

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENE  
FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER  
EN ELECTRONIQUE

Spécialité : Traitement du Signal et des Images

*Par : Melle Samia MASSOUT*

**Thème**

# FUSION DES IMAGES SATELLITAIRES PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE

Soutenu le 21/10/2006, devant le jury composé de :

Mme A. BELHADJ-AISSA  
Mme L. HAMAMI  
Mr Y. CHIBANI  
Mme S. ALILAT  
Melle N. OUARAB

Professeur  
Maître de conférences  
Maître de conférences  
Chargée de Cours  
Chargée de Cours

USTHB  
ENP  
USTHB  
USTHB  
USTHB

Président  
Examinatrice  
Examineur  
Invitée  
Directrice de mémoire

# Table des Matières

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION GENERALE.....1

## CHAPITRE I FUSION D'IMAGES SATELLITAIRES

1.	INTRODUCTION.....	3
2.	IMAGES UTILISEES.....	4
3.	FUSION CAPTEUR PAN/CAPTEUR XS.....	5
4.	TECHNIQUES DE FUSION.....	6
4.1.	Principes des méthodes de fusion par substitution.....	7
4.1.1.	Fusion par la transformation IHS.....	7
4.1.2.	Fusion par la transformation ACP.....	8
4.2.	Principes des méthodes de fusion par injection d'éléments haute résolution....	9
4.2.1.	Fusion par la méthode HPF.....	9
4.2.2.	Fusion par analyse multirésolution associée aux ondelettes.....	10
4.2.3.	Fusion par le concept ARSIS.....	11
4.2.4.	Fusion par la pyramide morphologique.....	11
5.	CONCLUSION.....	12

## CHAPITRE II MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE

1.	INTRODUCTION.....	14
2.	PROPRIETES DES TRANSFORMATIONS MORPHOLOGIQUES.....	14
3.	FILTRES MORPHOLOGIQUES.....	15
3.1.	Elément structurant (ES).....	16
3.2.	Morphologie mathématique binaire.....	17
3.2.1.	Dilatation.....	17
3.2.2.	Erosion.....	18
3.2.3.	Ouverture morphologique.....	19
3.2.4.	Fermeture morphologique.....	19
3.3.	Morphologie mathématique fonctionnelle.....	20
3.3.1.	Définition de sous graphe.....	20

3.3.2.	Dilatation.....	21
3.3.3.	Erosion.....	22
3.3.4.	Ouverture.....	22
3.3.5.	Fermeture.....	23
4.	EVALUATION DES FILTRES MORPHOLOGIQUES.....	23
4.1.	Variation de la taille de l'élément structurant.....	24
4.2.	Variation de l'origine de l'élément structurant.....	25
4.3.	Variation de la forme de l'élément structurant.....	26
5.	COMBINAISON DE FILTRES MORPHOLOGIQUES.....	28
6.	CONCLUSION.....	29

## **CHAPITRE III**

### **DECOMPOSITION PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE**

1.	INTRODUCTION.....	30
2.	PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE.....	31
2.1.	Principe de la décomposition.....	32
2.1.1.	Filtrage.....	33
2.1.2.	Calcul des détails.....	34
2.1.2.1.	Applications.....	35
2.1.2.2.	Evaluations.....	35
2.1.3.	Sous échantillonnage.....	37
2.1.4.	Détails dus au sur échantillonnage.....	40
2.2.	Principe de la recomposition.....	41
2.2.1.	Sur échantillonnage.....	42
2.2.2.	Ajout des détails.....	42
3.	ETUDE DE LA REVERSIBILITE DE LA PYRAMIDE.....	43
3.1.	Etude de la réversibilité en fonction des détails injectés.....	43
3.2.	Décomposition et recomposition de l'image "Bateau".....	45
3.2.1.	Images des deux premiers niveaux.....	45
3.2.2.	Images de détails des deux premiers niveaux.....	46
3.2.3.	Représentation pyramidale.....	46
4.	CONCLUSION.....	49

# CHAPITRE IV

## FUSION D'IMAGES PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE ET EVALUATION DES RESULTATS

1.	PRINCIPE DE LA FUSION PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE.....	50
1.1.	Décomposition de l'image haute résolution.....	51
1.1.1.	Filtrage.....	51
1.1.2.	Sous-échantillonnage.....	51
1.2.	Recomposition de l'image basse résolution.....	52
2.	IMAGES UTILISEES.....	53
3.	CRITERES D'EVALUATION.....	55
4.	EVALUATION DU PROCESSUS DE FUSION.....	57
4.1.	Présentation des images de détails.....	58
4.2.	Apport de l'information spatiale.....	59
4.3.	Evaluation spectrale.....	63
4.4.	Signatures spectrales.....	66
5.	CONTRIBUTIONS.....	68
5.1.	Evaluation des résultats "Filtre médian".....	68
5.1.1.	Apport de l'information spatiale.....	68
5.1.2.	Apport de l'information spectrale.....	69
5.2.	Evaluation des résultats de la fusion "Normalisation des détails".....	69
5.2.1.	Apport de l'information spatiale "facteur 1".....	71
5.2.2.	Apport de l'information spectrale "facteur 1".....	72
5.2.3.	Apport de l'information spatiale "facteur 2".....	72
5.2.4.	Apport de l'information spectrale "facteur 2".....	73
6.	COMPARAISON DES FILTRES.....	75
7.	CONCLUSION.....	76
	CONCLUSION GENERALE.....	78
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	80

## Liste des Figures

Figure I.1 : Niveaux de fusion d'images.....	4
Figure I.2 : Spectre électromagnétique.....	5
Figure I.3 : Objectif de la fusion d'images SPOT.....	6
Figure I.4 : Fusion d'images par la méthode IHS.....	7
Figure I.5 : Fusion par la méthode ACP.....	8
Figure I.6 : Fusion par la méthode HPF.....	9
Figure I.7 : Fusion d'images par la méthodes des ondelettes (AMR : analyse multirésolution).....	10
Figure I.8 : Schéma synoptique du concept ARSIS.....	11
Figure.I.9 : Schéma de la fusion par la pyramide morphologique.....	12
Figure II.1 : Formes de l'élément structurant.....	16
Figure II.2 : Dilatation binaire.....	17
Figure II.3 : Erosion binaire.....	18
Figure II.4 : Ouverture binaire.....	19
Figure II.5 : Fermeture binaire.....	20
Figure II.6 : Sous graphe d'une fonction.....	21
Figure II.7 : Dilatation en niveaux de gris (cas d'une fonction continue).....	21
Figure II.8 : Erosion en niveaux de gris (cas d'une fonction continue).....	22
Figure II.9 : Ouverture en niveaux de gris (cas d'une fonction continue).....	23
Figure II.10 : Fermeture en niveaux de gris (cas d'une fonction continue).....	23
Figure II.11 : Image test.....	24
Figure II.12 : Différentes tailles de l'élément structurant.....	24
Figure II.13 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de la taille).....	24
Figure II.14 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de la taille).....	25
Figure II.15 : Différentes positions de l'origine de l'élément structurant.....	25
Figure II.16 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de l'origine).....	26
Figure II.17 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de l'origine).....	26
Figure II.18 : Différentes formes de l'élément structurant.....	27
Figure II.19 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de la forme).....	27
Figure II.20 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de la forme).....	27
Figure III.1 : Schéma de l'algorithme pyramidal.....	31
Figure III.2 : Construction d'un niveau de la pyramide.....	32

Figure III.3 : Schéma synoptique d'une transformation morphologique.....	32
Figure III.4 : Schéma synoptique de calcul de détails dus au filtrage.....	35
Figure III.5 : Images résultats du filtre ouverture.....	35
Figure III.6 : Images résultats du filtre ouverture suivie d'une fermeture.....	36
Figure III.7 : Schéma synoptique de sous échantillonnage.....	37
Figure III.8 : Exemple de décimation avec un pas de $2 \times 2$ .....	38
Figure III.9 : Schéma synoptique d'interpolation.....	40
Figure III.10 : Schéma synoptique de calcul de détails dus au sous échantillonnage.....	41
Figure III.11 : Schéma de recombinaison par la pyramide morphologique.....	43
Figure III.12 : Images recomposées avec des détails différents.....	44
Figure III.13 : Images basse résolution du niveau 0 et 1 de la pyramide morphologique.....	45
Figure III.14 : Images hautes fréquences du niveau 0 et 1 de la pyramide morphologique a) $D_{inf, filtre, 0}$ , b) $D_{sup, filtre, 0}$ , c) $D_{inf, filtre, 1}$ , d) $D_{sup, filtre, 1}$ .....	46
Figure III.15 : Représentation pyramidale des approximations (Images des différents niveaux) de l'image originale.....	47
Figure III.16 : Pyramide des détails.....	47
Figure III.17 : Pyramide de recombinaison.....	47
Figure IV.1 : Schéma de la fusion par la pyramide morphologique.....	50
Figure IV.2 : Synoptique de la fusion d'images par la pyramide morphologique.....	53
Figure IV.3 : Images d'Alger (SPOT).....	54
Figure IV.4 : Types d'informations à évaluer.....	55
Figure IV.5 : Images de détails ainsi que leurs histogrammes.....	58
Figure IV.6 : Composition colorée des images synthétisées à 10m (Alger).....	60
Figure IV.7 : Bandes spectrales du satellite SPOT.....	63
Figure IV.8 : Composition colorée des images synthétisées et originales à 20m (Alger).....	64
Figure IV.9 : Paramètre RASE des images multispectrales originales et synthétisées.....	65
Figure IV.10 : Paramètre ERGAS des images multispectrales originales et synthétisées.....	66
Figure IV.11 : Signatures spectrales de trois thèmes.....	67
Figure IV.12 : Principe de la fusion par la pyramide morphologique avec modélisation des détails.....	70
Figure IV.13 : Image panchromatique et composition colorée des images synthétisées à 10m 'filtre médian et modèle 2' (Alger).....	74
Figure IV.14 : Comparaison des filtres par le paramètre 'ERGAS'.....	76
Figure IV.15 : Fenêtre principale du logiciel.....	76

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des capteurs PAN et XS.....	5
Tableau III.1 : Paramètres statistiques des images résultats ‘‘ouverture’’.....	36
Tableau III.2 : Paramètres statistiques des images résultats ‘‘Ouverture suivie d’une fermeture’’ .....	36
Tableau IV.1 : Caractéristiques des images d’Alger.....	54
Tableau IV.2 : Caractéristiques statistiques des images d’Alger.....	54
Tableau IV.3 : Evaluation statistique du contenu spatial des images multispectrales synthétisées (Alger).....	61
Figure IV.4 : Coefficients de corrélation entre les hautes fréquences de l’image panchromatique et de l’image multispectrale synthétisée.....	62
Tableau IV.5 : Evaluation statistique du contenu spectral des images multispectrales synthétisées (Alger).....	65
Tableau IV.6 : Evaluation spatiale des images synthétisées ‘filtre médian’.....	69
Tableau IV.7 : Evaluation spectrale des images synthétisées en utilisant un filtre médian.....	69
Tableau IV.8 : Paramètres statistiques de l’image panchromatique et des images multispectrales synthétisées avec le facteur 1.....	71
Tableau IV.9 : Paramètres statistiques des images multispectrales originales et synthétisées avec le facteur 1.....	72
Tableau IV.10 : Paramètres statistiques des images panchromatique et multispectrales synthétisées avec le facteur 2.....	73
Tableau IV.11 : Paramètres statistiques des images multispectrales originales et synthétisées avec le facteur 2.....	73
Tableau IV.12 : Evaluation spatiale des images synthétisées ‘méthode HPF’.....	75
Tableau IV.13 : Evaluation spectrale des images synthétisées ‘méthode HPF’.....	75

## **REMERCIEMENTS**

*Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire à été développé et mis en œuvre au Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement (LTIR) de la Faculté d'Electronique et d'Informatique de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).*

*Je voudrais exprimer ma gratitude, ma reconnaissance et mes remerciements à Melle N. OUARAB, Chargée de cours et de Recherche à l'USTHB pour son encadrement et à Mr Y. SMARA, Professeur à l'USTHB pour sa disponibilité et conseils.*

*Je remercie vivement Mme A. BELHADJ-AISSA, dont j'ai pu apprécier la disponibilité et les conseils et pour l'honneur qu'elle me fait de présider ce jury.*

*Je tiens à remercier Mr Y.CHIBANI, maître de conférences à l'USTHB, Mme L. HAMAMI, maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) ainsi que Mme S. ALILAT, Chargée de Cours et de Recherche à l'USTHB, d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Je remercie chaleureusement Mme A. KEMMOUCHE et Mr M. BELHADJ-AISSA; maîtres de conférences à l'USTHB, pour leurs encouragements.*

*Je tiens également à remercier tous les membres des équipes II et IV du Laboratoire de Traitement d'Images et rayonnement.*

*Enfin, mes remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement de ce travail.*

*Equipe II : "Imagerie Radar et SIG"*

*Equipe IV : "Imagerie Radar et Fusion de Données"*

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les techniques de télédétection connaissent une évolution permanente, mettant en œuvre des technologies et des méthodes qui se diversifient de plus en plus que les données recueillies s'accroissent. Ceci est dû au grand nombre de satellites opérationnels et à la diversité des capteurs montés à leur bord.

Dans le but d'exploiter au maximum ces données, il est apparu nécessaire de fusionner les images issues des différents capteurs pour avoir un meilleur contenu informationnel afin d'améliorer l'interprétation thématique de ces images.

Avec la disponibilité de plus en plus grande de données images (multirésolutions, multifréquences, multitemporelles, multicapteurs) issues de satellites de télédétection, la fusion d'images est devenue un outil précieux pour exploiter ces dernières. Elle vise l'intégration de données différentes et complémentaires pour améliorer l'information contenue dans ces images, et leur interprétation. Elle est généralement utilisée dans le but :

- d'améliorer la classification par l'apport de données complémentaires,
- de détecter les changements par l'utilisation des données multitemporelles,
- de substituer l'information absente dans une image par les données d'une image de nature différente.

La plupart des satellites d'observation de la terre fournissent des images à haute résolution spatiale et des images de moins bonne résolution spatiale (Cas du satellite SPOT: Canal panchromatique (10 mètres), trois canaux multispectraux (20 mètres)), mais de meilleure résolution spectrale. Les premières permettent une meilleure distinction des formes, des caractéristiques et des structures des différents objets au sol, alors que les secondes permettent une meilleure identification de la nature des objets. L'objectif principal de notre étude consiste donc en l'amélioration de la résolution spatiale des images multispectrales tout en préservant le contenu spectral de ces images.

Dans ce contexte, nous avons étudié et mis en œuvre une méthode de fusion basée sur les algorithmes pyramidaux et la morphologie mathématique. En effet, à partir d'un jeu images d'entrée constitué d'une image haute résolution spatiale et de plusieurs images

multispectrales, nous synthétisons des images multispectrales à la haute résolution. Le processus traite l'image haute résolution spatiale pour extraire les détails pour les injecter par la suite dans les images multispectrales de faible résolution spatiale.

Le mémoire est organisé comme suit :

Dans le chapitre I, nous exposons des généralités sur la fusion d'images, les différents types d'images satellitaires et la fusion d'images panchromatique et multispectrales. Nous donnons brièvement les avantages et inconvénients des méthodes classiques.

Le chapitre II est consacré à des rappels sur la morphologie mathématique. Nous donnons les caractéristiques d'une transformation morphologique, le principe de la morphologie mathématique en définissant l'élément structurant, les opérateurs de base et les filtres de la morphologie mathématique (binaire et en niveau de gris). L'évaluation de ces filtres a été faite en les appliquant sur une image en niveaux de gris pour différentes formes, tailles et origines de l'élément structurant. A la fin de ce chapitre, nous exploitons d'autres filtres morphologiques obtenus par la combinaison de l'ouverture et de la fermeture.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation d'une étude et d'une implémentation de la transformation par la pyramide morphologique. Nous avons appliqué le principe de décomposition pour calculer et exploiter les images de détails après filtrage avec l'utilisation d'une ouverture et la combinaison de l'ouverture et la fermeture. Pour estimer la réversibilité, nous avons présenté des pyramides de décomposition, de détails et de recomposition.

Nous avons exploité la pyramide morphologique pour la fusion d'images satellitaires dans le chapitre IV, où nous avons présenté quelques combinaisons des paramètres de la pyramide morphologique qui permettent de fusionner les images haute résolution et basse résolution spatiales.

Pour notre part, une évaluation est réalisée en exploitant tous les algorithmes implémentés en utilisant des images panchromatique et multispectrales. Ces images sont issues du capteur HRV du satellite SPOT représentant une scène EST de la baie d'Alger. Nous nous sommes basés sur deux types d'évaluation. Une évaluation qualitative (visuelle) en utilisant une composition colorée et une évaluation quantitative avec l'utilisation des paramètres statistiques.

En conclusion, les apports de la morphologie mathématique constatés dans nos applications sont rappelés et nous proposons les suites éventuelles de ce travail.

# CHAPITRE I

## FUSION D'IMAGES

### SATELLITAIRES

#### 1. INTRODUCTION

Pour l'exploitation des données multi sources de plus en plus nombreuses, des techniques analytiques et numériques de fusion de données sont développées. Pour cela, plusieurs définitions ont été attribuées à cette fusion, suivant différents auteurs [RAN 93], [MAN 94], [POH 98], [POH 99] et [WAL 99].

✓ En 1998, Burchroithner et Wald définissent la fusion comme : "ensemble de données qui constitue un cadre formel dans lequel s'expriment les moyens et les techniques permettant l'alliance des données provenant de sources diverses. Elle vise l'obtention d'information de plus grande qualité, la définition de "plus grande qualité" dépendra de l'origine de l'application".

✓ D'après Pohl et Van Genderen [POH 99], "la fusion d'images est la combinaison de deux ou plusieurs images différentes pour obtenir une nouvelle image en utilisant certains algorithmes". Cette définition se limite à la fusion d'images.

✓ L.Wald [WAL 99] a résumé les différentes définitions qui se trouvent dans la littérature. Il précise que la fusion de données est un domaine très vaste et il est très difficile de donner une définition précise.

✓ Alors que d'autres auteurs [RAN 03], [AIA 04], [WAN 05], [SHI 05] et [LI 05] définissent la fusion d'informations d'une manière générale comme "Ensemble de méthodes, d'outils et de moyens utilisés pour la fusion de données, de sources de différentes natures permettant d'améliorer la qualité d'interprétation de l'information disponible".

La fusion de données est un axe de recherche dont l'objectif principal est de combiner des données issues de différentes sources pour faciliter le traitement et permettre d'obtenir des données plus riches en informations.

La fusion de données peut être exécutée aux niveaux pixel, caractéristiques et décision (Figure I.1) [GEN 98].

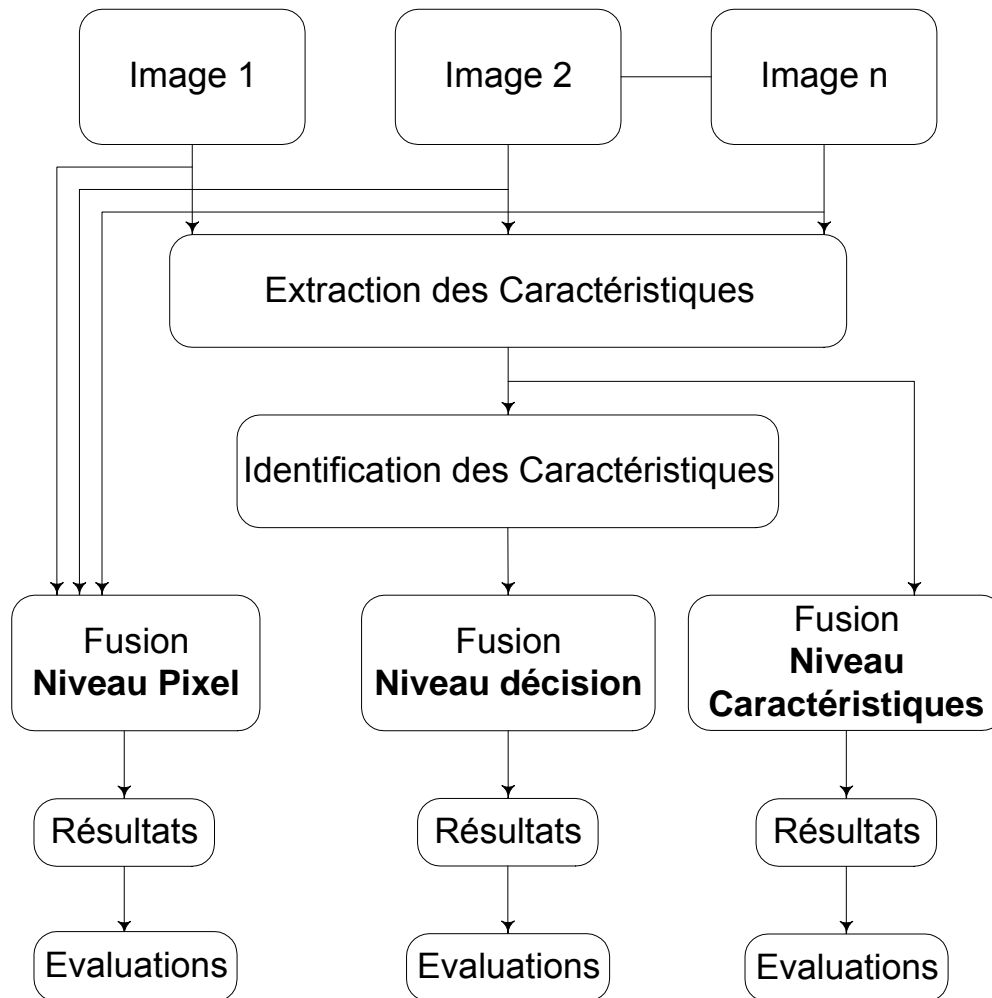


Figure I.1 : Niveaux de fusion d'images

De nombreuses méthodes ont été développées sur la fusion d'images au niveau pixel et caractéristiques [MAT 94], [NUN 99], [LIU 00], [FAN 01], [HIL 02] et [WAN 05], dont le but est l'amélioration des supports d'interprétation. On distingue, celles qui permettent de synthétiser des images multispectrales à haute résolution spatiale disponible, tout en conservant le contenu spectral des images originales [CHI 03] et [OUA 03].

