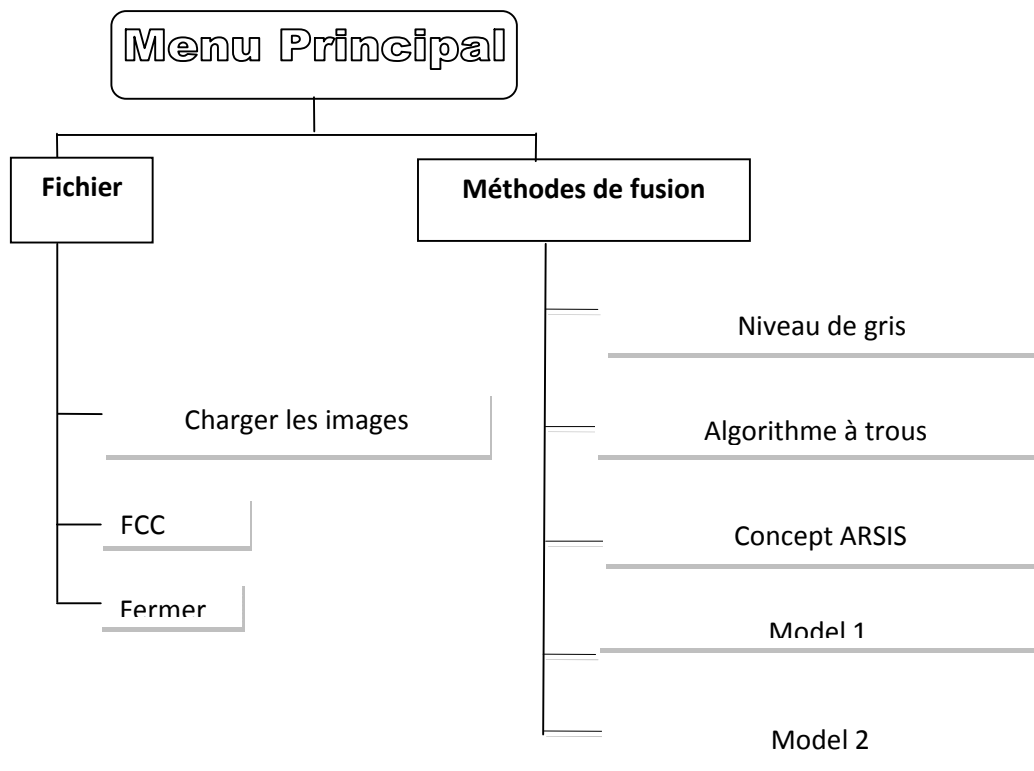


Figure. 4.11: L'organigramme de l'interface

Comme il est indiqué dans l'organigramme, d'abord on va charger quatre images : une image panchromatique à haute résolution spatiale et trois images multispectrales à faible résolution spatiale, puis on les transforme en niveaux de gris ; ensuite, on applique la transformée en ondelette (Algorithme à trous, Concept ARSIS) sur ces quatre images en niveaux de gris ; cette application va nous donner, des images de détails et d'approximation ; puis on applique le processus de fusion pour chaque méthode.

3.2 application sous le logiciel Matlab

L'application contient une interface graphique d'utilisateur et englobe une série de méthodes de fusion d'images. Cette application a été développée dans le cadre de la préparation du présent sujet de thèse de doctorat en science. Elle est destinée à créer une interface facile à manipuler pour l'utilisateur afin de lui permettre de fusionner deux images de même taille.



Figure. 4.12: Aperçu de l'application de fusion des images satellitaires

L'application est conçue pour fonctionner dans un environnement Windows, et dispose d'un GUI (Graphical User Interfaces) sous Matlab permettant à l'utilisateur d'interagir avec le programme en exploitant toutes les fonctionnalités disponibles. Nous apercevons lors du lancement, ou la compilation de l'application, la fenêtre d'accueil disposant de trois (3) onglets :

- L'onglet "Choisir une méthode de fusion" : qui permet de choisir une des méthodes de fusion suivantes : Contourlettes ou Shearlet.
- L'onglet "Image basse résolution" : pour charger la première image correspondant à l'image multispectrale basse résolution qu'on souhaite fusionner.
- L'onglet "Image haute résolution" : pour charger la seconde image correspondant à l'image panchromatique haute résolution qu'on souhaite fusionner.

Les trois points précédents correspondent au cheminement de l'utilisateur pour fusionner eux images, tel que montré dans la figure suivante :

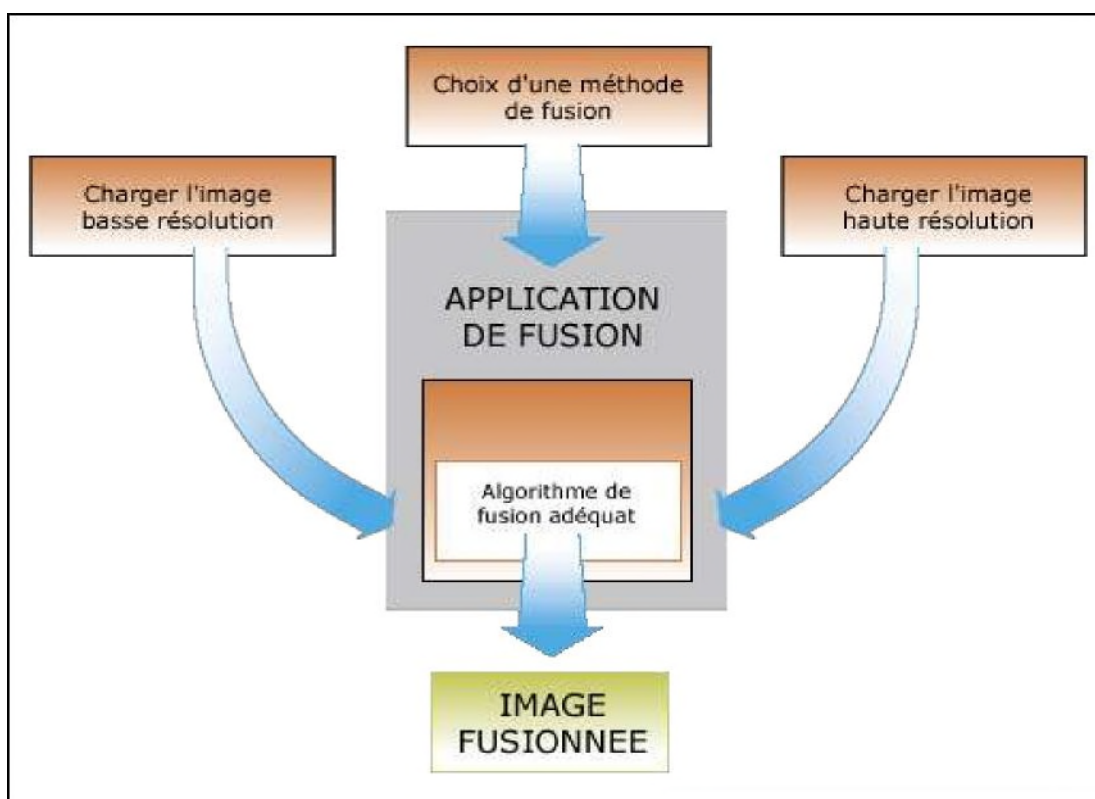


Figure. 4.13: Cheminement parcouru pour fusionner deux images

Dans l'onglet "Image basse résolution", l'utilisateur dispose d'un bouton "Ouvrir" lui permettant de sélectionner l'image basse résolution dont il souhaite fusionner. Divers formats d'images sont supportés, dont les plus utilisés : JPEG, TIFF, GIF, BMP, PNG... De la même sorte, le bouton "Ouvrir" dans l'onglet "Image haute résolution", permet de sélectionner l'image haute résolution à fusionner avec l'image précédemment sélectionnée. Les deux images doivent cependant être de taille identique et d'un même panneau de couleur.

L'utilisateur dispose également du bouton "Aperçu", permettant de donner un aperçu agrandi de l'image sélectionnée et pourrait même servir plus tard, pour vérifier et comparer visuellement les deux images avec le résultat de fusion.

Une fois les deux images chargées, le bouton "Fusionner" situé en bas de la fenêtre déclenche le processus de fusion selon la méthode de fusion sélectionnée précédemment, en fusionnant les images basse et haute résolution sélectionnées au-préalable. Lors de ce processus de fusion, qui peut être plus au moins long, selon les tailles des images et la méthode de fusion. Des messages d'accompagnement s'affichent au fur et à mesure du calcul, donnant lieu à l'état d'avancement du processus de fusion.

4. Fonctionnalités :

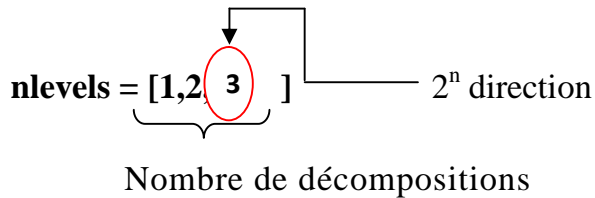
Cette section décrit les méthodes de fusions implémentées dans l'application de développement. Nous avons choisis d'implémenter les méthodes jugées les plus pertinentes dans leur résultat de fusion, depuis notre étude sur l'état de l'art des méthodes existantes au second chapitre. Nos tests de comparaison et de performance ont principalement été réalisés par rapport à la méthode des ondelettes, cette méthode, rappelons-le, a fait l'objet de l'unanimité de plusieurs auteurs pour ses qualités de fusion lors des études précédentes.