## 2. IMAGES UTILISEES

En télédétection, il existe principalement deux types d'images : les images optiques et les images radar. Ces images sont acquises respectivement dans les longueurs d'ondes du visible (0.4  $\mu\text{m}$  – 0.7  $\mu\text{m}$ ) et du micro-onde (1cm -100cm) comme illustré sur la Figure I.2. La fusion de ces images peut se faire de manières différentes [LI 02] et [WAL 03] :

- image optique – image optique,

- image optique – image radar,
- image radar – image radar.

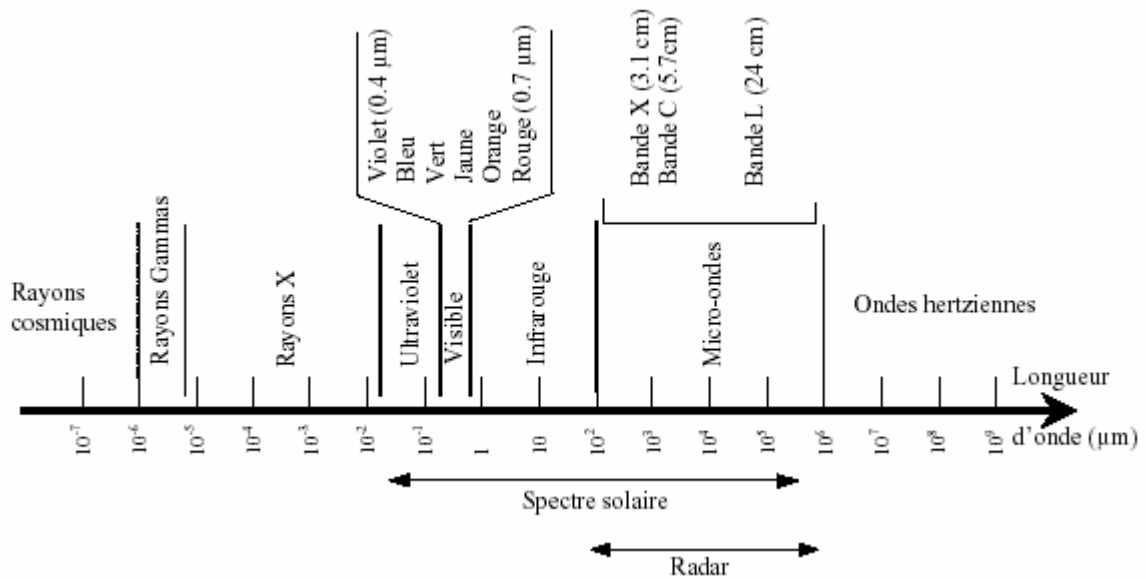


Figure I.2 : Spectre électromagnétique

Certains satellites sont équipés de capteurs multispectraux et capteur panchromatique dont l'information est complémentaire, c'est le cas du satellite SPOT, qui distingue deux types de capteurs optiques :

- panchromatique (PAN),
- multispectral (XS).

Les caractéristiques de ces deux capteurs sont résumées dans le tableau suivant :

	Largeur de Fauchée	Résolution Spectrale	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Capteur PAN	60 Km	Monobande	10 m	26 jours
Capteur XS	60 Km	Multibandes	20 m	26 jours

Tableau I.1 : Caractéristiques des capteurs PAN et XS

### 3. FUSION CAPTEUR PAN /CAPTEUR XS

La fusion capteur PAN/capteur XS mélange une image panchromatique à haute résolution spatiale HRS et de faible résolution spectrale (monochromatique) et une image multispectrale à basse résolution spatiale BRS et haute résolution spectrale. L'image multispectrale peut être composée de 3, 4 (ou n) canaux.

Des méthodes de fusion d'images satellitaires [CHI 01], [AIA 04], [PUI 04] et [GAR 05], permettent ainsi de faire un compromis entre l'importance de l'information spatiale que

l'on désire introduire dans le produit de la fusion et l'importance de l'information spectrale de l'image multispectrale BRS que l'on désire préserver.

Le produit de la fusion devrait correspondre à une image multispectrale acquise par le capteur XS à haute résolution.

Le rapport de résolution spatiale entre les deux types d'images est de 2 (SPOT PAN (10m) et XS (20m)). L'arrivée récente de capteurs panchromatique à très haute résolution spatiale tend à augmenter ce rapport, dans le cas des satellites Ikonos PAN (1m) et XS (4m) ou Quickbird PAN (0.7m) et XS (2.8m), ce rapport de résolution est égal à 4 [PUI 04] et [ZHA 05]. Dans le cas où le rapport est une puissance de 2, il est appelé dyadique.

La figure suivante illustre l'objectif de la fusion d'images.

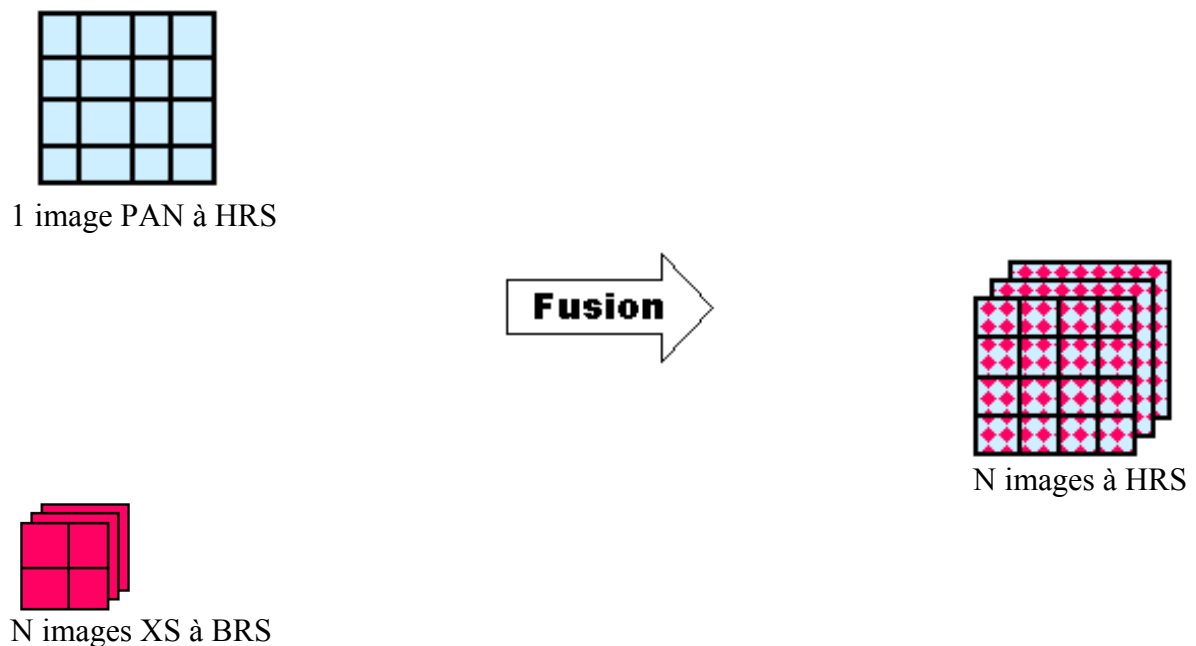


Figure I.3 : Objectif de la fusion d'images SPOT

Le principe de la fusion pour l'amélioration de la résolution spatiale impose aussi que :

- Les images soient de différentes résolutions spatiale et spectrale,
- Les images doivent représenter la même zone géographique,
- Les images doivent être superposables.

#### 4. TECHNIQUES DE FUSION

Plusieurs méthodes de fusion ont été citées dans la littérature [RAN 93], [MAN 94], [POH 98], [WAL 02] et [LAP 02]. Nous citons deux catégories les plus utilisées. La première regroupe les méthodes qui prennent en compte simultanément l'ensemble des bandes dans le processus de fusion (IHS et ACP). Dans la deuxième, on trouve la méthode HPF et les

méthodes fondées sur la décomposition pyramidale (Ondelettes et Filtrés Morphologiques) qui traitent séparément l'information spatiale et chaque bande spectrale.

#### 4.1. Principes des méthodes de fusion par substitution

Nous présentons le principe de deux méthodes de fusion :

- ✓ Fusion par la transformation IHS,
- ✓ Fusion par la transformation ACP.

##### 4.1.1. Fusion par la transformation IHS

La fusion par la méthode IHS (Intensité, Teinte et Saturation) consiste à convertir les images multispectrales (basse résolution) existant dans le système de couleur RGB (Rouge, Vert (green) et Bleu) dans l'espace de couleur IHS plus proche de la perception humaine [SMA 98], [POH 99] et [ZHA 05]. La figure suivante illustre le principe de cette méthode.

Les différentes étapes de cette méthode se résument comme suit :

- 1- Rééchantillonnage des images originales multispectrales XS à la même dimension que l'image panchromatique,
- 2- Transformation RGB en IHS des images rééchantillonnées,
- 3- Mise en correspondance de l'histogramme de l'image panchromatique à celui de l'image composante intensité,
- 4- Remplacer le canal intensité par l'image panchromatique spécifiée,
- 5- Application de la transformation inverse IHS en RGB.

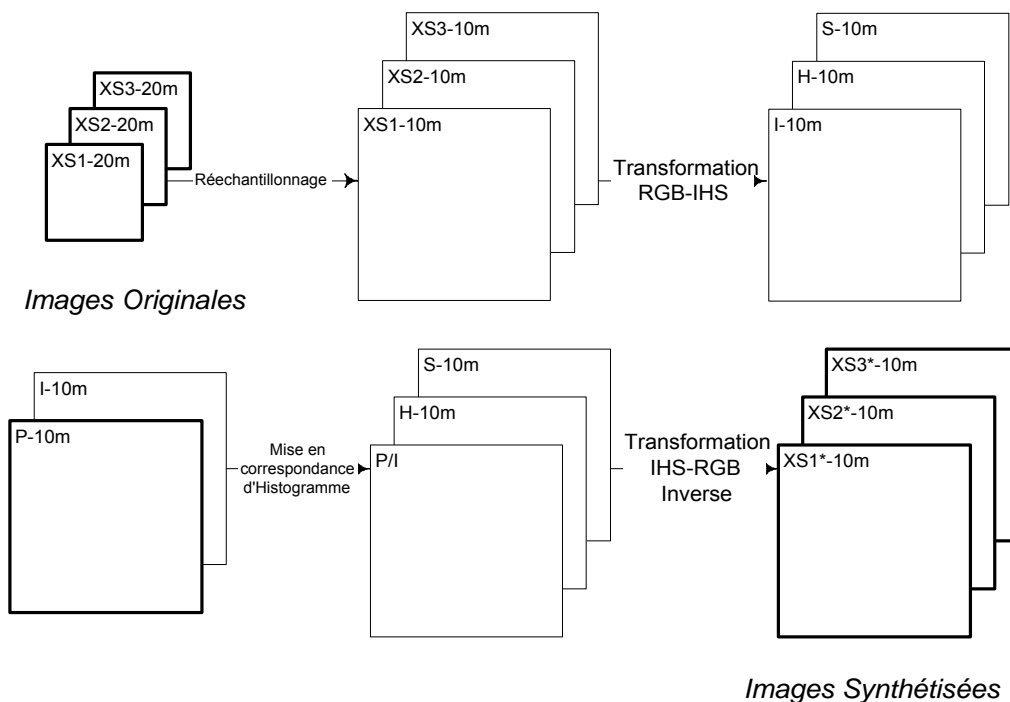


Figure I.4 : Fusion d'images par la méthode IHS

Où :

I : Composante Intensité,

H : Composante Teinte,

S : Composante Saturation.

La méthode de la fusion par IHS introduit l'information spatiale, mais elle ne conserve pas l'information spectrale et le nombre de canaux est limité à l'entrée du processus.

#### 4.1.2. Fusion par la transformation ACP

La méthode ACP (Analyse en Composantes Principales) est une technique statistique qui transforme un ensemble de données multivariées en des variables decorréliées dans un ensemble de nouvelles combinaisons linéaires des données originales [POH 99].

Les différentes étapes de la fusion sont comme suit :

- 1- Rééchantillonnage des images XS,
- 2- Analyse et calcul des composantes principales à partir des images XS,
- 3- Spécification d'histogramme de l'image panchromatique à celui de la première composante de l'ACP,
- 4- Remplacer la première composante de l'ACP par l'image panchromatique,
- 5- Calculer la transformation inverse de l'ACP.

La figure suivante illustre la fusion par la méthode ACP.

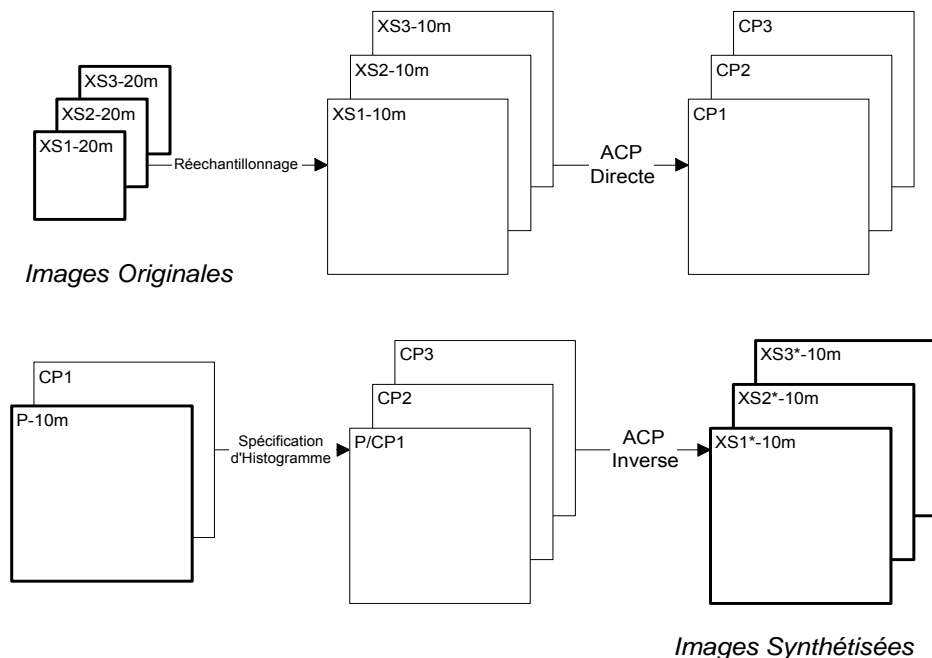


Figure I.5 : Fusion par la méthode ACP

Où :

CP1 : Première composante principale,

CP2 : Seconde composante principale,

CP3 : Troisième composante principale.

Le nombre canaux à l'entrée du processus de fusion par cette méthode n'est pas limité, mais on perd la notion de l'information spectrale.

## 4.2. Principes des méthodes de fusion par injection d'éléments haute résolution

Nous donnons dans cette section, le principe des méthodes suivantes :

- ✓ Fusion par la méthode HPF (Filtre Passe Haut),
- ✓ Fusion par l'analyse multirésolution associée aux ondelettes,
- ✓ Fusion par le concept ARSIS,
- ✓ Fusion par la Pyramide Morphologique.

### 4.2.1. Fusion par la méthode HPF

La méthode HPF (Filtre Passe Haut) est basée sur l'extraction de l'information spatiale propre de l'image haute résolution à l'aide d'un filtre passe-haut et de l'injecter dans les différentes bandes spectrales de l'image de faible résolution spatiale.

L'algorithme de fusion par la méthode HPF utilisé est donné par l'équation suivante [MUL 98] :

$$F_{ij} = L_{ij} + \overline{H}_{ij}$$

Où :

$F_{ij}$  : Pixel de l'image fusionnée de coordonnées (i, j),

$L_{ij}$  : Pixel de l'image basse résolution de coordonnées (i, j),

$\overline{H}_{ij}$  : Pixel de l'image haute résolution spatiale filtrée de coordonnées (i, j).

Les différentes étapes de la méthode sont décrites dans la figure suivante :

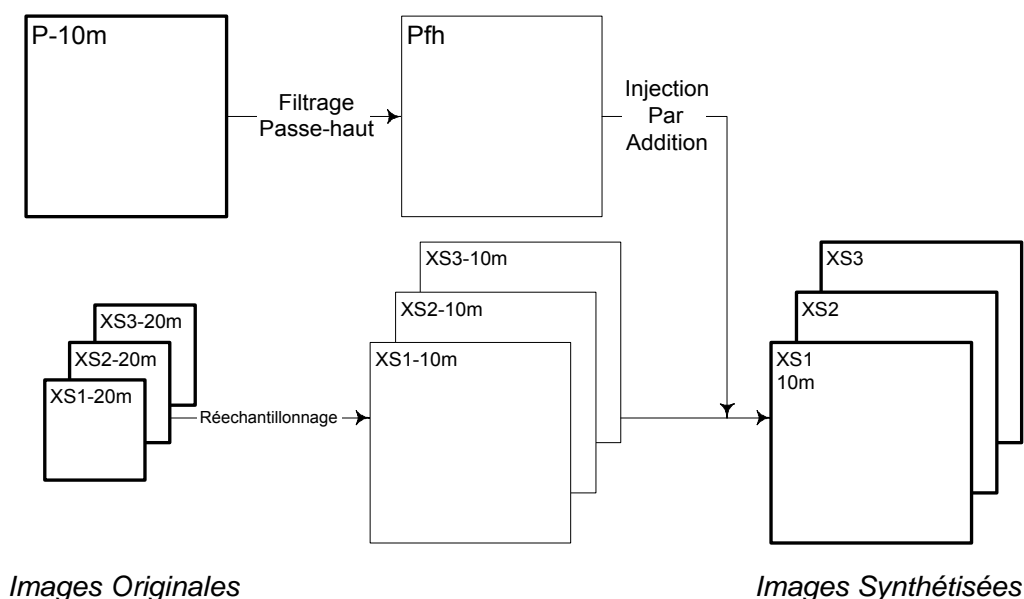


Figure I.6 : Fusion par la méthode HPF

#### 4.2.2. Fusion par l'analyse multirésolution associée aux ondelettes

Le principe de cette méthode consiste à utiliser l'information spatiale comprise entre les résolutions 10 et 20m de la bande panchromatique pour simuler des images XS à la résolution spatiale 10m. Le processus s'effectue en utilisant l'analyse multirésolution associée aux ondelettes [YOC 95] et [OUA 03].

La méthode se résume suivant les étapes suivantes :

- 1- Mise en correspondance de l'histogramme de l'image panchromatique à celui de l'image XS,
- 2 Décomposition en coefficients d'ondelettes de l'image panchromatique spécifiée (les coefficients d'ondelettes contiennent les structures d'échelles comprises entre 10 et 20 m présentes dans l'image panchromatique),
- 3 Construction des images synthétiques à 10m. Dans cette étape, on substitue chaque image multispectrale d'origine à l'image panchromatique, obtenue dans l'étape précédente et on applique la transformation en ondelettes inverse.

La figure suivante illustre le principe de cette méthode :

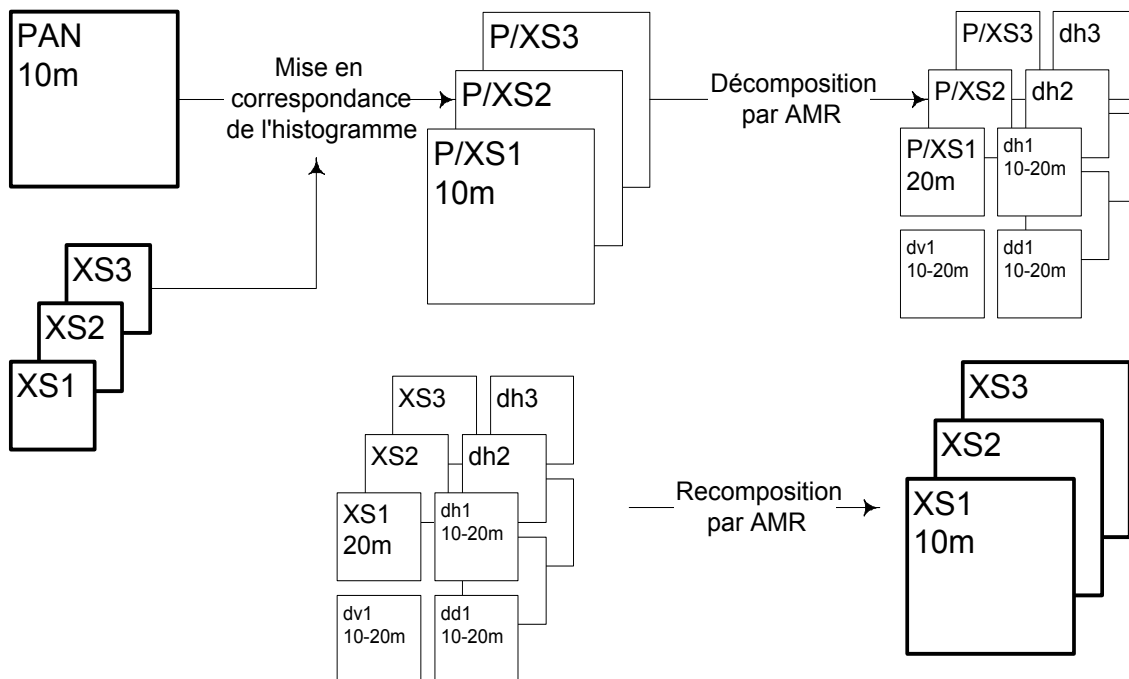


Figure I.7 : Fusion d'images par la méthode des ondelettes (AMR : analyse multirésolution)

Où :

- dh : est le coefficient des détails horizontaux,
- dv : est le coefficient des détails verticaux,
- dd : est le coefficient des détails diagonaux.