4.1. Contourlettes :

La fusion des deux images (basse et haute résolution) avec la transformée en contourlettes est également une fusion des coefficients de décomposition. La décomposition est cependant multi-échelle et multidirectionnelle. Pour chaque niveau de décomposition, il existe un certain nombre de directions. Lors du processus de fusion, la première image est décomposée avec la fonction '*pdfbdec*' en bancs de filtres pyramidaux suivant un filtre '*pfilter*' et des bancs

de filtres directionnels suivant un filtre '*dfilter*'. Le niveau de décomposition '*nlevels*' est un tableau, où le nombre de ses éléments renseigne sur le nombre de décompositions multi-échelles, tandis que la valeur de chaque élément du tableau renseigne sur le nombre de décompositions directionnelles appliquées à cette position.

Exemple :



C'est une décomposition multi-échelle au nombre de 3, le premier niveau aura 2^1 directions, le second niveau 2^2 directions et le troisième niveau 2^3 directions.

Voici un extrait du code source en Matlab pour réaliser la fusion selon la méthode des contourlettes :

```
% Décomposer l'image basse résolution en coefficients contourlettes
```

```
coeffs1 = pdfbdec(double(im1),pfilter,dfilter,nlevels);
```

```
% Décomposer l'image haute résolution en coefficients contourlettes
```

```
coeffs2 = pdfbdec(double(im2),pfilter,dfilter,nlevels);
```

```
% Fusionner les coefficients de décompositions des 2 images
```

```
coeffs = ctfus(coeffs1,coeffs2,AFUSMETH,DFUSMETH);
```

```
% Appliquer la transformée en contourlettes inverse
```

```
fusim = pdfbrec(coeffs,pfilter,dfilter);
```

Les coefficients de décomposition en contourlettes des deux images '*coeffs1*' et '*coeffs2*' sont fusionnés par la fonction '*ctfus*' pour donner les coefficients '*coeffs*'. Ces derniers vont servir pour la fonction '*pdfbrec*' afin de reconstruire l'image résultat en réalisant tout simplement la transformée en contourlettes inverse.

La figure si dessous illustre un exemple de la décomposition de l'image du canal 1 par la transformée de Contourlet.

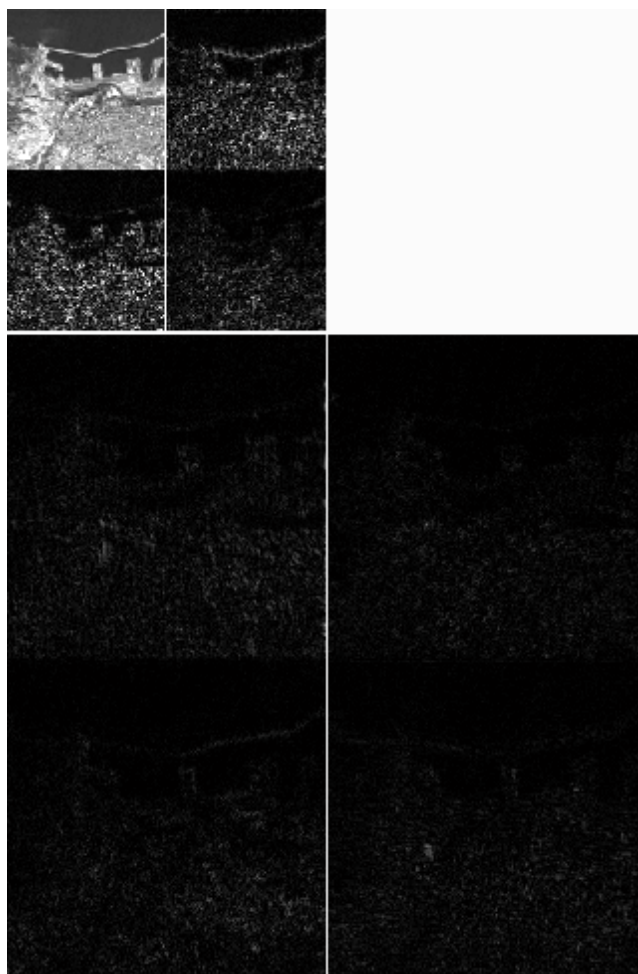


Figure. 4.14: La décomposition de l'image du canal 1 par la transformée de Contourlet

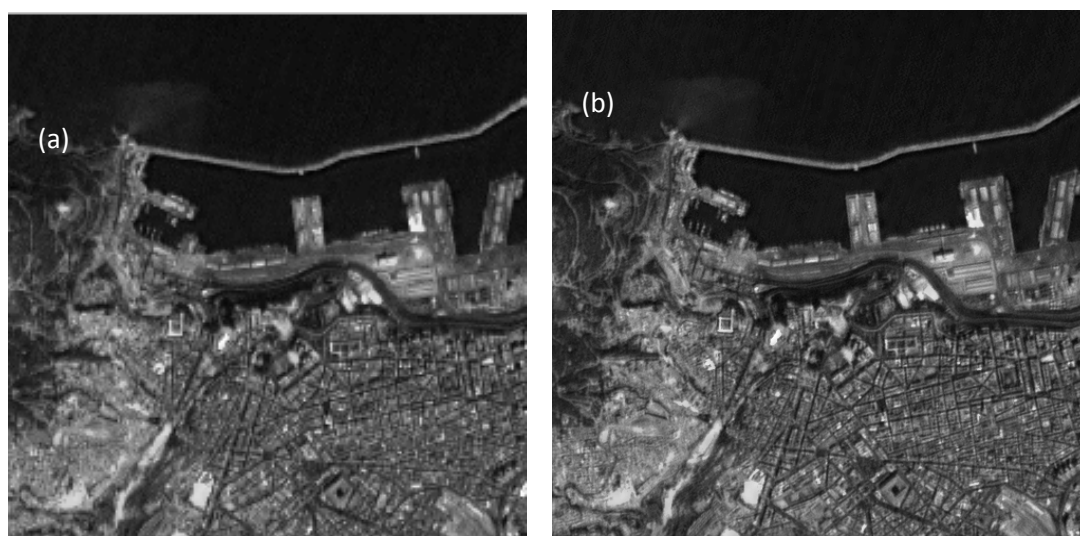


Figure. 4.15: (a) L'image originale du canal 1, (b) L'image reconstruite.

4.2. SHEARLET

La décomposition est effectuée en appliquant successivement des opérateurs de fenêtrage à l'image suivis chacun d'une transformée de Fourier. La reconstruction s'obtient alors en effectuant la transformée inverse de chaque composante puis en appliquant l'opérateur de fenêtrage dual et en sommant finalement chaque contribution.

Voici un extrait du code source en Matlab pour réaliser la fusion selon la méthode de Shearlet :

```
% Décomposer l'image basse résolution en coefficients Shearlet
```

```
[ST im1, Ps im1] = shearletTransformSpect(im1);
```

```
% Décomposer l'image haute résolution en coefficients Shearlet
```

```
[ST im2, Psi im2] = shearletTransformSpect(im2);
```

```
% Fusionner les coefficients de décompositions des 2 images et appliquer la transformée en Shearlet inverse
```

```
imFus = inverseShearletTransformSpect(ST im1, Psi im2);
```

Les étapes à suivre pour fusionnée des images par la méthode de Shearlet :

1. Suréchantillonner l'images MS pour rendre sa taille de Pixel égale à celle de l'image panchromatique.
2. Appliquer la transformée de Shearlet discrète FFST (Fast Finite Shearlet Transform) à l'image panchromatique et aux images multi spectrales. Quatre images (ST^{MS} , ST^{PAN} , Psi^{MS} , Psi^{PAN}) sont obtenues à partir de chaque image multi spectral et panchromatique.

3. En utilisant les images de détail (ST^{MS} , ST^{PAN}) de chaque décomposition, pour produire des images de détail qui sont remplacé dans la décomposition multispectrale (Ψ^{MS} , Ψ^{PAN}).

4. En appliquant la transformée de Shearlet inverse IFFST (Inverse Fast Finite Shearlet Transform) pour obtenir finalement l'image fusiunée.

La figure si dessous illustre un exemple de la décomposition de l'image du canal 1 par la transformée de Shearlet.