**4.2.3. Fusion par le concept ARSIS**

Le concept ARSIS [RAN 93], [LAN 03] et [HAD 04] a été développé pour l'amélioration de la résolution spatiale des images satellitaires dans un ensemble multirésolution d'images.

La méthode ARSIS "Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures" a été définie pour produire des images synthétiques proches de ce que verrait un capteur s'il avait la meilleure résolution spatiale disponible [RAN 03].

Ce concept est composé d'une série de modèles :

- Décomposition hiérarchique de l'information,
- Calcul d'un modèle de transformation de l'information,
- Calcul de l'information manquante aux images de plus faible résolution pour permettre leurs synthèses à la plus haute résolution spatiale disponible dans l'ensemble d'images. Le schéma d'application du concept ARSIS est donné par la figure suivante :

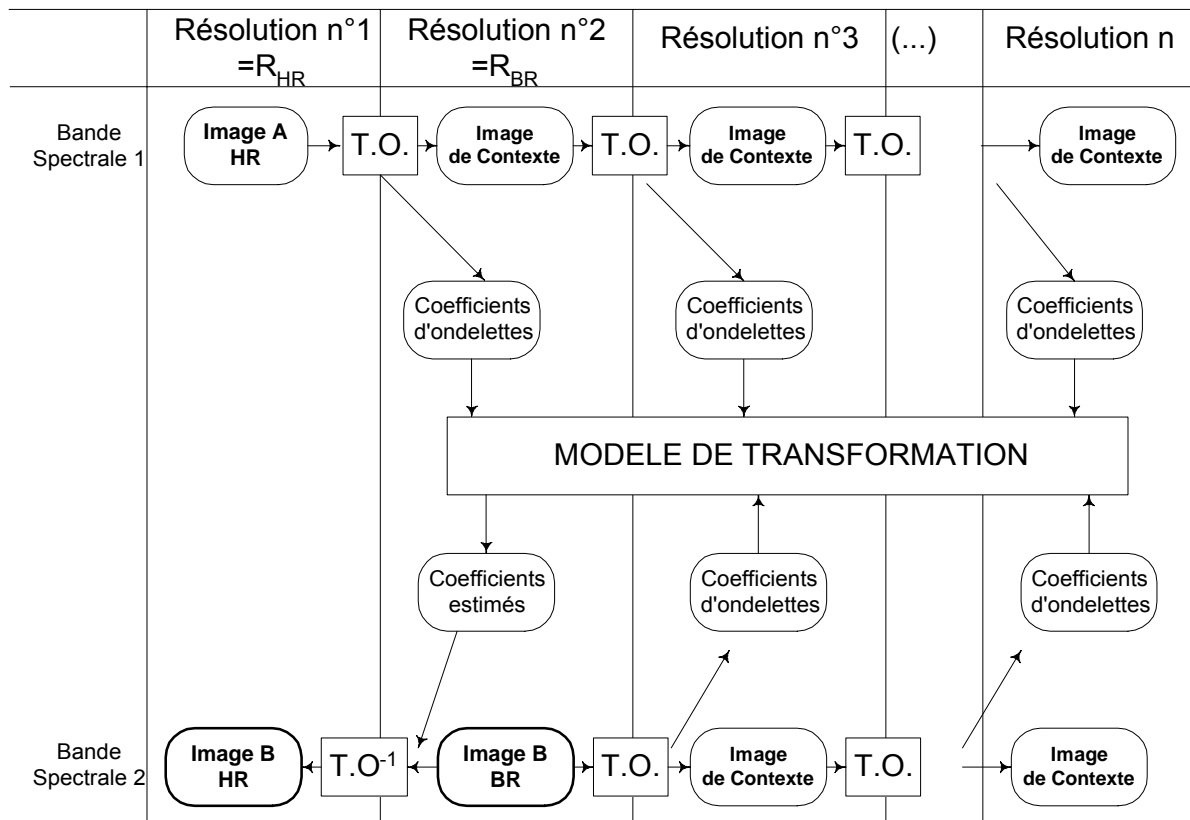


Figure I.8 : Schéma synoptique du concept ARSIS

**4.2.4. Fusion par la pyramide morphologique**

La fusion par la pyramide morphologique nécessite deux étapes :

✓ La première permet de construire une pyramide morphologique telle que la base de la pyramide soit représentée par l'image haute résolution. Les images des différents niveaux sont les approximations de l'image originale (haute résolution) obtenues en utilisant des opérateurs morphologiques. Une deuxième pyramide est générée, elle est appelée pyramide des détails qui représentent la différence entre les images de deux niveaux successifs.

✓ La seconde est une étape de recomposition, elle se fait à partir de l'image multispectrale et les images de détails des différents niveaux. Ce processus permet de synthétiser l'image multispectrale à la résolution de l'image décomposée.

Le processus de recomposition permet de fournir l'image fusionnée par la figure suivante :

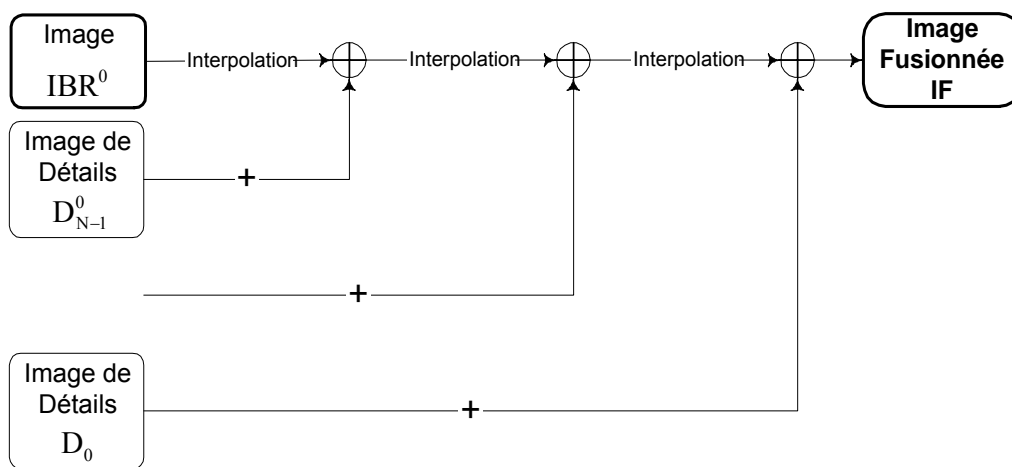


Figure I.9 : Synthèse de l'image haute résolution

Où :

$D_j$  : Détails obtenus après l'opération de filtrage au niveau  $j$  à partir de l'image haute résolution,

IBR : Image basse résolution,

IF : image fusionnée.

## 5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques définitions sur la fusion d'images satellitaires au niveau pixel. Nous avons présenté quelques principes de fusion des images panchromatique et multispectrales. Ces méthodes permettent de synthétiser des images à la résolution de l'image panchromatique.

La méthode IHS présente des inconvénients, tels que le nombre de canaux est limité à l'entrée du processus et elle ne préserve pas l'information spectrale. Dans le cas de la

méthode ACP, le nombre de canaux n'est pas limité, mais l'inconvénient est qu'elle ne préserve pas l'information spectrale. La fusion par l'analyse multirésolution a l'avantage de conserver l'information spectrale, mais le rapport des résolutions est dyadique dans le cas de l'algorithme de Mallat. Pour notre part, nous nous sommes intéressés à exploiter la morphologie mathématique pour la fusion d'images satellitaires.

## CHAPITRE II MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE

### 1. INTRODUCTION

La pyramide morphologique permet, en combinant le principe des algorithmes pyramidaux et la théorie de la morphologie mathématique, de décomposer une image à différentes résolutions. Ce principe peut avoir de nombreuses applications, telles que l'extraction des contours, de la texture et d'autres, en particulier la fusion de données, ce qui permet donc de mélanger plusieurs images à des niveaux de résolutions différentes. La morphologie mathématique est un ensemble de méthodes de traitement de signaux unidirectionnels et bidirectionnels. Elle a été développée à l'école des mines de Paris par J.Serra et son équipe en 1982 [SER 82], [COS 85] et [KEM 05]. Cette méthode traite l'image par une approche géométrique en la considérant non pas comme une fonction mais plutôt comme un espace de représentation d'objets ayant des propriétés ensemblistes. De ce fait, la théorie binaire a été étendue aux images de niveaux de gris et certains opérateurs fonctionnent désormais sur des images couleurs [MUK 02]. Pour mieux maîtriser la théorie de la morphologie mathématique, il est nécessaire de donner quelques notions de base sur la théorie des ensembles, les caractéristiques, les propriétés des transformations morphologiques et les filtres de base de la morphologie mathématique. L'avantage majeur des filtres morphologiques binaires ou fonctionnels est de préserver la forme et les contours des objets. Cette caractéristique a permis d'élargir leur application que ce soit en traitement du signal [YOU 02] ou en imagerie [PET 95], [COS 01], [LAP 01], [MUK 01] et [SHI 05].

### 2. PROPRIETES DES TRANSFORMATIONS MORPHOLOGIQUES

Les transformations morphologiques sont définies comme des applications de l'ensemble des parties de  $\mathbb{R}^2$ , notées  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$  dans lui-même. La morphologie mathématique est

un outil qui permet de traiter l'image en se basant sur les caractères ensemblistes [MAR 86], [MAR 88], [HEI 92] et [SERA 01].

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement les caractéristiques de la transformation morphologique qui sont les suivantes :

- Croissance,
- Extensivité,
- Anti-extensivité,
- Idempotence.

#### ▪ **Croissance**

Une transformation est dite croissante si un ensemble  $X$  inclus dans un ensemble  $Y$ , le transformé  $T(X)$  est lui aussi inclus dans  $T(Y)$ . Ceci se traduit par :

$$X \subset Y \Rightarrow T(X) \subset T(Y) \quad (\text{II.1})$$

#### ▪ **Extensivité**

Une transformation est dite extensive, si l'ensemble  $X$  est inclus dans son propre transformé  $T(X)$ . En d'autres termes :

$$\forall X, \quad X \subset T(X) \quad (\text{II.2})$$

#### ▪ **Anti-extensive**

Inversement, une transformation  $T$  est anti-extensive si la transformé de  $T(X)$  est incluse dans l'ensemble  $X$ . Ceci est équivalent à :

$$\forall X, \quad T(X) \subset X \quad (\text{II.3})$$

#### ▪ **Idempotence**

Une transformation est dite idempotente si ayant fait subir une transformation  $T$  à  $X$  et ayant renouvelé cette transformation sur  $T(X)$ , on obtient des ensembles  $T(X)$  et  $T(T(X))$  égaux.

$$T[T(X)] = T(X) \quad (\text{II.4})$$

### 3. **FILTRES MORPHOLOGIQUES**

En morphologie mathématique, l'image à traiter est considérée comme un ensemble de formes  $X$ . Le principe est de comparer l'image à une forme élémentaire  $B$  (un ensemble de géométrie connue) appelée élément structurant. On déplace cet élément de façon à ce que son origine passe par tous les points de l'espace de l'image. A chaque position, on se pose une question relative à l'union, à l'intersection et l'inclusion de  $B$  avec  $X$  ou dans  $X$ . L'ensemble

obtenu pour les différentes positions de l'origine de l'élément B correspond aux réponses de la transformation de l'ensemble X.

La morphologie mathématique permet d'analyser l'image sous deux types [SER 01] et [KEM 05] :

✓ Soit comme un ensemble de formes prises sur un fond. Il s'agit alors de la morphologie binaire où les transformations s'appliquent à l'ensemble X ou à son complément  $X^c$ .

✓ Soit comme une fonction de niveaux de gris. Il s'agit alors de la morphologie en niveaux de gris où les transformations par analogie avec la morphologie binaire s'appliquent à l'ensemble borné par le graphe de la fonction  $I(x, y)$  en niveau de gris.

Dans chacun de ces types, les opérateurs de base sont l'érosion et la dilatation. Avant d'approfondir ces types de transformation, nous définissons l'élément structurant.

### 3.1. Élément structurant (ES)

L'élément structurant permet d'analyser les caractéristiques incluses dans son voisinage, il est défini par trois paramètres :

- la forme,
- l'origine,
- la taille.

#### ▪ Formes de l'élément structurant

L'élément structurant prend des formes géométriques simples (disque, segment, carré etc.) selon les figures suivantes.

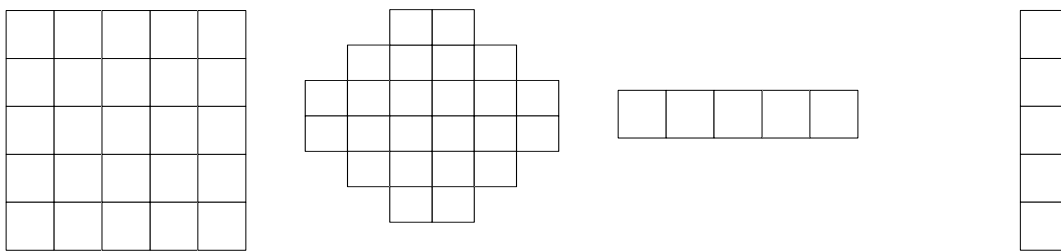


Figure II.1 : Formes de l'élément structurant

#### ▪ Origines de l'élément structurant

Son origine correspond au pixel de l'image à traiter, il peut être le centre du cercle, l'extrémité du segment ou le coin d'un carré. Pour avoir l'isotropie de traitement, l'origine de l'élément structurant doit être au centre.

### ▪ Tailles de l'élément structurant

Généralement, la taille de l'élément structurant est donnée par :

- ✓  $(2*k+1, 2*k+1)$  pour les formes carrées,
- ✓  $(1, 2*k+1)$  ou  $(2*k+1, 1)$  pour les formes linéaires,
- ✓  $(2*k+1, 2*k+1)$  pour les formes circulaires avec la valeur de 1 pour la forme considérée.

Le choix de la taille et la forme de l'élément structurant dépendent de l'objectif de traitement.

## 3.2. Morphologie mathématique binaire

Une image binaire renferme un certain nombre de régions codées à 0 (région en noir) que l'on peut définir comme des objets d'intérêt par rapport à un fond codé à 1 (région en blanc). Cette théorie fait appel à la transformation ensembliste classique (union, inclusion et intersection). Pour définir les opérateurs de base telles que la dilatation, l'érosion, l'ouverture et la fermeture, nous considérons un ensemble  $X$  appartenant à  $P(R^2)$  et un élément structurant muni d'un centre  $X$ , noté  $B$ .

### 3.2.1. Dilatation

La dilatation de l'ensemble  $X$  par un élément structurant  $B$  est définie par l'ensemble des points  $x$  tel que le translaté  $B_x$  ( $x$  correspond à la fois à l'origine de l'élément structurant et au pixel de l'image à traiter) rencontre  $X$ . La dilatation de  $X$  par  $B$  notée  $D_B(X)$  est donnée par :

$$D_B(X) = \{x / x \cap B_x \neq \emptyset\} \quad (\text{II.5})$$

Elle est aussi donnée par l'addition de Minkowski :

$$D_B(X) = X \oplus \tilde{B} \quad (\text{II.6})$$

Considérons un ensemble  $X$  à dilater, l'utilisation d'un élément structurant circulaire  $B$ , dont l'origine est au centre permet d'obtenir un ensemble dilaté  $X \oplus B$  présenté sur la figure ci-dessous.

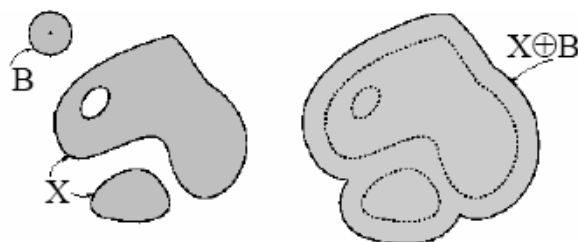


Figure II.2 : Dilatation binaire

Nous constatons que la dilatation permet :

- ✓ d'ajouter une couche de pixels du fond à X,
- ✓ de boucher les trous progressivement,
- ✓ de réduire les concavités dans les formes,
- ✓ de faire rencontrer deux formes voisines.

La dilatation est une transformation croissante, extensive et invariante par translation.

### 3.2.2. Erosion

L'érosion de l'ensemble X par un élément structurant B est définie par l'ensemble des points x tel que le translaté de  $B_x$  (B centré en x) soit inclus dans X.

L'érosion de X par B notée  $E_B(X)$  est donnée par :

$$E_B(X) = \{x \in B / B_x \subset X\} \quad (\text{II.7})$$

L'érosion est aussi donnée par la soustraction de Minkowski :

$$E_B(X) = X \ominus \tilde{B} \quad (\text{II.8})$$

L'exemple précédent illustre aussi l'effet de l'érosion où :

- X est la forme à éroder,
- B est l'élément structurant de forme circulaire,
- $X \ominus B$  est la forme érodée.



Figure II.3 : Erosion binaire

L'érosion permet de :

- ✓ supprimer une couche de pixels du bord de X,
- ✓ creuser progressivement les trous,
- ✓ augmenter les concavités dans les formes,
- ✓ supprimer les isthmes et les capes,
- ✓ déconnecter les objets en contact fin.

L'érosion est une transformation croissante, anti-extensive et invariante par translation.

**Remarque**

Dilater un ensemble  $X$  revient à éroder son complément  $X^c$  et inversement. On dira que l'érosion et la dilatation sont des opérations duales pour la complémentarité (l'érosion d'une forme correspond à la dilatation du fond).

L'érosion et la dilatation sont souvent itérées. On peut aussi concaténer les opérations érosion et dilatation et on peut définir deux nouvelles transformations : l'ouverture et la fermeture. Ces deux nouvelles transformations sont des filtres morphologiques de type passe bas.

**3.2.3. Ouverture morphologique**

L'ouverture morphologique est le résultat d'une érosion suivie d'une dilatation sur l'ensemble  $X$  par un élément structurant  $B$ , telle que :

$$O_B(X) = D_B[E_B(X)] \quad (\text{II.9})$$

L'exemple suivant illustre l'effet de l'ouverture sur l'ensemble  $X$  en utilisant un élément structurant  $B$  de forme circulaire centrée.

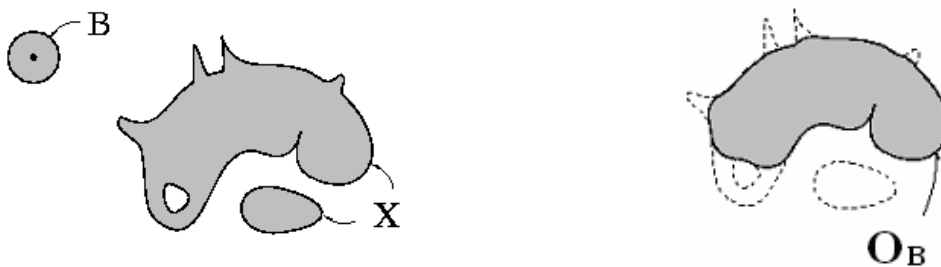


Figure II.4 : Ouverture binaire

En utilisant l'opérateur 'ouverture', on constate que :

- ✓ les petits détails sont éliminés,
- ✓ les objets massifs retrouvent leurs formes,
- ✓ les grosses particules sont partiellement préservées,
- ✓ les contours sont lissés,
- ✓ certaines particules sont déconnectées.

L'ouverture est une transformation croissante, extensive et idempotente.

**3.2.4. Fermeture morphologique**

La fermeture morphologie est définie par l'application d'une dilatation suivie d'une érosion sur l'ensemble  $X$ , par un élément structurant  $B$ , telle que :

$$F_B(X) = E_B[D_B(X)] \quad (\text{II.10})$$

L'exemple suivant représente l'effet de la fermeture sur l'ensemble X en utilisant un élément structurant de forme circulaire centrée.

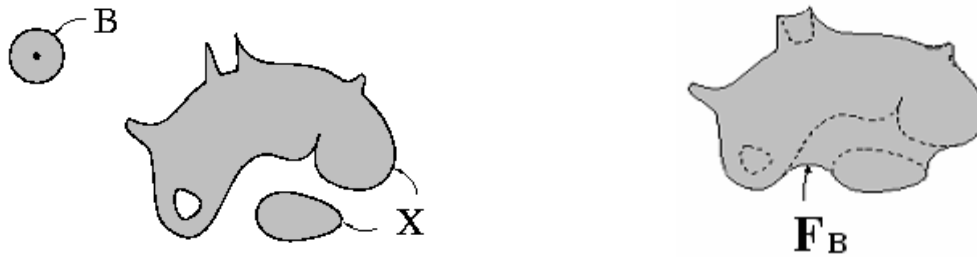


Figure II.5 : Fermeture binaire

En utilisant l'opérateur "fermeture", on constate que :

- ✓ les petits trous ou les fentes fines sont bouchés,
- ✓ les objets massifs retrouvent leurs formes,
- ✓ les trous de plus grande taille sont partiellement préservés,
- ✓ les contours sont lissés,
- ✓ certaines particules sont connectées.

La fermeture est une transformation croissante, idempotente et extensive.

### Remarque

L'ouverture et la fermeture ont tendance à lisser les contours des ensembles et les objets massifs retrouvent leurs formes.

### 3.3. Morphologie mathématique fonctionnelle

La morphologie mathématique fonctionnelle à la différence de la morphologie binaire, s'applique aux images en niveaux de gris [DEB 88] et [HEI 92]. Dans ce cas, les images sont modélisées par des fonctions (continues ou discrètes). Le sous graphe de la fonction joue le rôle de l'ensemble X.

Pour bien comprendre la morphologie mathématique en niveaux de gris, il est nécessaire d'introduire la notion de sous graphe.

#### 3.3.1. Définition de sous graphe

Soit  $t(x)$  une fonction décrivant les niveaux de gris de l'image et  $I$  est le graphe de la fonction. Le sous graphe  $SG(I)$  est l'espace situé en dessous de  $t(x)$  donné par :

$$SG(I) = \{(x, y) / y \leq t(x)\} \quad (II.11)$$

La figure ci-dessous représente l'allure (I) d'une fonction  $t(x)$  et  $SG(I)$  l'aire hachurée présente le sous graphe de  $t(x)$ .

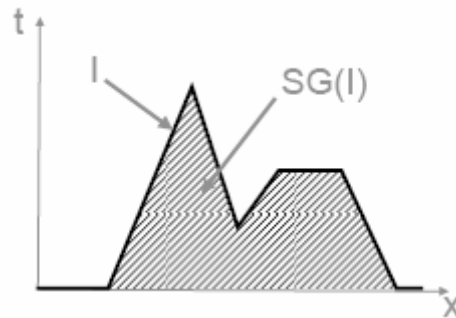


Figure II.6 : Sous graphe d'une fonction

Tous les opérateurs suivants sont définis avec un élément structurant plat et symétrique. Comme dans le cas de la morphologie binaire, les opérateurs de base de la morphologie fonctionnelle sont la dilatation et l'érosion.

### 3.3.2. Dilatation

La dilatation d'une image à un niveau de gris est donnée par :

$$D_B(t(u)) = \sup \{t(x) : x \in B_x\} \quad (\text{II.12})$$

Avec :  $u \in B_x$

Ainsi, pour construire la fonction dilatée par un élément structurant plat, il suffit d'attribuer à chaque point du domaine  $B_x$  la valeur supérieure que prend  $t(x)$  dans ce domaine. On a aussi :

$$D_B(I) = t(x) \oplus B_x \quad (\text{II.13})$$

La figure ci-dessous illustre l'effet de la dilatation où :

- $t(x)$  est la fonction à dilater,
- $B$  est l'élément structurant de forme linéaire et d'origine centrée,
- $D_B(I)$  est la fonction dilatée.

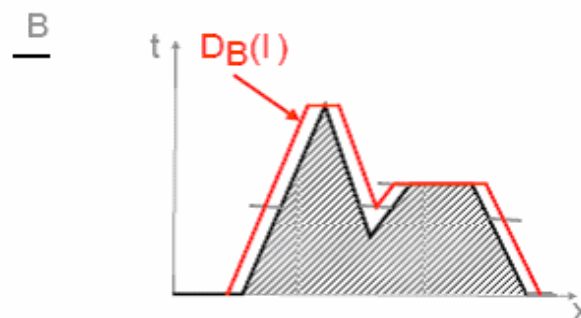


Figure II.7 : Dilatation en niveaux de gris (cas d'une fonction continue)

Nous remarquons sur la figure II.7 que la dilatation comble les creux dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant. La dilatation a pour effet d'élargir l'objet considéré.

### 3.3.3. Erosion

L'érosion d'images à niveaux de gris est définie par [DRO 05] :

$$E_B(t(u)) = \inf \{t(x) : x \in B_x\} \quad (\text{II.14})$$

Avec :  $u \in B_x$

Pour construire la fonction érodée par un élément structurant plat, il suffit d'attribuer à chaque point du domaine  $B_x$  la plus petite valeur que prend  $t(x)$  dans ce domaine. On a aussi:

$$E_B(I) = t(x) \ominus B_x \quad (\text{II.15})$$

Soit la figure ci-dessous qui illustre l'application de l'érosion à une fonction  $t(x)$  par un élément structurant  $B$  de forme linéaire et d'origine centrée. Le résultat est représenté sur la figure par  $E_B(I)$ .

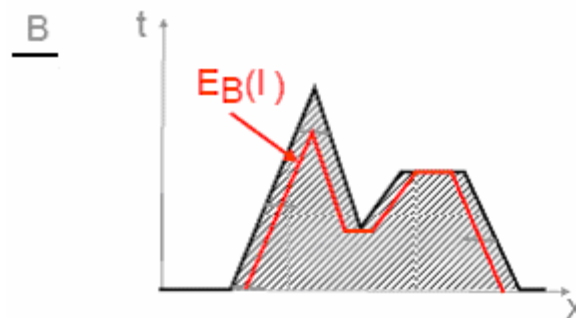


Figure II.8 : Erosion en niveaux de gris (cas d'une fonction continue)

Nous remarquons sur la figure II.8 que l'érosion supprime les pics de taille inférieure à celle de l'élément structurant et réduit l'objet considéré.

### 3.3.4. Ouverture

Comme en morphologie mathématique ensembliste, l'ouverture [DRO 05] consiste en une érosion suivie d'une dilatation. La figure II.9 représente le résultat de l'ouverture avec un élément structurant  $B$  de forme linéaire.

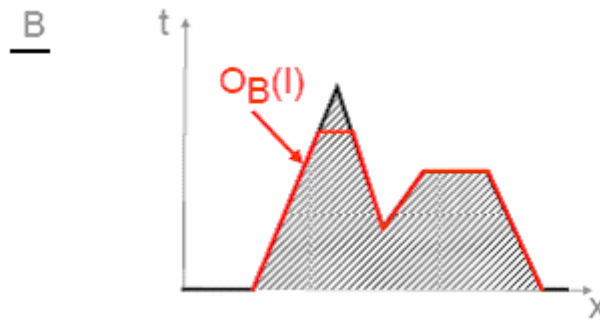


Figure II.9 : Ouverture en niveaux de gris (cas d'une fonction continue)

Nous remarquons sur l'exemple que l'ouverture supprime les pics de l'ensemble sans élargir ou réduire l'ensemble considéré.

### 3.3.5. Fermeture

Comme en morphologie mathématique ensembliste, la fermeture consiste en une dilatation suivie d'une érosion. Le résultat de la fermeture avec un élément structurant B de forme linéaire est représenté par la figure II.10.

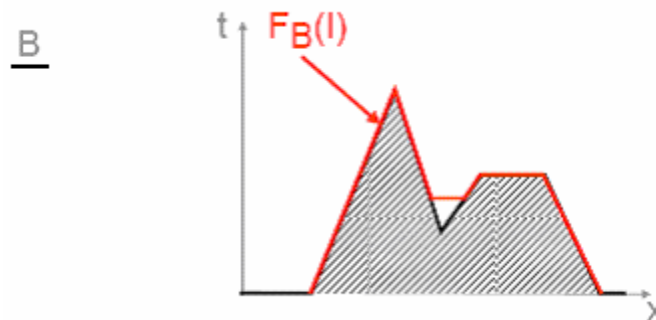


Figure II.10 : Fermeture en niveaux de gris (cas d'une fonction continue)

#### Remarque

La fermeture a pour effet de remplir les creux dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant sans élargir ou réduire l'objet considéré. La fermeture et l'ouverture sont deux opérateurs qui préservent les contours des ensembles. Nous donnons un exemple d'application des différents opérateurs de la morphologie mathématique sur une image test.

## 4. EFFETS DES FILTRES MORPHOLOGIQUES

Dans le cadre de notre travail, nous appliquons après leurs mises en œuvre, les opérateurs de base de la morphologie mathématique que sont la dilatation, l'érosion,

l'ouverture et la fermeture. Les images résultats sont présentées en fonction des paramètres de l'élément structurant, à savoir : la taille, l'origine et la forme.

#### 4.1. Variation de la taille de l'élément structurant

Les images des figures II.13 et II.14 sont les résultats que nous avons obtenus, avec deux opérateurs de base de la morphologie mathématique (érosion et ouverture) sur l'image "bateau" dont la taille est de 256×256 pixels.



Figure II.11 : Image test

Nous avons appliqué des filtres avec un élément structurant (ES) de taille variable (3×3 et 5×5), de forme carrée et d'origine centrée.

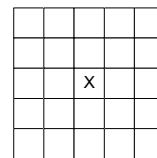


Figure II.12 : Différentes tailles de l'élément structurant



Erosion avec un ES 3×3



Erosion avec un ES 5×5

Figure II.13 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de la taille)

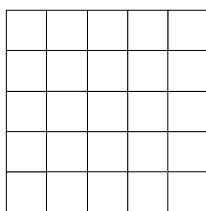
Ouverture avec un ES  $3 \times 3$ Ouverture avec un ES  $5 \times 5$ 

Figure II.14 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de la taille)

Après application de l'opérateur érosion, nous constatons la suppression des objets de taille inférieure à celle de l'élément structurant et ayant des niveaux de gris élevés (les objets clairs). Comme l'érosion affecte, à chaque pixel traité, la valeur minimale de niveau de gris qui se trouve dans le voisinage, alors la forme des objets en niveaux de gris élevés est rétrécie, par contre celle des objets en niveaux de gris faibles est élargie. Cet effet est important lorsque la taille de l'élément structurant est grande. Nous remarquons aussi l'effet de bloc, qui est visible lorsque la taille de l'élément structurant augmente. L'ouverture a pour effet de supprimer les objets de taille inférieure à celle de l'élément structurant et ayant des valeurs de niveaux de gris élevés.

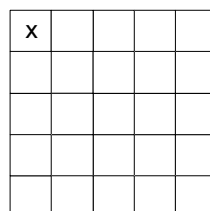
#### 4.2. Variation de l'origine de l'élément structurant

Nous avons appliqué des filtres avec différents éléments structurants (ES) de forme carrée, de taille ( $5 \times 5$ ) et d'origine variable.

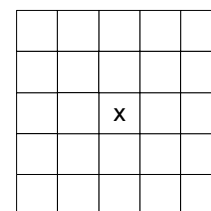


x

a) Origine à l'extérieur



b) Origine dans un coin



c) Origine au centre

Figure II.15 : Différentes positions de l'origine de l'élément structurant

Les images des figures II.16 et II.17 sont les résultats que nous avons obtenus, avec l'application des filtres "Erosion" et "Ouverture".



*Erosion "origine de l'ES à l'extérieur"*

*Erosion "origine de l'ES dans un coin"*

*Erosion "l'origine de l'ES au centre"*

*Figure II.16 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de l'origine)*



*Ouverture "origine de l'ES à l'extérieur"*

*Ouverture "origine de l'ES dans un coin"*

*Ouverture "l'origine de l'ES au centre"*

*Figure II.17 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de l'origine)*

Nous remarquons sur les images obtenues après opération de filtrage, qu'en appliquant les opérateurs érosion et ouverture avec différents centres d'éléments structurants, il apparaît un décalage dans les structures de l'image.

#### 4.3. Variation de la forme de l'élément structurant

Nous avons appliqué des filtres avec un élément structurant (ES) de taille (5×5), l'origine au centre et de forme variable (linéaire, circulaire et carrée).

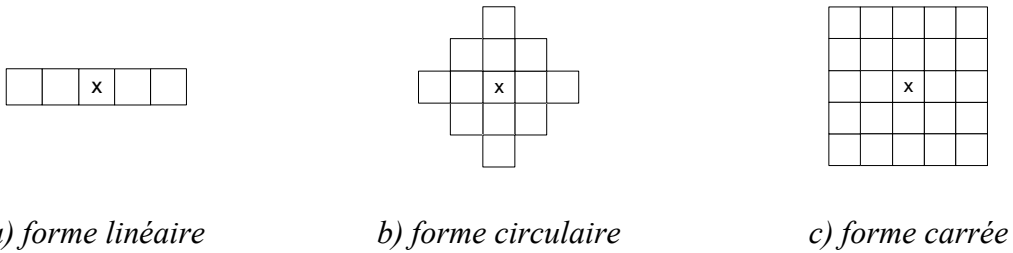


Figure II.18 : Différentes formes de l'élément structurant

Les images des figures II.19 et II.20 sont les résultats que nous avons obtenus, avec deux opérateurs de base de la morphologie mathématique (érosion et ouverture).



Erosion avec un ES linéaire

Erosion avec un ES circulaire

Erosion avec un ES carré

Figure II.19 : Erosion appliquée à l'image "bateau" (variation de la forme)



Ouverture avec un ES linéaire

Ouverture avec un ES circulaire

Ouverture avec un ES carré

Figure II.20 : Ouverture appliquée à l'image "bateau" (variation de la forme)

Nous remarquons que la forme de l'élément structurant intervient sur l'opération de filtrage qui est favorisée dans un sens ou un autre selon la forme de l'élément structurant.

## 5. COMBINAISON DE FILTRES MORPHOLOGIQUES

D'autres filtres morphologiques peuvent être obtenus par la combinaison de l'ouverture et de la fermeture [HEI 95]. Ces filtres sont donnés par la :

- ✓ Combinaison de deux filtres,
- ✓ Combinaison de trois filtres.

### a) Combinaison de deux filtres

La combinaison d'une ouverture et d'une fermeture permet de donner les filtres suivants :

- Une ouverture suivie d'une fermeture ( $\varphi\gamma$ ),
- Une fermeture suivie d'une ouverture ( $\gamma\varphi$ ).

### b) Combinaison de trois filtres

La combinaison de trois filtres de base de la morphologie mathématique (ouverture et fermeture) permet de donner deux nouveaux types de filtres qui sont :

- Une ouverture suivie respectivement d'une fermeture et d'une ouverture ( $\varphi\gamma\varphi$ ).
- Une fermeture suivie respectivement d'une ouverture et d'une fermeture ( $\gamma\varphi\gamma$ ).

Du fait que les filtres morphologiques soient idempotents, on ne peut pas obtenir plus de ces quatre compositions.

- ✓ La composition de l'ouverture ( $\varphi$ ) avec les deux filtres ( $\varphi\gamma$ ) et ( $\gamma\varphi$ ) donne respectivement :

a)  $\varphi(\varphi\gamma) = \varphi\gamma$ .

b)  $\varphi(\gamma\varphi) = \varphi\gamma\varphi$

- ✓ De même la combinaison des deux filtres ( $\varphi\gamma$ ) et ( $\gamma\varphi$ ) avec la fermeture ( $\gamma$ ) permet d'obtenir :

a)  $\gamma(\varphi\gamma) = \gamma\varphi\gamma$

b)  $\gamma(\gamma\varphi) = \gamma\varphi$

- ✓ La composition de  $\varphi\gamma\varphi$  et  $\gamma\varphi\gamma$  avec la fermeture ( $\gamma$ ) donne :

a)  $\gamma(\varphi\gamma\varphi) = (\gamma\varphi)(\gamma\varphi) \quad (\gamma\varphi) \text{ est un filtre idempotent.}$   
 $= (\gamma\varphi)$

b)  $\gamma(\gamma\varphi\gamma) = \gamma\varphi\gamma$

✓ La composition de  $\varphi\gamma\varphi$  et  $\gamma\varphi\gamma$  avec l'ouverture ( $\varphi$ ) donne :

a)  $\varphi(\varphi\gamma\varphi) = \varphi\gamma\varphi$

b)  $\varphi(\gamma\varphi\gamma) = (\varphi\gamma) (\varphi\gamma)$   
 $= (\varphi\gamma)$

On ne peut donc pas avoir plus de trois compositions de filtres de base.

## 6. CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons donné quelques définitions sur la théorie des ensembles, puis les propriétés et les caractéristiques des transformations de la morphologie mathématique. Nous avons développé le principe des opérateurs de la morphologie mathématique en binaire et en niveaux de gris. Nous avons appliqué ces opérateurs sur une image en niveaux de gris. Cette application nous a permis de constater que l'avantage de l'ouverture et la fermeture par rapport à la dilatation et l'érosion est de préserver la forme des objets. Dans les chapitres suivants, nous allons exploiter d'autres types de filtres morphologiques que nous définirons par la combinaison de l'ouverture et de la fermeture.

## **CHAPITRE III DECOMPOSITION PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE**

### **1. INTRODUCTION**

La surface terrestre peut être considérée comme un ensemble d'objets de tailles et de formes différentes. En fonction de la résolution à laquelle on discrétise une scène, les résultats des traitements sont totalement différents. La même scène peut être représentée avec différentes résolutions. Les petits objets sont mieux distingués à la haute résolution et ils sont moins bien représentés à la basse résolution.

Plus la résolution spatiale est haute, plus la taille de l'image numérique est grande et le nombre de pixels la constituant augmente pour une même surface au sol.

Les algorithmes pyramidaux permettent l'analyse d'une telle surface. La représentation pyramidale est composée de l'image originale à la base de la pyramide et de ses approximations aux différents niveaux telle que la résolution spatiale augmente, en passant de la base vers le sommet. Les algorithmes pyramidaux sont des méthodes de traitement d'images basées sur la décomposition et la recombinaison de l'image [MEE 90], [LI 94], [PIE 02] et [PET 03]. Les analyses pyramidales ont été introduites initialement par Burt et Adelson [BUR 83]. Cet outil mathématique permet de calculer les approximations successives d'une fonction (image) à différentes résolutions spatiales [ADE 84] et [OGD 85].

L'association de la notion pyramidale à d'autres outils mathématiques a permis de développer plusieurs algorithmes pyramidaux tels que :

- l'analyse multirésolution associée aux ondelettes [MAL 88] et [ABA 03],
- la pyramide de Laplace généralisée [AIA 02],
- la pyramide morphologique [GOU 00], [ACT 00] et [ROE 01].

pour diverses applications telles que la compression et la fusion de données pour ne citer que ces deux.

Heigmans définit l'algorithme pyramidal comme suit [HEI 00].

“La pyramide consiste en un nombre fini de niveaux telle que le contenu en informations diminue lorsque le niveau augmente et chaque pas vers un niveau supérieur est implémenté par un opérateur d’analyse (réduisant l’information), tandis que chaque pas vers un niveau inférieur est implémenté par un opérateur de synthèse (préservant l’information)”.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l’étude et la mise en œuvre du concept de la pyramide morphologique qui est la combinaison de l’algorithme pyramidal associé à la morphologie mathématique. La description de l’algorithme pyramidal d’une image en niveaux de gris est donnée par la figure III.1.

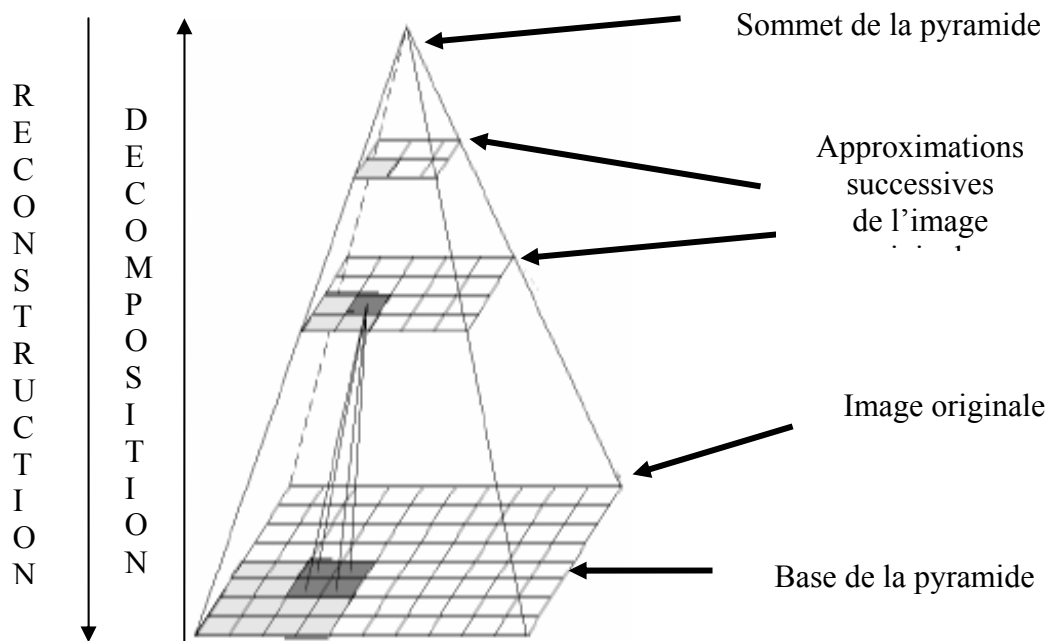


Figure III.1 : Schéma de l’algorithme pyramidal

## 2. PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE

Le principe général de la pyramide morphologique est composé de deux étapes :

✓ La première étape permet de construire une pyramide morphologique telle que la base de la pyramide soit représentée par l’image originale. Les images des différents niveaux sont les approximations de l’image originale obtenues en utilisant des opérateurs morphologiques. Une deuxième pyramide est générée, elle est appelée pyramide des détails qui représentent la différence entre les images de deux niveaux successifs.