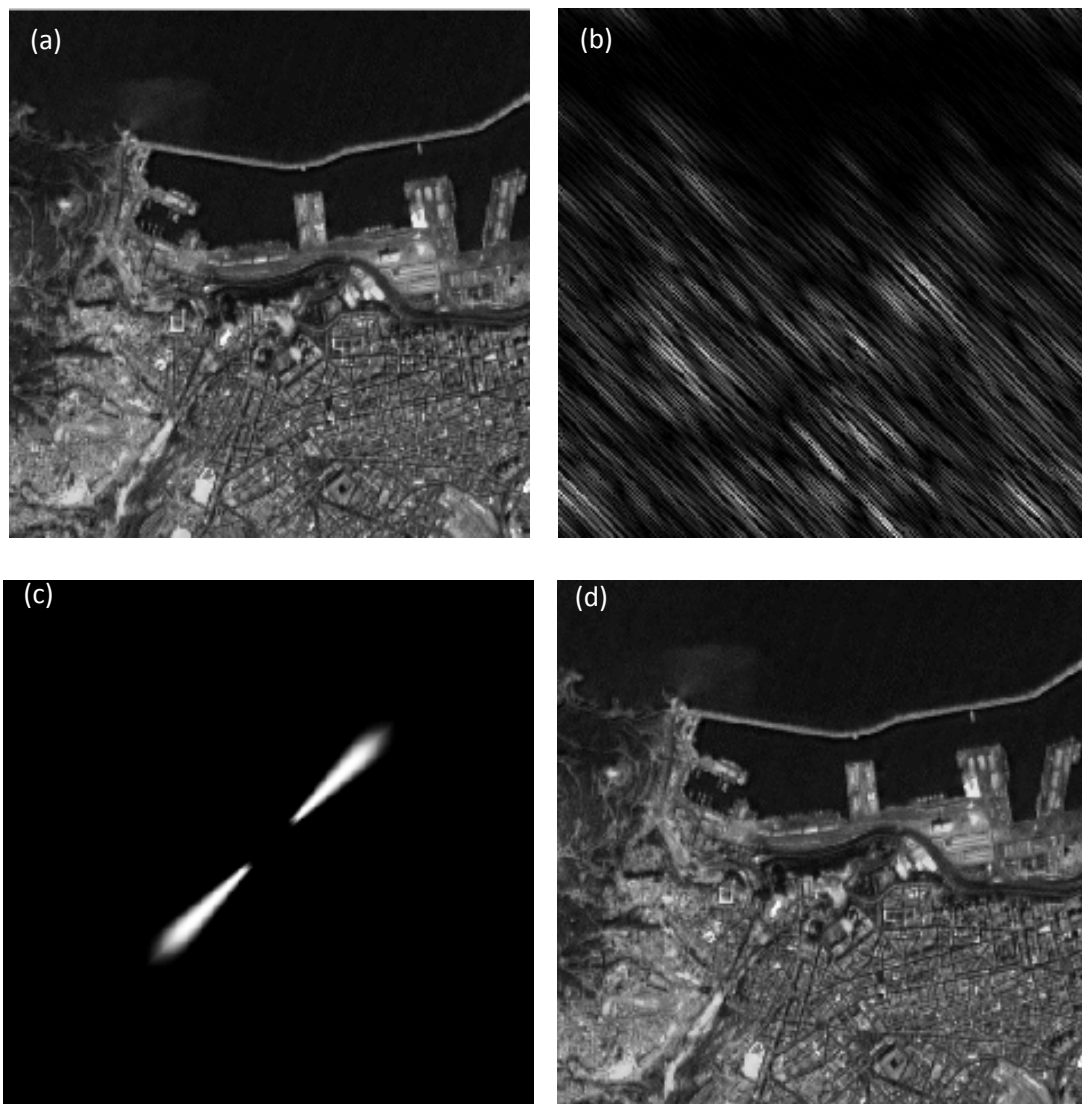


Figure. 4.16: (a) L'image original du canal 1, (b) Coefficients de Shearlet (Détails de haute fréquence), (c) Shearlet (information de basse fréquence), (d) L'image reconstruite.

Le principe de la transformée en Shearlet est résumé dans l'organigramme suivant :

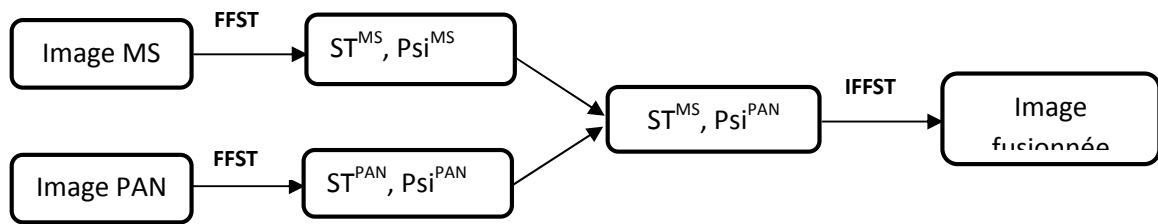


Figure. 4.17: Principe d'application de la transformée en Shearlet

5. Résultats de fusion pour le satellite MSG :

5.1 Résultats pour le satellite MSG1

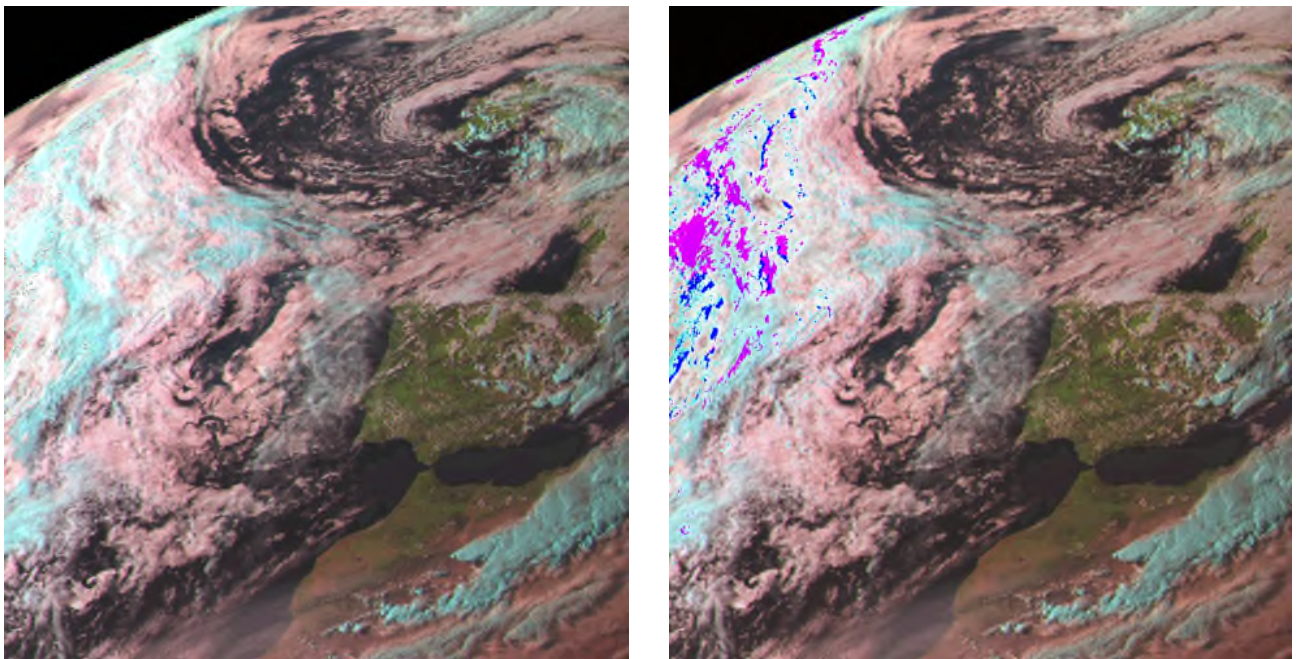


Figure. 4.18: Image fusionnée par modèle M1, Image fusionnée par modèle M2

5.2 Résultats pour le satellite MSG2

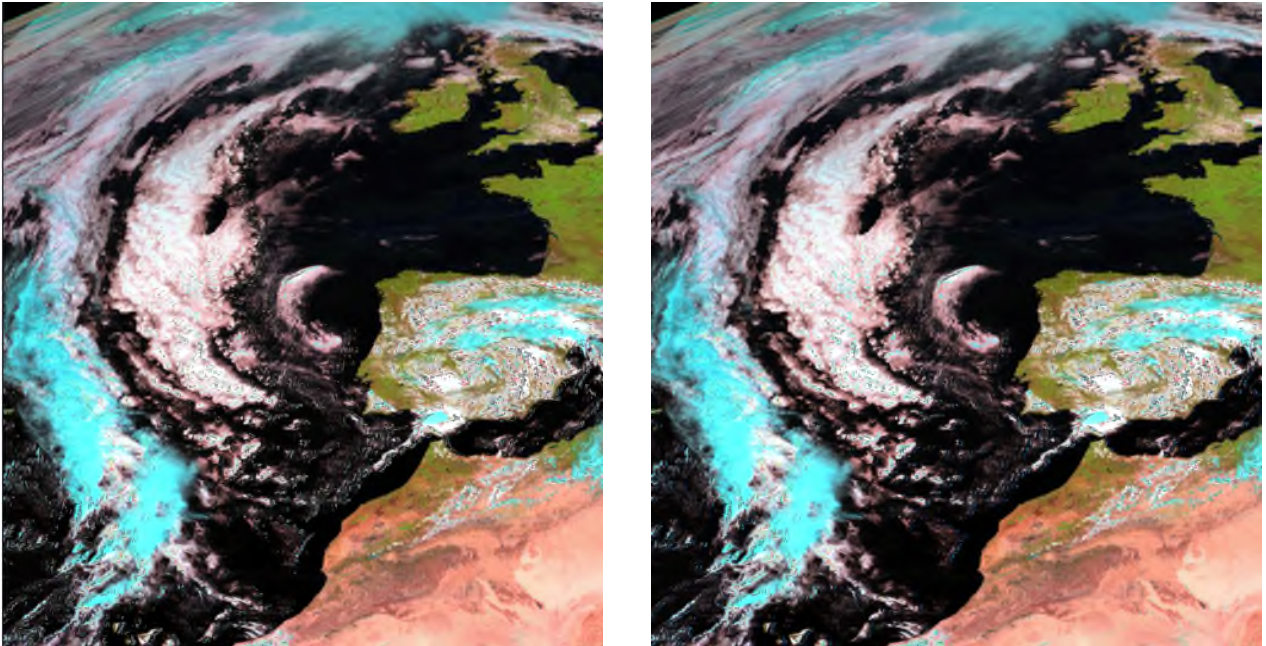


Figure. 4.19: Image fusionnée par model M1, Image fusionnée par model M2

6. Résultats de fusion pour le satellite IRS :

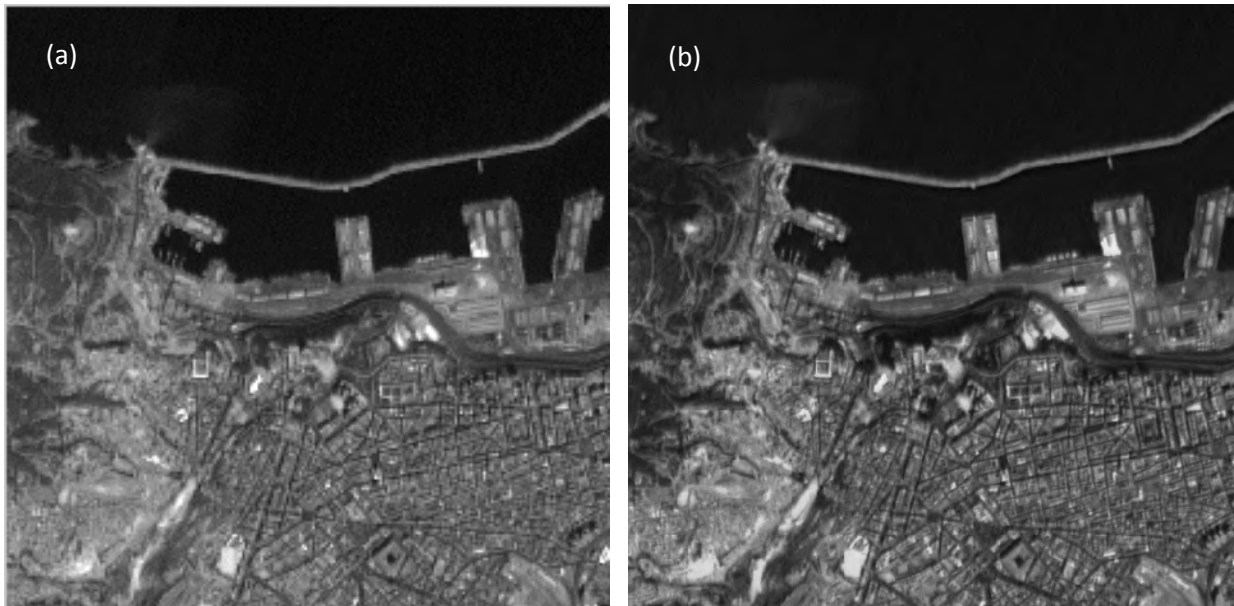


Figure. 4.20: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode d'algorithme "A trous", (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode d'algorithme "A trous".



Figure. 4.21: (c) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode d'algorithme "A trous", (d) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode de Shearlet.

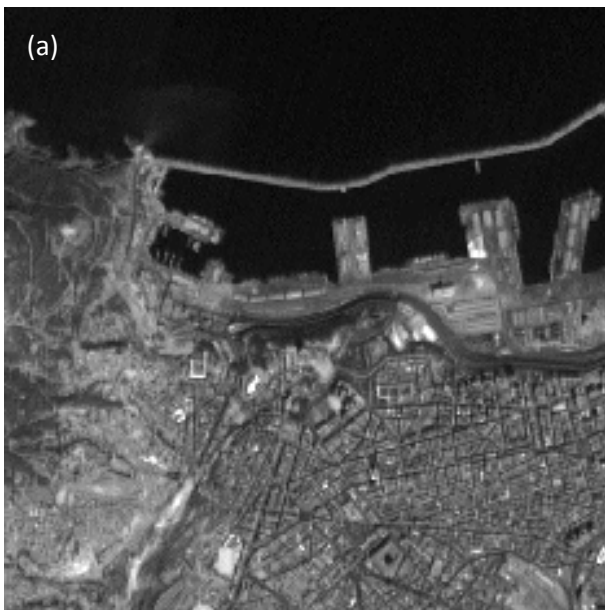


Figure. 4.22: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode de Shearlet, (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode de Shearlet.



Figure. 4.23: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode du concept ARSIS (b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode du concept ARSIS.

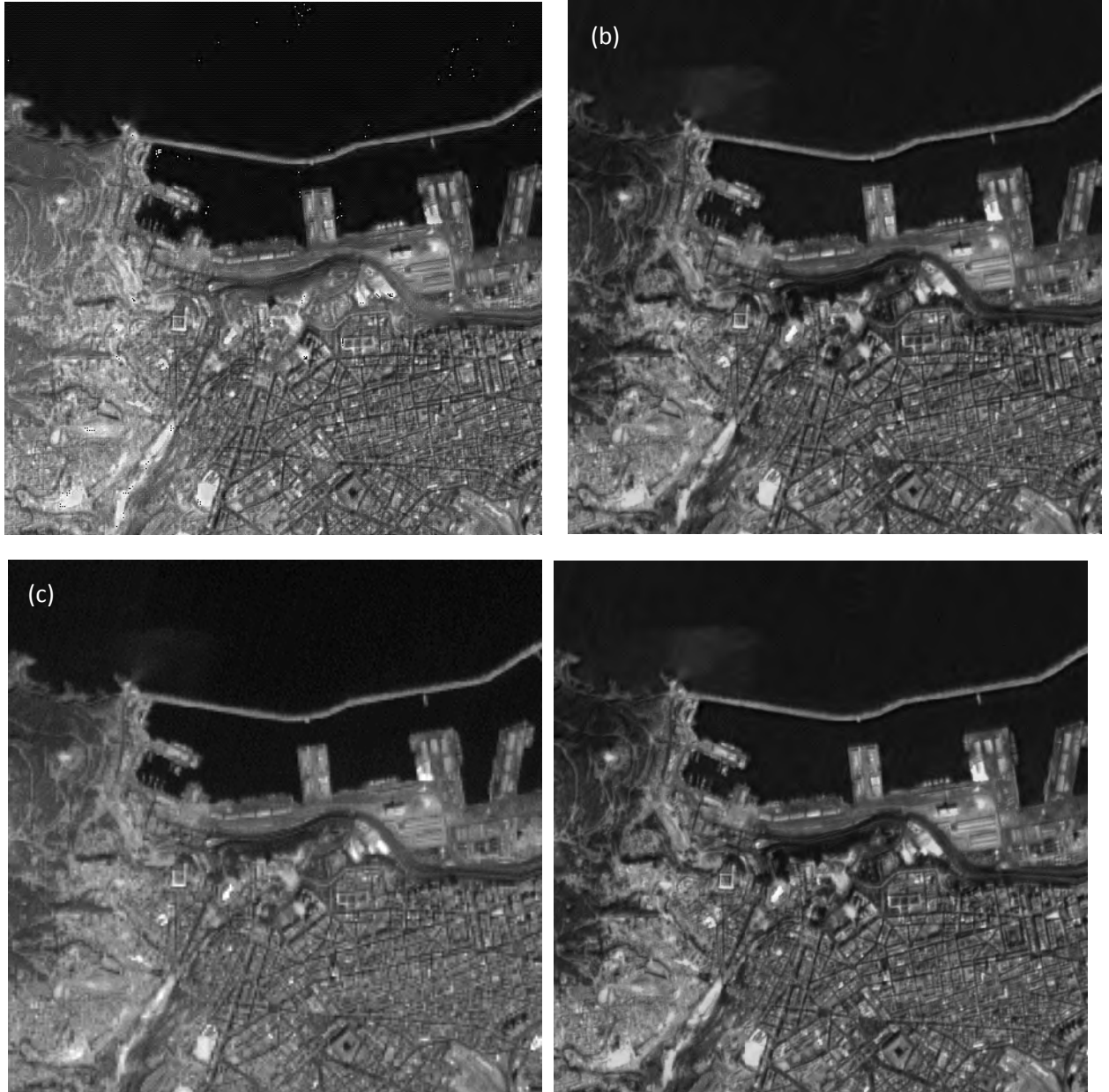


Figure. 4.24: (a) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode du concept ARSIS,(b) Fusion de l'image Pan avec l'image band 1 par la méthode de Contourlette,(c) Fusion de l'image Pan avec l'image band 2 par la méthode de Contourlette,(d) Fusion de l'image Pan avec l'image band 3 par la méthode de Contourlette.