✓ La recomposition se fait à partir de la dernière image filtrée et les détails des différents niveaux. Cette partie constitue la seconde étape de la pyramide.

Pour bien étudier et implémenter ces deux parties essentielles de la pyramide morphologique, nous allons donner leurs principes en se basant sur les travaux de F.Laporterie [GOU 00], [LAP 01], [LAP 02] et [LAP 03].

## 2.1. Principe de la décomposition

Le principe de la décomposition se construit par une itération d'une transformation notée  $T_{dec,i}$ , où  $i$  est l'indice de l'étage. Cette transformation est composée d'un filtrage et d'un sous échantillonnage pour réduire la taille de l'image (Figure III.2).

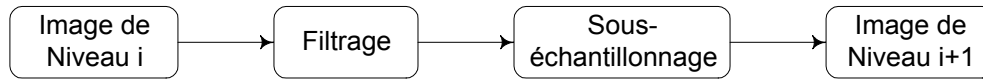


Figure III.2 : Construction d'un niveau de la pyramide

Le passage à un niveau supérieur (une transformation  $T_{dec,i}$ ) se fait en réalisant les quatre étapes suivantes que nous avons étudiées, développées et mises en œuvre pour l'élaboration de notre processus de fusion, schématisées par la figure III.3 :

- 1- le filtrage morphologique,
- 2- le calcul de la différence entre l'image initiale et l'image filtrée,
- 3- le sous-échantillonnage,
- 4- le calcul de la différence entre l'image avant et après échantillonnage.

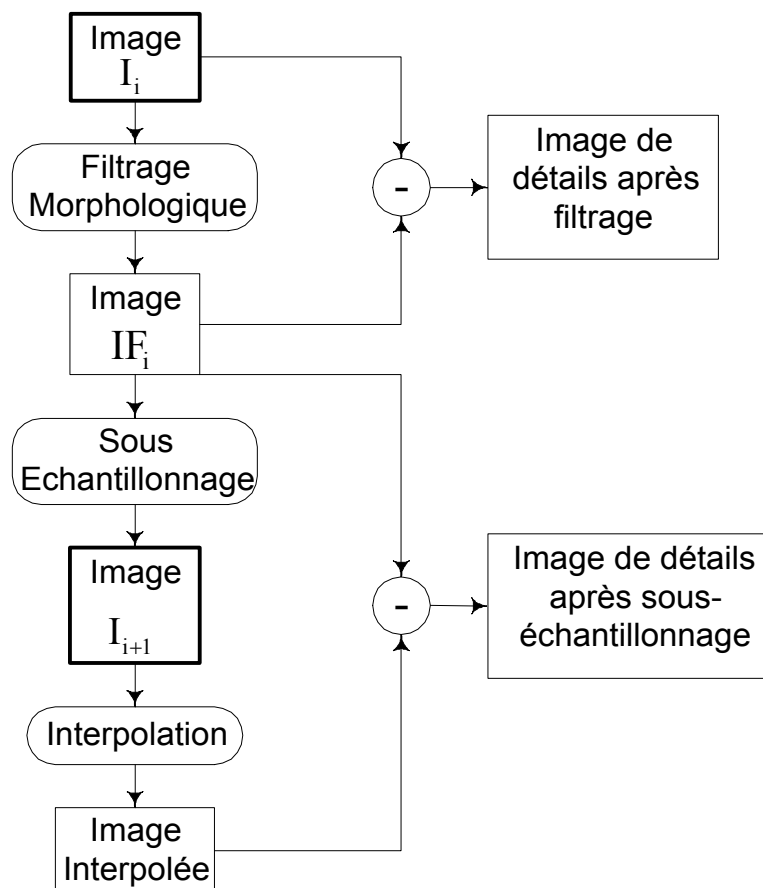


Figure III.3 : Schéma synoptique d'une transformation morphologique

### 2.1.1. Filtrage

Cette étape consiste à effectuer une transformation morphologique sur l'image originale  $I_i(x_k, y_l)$  où :

- $i$  est l'indice de l'étage,
- $(x_k, y_l)$  est l'indice du pixel sur la grille de l'image,
- $k$  et  $l$  sont respectivement le nombre de lignes et de colonnes.

Cette opération est donnée par :

$$IF_i(x_{ki}, y_{li}) = FM_{B,i}(I_i(x_{ki}, y_{li})) \quad (\text{III.1})$$

Où :

- $IF_i$  représente l'image filtrée de  $I_i$  au niveau  $i$ ,
- $B$  est l'élément structurant associé à l'image filtrée  $FM_{B,i}$ .

Les filtres morphologiques utilisés sont des filtres passe bas. Donc l'image filtrée représente la partie basse fréquence dans le domaine spatial.

Dans notre étude, nous avons utilisé les filtres suivants [LAP 02] :

- fermeture suivie d'une ouverture ( $\Phi \ \gamma$ ),
- ouverture suivie d'une fermeture ( $\gamma \ \Phi$ ),
- fermeture suivie d'une ouverture suivie d'une fermeture  $\gamma \ \Phi \ \gamma$ ,
- ouverture suivie d'une fermeture suivie d'une ouverture  $\Phi \ \gamma \ \Phi$ ,
- demi somme de l'ouverture et de la fermeture  $\frac{1}{2}(\gamma + \Phi)$ ,

Nous avons proposé de mettre en œuvre et d'évaluer les filtres et opérateurs tels que :

- la dilatation,
- l'érosion,
- l'ouverture  $\gamma$ ,
- la fermeture  $\Phi$ ,
- somme de l'ouverture et de la fermeture  $\gamma + \Phi$ ,
- différence de l'ouverture et de la fermeture  $\gamma - \Phi$  et  $\Phi - \gamma$ ,
- demi différence de l'ouverture et de la fermeture  $\frac{1}{2}(\gamma - \Phi)$  et  $\frac{1}{2}(\Phi - \gamma)$ .

L'utilisation de cette variété de filtres a pour but de tester leur efficacité dans le processus de décomposition.

#### Remarque

Le choix du type de filtre est accompagné de l'élément structurant défini par les trois paramètres suivants :

- la forme,
- la taille,
- l'origine.

Dans le cadre de notre travail, l'élément structurant que nous avons utilisé est défini comme suit :

- forme carrée et de taille  $(2*k+1, 2*k+1)$ ,
- forme linéaire de taille  $(1, 2*k+1)$  et  $(2*k+1, 1)$ .

L'origine peut être à l'intérieur ou à l'extérieur de l'élément structurant.

### 2.1.2. Calcul des détails

Après l'opération de filtrage, quelques structures de l'image originale n'apparaissent pas dans l'image filtrée. Cette partie, séparée de l'image initiale, est la composante haute fréquence éliminée par le filtrage et qui représente les détails.

Les deux équations suivantes permettent le calcul des détails répartis en  $D_{sup,filtré,i}$  et  $D_{inf,filtré,i}$  au niveau  $i$ .

$$D_{sup,filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) = \sup\{I_i(X_{ki}, Y_{li}), IF_i(X_{ki}, Y_{li})\} - IF_i(X_{ki}, Y_{li}) \quad (III.2)$$

$$D_{inf,filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) = \sup\{I_i(X_{ki}, Y_{li}), IF_i(X_{ki}, Y_{li})\} - I_i(X_{ki}, Y_{li})$$

$$\forall X_{ki} \in [1, \dots, ki], \forall Y_{li} \in [1, \dots, li]$$

Où :

- $D_{sup,filtré,0}$  correspond aux zones plus claires sur l'image initiale que sur l'image filtrée,
- $D_{inf,filtré,0}$  correspond aux zones foncées (sombres) sur l'image initiale que sur l'image filtrée.

Les deux images de détails  $D_{sup,filtré,0}$  et  $D_{inf,filtré,0}$  sont regroupées en une seule image par la relation suivante :

$$D_{filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) = D_{sup,filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) - D_{inf,filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) \quad (III.3)$$

d'où :

$$D_{filtré,i}(X_{ki}, Y_{li}) = I_i(X_{ki}, Y_{li}) - IF_i(X_{ki}, Y_{li})$$

$D_{sup,filtré,0}$  et  $D_{inf,filtré,0}$  ont des valeurs positives, entières et codées sur le même nombre NG de niveaux de gris que les images de l'étage  $i$ . Mais l'image  $D_{filtré,i}$  obtenue après filtrage, possède des valeurs positives ou négatives, entières et codées sur  $[-NG, NG]$ .

Le schéma synoptique suivant illustre le principe du calcul de l'image de détails obtenue après filtrage.

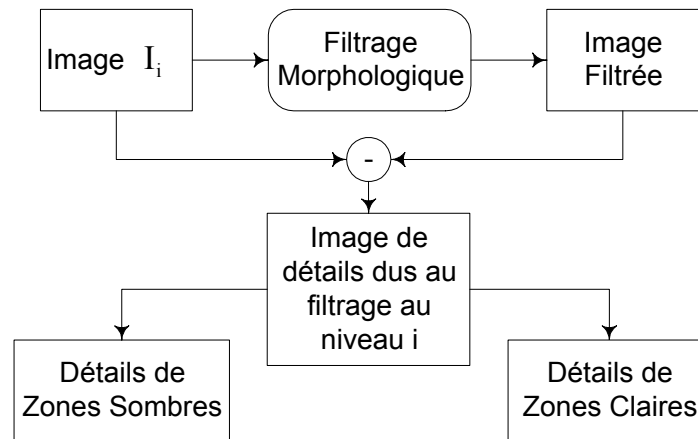


Figure III. 4 : Schéma synoptique de calcul de détails dus au filtrage

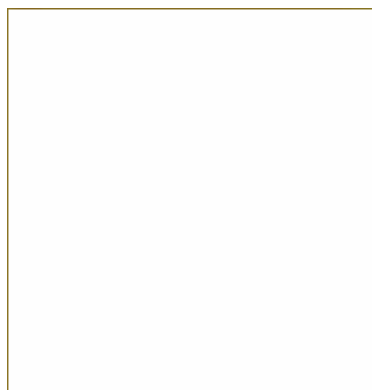
### 2.1.2.1. Applications

Pour valider le processus de fusion, nous avons d'abord testé les filtres (ouverture et la combinaison de la fermeture et de l'ouverture) sur l'image "Bateau" et nous présentons quelques résultats qui sont donnés par les figures suivantes. Celles-ci représentent les détails du premier niveau  $D_{sup, filtre, 0}$  et  $D_{inf, filtre, 0}$  en utilisant un élément structurant de forme carrée, de taille 5x5 et d'origine centrée. Nous précisons que les images  $D_{sup, filtre, 0}$  et  $D_{inf, filtre, 0}$  sont présentées en niveaux de gris inverse et nous avons utilisé différents filtres.

### 2.1.2.2. Evaluations

#### A. Evaluation du filtre "Ouverture"

Les figures suivantes représentent l'image filtrée et l'image de détails  $D_{sup, filtre, 0}$  obtenues au niveau 0 de la pyramide par l'application de l'ouverture.



a) Image filtrée

b) Image  $D_{inf, filtre, 0}$

c) Image  $D_{sup, filtre, 0}$

Figure III.5 : Images résultats du filtre ouverture

Le tableau ci-dessous comporte les paramètres statistiques des images résultats.

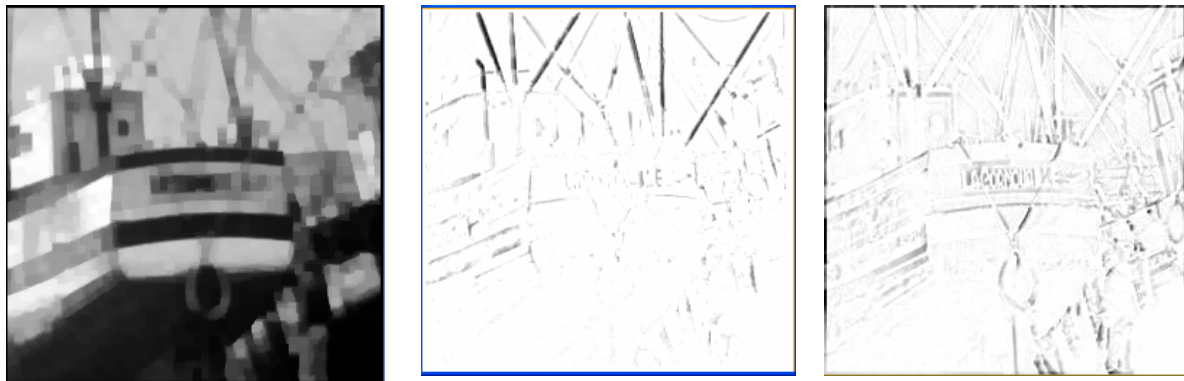
	Moyenne	Ecart type
Image filtrée	116.70	75.64
Image $D_{\text{inf, filtre}, 0}$	0.00	0.00
Image $D_{\text{sup, filtre}, 0}$	9.90	17.59

Tableau III.1 : Paramètres statistiques des images résultats ‘ouverture’

L’application d’un filtre ouverture sur l’image test permet d’obtenir une image filtrée de même taille que l’image originale. Sur cette image, nous remarquons la suppression de quelques éléments (objets) qui représentent les détails (les hautes fréquences). Ces détails ont une taille inférieure à celle de l’élément structurant et des valeurs de niveaux de gris élevées (zones claires). Ceci explique que la répartition de ces détails est seulement dans l’image de détails  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$  et  $D_{\text{inf, filtre}, 0} = 0$ .

### B. Evaluation du filtre ‘Ouverture suivie d’une fermeture ( $\phi \gamma$ )’

L’application de l’ouverture suivie d’une fermeture permet de donner une image filtrée et deux images de détails  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$  et  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$  représentées sur les figures ci-dessous.



a) Image filtrée

b) Image  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$

c) Image  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$

Figure III.6 : Images résultats du filtre ouverture suivie d’une fermeture

Les paramètres statistiques des images résultats sont représentés par le tableau suivant:

	Moyenne	Ecart type
Image filtrée	118.33	77.19
Image $D_{\text{inf, filtre}, 0}$	4.05	15.78
Image $D_{\text{sup, filtre}, 0}$	12.33	29.14

Tableau III.2 : Paramètres statistiques des images résultats ‘ouverture suivie d’une fermeture’

L'application d'une combinaison de deux filtres de base "une ouverture suivie d'une fermeture" permet d'obtenir une image filtrée sur laquelle, nous remarquons l'élimination de quelques objets qui représentent les détails. Nous remarquons bien que les détails sont répartis entre  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$  et  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$ . Les détails  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$  (zones claires) sont dus à l'application de l'ouverture et les détails  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$  (zones sombres) sont dus à l'application de la fermeture. Nous remarquons aussi qu'il y a plus de détails dans  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$  que dans  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$  d'après les valeurs des paramètres statistiques du tableau III.2.

### Remarque

L'utilisation de la combinaison d'ouverture et de fermeture donne des détails répartis en  $D_{\text{inf, filtre}, i}$  et  $D_{\text{sup, filtre}, i}$  de telle sorte que si :

$$\begin{cases} D_{\text{sup, filtre}, i} = 0 & \Rightarrow & D_{\text{inf, filtre}, i} \neq 0 \\ D_{\text{inf, filtre}, i} = 0 & \Rightarrow & D_{\text{sup, filtre}, i} \neq 0 \end{cases}$$

C'est à dire que les informations sont réparties de manière à ne pas trouver le même détail dans les deux images  $D_{\text{sup, filtre}, i}$  et  $D_{\text{inf, filtre}, i}$ .

### 2.1.3. Sous échantillonnage

Le sous échantillonnage est appliqué sur l'image filtrée [FLO 01] et [LAP 02]. Il permet de réduire la taille de l'image en allant de la base de la pyramide vers le sommet. Dans le cas dyadique (puissance de 2), le sous échantillonnage permet de réduire la taille de l'image en passant d'une résolution  $N \cdot 2^i$  à une résolution de  $N \cdot 2^{i+1}$  où N et i sont des entiers. Le sous échantillonnage d'une image est donné par :

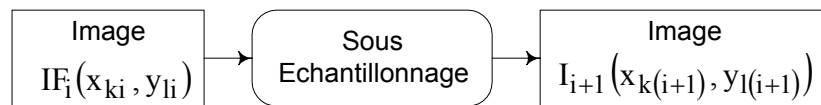


Figure III.7 : Schéma synoptique de sous échantillonnage

Avec :

$$x_{ki} = [1 \dots ki], \quad y_{li} = [1 \dots li]$$

$$x_{k(i+1)} = [1 \dots k(i+1)], \quad y_{l(i+1)} = [1 \dots l(i+1)]$$

$$k_i > k(i+1) \quad \text{et} \quad l_i > l(i+1)$$

Le sous échantillonnage dépend de deux paramètres qui sont :

- le pas de sous échantillonnage,
- l'algorithme de sous échantillonnage.

### A. Pas de sous échantillonnage

Le pas de sous échantillonnage est le rapport des résolutions des deux images de niveaux successifs de la pyramide. Il est défini par sa taille et sa forme. Généralement, le pas de sous échantillonnage est défini par une fenêtre  $n \times n$ .

Le nombre de lignes  $l_{i+1}$  (respectivement de colonnes  $k_{i+1}$ ) de l'image au niveau  $i+1$  est donné en fonction du nombre de lignes  $l_i$  (respectivement de colonnes  $k_i$ ) de l'image de niveau  $i$  par les équations suivantes :

$$(k_i, l_i) = (C_1 n^{m+1}, C_2 n^{m+1}) \xrightarrow{\text{ech}} (k_{i+1}, l_{i+1}) = (C_1 n^m, C_2 n^m) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$k_{i+1} = k_i / n \quad \text{et} \quad l_{i+1} = l_i / n$$

Où :

$C_1, C_2, n$ , et  $m$  sont des entiers.

Dans le cas dyadique, on a :

$$(k_i, l_i) = (C_1 2^{m+1}, C_2 2^{m+1}) \xrightarrow{\text{ech}} (k_{i+1}, l_{i+1}) = (C_1 2^m, C_2 2^m)$$

Les figures ci-dessous illustrent la variation du nombre de lignes et de colonnes lorsque le nombre de niveau augmente (cas d'une décimation dyadique) : a) image initiale (niveau 0), b) image décimée de niveau 1 et c) image décimée de niveau 2.

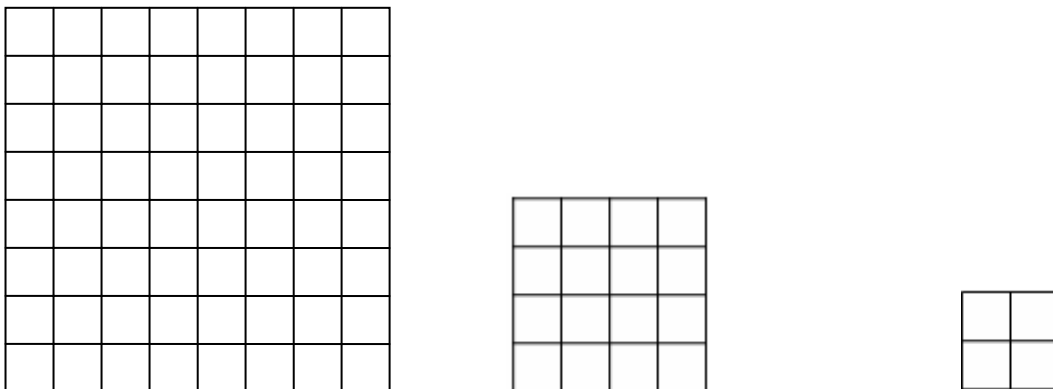


Figure III.8 : Exemple de décimation avec un pas de  $2 \times 2$

Nous remarquons sur la figure que pour chaque transition vers un niveau supérieur le nombre de pixels est divisé par 4 (cas dyadique).

## B. Algorithmes de sous échantillonnage

L'algorithme de sous échantillonnage exprime la relation entre un pixel de l'image au niveau  $i+1$  et les  $n \times n$  pixels (cas d'un pas de décimation carrée) définis par le pas de décimation au niveau  $i$  [LAP 02]. Dans notre travail, nous avons développé et implémenté les trois algorithmes suivants :

- ✓ Décimation  $1/n$ ,
- ✓ Décimation par la moyenne,
- ✓ Décimation par la médiane.

### B.1. Sous échantillonnage $1/n$

Dans ce cas, le pixel de niveau  $i+1$  correspond à un pixel sur les  $n \times n$  pixels définis par le pas de décimation au niveau  $i$ .

$$I_{i+1}(x_{ki+1}, y_{li+1}) = IF_i \left( x_{ki+1} \times n - E\left(\frac{n}{2}\right), y_{li+1} \times n - E\left(\frac{n}{2}\right) \right) \quad (\text{III.6})$$

Où :  $E()$  : partie entière

### B.2. Décimation par la moyenne

Chaque pixel de niveau  $i+1$  de l'image sous échantillonnée correspond à la moyenne des pixels sur les  $n \times n$  définis par le pas de décimation sur l'image filtrée. Dans le cas d'un pas de décimation carré  $(n, n)$ . La moyenne est donnée par la formule suivante:

$$I_{i+1}(x_{ki+1}, y_{li+1}) = \sum_{p=0}^{n-1} \sum_{q=0}^{n-1} \frac{IF_i(x_{ki+1} \times n - p, y_{li+1} \times n - q)}{n \times n} \quad (\text{III.7})$$

### B.3. Décimation par la médiane

Dans le cas de la décimation médiane, on ordonne les valeurs des pixels  $n \times n$  définis par le pas de décimation de l'image au niveau  $i$  selon un ordre croissant et la valeur médiane correspond au pixel sur l'image au niveau  $i+1$ , dans le cas où  $n$  est impair.

Si  $n$  est pair, la médiane correspond à la moyenne des deux pixels centraux.

L'algorithme de décimation médiane est donné par :

$$I_{i+1}(x_{ki+1}, y_{li+1}) = \text{Médiane}(IF_i(x_{ki+1} \times n - p, y_{li+1} \times n - q)), \quad (\text{III.8})$$

$p = 0 \dots (n-1), \quad q = 0 \dots (n-1)$

### 2.1.4. Détails dus au sous échantillonnage

Pour ne pas perdre d'informations lors de la décomposition, il faut calculer les détails dus au sous-échantillonnage. Ces détails sont calculés par la différence entre l'image avant et après sous échantillonnage, c'est-à-dire entre l'image filtrée et l'image sous échantillonnée.

Pour ce faire, il faut ramener l'image sous échantillonnée à la même taille que l'image filtrée en utilisant des algorithmes d'interpolation.

Ces algorithmes permettent le passage de niveau (i+1) au niveau (i), comme il est indiqué dans le schéma synoptique suivant :



Figure III.9 : Schéma synoptique d'interpolation

Avec :

$$x_{ki} = [1 \dots ki], \quad y_{li} = [1 \dots li]$$

Où :

$k_i$  et  $l_i$  sont respectivement le nombre de lignes et de colonnes de l'image au niveau  $i$ .

$$x_{k(i+1)} = [1 \dots k(i+1)], \quad y_{l(i+1)} = [1 \dots l(i+1)]$$

Où :

$k(i+1)$  et  $l(i+1)$  sont respectivement le nombre de lignes et de colonnes de l'image au niveau  $i+1$ .

Dans le cas de notre travail, plusieurs algorithmes d'interpolation sont étudiés, développés et mis en œuvre. Nous citons :

- Algorithme de duplication,
- Interpolation bilinéaire,
- Interpolation bicubique.

Après avoir interpolé l'image sous échantillonnée à la même taille que celle de l'image filtrée, on calcule deux images de détails avec les équations suivantes :

$$D_{\text{sup,deci},i}(x_{ki}, y_{li}) = \sup[IF_i(x_{ki}, y_{li}), I_{i+1, \text{int}}(x_{ki}, y_{li})] - I_{i+1, \text{int}}(x_{ki}, y_{li}) \quad (\text{III.10})$$

$$D_{\text{inf,deci},i}(x_{ki}, y_{li}) = \sup[IF_i(x_{ki}, y_{li}), I_{i+1, \text{int}}(x_{ki}, y_{li})] - IF_i(x_{ki}, y_{li})$$

$$\forall x_{ki} \in [1, \dots, ki], \forall y_{li} \in [1, \dots, li]$$

Les deux images de détails de décimation peuvent être représentées en une seule image par la relation suivante :

$$D_{\text{deci},i}(x_{ki}, y_{li}) = D_{\text{sup,deci},i}(x_{ki}, y_{li}) - D_{\text{inf,deci},i}(x_{ki}, y_{li}) \quad (\text{III.11})$$

L'image  $D_{\text{deci},i}$  prend des valeurs positives ou négatives, entières et codées sur le même nombre NG de niveaux de gris que les images de l'étage  $i$ . On peut aussi, à chaque étage  $i$ , calculer les images  $D_{\text{sup},i}$  et  $D_{\text{inf},i}$ . Ces images sont données par :

$$\begin{aligned} D_{\text{sup},i}(x_{ki}, y_{li}) &= D_{\text{Sup},\text{filtre},i}(x_{ki}, y_{li}) - D_{\text{sup},\text{deci},i}(x_{ki}, y_{li}) \\ D_{\text{inf},i}(x_{ki}, y_{li}) &= D_{\text{inf},\text{filtre},i}(x_{ki}, y_{li}) - D_{\text{inf},\text{deci},i}(x_{ki}, y_{li}) \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Ces deux images ont des valeurs positives, entières et codées sur le même nombre de niveaux de gris NG que les images de l'étage  $i$ .

La figure suivante illustre le schéma synoptique du principe, du calcul des détails obtenus après filtrage.

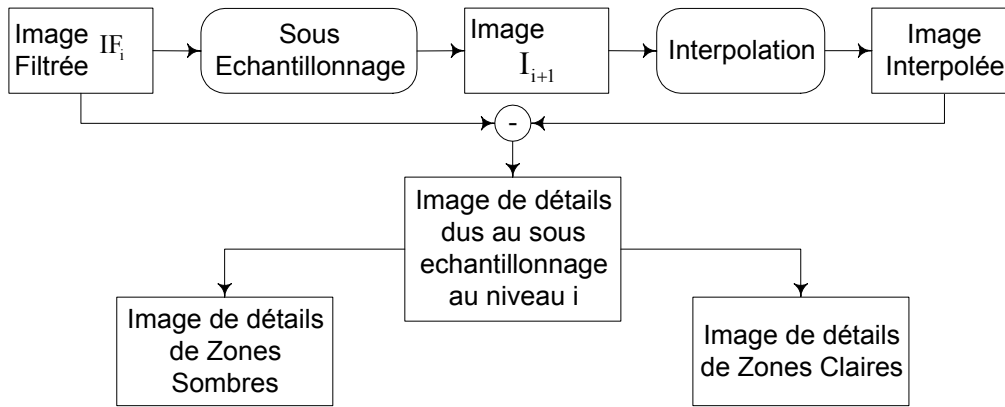


Figure III.10 : Schéma synoptique de calcul de détails dus au sous échantillonnage

A la fin de chaque étage  $i$ , une seule image de détails peut être calculée de différentes manières comme suit :

$$\begin{aligned} D_i(x_{ki}, y_{li}) &= D_{\text{sup},i}(x_{ki}, y_{li}) - D_{\text{inf},i}(x_{ki}, y_{li}) \\ &= D_{\text{filtre},i}(x_{ki}, y_{li}) + D_{\text{deci},i}(x_{ki}, y_{li}) \\ &= I_i(x_{ki}, y_{li}) - I_{i+1, \text{int}}(x_{ki}, y_{li}) \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

L'image  $D_i(x_{ki}, y_{li})$  prend des valeurs positives ou négatives, entières et codées sur  $[-NG, +NG]$ .

## 2.2. Principe de la recomposition

Cette opération permet d'aller du sommet de la pyramide vers la base. La recomposition par cette méthode se fait à partir de la dernière image filtrée (image de basse résolution) [FLO 01] et [LAP 05].

La recomposition de la pyramide morphologique est basée sur l'itération de deux opérations de base :

- ✓ Sur-échantillonnage,
- ✓ Ajout des détails.

### 2.2.1. Sur-échantillonnage

Cette étape a pour effet d'augmenter la taille de l'image en utilisant le même type d'interpolation que celui appliqué lors de la décimation. Ainsi, le passage d'un niveau supérieur de la pyramide à un niveau inférieur permet la recomposition de l'image reconstruite filtrée (IRF) de même taille que celle de l'image de détails de ce niveau.

Le sur-échantillonnage à l'étage  $i+1$  de l'image  $IR_{i+1}$  s'exprime par :

$$IR_{i+1}(x_{k(i+1)}, y_{l(i+1)}) \xrightarrow{\text{sur-ech}(n,n)} IRF_i(x_{ki}, y_{li}) \quad (\text{III.14})$$

Où :

- $IR_i(x_{ki}, y_{li})$  est l'image recomposée,
- $IRF_i(x_{ki}, y_{li})$  est l'image reconstruite filtrée.

L'interpolation est définie par deux paramètres :

- Pas d'interpolation,
- Algorithme d'interpolation.

### 2.2.2. Ajout des détails

Pour recomposer une image la plus proche possible de l'image initiale, il faut ajouter à l'image sur-échantillonnée de l'étape précédente les détails calculés lors de la décomposition. L'expression mathématique qui nous permet d'ajouter des détails à l'image sur-échantillonnée est donnée par :

$$IR_i(x_{ki}, y_{li}) = IRF_i(x_{ki}, y_{li}) + D_i(x_{ki}, y_{li}) \quad (\text{III.15})$$

Où :

- $IR_i(x_{ki}, y_{li})$  : Image recomposée,
- $IRF_i(x_{ki}, y_{li})$  : Image reconstruite filtrée,
- $D_i(x_{ki}, y_{li})$  : Image des détails calculés lors de la décomposition de niveau  $i$ .

Ainsi à chaque niveau  $i$  de la pyramide, nous avons :

$$IR_i = I_i \quad (\text{III.16})$$

$I_i$  : Image de niveau  $i$ ,

$IR_i$  : Image recomposée à ce même niveau  $i$ .

En particulier, on a  $IR_0 = I_0$ .

Où :

$I_0$  : est l'image de la base de la pyramide (image initiale).

$IR_0$  : est l'image reconstruite au niveau 0.

Le principe de la recombinaison par la pyramide morphologique est résumé dans le schéma suivant :

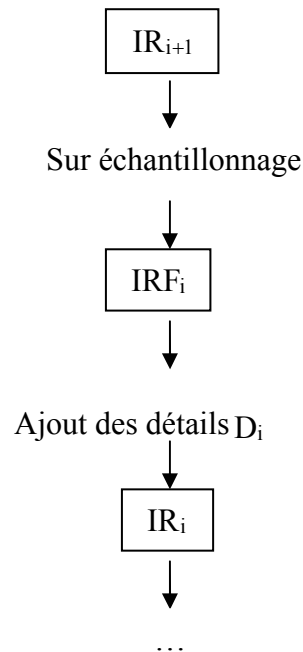


Figure III.11 : Schéma de recombinaison par la pyramide morphologique

### 3. ETUDE DE LA REVERSIBILITE DE LA PYRAMIDE

Après l'étude et la mise en œuvre de la pyramide morphologique, il est important d'étudier la réversibilité de la pyramide morphologique et d'appliquer le principe de décomposition et de recombinaison en fonction du nombre de niveaux et du pas de sous-échantillonnage.

#### 3.1. Etude de la réversibilité en fonction de détails injectés

Nous étudions la réversibilité de la pyramide en fonction du type de détails :

- Injection des détails calculés après filtrage,
- Injection des détails calculés après filtrage et décimation.

Pour cela nous avons utilisé dans le principe de la décomposition et de la recombinaison de la même image, les paramètres suivants :

- filtre ouverture suivie d'une fermeture et un élément structurant carré  $2 \times 2$ .
- Interpolation par décimation moyenne,

- Interpolation bilinéaire.

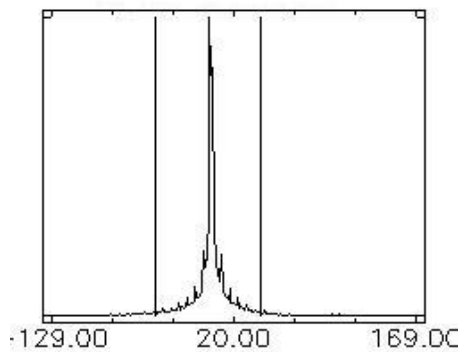
Sur la figure suivante, nous présentons les deux images recomposées avec des détails différents ainsi les histogrammes des images de différence entre l'image originale et l'image recomposée :



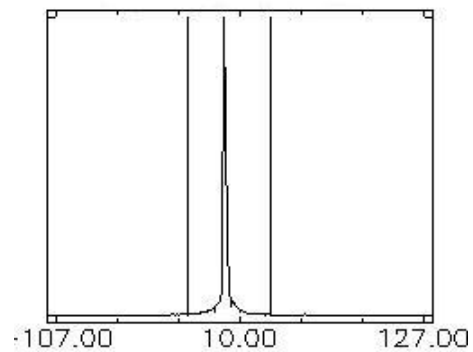
*Image recomposée 'détails après filtrage'*



*Image recomposée 'détails après filtrage et décimation'*



*Histogramme de l'image de différence  
'détails après filtrage'*



*Histogramme de l'image de différence  
'détails après filtrage et décimation'*

*Figure III.12 : Images recomposées avec des détails différents*

L'injection des détails après filtrage permet de recomposer l'image de sorte que le coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image recomposée soit égale à 0.973. L'introduction des détails après filtrage et décimation donne un coefficient de corrélation de 0.987. Les valeurs des coefficients de corrélation et les histogrammes de l'image de différence (Figure III.12), nous permettent de constater que l'introduction des détails après décimation recompose mieux l'image comparativement à l'injection des détails après filtrage uniquement.

### 3.2. Décomposition et recombinaison de l'image "Bateau"

Nous avons appliqué le processus de décomposition et de recombinaison de la pyramide morphologique en fonction du nombre de niveaux et du pas de sous échantillonnage. Nous présentons comme exemple une pyramide de deux niveaux et un pas de décimation  $2 \times 2$ . Le principe de la pyramide morphologique est appliqué avec les paramètres suivants :

- Le filtre utilisé est une fermeture suivie d'une ouverture,
- L'élément structurant est linéaire,
- L'algorithme de décimation moyenne,
- Pas de décimation égal à 2,
- L'algorithme d'interpolation bilinéaire.

#### 3.2.1. Images des deux premiers niveaux

Sur les figures ci-dessous, nous présentons respectivement l'image originale et son approximation, image du premier niveau de la pyramide. Par la suite, les images filtrées correspondantes à chacune de ces images.



a) Image initiale



b) Image filtrée au niveau 0



c) Image échantillonnée du 1<sup>er</sup> niveau



d) Image filtrée du 1<sup>er</sup> niveau

Figure.III.13 : Images basse résolution du niveau 0 et 1 de la pyramide morphologique

### 3.2.2. Images de détails des deux premiers niveaux

La figure III.14 représente les images de détails  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$  et  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$  de niveau 0 et les images  $D_{\text{inf, filtre}, 1}$  et  $D_{\text{sup, filtre}, 1}$  de niveau 1 de la pyramide.

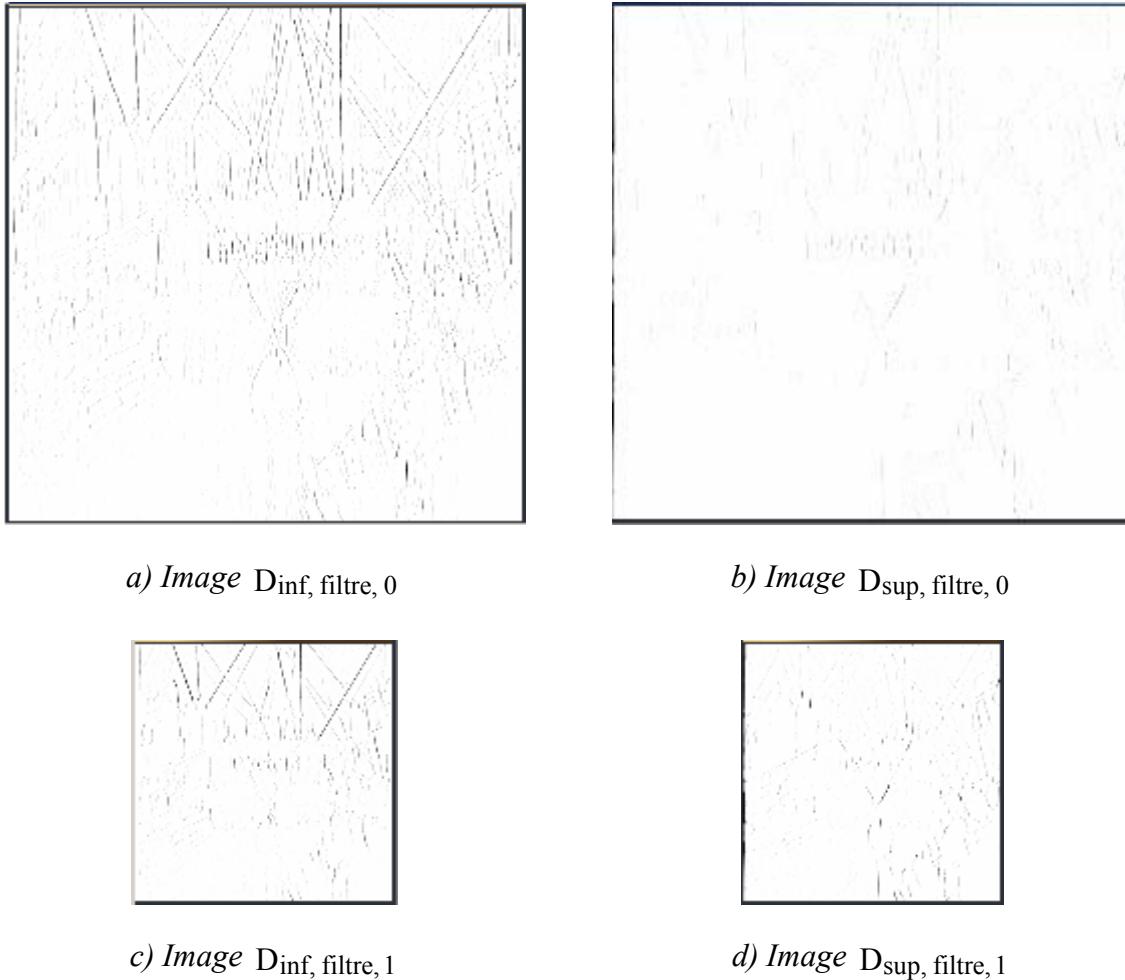


Figure III.14 : Images hautes fréquences du niveau 0 et 1 de la pyramide morphologique

a)  $D_{\text{inf, filtre}, 0}$ , b)  $D_{\text{sup, filtre}, 0}$ , c)  $D_{\text{inf, filtre}, 1}$ , d)  $D_{\text{sup, filtre}, 1}$

### 3.2.3. Représentation pyramidale

Les figures suivantes sont la représentation pyramidale de l'image originale et ses approximations ainsi que la pyramide des détails et sa recombinaison.



Figure III.15 : Représentation pyramidale des approximations (Images des différents niveaux) de l'image originale

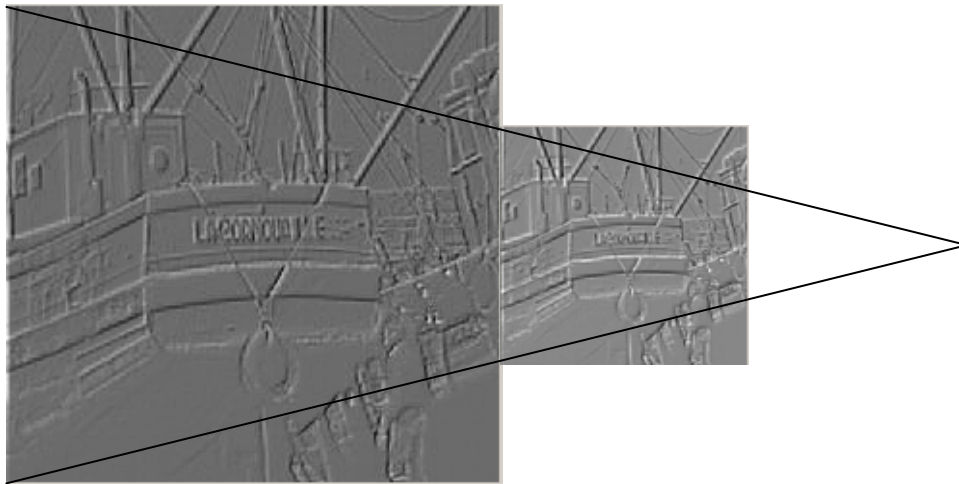


Figure III.16 : Pyramide des détails

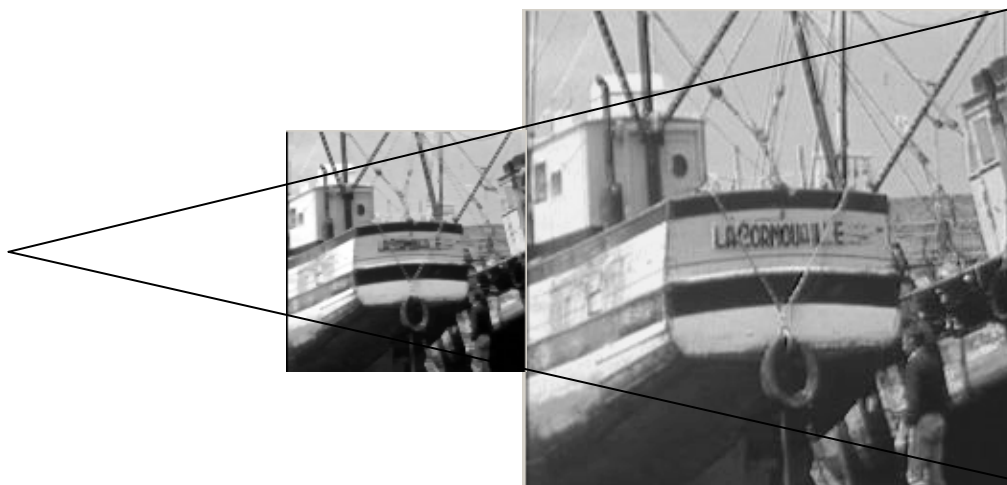


Figure III.17 : Pyramide de recombinaison

La pyramide de recombinaison est construite à base de l'image filtrée au niveau 1 obtenue lors de la décomposition de taille  $128 \times 128$  (image de niveau 1 de la pyramide) et de l'image reconstituée à partir de cette dernière de taille  $256 \times 256$  (image de la base de la pyramide).