7. Outils d'évaluation :

Pour les images de télédétection, l'image idéale désirée ne peut être acquise. Nous devons se fier dès lors à d'autres outils pour évaluer et comparer nos résultats. Il existe plusieurs méthodes disponibles pour l'évaluation de la qualité d'image, qui incluent une comparaison visuelle et statistique. Les index tels que l'erreur quadratique moyenne (MSE) et la valeur de pointe du signal/bruit (PSNR), jugés insatisfaisants, sont inutilisables dans notre cas.

L'évaluation de la fusion d'image est faite en mesurant la quantité d'informations rehaussées dans l'image fusionnée. Elle est basée sur une analyse visuelle et une analyse quantitative.

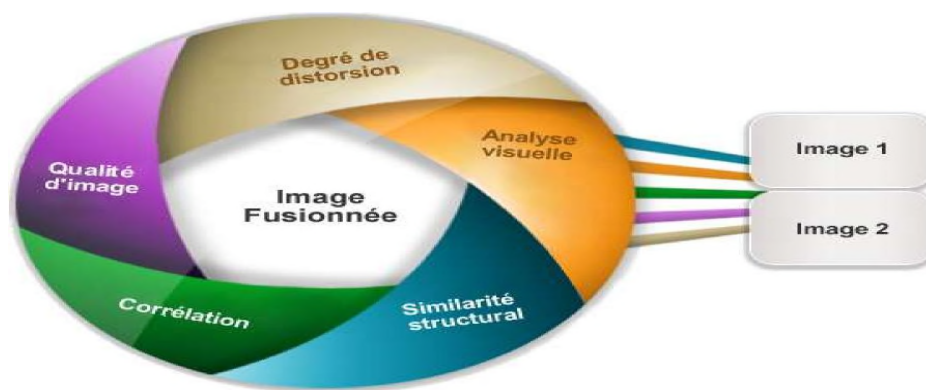


Figure. 4.25: Schéma de comparaison entre les images sources et l'image fusionnée

Le schéma ci-dessus résume les tests de comparaisons calculés entre l'image de fusion et les images sources. Chaque index de comparaison est calculé séparément avec l'image source 1 (image basse résolution multispectrale), puis avec l'image source 2 (image haute résolution panchromatique). La moyenne des deux valeurs est celle qui est retenue et pas uniquement la comparaison entre l'image de fusion et l'image 1, comme nous pouvons le trouver dans certaines littérature traitant de la fusion d'images.

7.1. Analyse visuelle :

Préconisée par la littérature et les experts, l'analyse visuelle du résultat et des différences est un outil essentiel. Le recours à l'analyse visuelle peut paraître subjectif car le jugement d'une personne sur le résultat esthétique d'une image va dépendre de ses connaissances, de ses attentes et de l'application considérée. Cependant, l'utilisation du système visuel humain en tant qu'outil de jugement

de la qualité n'est pas à négliger ; l'utilisateur pourra voir immédiatement la tendance générale des distorsions de l'image en fonction de ses propres attentes.

L'évaluation des techniques de fusion, dans le cadre d'une exploitation visuelle, est axée sur deux qualités particulières : la meilleure préservation des teintes et couleurs originelles, ainsi que l'apport maximal de l'information originale contenue dans l'image à haute résolution. La première garantit la possibilité de réaliser une interprétation visuelle selon un ensemble de clés standards (teintes, couleurs), la seconde assure que l'injection du détail spatial offre un apport substantiel à l'interprétation et à la reconnaissance. L'analyse visuelle est subjective donne des comparaisons directes. Cependant, elle est facilement influencée par des facteurs psychologiques visuels. La fusion d'image doit être basée sur une vision subjective et des critères d'évaluation quantitatifs objectifs.

7.2. Analyse quantitative :

La connaissance des points forts et points faibles d'une méthode ne peut être fiable que si un cadre formel d'évaluation de la qualité est établi et respecté. Pour cela, la mesure de la qualité de fusion doit s'accompagner d'un certain nombre de critères d'évaluation formels.

L'analyse quantitative utilise des index statistiques pour mesurer et comparer l'image résultat aux images sources. Parmi ces comparaisons, nous mesurons le degré de distorsion par la distorsion du spectre, la corrélation par le coefficient de corrélation, la qualité d'image par l'index universel de qualité d'image et la similarité structural par l'index de similarité structural. D'autres index statistiques propres à l'image résultat sont également calculés tel que : la valeur moyenne, la déviation standard et l'entropie.

Plusieurs paramètres statistiques sont utilisés pour l'évaluation quantitative [9]

A. Bais

Le biais consiste à calculer la différence entre la moyenne de l'image synthétisée et l'image originale. Il est calculé par la relation suivante :

$$Bias = \frac{mean(XS_l) - mean(XS_l^*)}{mean(MS_l)}$$

On désigne par :

xs : L'image multispectrale originale.

xs^* : L'image fusionnée.

B. Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation exprime la similitude entre deux images. il est donné par la relation suivante :

$$\text{Coefficient de Corrélation} = \frac{\text{Covariance}(xs, xs^*)}{\sqrt{\text{Variance}(xs) - \text{Variance}(xs^*)}}$$

8. Propriétés statistiques de chaque méthode :

A partir des résultats de fusion, il est difficile de réaliser une comparaison basée uniquement sur une analyse visuelle, nous remarquons un résultat légèrement plus sombre dans la méthode basée sur les ondelettes (Algorithme à trous, Concept ARSIS), mais toutefois il est nécessaire de passer à une évaluation quantitative.

Le tableau suivant résume les propriétés statistiques qui nous intéressent pour la comparaison.

8.1 Pour le satellite MSG

	Model M1	Model M2
Biais idéal (0)	0.0027	0.0053
Différence idéal moyenne idéal (0)	0.00046	0.065
Coefficient de Corrélation idéal (1)	0.97	0.95

Tableau 5 : Les propriétés statistiques des images fusionnées du satellite MSG1

	Model M1	Model M2
Biais idéal (0)	0.0083	0.011
Différence idéal moyenne idéal (0)	0.038	0.052
Coefficient de Corrélation idéal (1)	0.90	0.92

Tableau 6 : Les propriétés statistiques des images fusionnées du satellite MSG2.

8.2 Pour le satellite IRS

Méthodes		Différence idéal moyenne idéal (0)	Biais idéal (0)	Coefficient de Corrélation idéal (1)
Transformée de Shearlet	XS1	0.0941	0.0033	0.9782
	XS2	0.0178	0.0052	0.9967
	XS3	0.0408	0.0023	0.9913
<i>Algorithm "A trous"</i>	XS1	- 0,0020	- 0,0046	0,9905
	XS2	0,0727	0,0161	0,9903
	XS3	0,0984	0,0329	0,9884
<i>Concept ARSIS (Ondelette de Haar)</i>	XS1	-0,0185	0,0177	0,9995
	XS2	-0,0182	0,0141	1,0000
	XS3	-0,0541	0,0032	0,9981
<i>Contourlette</i>	XS1	0,0195	0,0167	0,9992
	XS2	0,0132	0,0121	1,0000
	XS3	0,0241	0,0012	0,9987

Tableau 7 : Les propriétés statistiques des images fusionnées du satellite IRS.

A partir des tableaux 5,6 et 7, les résultats de fusion basés sur les deux méthodes Contourlette et Shearlet sont nettement supérieurs. Avec un

coefficient de corrélation plus grand, un degré de distorsion du spectre plus petit que les méthodes à base de la transformée d'Ondelettes, un index de qualité d'image et de similarité structural plus importants.

9. Conclusion pour les méthodes utilisées :

9.1 Rappel des précautions à prendre concernant la qualité d'une méthode :

Nous voulons souligner ici les précautions à prendre lorsque l'on conclue quant à la qualité d'une méthode de fusion. Les conclusions doivent être nuancées puisque la qualité des produits fusionnés par une méthode dépend :

- De l'écart entre les instants d'acquisition,
- Des résolutions spatiales des images d'entrée,
- Du ratio entre ces images,
- Des réponses spectrales des capteurs (spectres disjoints, chevauchement, recouvrement total...),
- Du contenu spatial et spectral de la scène,
- Et enfin, de l'importance accordée par l'utilisateur aux différents aspects de la qualité des produits fusionnés.

9.2. Les méthodes à base de la transformée d'ondelette :

L'avantage de cette méthode est de ne pas distordre l'ensemble original en produisant des couleurs fidèles à celles des compositions colorées originales. De plus, l'impression visuelle de l'image obtenue est très bonne, puisque l'intégralité des structures de A est injectée dans les produits fusionnés.

Et à l'aide de ces méthodes, il n'y a pas de distorsion radiométrique qui est due à une modification des basses fréquences des modalités MS d'origine, et donc il y a un respect de la propriété de cohérence car on a utilisé la transformée d'Ondelette pour séparer entre les basse et haute fréquences de l'image et donc nous avons injecté les détails de l'image PAN et l'information de couleur des images MS.

D'après le tableau ci-dessus, si on compare en terme de la luminance, on remarque que dans la méthode I (processus de remplacement), l'image résultante est la plus nette puisque nous obtenons la plus grande valeur de la moyenne, et si on compare en terme du contraste, la méthode III (méthode d'hybridation IHS) nous a donné une image résultante la mieux contrastée, puisque nous obtenons la plus grande valeur de la variance

9.3. Les méthodes à base de la transformée directionnelle :

Nous avons aperçu que les meilleures techniques de fusion d'images satellitaires multispectrales et panchromatiques sont basées sur des approches hiérarchiques, où les images d'entrée sont converties en représentations pyramidales ou multi-échelles. Les méthodes basées sur la transformée en ondelette donnent de bons résultats mais nous avons noté la limitation de la Transformée dans la prise en compte de l'information directionnelle. Ceci se traduit par des contours discontinus, des points...

La transformée en contourlettes, qui se base sur l'utilisation de bancs de filtres directionnels et la transformée de Shearlet qui se base sur l'utilisation de la transformée de fourrier directe et inverse, on l'avantage d'être invariante au décalage (shift invariant), multi-échelle et multidirectionnelle, et a donné des résultats meilleurs, tout en préservant des contours lisses et assimilés aux images originales. Le calcul des différents critères d'évaluation a démontré le gain enregistré par la méthode de fusion basée sur la transformée en contourlettes. Nous pouvons affirmer donc que cette méthode apporte une amélioration significative dans la fusion des images satellitaires. Nous avons apporté une amélioration à cette méthode en la combinant avec la méthode à base d'ondelette, afin d'améliorer la résolution spatiale tout en préservant l'information spectrale et texturale.

Comparativement aux techniques de fusion existantes rapportées dans la littérature et sur le marché actuel des logiciels spécialisés dans le domaine de la télédétection et

de la géomantique, la nouvelle méthode proposée est une technique innovatrice et unique en son genre, son schéma est plus flexible et plus efficace.

CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes placés dans le cadre de la synthèse d'images MS à haute résolution spatiale qui soient les plus proches possibles de celles qui auraient été acquises par le capteur correspondant s'il possédait cette haute résolution. La synthèse à haute résolution s'effectue au moyen d'une modalité possédant cette haute résolution spatiale, dans notre cas, il s'agit de la modalité Pan. L'information qui sépare la modalité MS d'origine et l'image fusionnée correspond aux hautes fréquences spatiales, qui sont présentes dans la modalité Pan.

D'après les résultats que nous avons obtenu et si on utilise les critères de comparaison tel que l'histogramme et les propriétés statistiques entre les images résultats et l'image que nous avons au début on voit très clairement qu'il y a une grande différence entre eux, ce qui implique que nous avons réussi à fusionner l'image panchromatique à haute résolution et l'image multispectrale à basse résolution en injectant les détails de l'image panchromatique à l'image multispectrale afin d'augmenter la résolution de l'image multispectrale par les différentes méthodes appliquées dans notre travail

Pour les méthodes à base de la transformée d'ondelette, l'avantage de cette méthode est de ne pas distordre l'ensemble original en produisant des couleurs fidèles à celles des compositions colorées originales. De plus, l'impression visuelle de l'image obtenue est très bonne, puisque l'intégralité des structures de l'image panchromatique est injectée dans les produits fusionnés.

Et a l'aide de ces méthodes, il n'y a pas de distorsion radiométrique qui est due à une modification des basses fréquences des modalités MS d'origine, et donc il y a un respect de la propriété de cohérence car on a utilisé la transformée d'Ondelette pour séparer entre les basse et haute fréquences de l'image et donc nous avons injecté les détails de l'image PAN et l'information de couleur des images MS.

Pour les méthodes à base de la transformée directionnel tel que la transformée en contourlettes, qui se base sur l'utilisation de bancs de filtres directionnels et la transformée de Shearlet qui se base sur l'utilisation de la transformée de fourrier directe et inverse, on l'avantage d'être invariante au décalage (shift invariant), multi-échelle et multidirectionnelle, et a donné des résultats meilleurs, tout en préservant des contours lisses et assimilés aux images originales

Il ressort de cette étude que les méthodes de fusion sont nombreuses en télédétection et n'ont jamais été comparées de façon systématique entre elles. Les études déjà réalisées montrent cependant qu'aucune méthode ne serait meilleure qu'une autre : tout dépend de l'objectif de la fusion (qualité visuelle / qualité spectrale).

Dans ce qui suit, nous allons essayer de présenter un certain nombre d'améliorations et de perspectives pratiques et théoriques qui peuvent être envisagées :

1. Améliorer les techniques de fusion en introduisant de nouvelles méthodes et plusieurs modèles d'imagerie satellitaire.
2. Trouver une astuce pour éviter l'étape de ré échantillonnage qui été un problème major de perte d'information.
3. Utiliser autres méthodes récentes à base de la transformée directionnel tel que les Bandelette, Curvelet...ect.

BIBLIOGRAPHIE

[Lillesand et Kiefer, 1979] T.M. Lillesand et R.W. Kiefer. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons, Inc., 1979.

[Mathieu, 1994] S.Mathieu. Aide à la détermination de faciès pédopaysagers à partir de données satellitaires. Thèse de Doctorat, U. Paris VII, Septembre 1994.

[Oscar VIVEROS CANCINO, 2003] Oscar Viveros Cancino. Analyse du milieu urbain par une approche de fusion de données satellitaires optiques et radar. Thèse de Doctorat, Université De Nice-Sophia Antipolis – Ufr Sciences, 10 Juin 2003.

[E-cours] E-cours.<http://e-cours.univ-paris1.fr>.

[Eumetsat, 2005] Eumetsat, 2005, MSG : Meteosat Second Génération En Orbit- En Service. [http:// www.eumetsat.int/ groups/cps/documents/document/pdf_msg02_fr.pdf](http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_msg02_fr.pdf).

[Pohl et Van Genderen, 1998] Pohl C., Van Genderen J.L., 1998. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications, International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n°5, p. 823-854.

[Gonzalez et al. 1996] Garguet-Duport, B., Girel, J., Chassery, J-M. and Pautou, G. 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 62, n°9, p. 1057-1066.

[Yésou et al., 1993] Yésou H., Besnus Y., Rolet J., Pion J.C., Aing A., 1993. Merging Seasat and SPOT Imagery for the Study of Geological Structures in a Temperate Agricultural Region, Remote Sensing of Environment, n°43, p. 265-279.

[Mangolini, 1994] Mangolini M. 1994. Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo-interprétation. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, p. 174.

[Bontemps, 2004] Bontemps S., 2004. Cartographie et interprétation de l'évolution du développement territorial par télédétection spatiale au Cambodge, Mémoire de fin d'études de la faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve, p. 111.

[Chavez et al. 1991] Chavez P.S., S.C. Sides et J.A. Anderson, 1991. 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.

[Ranchin T. et Wald L. 2000] Ranchin T. et Wald L. 2000. 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.

[Ranchin T. 2005] Ranchin T. 2005. Fusion de données et modélisation de l'environnement. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université de Nice-Sophia Antipolis.

[Garguet et al, 1996] Garguet-Duport, B., Girel, J., Chassery, J-M. and Pautou, G. 1996. The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 62, n°9, p. 1057-1066.

[Truchetet, 1998] Truchetet, F. (1998) Ondelettes pour le signal numérique. Éditions Hermes, Paris, 160 p.

[Ranchin, 1993] Ranchin, T. (1993) 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, 110 p.

[T. Ranchin et L. Wald, 1997] Ranchin T. et Wald L. 1997. Fusion d'images HRV (P et XS) de SPOT à l'aide de la méthode ARSIS : apports à la cartographie urbaine. Télédétection des milieux urbains et périurbains, p. 283-290.

[Ranchin et Wald 2000] Ranchin T. et Wald, L. 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, N°1 : 4-18.

[I. BLOCH, H. MAÎTRE] Les méthodes de raisonnement dans les images par Isabelle BLOCH, Henri MAÎTRE. Télécom PARIS école nationale supérieure de télécommunication
DEPARTEMENT TSI.

ANNEXES I

1. La composition colorée

1.1 La formation de la couleur

Toutes les couleurs sont formées par l'addition de la lumière des trois couleurs primaires additives : rouge, vert et bleu (procédé utilisé pour afficher de la lumière sur un écran par exemple). En partant du noir, c'est à dire l'absence de lumière, on va ajouter des quantités variables de lumières rouge, verte et bleue pour afficher une couleur précise. Chaque couleur est donc une combinaison singulière des trois couleurs primaires, la couleur blanche étant l'addition des trois couleurs primaires à intensité maximale. Ce procédé est appelé synthèse trichromique additive.

La synthèse trichromique soustractive est le procédé inverse. Toutes les couleurs sont créées par soustraction de la lumière des trois couleurs soustractives : cyan, magenta et jaune (procédé utilisé pour la peinture, l'imprimerie ou la photographie). En partant du blanc, c'est à dire la lumière la plus intense, on va soustraire des quantités variables de lumières rouge, verte et bleue pour afficher une couleur précise.