La pyramide morphologique permet de décomposer une image en deux pyramides :

- La première pyramide est composée de l'image originale (image de la base de la pyramide) et des images d'approximations de l'image originale.
- La deuxième pyramide est composée des images de détails calculées à chaque niveau.

Le processus de recombinaison permet d'aller de la dernière image filtrée jusqu'à la recombinaison de l'image de la base de la pyramide en utilisant les images de détails de chaque niveau.

D'après l'histogramme de l'image de différence entre l'image originale et l'image reconstituée, nous constatons que la plupart des pixels de cette image ont un niveau de gris nul. La valeur moyenne de l'image de différence est égale à -0.269.

De même, la comparaison des paramètres statistiques de l'image originale  $I_0$  et l'image reconstituée  $IR_0$ , nous permet de conclure que le processus est réversible de sorte que le coefficient de corrélation entre ces deux images est égal à 0.993.

#### **4. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons donné la définition de l'algorithme pyramidal, ensuite le principe de la pyramide morphologique. Dans l'opération de décomposition, nous avons donné les différents types de filtres utilisés, ainsi que les algorithmes utilisés pour réduire la taille de l'image et le calcul des détails obtenus après le filtrage et l'échantillonnage.

Dans la recomposition, nous avons démontré que le processus est réversible à travers plusieurs exemples suivant différentes valeurs des paramètres qui interviennent dans le processus.

Nous pouvons donc, exploiter cette approche dans la fusion des images satellitaires

## CHAPITRE IV

### FUSION D'IMAGES PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE ET EVALUATION DES RESULTATS

#### 1. PRINCIPE DE LA FUSION PAR LA PYRAMIDE MORPHOLOGIQUE

Dans le cadre de notre travail, nous avons étudié et mis en œuvre un processus de fusion d'images satellitaires basé sur la pyramide morphologique. La méthode que nous avons mise en œuvre repose sur le principe de la décomposition de l'image haute résolution spatiale en utilisant les filtres non linéaires de la morphologie mathématique pour extraire les détails. Ces détails sont injectés lors de la recombinaison dans l'image basse résolution pour synthétiser des images multispectrales à haute résolution spatiale.

Pour étudier et mettre en œuvre les algorithmes de la pyramide morphologique, nous nous sommes inspirés des travaux de F.Laporterie [LAP 00], [LAP 02] et [LAP 05]. Le principe de cette méthode est schématisé par la figure suivante.

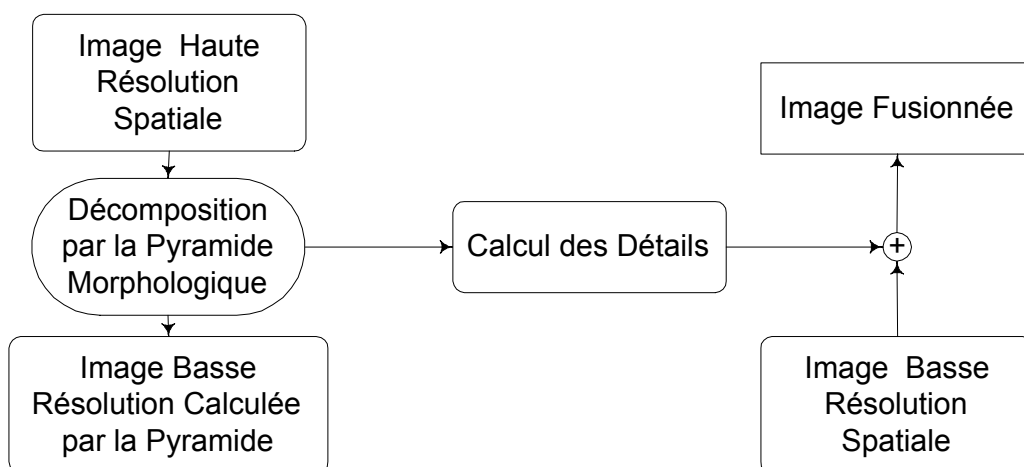


Figure IV.1 : Schéma de la fusion par la pyramide morphologique

## 1.1. Décomposition de l'image haute résolution

Nous appliquons le processus de décomposition sur l'image haute résolution spatiale pour séparer les hautes fréquences qui représentent les images de détails des différents niveaux de la pyramide des basses fréquences représentées par les approximations de l'image d'entrée. Nous arrêtons l'opération lorsque la dernière image filtrée possède la même taille que l'image basse résolution.

Le processus de décomposition de l'image haute résolution spatiale (HRS) est défini par une itération d'un filtrage et d'un sous-échantillonnage. Le nombre de niveaux de la pyramide morphologique est donné par le rapport des résolutions entre l'image haute résolution spatiale (HRS) et l'image basse résolution (BRS) ainsi que le pas de sous-échantillonnage.

Nous abordons donc, dans ce qui suit, la partie filtrage du processus de fusion.

### 1.1.1. Filtrage

Nous avons étudié et implémenté dans ce processus de fusion, les opérateurs de base et les filtres morphologiques que nous avons cités dans le chapitre précédent.

Il est à noter que les résultats obtenus après application de l'opérateur filtrage sont liés directement aux caractéristiques de l'élément structurant qui sont définis par la forme, la taille et l'origine.

Rappelons que les images de détails sont obtenues par application de ces filtres (Chapitre III). Cette opération de filtrage est suivie d'une procédure de sous-échantillonnage.

### 1.1.2. Sous-échantillonnage

Le sous-échantillonnage permet de réduire la taille de l'image haute résolution (HRS). Il est défini par deux paramètres :

- pas de sous-échantillonnage,
- algorithme de sous-échantillonnage.

A cette étape, les algorithmes que nous avons mis en oeuvre sont la décimation simple, la décimation moyenne et la décimation médiane.

Les résultats de ces deux étapes à savoir le filtrage et le sous-échantillonnage sont les images de détails qu'il faut combiner avec les images basse résolution dans le processus de recombinaison.

## 1.2. Recomposition de l'image basse résolution

Lors de ce processus de recomposition qui permet de synthétiser l'image multispectrale à haute résolution spatiale, nous appliquons une interpolation et un ajout des détails calculés lors de la décomposition de l'image haute résolution.

Les algorithmes d'interpolation que nous avons mis en œuvre sont : l'interpolation par duplication, l'interpolation bilinéaire et l'interpolation bicubique.

Le processus de recomposition permet de synthétiser l'image fusionnée à un niveau  $j$  par la formule suivante :

$$IF = D_j + \text{Int}_j(D_{j+1} + \text{Int}_{j+1}(D_{j+2} + \dots + \text{Int}_{N-2}(D_{N-1} + \text{Int}_{N-1}(IBR)))) \quad (\text{IV.1})$$

Où:

IF : image fusionnée,

IBR : image basse résolution spatiale,

$D_j$  : image de détails de niveau  $j$ .

Le processus général intégrant la phase de la décomposition et de la recomposition par la fusion des images satellitaires est donné par la figure IV.2.

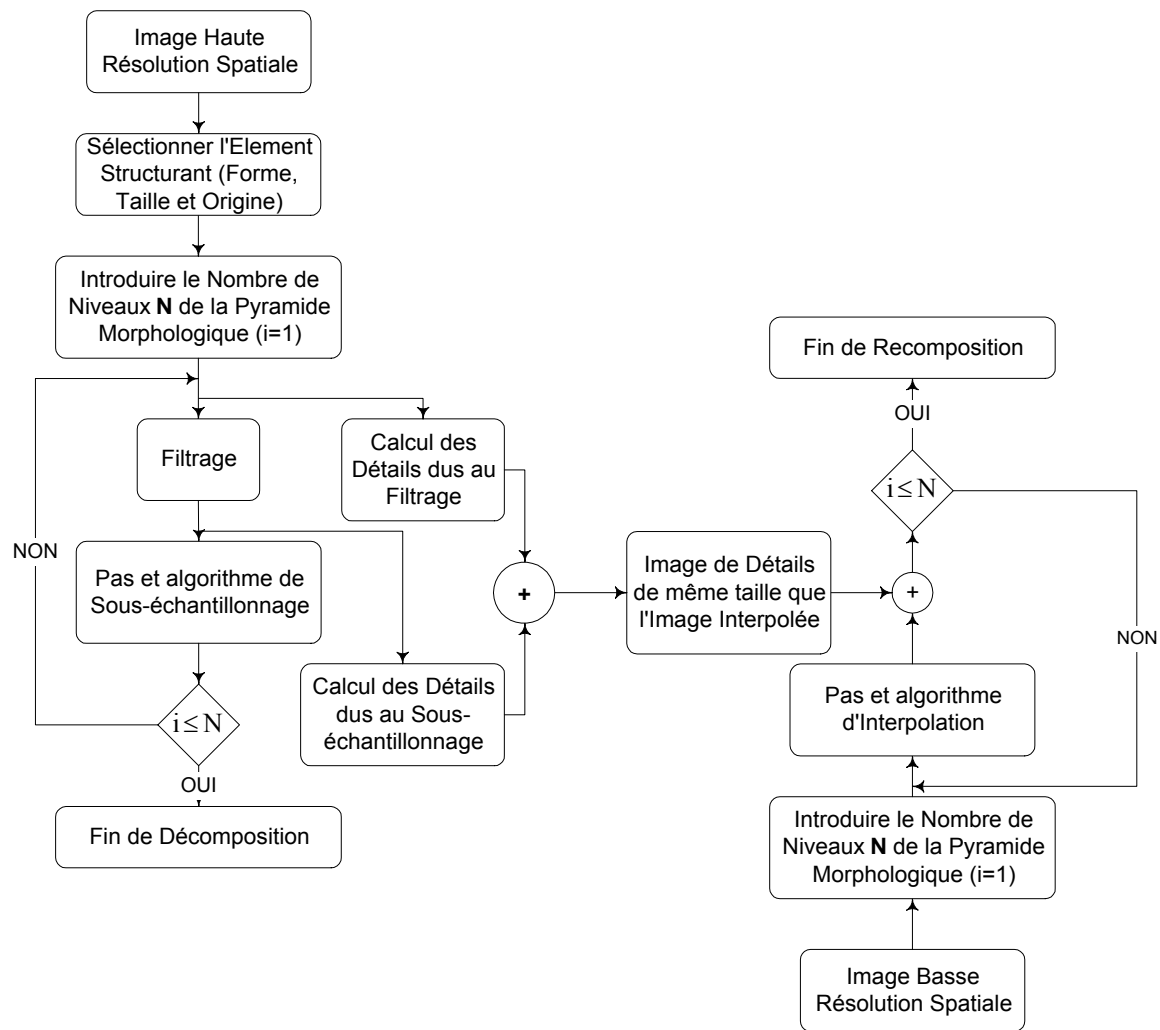


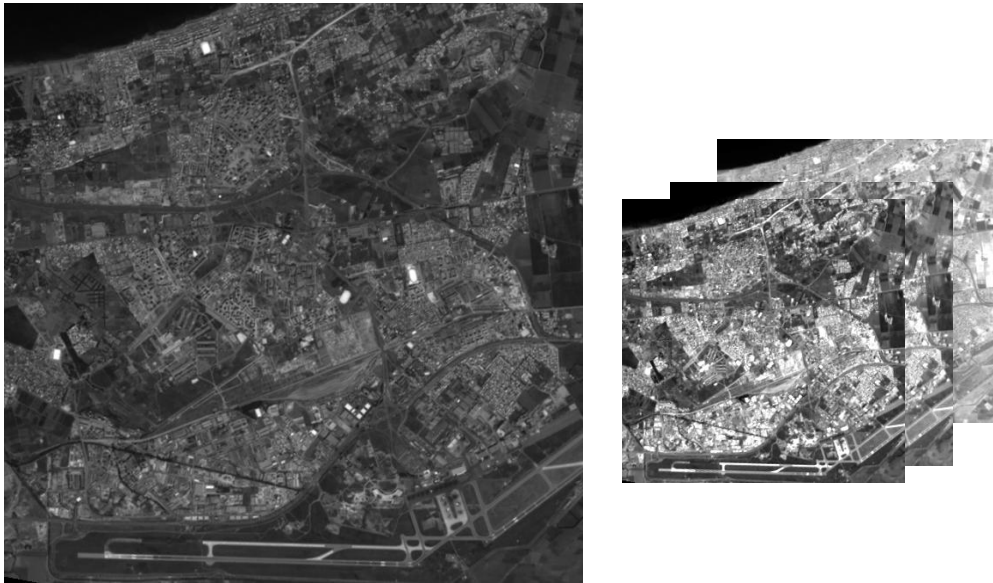
Figure IV.2 : Synoptique de la fusion d'images par la pyramide morphologique

Pour valider les résultats obtenus par le processus de la fusion, il est nécessaire de choisir certains critères d'évaluation qui permettent de comparer l'image synthétisée aux images originales.

## 2. IMAGES UTILISEES

Pour la mise en œuvre pratique, nous avons exploité les images prises sur la région d'Alger : une image panchromatique à haute résolution spatiale et une image multispectrale à trois bandes (XS1, XS2, XS3) à basse résolution spatiale (Figure IV.3). Ces images sont issues du capteur HRV du satellite SPOT et représentent la zone Est de la baie d'Alger (sur une zone qui couvre la région de Bab-Ezzouar).

L'image sur la région d'Alger est constituée d'un milieu urbain et périurbain et elle est acquise le 01 Avril 1997. La scène est très structurée et hétérogène.

*Image panchromatique originale**Images XS originales**Figure IV.3 : Images d'Alger (SPOT)*

Les caractéristiques (résolutions spectrales, spatiales et dimensions en pixels) de ces images sont données dans le tableau IV.1.

	Bandes spectrales	Résolutions spatiales	Dimensions (pixels)
Panchromatique	0.51-0.73 $\mu\text{m}$	10 m	660×660
XS1	0.51-0.59 $\mu\text{m}$	20 m	330×330
XS2	0.61-0.68 $\mu\text{m}$	20 m	330×330
XS3	0.79-0.89 $\mu\text{m}$	20 m	330×330

*Tableau IV.1 : Caractéristiques des images d'Alger*

Nous précisons que le rapport des résolutions entre l'image panchromatique et les images multispectrales est de 2 (cas dyadique). Les caractéristiques statistiques des images sont présentées dans le tableau suivant :

	XS1	XS2	XS3	PAN
Moyenne	100.93	65.26	91.16	69.49
Ecart-type	20.19	15.97	19.16	26.35
Entropie	4.34	4.11	4.10	4.60
Facteur de calibration	1.37341	1.04465	1.38629	1.35477

*Tableau IV.2 : Caractéristiques statistiques des images d'Alger*

Avant d'évaluer les résultats de la fusion, nous présentons quelques images de détails obtenues à partir du processus que nous avons implémenté et à partir des critères d'évaluation proposés dans ce qui suit.

### 3. CRITERES D'EVALUATION

Une fois les images synthétisées, une évaluation des résultats obtenus par le processus de la fusion s'impose du point de vue contenu spatial et contenu spectral selon la figure IV.4.

Pour cela, nous avons considéré deux critères d'évaluation :

- Une évaluation qualitative (Aspect visuel),
- Une évaluation quantitative (Aspect statistique).

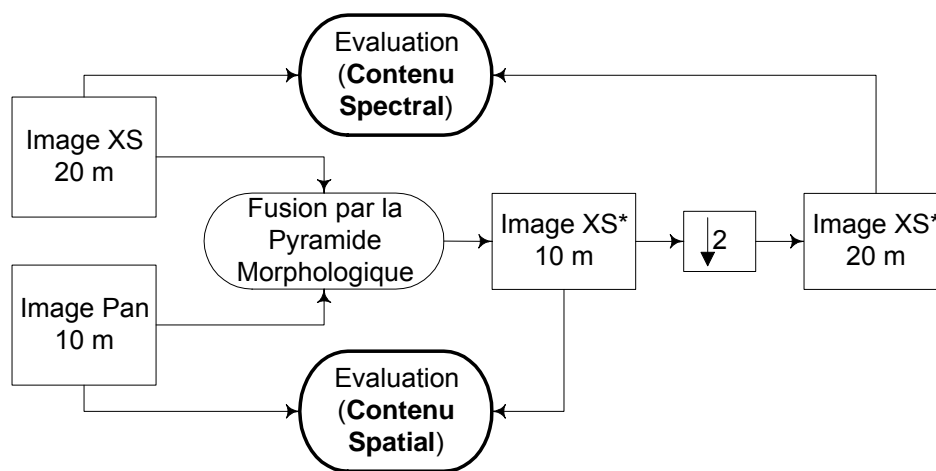


Figure IV.4 : Types d'informations à évaluer

Où :

- XS\*10 : image multispectrale synthétisée à 10m,
- XS : image originale à 20m,
- XS\*20 : image synthétisée à 10m et rééchantillonnée à 20m.

Les paramètres statistiques qui ont été proposés dans la littérature [WAL 99], [WAL 02] et [RAN 03] résument quantitativement les performances des méthodes de fusion pour la synthèse des images à haute résolution spatiale et ils sont regroupés en deux ensembles.

Le premier ensemble fournit une évaluation globale pour chaque bande synthétisée. Il contient les paramètres suivants :

#### ➤ Biais

Le premier paramètre statistique concerne le biais et sa valeur relative à la valeur moyenne de l'image originale. Il consiste à calculer la différence entre la moyenne de l'image

synthétisée et l'image originale (la valeur idéale étant nulle). Il est calculé par la relation suivante :

$$\text{Biais} = \text{moyenne}(XS^*) - \text{moyenne}(XS) \quad (\text{IV.2})$$

➤ **Différence des variances**

Le second paramètre est la différence des variances ainsi que sa valeur relative à la variance originale. Cette différence exprime la quantité d'information ajoutée ou perdue lors du processus de la fusion. La différence des variances entre l'image originale et l'image synthétisée est donnée par la relation suivante :

$$\Delta \text{var} = \text{Var}(XS^*) - \text{Var}(XS) \quad (\text{IV.3})$$

➤ **Coefficient de corrélation**

Le coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image synthétisée exprime la similitude des structures entre les deux images. Il est donné par la relation suivante :

$$\text{Coffecient de corrélation} = \frac{\text{Cov}(XS, XS^*)}{\sqrt{\text{Var}(XS) \times \text{Var}(XS^*)}} \quad (\text{IV.4})$$

➤ **Ecart-type de l'image de différence**

Le paramètre écart-type de l'image de différence ainsi que sa valeur relative à la moyenne de l'image originale indique le niveau d'erreur à chaque pixel. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\text{Ecart type} = \sqrt{\text{Var}(XS^* - XS)} \quad (\text{IV.5})$$

➤ **Différence d'entropies**

Dans la théorie de l'information, la différence d'entropie décrit la quantité de l'information ajoutée ou perdue. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\text{La différence d'entropie} = \text{entropie}(XS^*) - \text{entropie}(XS) \quad (\text{IV.6})$$

L'entropie est donnée par :

$$\text{Entropie} = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (\text{IV.7})$$

Avec :

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

$P_i$  : Probabilité du  $i^{\text{ème}}$  niveau de gris,  
 $n_i$  : Nombre de pixels possédant un niveau de gris  $i$ .

Le second ensemble a été proposé par Wald [WAL 02] pour caractériser globalement la qualité du produit de fusion. En effet, les 03 canaux synthétisés interviennent en même temps pour calculer les deux paramètres RASE et ERGAS.

➤ **RASE (Relative Average Spectral Error) (Erreur spectrale moyenne relative)**

Cette erreur est exprimée en pourcentage et caractérise les performances moyennes de la méthode pour les bandes considérées.

Elle est définie par :

$$\text{RASE} = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \text{RMSE}(B_k)^2} \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

$$M = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N M_k$$

Où :

$M_k$  : moyenne de l'image originale  $k$ ,

$N$  : nombre des canaux.

$B_k$  : image différence entre l'image originale et l'image synthétisée.

RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne), elle est définie par :

$$\text{RMSE}(B_k) = \sqrt{(\text{Biais}(B_k))^2 + (\text{Ecart-type}(B_k))^2} \quad (\text{IV.9})$$

➤ **ERGAS (Erreur relative globale adimensionnelle de synthèse)**

C'est un paramètre plus robuste que le RASE, puisqu'il prend en considération le rapport des résolutions entre les deux images. Il est défini par :

$$\text{ERGAS} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[ \frac{(\text{RMSE}(B_k))^2}{(M_k)^2} \right]} \quad (\text{IV.10})$$

- $h$  : valeur de la haute résolution,
- $l$  : valeur de la basse résolution.