Ainsi, du rouge mélangé au vert donne du jaune, du vert mélangé au bleu donne du cyan et de bleu mélangé au rouge donne du magenta. Le blanc est le fruit de l'addition des trois couleurs fondamentales à leur intensité maximale et le noir représente l'absence totale de lumière. Le gris est donc le résultat de l'addition d'une même proportion de chacune des trois couleurs fondamentales.

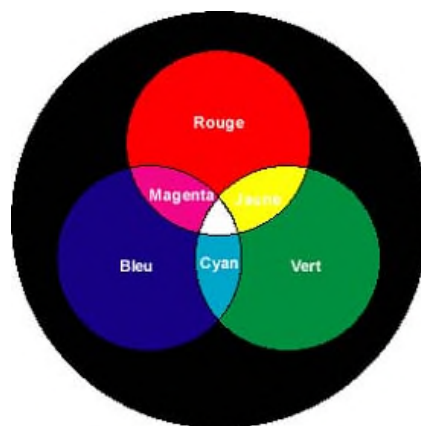


Figure.1 la synthèse trichromique additive

1.2 Le principe de la composition colorée

Aux trois couleurs fondamentales sont donc associés trois canaux d'une image satellitale. L'illustration ci-dessous montre le codage des trois canaux d'une image SPOT : le canal XS3 (proche infrarouge) est codé en rouge, le canal XS2 (rouge) est codé en vert et le canal XS1 (vert) est codé en bleu. Le résultat est appelé composition colorée.

En codant les trois canaux d'une image SPOT avec les trois couleurs fondamentales, on peut ainsi élaborer 27 compositions colorées différentes ($3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27$).

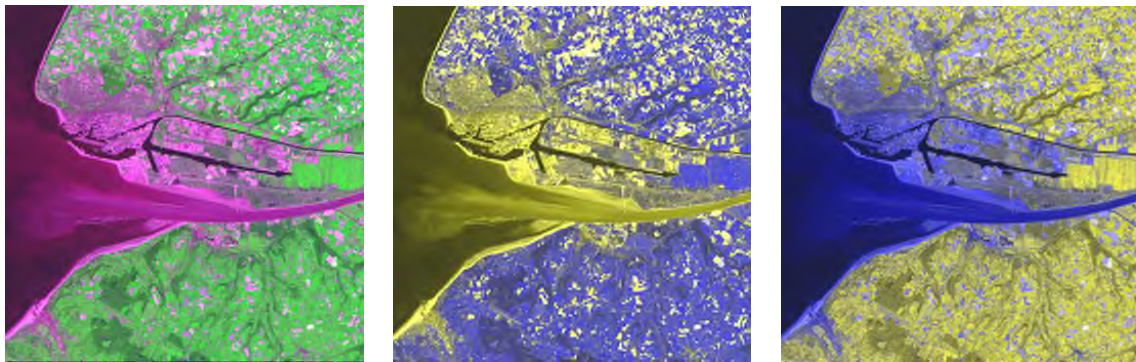


Figure.2 quelques exemples de compositions colorées élaborées à partir des trois mêmes canaux bruts

2. Bande spectrale : intervalle du spectre des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique.

3. Brillance : éclat, intensité lumineuse par unité de surface apparente.

4. Capteur : instrument qui recueille de l'énergie rayonnante provenant de la scène (ou cible) visée et fournit un signal électrique correspondant, à des fins de mesure. Un capteur actif est un capteur auquel est incorporé ou associé un émetteur qui irradie la scène dans la bande spectrale du récepteur.

5. Cible : portion de la surface terrestre observée par le satellite. Sa taille peut varier de quelques dizaines de km² à plusieurs milliers. On parle aussi de scène.

6. Contraste : Le contraste est l'écart de luminosité entre les hautes et les basses lumières.

7. Emission : énergie rayonnée dans une longueur d'onde définie, pendant l'unité de temps, par l'unité de surface d'un corps à une température déterminée.

8. Fréquence : nombre d'oscillations d'une onde par unité de temps d'un mouvement vibratoire simple. C'est l'inverse de la période.

9. Histogramme : représentation graphique d'un ensemble de données qui met en évidence les valeurs des paramètres en fonction de leur fréquence d'occurrence.

Luminance : en un point et dans une direction spécifiée, puissance rayonnée par unité de surface et par unité d'angle solide. Synonyme de radiance.

10. Multibande : se dit d'un capteur opérant dans plus d'une bande spectrale à la fois et par extension des images obtenues à l'aide de ce type de capteur. Ce terme est préférable à celui de multispectral car il y a plusieurs bandes mais un seul spectre électromagnétique.

11. Multispectral : se dit d'un capteur opérant dans plus d'une bande spectrale à la fois et par extension des images obtenues à l'aide de ce type de capteur.

12. Onde électromagnétique : ensemble de deux champs, électrique et magnétique, à oscillations perpendiculaires qui se propagent simultanément dans une direction donnée sans nécessiter de milieu matériel. Dans le vide, l'onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière.

13. Pixel : la plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la taille d'échantillonnage.

14. Rayonnement : processus par lequel une source fournit de l'énergie vers l'espace extérieur sous forme d'ondes ou de particules.

15. Rayonnement électromagnétique : c'est une forme dynamique d'énergie qui ne se manifeste que dans son interaction avec la matière. Il se compose comme un champ de forces dont les variations affectent les propriétés électriques et magnétiques de la matière. Il se caractérise par une période, une fréquence, une vitesse de propagation, une longueur d'onde et une amplitude.

16. Résolution : aptitude, d'un instrument d'observation ou de mesure, à discriminer deux objets ou deux valeurs proches l'une de l'autre.

17. Satellite : objet céleste animé d'un mouvement périodique autour d'un corps de masse prépondérante, ce mouvement étant principalement déterminé par le champ de gravité de ce dernier. Dans le cas d'un satellite artificiel, le terme "satellite" désigne l'objet aussi bien lorsqu'il se trouve à Terre ou en cours de lancement que lorsqu'il est placé en orbite.

18. Scène : domaine observé dont les limites résultent des conditions d'observation à un moment donné. Par extension, image de ce domaine considéré comme un produit commercialisable.

19. Signature spectrale : courbe caractéristique d'un corps, représentant par exemple sa réflectance spectrale ou son existence spectrale en fonction de la longueur d'onde.

20. Spectre électromagnétique : répartition des fréquences du rayonnement électromagnétique depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes hertziennes.

21. Télédétection : la télédétection est l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. *Télé* signifie "à distance" et *détection* veut dire "découvrir" ou "déceler".

22. Visible : portion de spectre électromagnétique comprise entre 0,4 et 0,7 μm .

23. Infrarouge : partie du spectre électromagnétique s'étendant de 0,7 μm à 1 mm de longueur d'onde. En télédétection, on le subdivise généralement en infrarouge proche, moyen et thermique.

1. A quoi ressemble une ondelette

Les ondelettes permettent, comme les sinus et les cosinus, de décomposer un signal. Les ondelettes sont localisées en temps et en fréquence. Le caractère localisé de l'ondelette s'exprime par le fait que la fonction est non nulle sur un intervalle fini et nulle partout ailleurs. Avec les ondelettes, on sait donc en quelques sortes quand un évènement se produit et comment il se produit, avec une certaine incertitude due au principe d'Heisenberg que l'on peut néanmoins fixer de manière arbitraire. Les ondelettes sont des dilatations (dilater est ici à prendre dans le sens étirer et comprimer !) et des translations d'une ondelette initiale que l'on nomme ondelette mère.

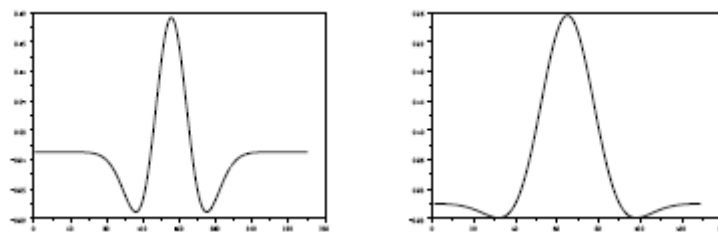


Figure.1 Ondelette mère Chapeau Mexicain et de Morlet

Suivant ce que l'on désire réaliser avec le signal, on utilise différents types d'ondelette mère. Par exemple, les ondelettes peuvent compresser de manière sensible et sans trop de perte une image (l'image est un signal carré en deux dimensions).

On utilise alors une onde mère carrée appelée *ondelette de Haar* qui code en **quelques** coefficients le signal de l'image . Ci-dessous est représenté l'ondelette de Haar :

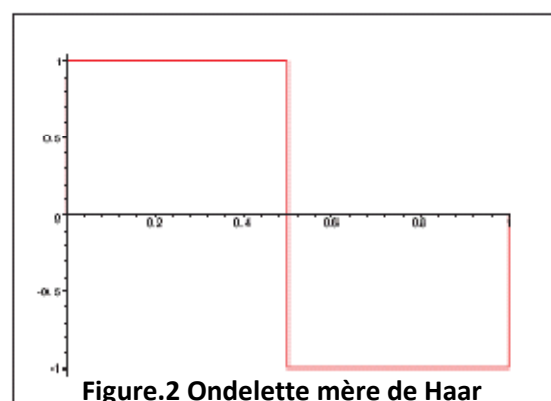


Figure.2 Ondelette mère de Haar

Les ondelettes sont donc des fonctions

$$\Psi_{s,t} = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$$

Où ψ est l'ondelette mère. ψ doit être de moyenne nulle, centrée au voisinage de 0 et d'énergie finie.

2. La transformée en ondelette

La transformée en ondelettes est similaire à celle de Fourier et s'écrit :

$$\gamma(s, \tau) = \int f(t) \Psi_{s,\tau}^*(t) dt$$

La transformée prend les deux arguments s et τ qui sont respectivement des coefficients de translation et de dilatation. En faisant varier ces arguments, on peut couvrir complètement le plan temps-fréquence avec des *boutes* ; on obtient ainsi une représentation complète et redondante du signal à analyser.

3. La multirésolution

Dans la multirésolution on examine le signal à résolution grossière, à l'aide d'ondelettes larges, et d'un petit nombre de coefficients, pour en tracer l'ébauche, ensuite on analyse aux résolutions fines, en utilisant un grand nombre de petites ondelettes, qui scrutent les détails. De cette manière les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal : elles utilisent une fenêtre étroite pour regarder les composantes transitoires de haute fréquence, et une fenêtre large pour regarder les composantes de longue durée, de basses fréquences.

3.1 Construction d'une multirésolution

La fonction d'échelle :

Nous écrivons la fonction d'échelle comme la combinaison de ses translatées à la résolution deux fois plus fine, chaque translatée étant affectée d'un coefficient.

$$\phi(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n 2\phi(2x - n)$$

L'ondelette :

On peut déduire directement l'ondelette de la fonction d'échelle

$$\phi(t) = 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n 2\phi(2t - n)$$

Dans ce cas nous avons déduit l'ondelette directement à partir de la fonction d'échelle.

Dans le cas de la fonction de Haar, nous savons que :

$$\phi(t) = \phi(2t) - \phi(2t - n)$$

C'est-à-dire

$$\phi(t) = 1 \text{ Si } 0 < t < \frac{1}{2}$$

$$\phi(t) = -1 \text{ Si } \frac{1}{2} < t < 1$$

$$\phi(t) = 0 \text{ Sinon}$$

les coefficients d_n sont $d_0 = \frac{1}{2}$ et $d_1 = -\frac{1}{2}$

3.2 L'exemple de Haar

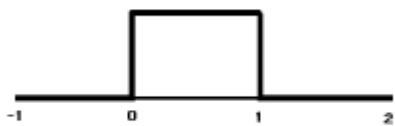


Figure.3 La fonction d'échelle de Haar

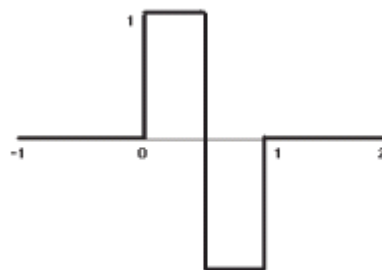


Figure.4 L'Ondelette de Harr

3.3 Interprétation de la fonction d'échelle

Elle donne une suite d'images du signal, chacune à des résolutions qui diffèrent de la précédente par un facteur deux, quand on augmente la résolution, les images successives approximent le signal de mieux en mieux, quand on la diminue, la quantité d'information contenue dans les images diminue, puis s'annule. Elle détermine donc la résolution la plus fine à laquelle on étudie le signal.

4. Une courte introduction aux ondelettes par la pratique

La transformée en ondelette est une méthode de traitement du signal adaptée aux signaux non périodiques. Elle permet une analyse temps-fréquence que ne permet pas une analyse par Fourier.

Les algorithmes d'ondelettes ont deux composants, une fonction d'ondelette et une fonction d'échelle (dénommé parfois filtre passe haut et filtre passe bas).

La fonction d'ondelette utilise deux (ou plus) mesures pour déterminer un coefficient d'ondelette. La fonction d'échelle utilise ces mêmes mesures pour créer une version comprimée du signal.

Dans la pratique, la première moitié des données est remplacée par les valeurs déterminées par la fonction d'échelle, la seconde moitié des données est remplacée par les valeurs déterminées par la fonction d'ondelette.

On peut donc dire que le signal traité est remplacé dans la première moitié par un signal équivalent "en moyenne" mais à fréquence d'échantillonnage 2 fois plus faible et que la seconde partie du signal par les coefficients (les détails) qui ajoutés à la première partie du signal permettent de le recomposer identiquement.

On obtient un traitement en multirésolution en reproduisant ce processus à chaque fois sur la première moitié du signal (le séparant à nouveau en valeurs d'échelles et en valeur d'ondelette). Un traitement en multirésolution doit donc se réaliser sur 2^m mesures.

4.1 Transformée en ondelettes de Haar

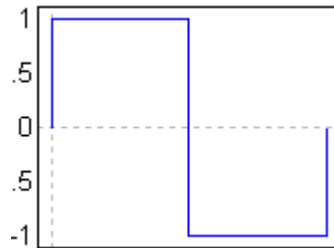


Figure.5 L'Ondelette de Haar

Pour calculer la transformée en ondelettes de Haar d'un tableau de $n = 2^m$ données, il faut:

- calculer la moyenne de chaque paire de données ($n/2$ moyennes);
- calculer la différence entre chaque données et sa moyenne respective ($n/2$ différences);
- placer les moyennes dans la première moitié du tableau de données;
- placer les différences dans la seconde moitié du tableau de données;
- répéter le processus sur la première moitié des données (c'est pourquoi le nombre de données n doit être une puissance de 2).

4.2 Expression des moyennes et différences

Deux mesures (l,r) peuvent être exprimées sous la forme d'une moyenne a et d'une différence d de la manière suivante:

- $a = (l+r)/2 =$ la fonction d'échelle;
- $d = l-a = a-r = (l-r)/2 =$ la fonction d'ondelette;

Le processus étant réversible de la manière suivante:

- $l = a+d;$
- $r = a-d.$

Exemple

Soit 8 données:

7, 1, 6, 6, 3, -5, 4, 2

Pour réaliser la première itération de la transformée en ondelette, il faut calculer:

Moyennes:

- $(7 + 1) / 2 = 4$
- $(6 + 6) / 2 = 6$
- $(3 + -5) / 2 = -1$
- $(4 + 2) / 2 = 3$

Et différences:

- $(7 - 4) = (4 - 1) = 3$
- $(6 - 6) = (6 - 6) = 0$
- $(3 - -1) = (-1 - -5) = 4$
- $(4 - 3) = (3 - 2) = 1$

Cette première itération donne les valeurs suivantes:

4, 6, -1, 3, 3, 0, 4, 1

La seconde itération ne concerne plus que les 4 premières valeurs:

4, 6, -1, 3

Moyennes:

- $(4 + 6) / 2 = 5$
- $(-1 + 3) / 2 = 1$

Différences:

- $(4 - 5) = (5 - 6) = -1$
- $(-1 - 1) = (1 - 3) = -2$

Cette deuxième itération donne les valeurs suivantes:

5, 1, -1, -2, 3, 0, 4, 1

La troisième itération se poursuit sur les 2 premières valeurs:

5, 1

Moyenne:

- $(5 + 1) / 2 = 3$

Différence:

- $(5 - 3) = (3 - 1) = 2$

Cette troisième itération donne les valeurs suivantes:

3, 2, -1, -2, 3, 0, 4, 1

Deux mesures étant le minimum possible, nous ne pouvons pas aller plus en avant dans ce processus. On remarque que la première valeur obtenue par la transformée est égale à la moyenne des données initiales:

$$(7 + 1 + 6 + 6 + 3 - 5 + 4 + 2) / 8 = 3$$

Le calcul de la transformée inverse commence sur les deux premières valeurs:

3, 2

- $l = 3 + 2 = 5$
- $r = 3 - 2 = 1$

Le premier traitement donne les valeurs suivantes:

5, 1, -1, -2, 3, 0, 4, 1

Le traitement se poursuit sur les 4 premières valeurs:

5, 1, -1, -2

- $l1 = 5 + -1 = 4$
- $r1 = 5 - -1 = 6$
- $l2 = 1 + -2 = -1$
- $r2 = 1 - -2 = 3$

Le second traitement donne les valeurs suivantes:

4, 6, -1, 3, 3, 0, 4, 1

Le traitement se poursuit sur les 8 premières valeurs (soit l'ensemble des valeurs):

4, 6, -1, 3, 3, 0, 4, 1

- $l1 = 4 + 3 = 7$
- $r1 = 4 - 3 = 1$
- $l2 = 6 + 0 = 6$
- $r2 = 6 - 0 = 6$
- $l3 = -1 + 4 = 3$
- $r3 = -1 - 4 = -5$
- $l4 = 3 + 1 = 4$
- $r4 = 3 - 1 = 2$

Le troisième et dernier traitement donne les valeurs suivantes:

7, 1, 6, 6, 3, -5, 4, 2