#### 4. EVALUATION DU PROCESSUS DE FUSION

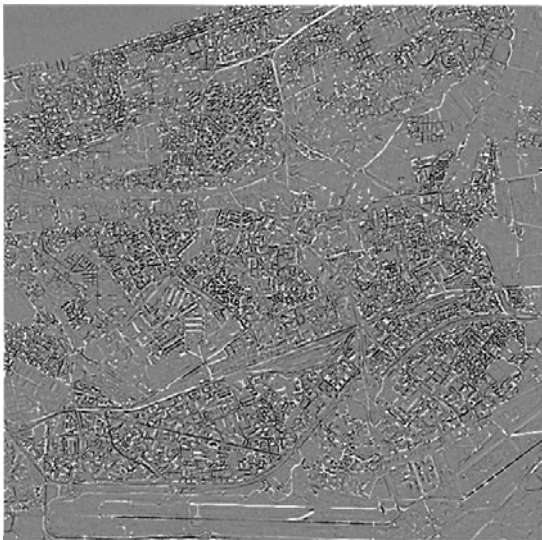
Nous appliquons les différents filtres développés et nous évaluons les résultats en fonction de la taille de l'élément structurant du point de vue spatial et spectral.

#### 4.1 Présentation des images de détails

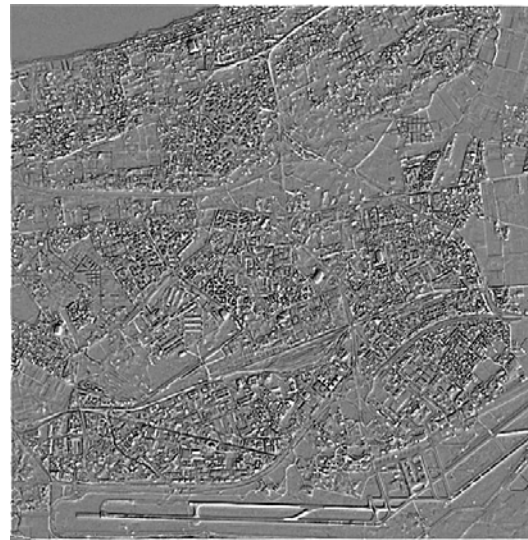
Les images de détails sont générées lors de la décomposition de l'image panchromatique. Ces détails sont de deux types :

- détails obtenus après l'opération de filtrage,
- détails obtenus après l'opération de filtrage et décimation.

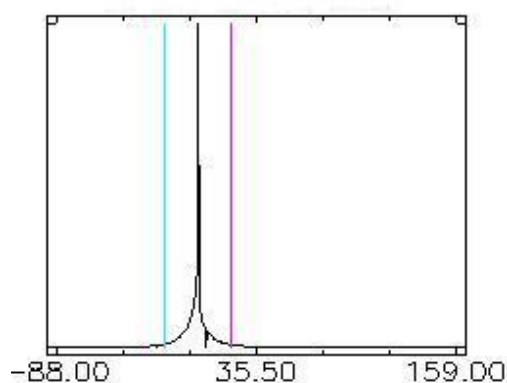
Pour calculer les deux types des images de détails, nous avons fait plusieurs tests et nous présentons sur la figure IV.5, les différents résultats obtenus à partir de l'image panchromatique de la région d'Alger en utilisant un élément structurant de taille  $3 \times 3$ , un filtre fermeture suivie d'une ouverture, une décimation moyenne, pas de décimation égal à 2 et une interpolation cubique.



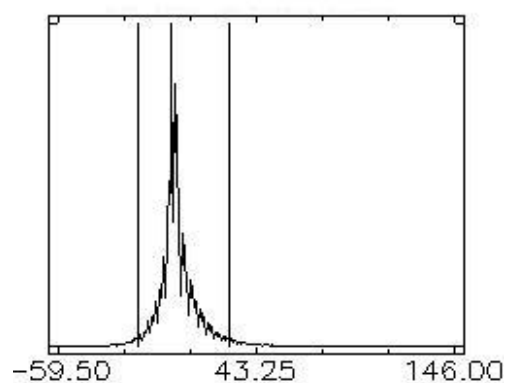
*Image de détails avec un ES  $3 \times 3$  'après filtrage'*



*Image de détails ES  $3 \times 3$  'après filtrage et décimation'*



*Histogramme de l'image de détails 'après filtrage'*



*Histogramme de l'image de détails 'après filtrage et décimation'*

*Figure IV.5 : Images de détails ainsi que leurs histogrammes*

La combinaison de l'ouverture et de la fermeture permet de donner des détails dont les niveaux de gris sont positifs et négatifs. Les premiers sont dus à l'ouverture et les seconds sont dus à la fermeture. Nous constatons que la combinaison de l'ouverture et de fermeture supprime les transitions (structures fines) dont les niveaux de gris sont élevés ou abaissés dans leur voisinage. Nous remarquons que l'ajout des détails de décimation aux détails de filtrage permet d'améliorer la qualité de l'image de détails. Nous constatons aussi que les détails de décimation permettent de mieux retrouver les formes des structures. Nous exploitons l'image de détails issus après opération de filtrage et décimation pour synthétiser des images multispectrales à la résolution de l'image panchromatique. Rappelons que la méthode de la fusion que nous avons mise en oeuvre dépend de plusieurs paramètres (filtres morphologiques, algorithmes de décimation et algorithmes d'interpolation). Pour cela, nous synthétisons des images multispectrales à haute résolution spatiale en utilisant différentes combinaisons de ces paramètres et nous évaluons les résultats en fonction du :

- filtre morphologique,
- algorithme d'interpolation,
- algorithme d'interpolation par décimation.

Et les meilleurs paramètres sont ceux qui :

- i) Détériorent le moins possible les informations spectrales contenues dans l'image multispectrale originale,
- ii) Introduisent convenablement les informations spatiales issues de l'image haute résolution spatiale.

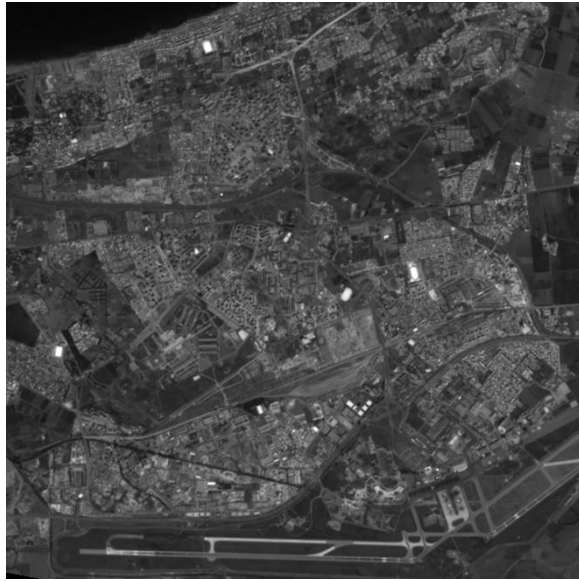
#### **4.2. Apport de l'information spatiale**

Pour évaluer l'apport des images synthétisées, nous nous sommes intéressés à l'étude de deux manières différentes :

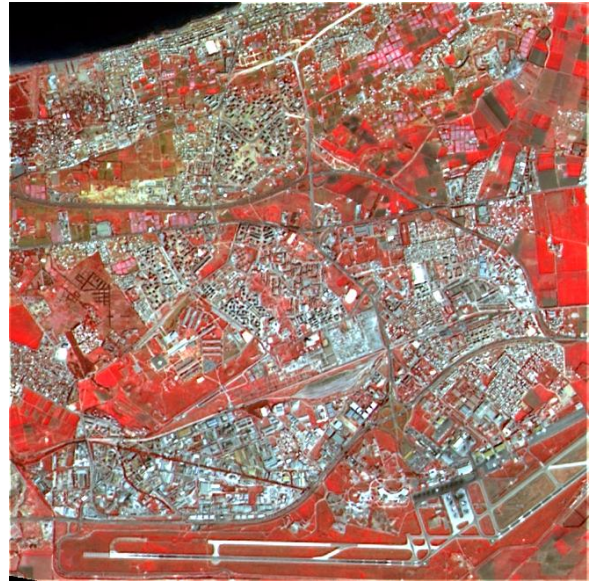
- Comparaison visuelle et statistique entre l'image panchromatique et XS synthétisée,
- Comparaison entre les hautes fréquences de l'image panchromatique et les hautes fréquences de l'image synthétisée en utilisant le filtre passe haut.

##### **a) Comparaison visuelle et statistique entre l'image panchromatique et XS synthétisée**

Après plusieurs tests, nous présentons l'image panchromatique et la composition colorée des images multispectrales synthétisées à 10m.



*Image panchromatique*



*Composition colorée des images  
multispectrales synthétisées avec une  
fermeture suivie d'une ouverture*



*Zoom d'une région de l'image  
Panchromatique*



*Zoom d'une région Composition colorée des  
images multispectrales synthétisées avec  
fermeture suivie d'une ouverture*

*Figure IV.6 : Composition colorée des images synthétisées à 10m (Alger)*

L'aspect visuel des images synthétisées, nous permet de constater que le filtre fermeture suivie d'une ouverture donne des résultats intéressants du point de vue introduction de l'information spatiale et conservation de l'information spectrale.

Les valeurs des paramètres statistiques calculées entre l'image panchromatique et les images multispectrales synthétisées à 10m en fonction de la taille de l'élément structurant sont représentées dans le tableau suivant.

Avec :

DV : Différence des variances,

RVV : Relativement à la variance vraie,

ECD : Ecart-type de la différence,

RM : Relativement à la moyenne (écart-type),

DE : Différence de l'entropie,

REV : Relativement à l'entropie vraie.

Paramètres statistiques		PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*	PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*
		Elément structurant linéaire 1×2			Elément structurant carré 3×3		
$\gamma$	DV	138.77	189.94	201.72	63.79	109.36	170.49
	RVV	27.07%	37.05%	39.35%	12.44%	21.33%	33.26%
	ECD	4.28	4.43	13.77	3.69	5.67	12.97
	RM	8.35%	8.65%	26.84%	7.19%	11.05%	25.29%
	DE	0.30	0.20	0.26	0.34	0.24	0.37
	REV	6.72%	4.35%	5.66%	7.57%	5.39%	8.22%
$\varphi\gamma$	DV	141.92	192.86	199.95	102.50	147.79	156.62
	RVV	27.68%	37.62%	39.00%	19.99%	28.83%	30.55%
	ECD	4.36	4.51	13.86	4.53	6.01	13.96
	RM	8.50%	8.80%	27.02%	8.83%	11.72%	27.22%
	DE	0.31	0.20	0.25	0.39	0.30	0.30
	REV	6.80%	4.47%	5.49%	8.67%	6.59%	6.63%
$\frac{1}{2}(\gamma+\varphi)$	DV	145.51	197.09	203.02	118.68	168.40	184.68
	RVV	28.38%	38.44%	39.60%	23.15%	32.85%	36.02%
	ECD	4.37	4.38	13.87	4.02	4.62	13.64
	RM	8.52%	8.53%	27.04%	7.83%	9.01%	26.60%
	DE	0.29	0.17	0.23	0.32	0.18	0.23
	REV	6.50%	3.80%	5.02%	7.07%	4.10%	5.17%
$\varphi\gamma\varphi$	DV	141.92	192.86	199.95	102.86	148.18	156.67
	RVV	27.68%	37.62%	39.00%	20.06%	28.90%	30.56%
	ECD	4.36	4.51	13.86	4.53	6.01	13.96
	RM	8.50%	8.80%	27.02%	8.84%	11.72%	27.23%
	DE	0.31	0.20	0.25	0.40	0.30	0.30
	REV	6.80%	4.47%	5.49%	8.69%	6.61%	6.62%

Tableau IV.3 : Evaluation statistique du contenu spatial des images multispectrales synthétisées (Alger)

Nous remarquons que l'utilisation d'un élément structurant de taille 3×3 tend à faire diminuer la différence des variances pour tous les filtres et à faire augmenter les valeurs de l'écart type de la différence et de la différence de l'entropie. Ceci explique que l'application du processus de la fusion en utilisant l'élément structurant 3×3 injecte beaucoup plus de détails comparativement à l'application d'un élément structurant de taille 1×2. Nous

remarquons que l'ouverture donne de meilleures valeurs des paramètres statistiques. Cependant, elle n'injecte que les structures dont les niveaux de gris sont élevés dans le voisinage.

### b) Comparaison des hautes fréquences

Un autre moyen d'évaluer l'aspect spatial dans le processus de fusion [ZHO 98] est de calculer le coefficient de corrélation entre les hautes fréquences de l'image panchromatique et celles de l'image multispectrale synthétisée à 10m. Les hautes fréquences sont extraites des deux images en utilisant un filtre passe haut.

- le filtre passe haut est donné par :

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

Les coefficients de corrélation que nous avons obtenus sont donnés par le tableau suivant. Les paramètres de la pyramide sont une interpolation par décimation moyenne, une interpolation bilinéaire, un élément structurant linéaire  $1 \times 2$  et différents filtres.

	Filtre passe haut		
Ouverture	0.921	0.909	0.847
$\varphi\gamma$	<b>0.927</b>	<b>0.917</b>	<b>0.857</b>
$\frac{1}{2}(\gamma+\varphi)$	0.920	0.908	0.846
$\varphi\gamma\varphi$	<b>0.927</b>	<b>0.917</b>	<b>0.857</b>

Tableau IV.4 : Coefficients de corrélation 'hautes fréquences de l'image panchromatique et de l'image multispectrale synthétisée'

Nous remarquons que l'utilisation des filtres  $\varphi\gamma$  et  $\varphi\gamma\varphi$  semble donner un meilleur coefficient de corrélation pour les trois bandes. Nous remarquons aussi que l'utilisation du filtre Laplacien permet de mieux évaluer les détails injectés. Nous pouvons constater que les hautes fréquences de l'image panchromatique sont similaires à ceux des images synthétisées.

Les résultats obtenus pour les bandes XS1 et XS2 sont comparables. Alors que les résultats concernant la bande XS3, celle-ci étant en dehors de la bande panchromatique selon la figure ci-dessous, explique bien l'écart des valeurs des paramètres statistiques.

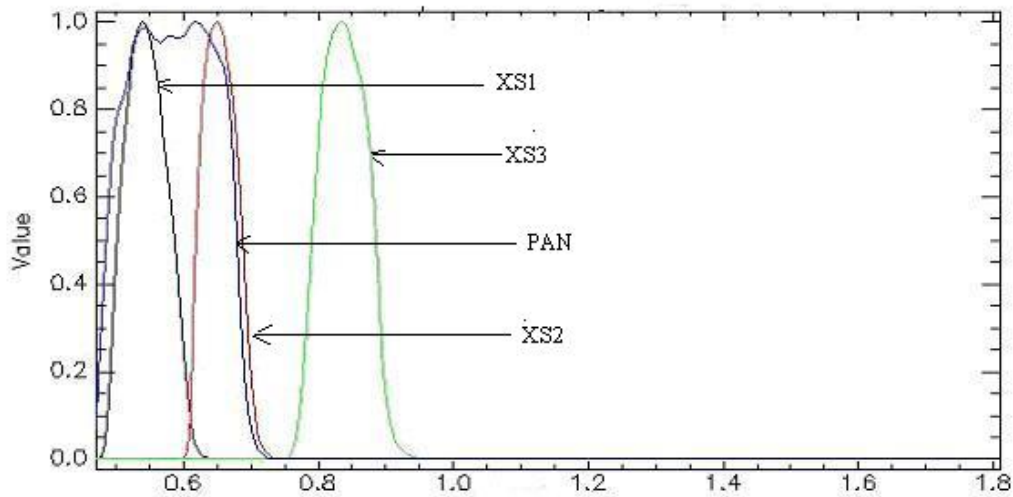
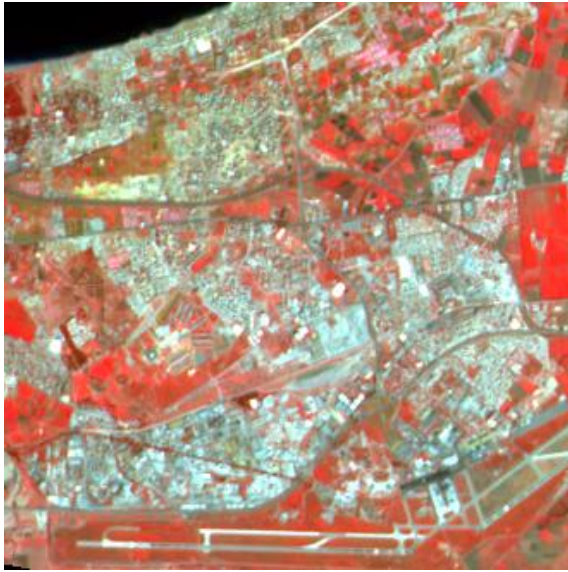


Figure IV.7 : Bandes spectrales du satellite SPOT

### 4.3. Evaluation spectrale

Les images multispectrales synthétisées à haute résolution spatiale en utilisant plusieurs filtres morphologiques sont sous-échantillonnées à 20 m et comparées aux images originales pour l'évaluation du contenu spectral.

La composition colorée des images multispectrales originales et les images synthétisées et rééchantillonnées à 10m sont représentées par les figures suivantes.



*Composition colorée des images originales*



*Composition colorée des images synthétisées  
avec un filtre fermeture suivie d'une  
ouverture*



*Zoom d'une région de la composition colorée  
des images originales*



*Zoom d'une région de la composition colorée  
des images synthétisées avec un filtre  
fermeture suivie d'une ouverture*

*Figure IV.8 : Composition colorée des images synthétisées et originales à 20m (Alger)*

De plus, les valeurs des paramètres statistiques calculées entre les images multispectrales originales XS et les images synthétisées et rééchantillonnées à 20m en utilisant différents types de filtres morphologiques sont données par le tableau IV.5.

Avec :

RMV : Relativement à la moyenne vraie,

CC : Coefficient de corrélation.

Paramètres statistiques		XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*
		Elément structurant linéaire 1×2			Elément structurant carré 3×3		
Ouverture	Biais	-0.63	-0.82	-0.62	-2.81	-3.69	-2.78
	RMV	-0.85%	-1.32%	-0.95%	-3.82%	-5.92%	-4.23%
	CC	0.95	0.91	0.93	0.94	0.91	0.91
$\varphi\gamma$	Biais	-0.30	-0.40	-0.30	0.37	0.48	0.36
	RMV	-0.42%	-0.65%	-0.46%	0.50%	0.78%	0.55%
	CC	0.94	0.91	0.93	0.91	0.86	0.89
$\frac{1}{2}(\gamma+\varphi)$	Biais	-0.05	-0.06	-0.05	-0.33	-0.43%	-0.32
	RMV	-0.06%	-0.10%	-0.07%	-0.44%	-0.69%	-0.49%
	CC	0.94	0.91	0.93	0.94	0.90	0.92
$\varphi\gamma\varphi$	Biais	-0.30	-0.40	-0.30	0.39	0.52	0.39
	RMV	-0.42%	-0.65%	-0.46%	0.53%	0.83%	0.59%
	CC	0.94	0.91	0.93	0.91	0.86	0.89

Tableau IV.5 : Evaluation statistique du contenu spectral des images multispectrales synthétisées (Alger)

Nous remarquons que pour la même taille de l'élément structurant, le filtre demi somme de l'ouverture et de la fermeture présente les meilleures valeurs du biais et du coefficient de corrélation comparativement aux autres filtres. Nous remarquons aussi que lorsque la taille de l'élément structurant augmente, les valeurs des paramètres statistiques deviennent importantes.

Les paramètres statistiques présentés ci-dessus permettent une évaluation de la conservation spectrale de chaque bande. Cependant les paramètres RASE et ERGAS permettent une évaluation globale pour les trois bandes multispectrales.

Les valeurs du paramètre RASE en exploitant les 03 canaux synthétisées et en utilisant les différents filtres sont données par la figure suivante :

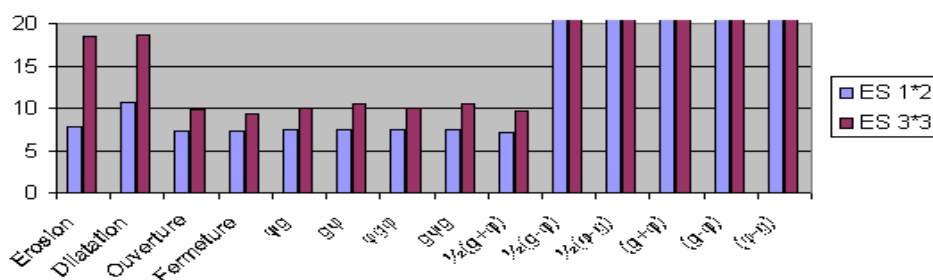


Figure IV.9 : Paramètre RASE des images multispectrales originales et synthétisées

Nous remarquons que l'utilisation de la combinaison de l'ouverture et de la fermeture ainsi que la demi somme des deux donne des valeurs du paramètre RASE relativement encourageantes et la plus petite valeur est donnée pour la demi somme de l'ouverture et de la fermeture qui est de (7.155). Nous remarquons aussi que lorsque la taille de l'élément structurant augmente, la valeur du paramètre RASE pour le même filtre devient moins significative.

Les valeurs du paramètre ERGAS en utilisant les différents filtres sont données par la figure suivante :

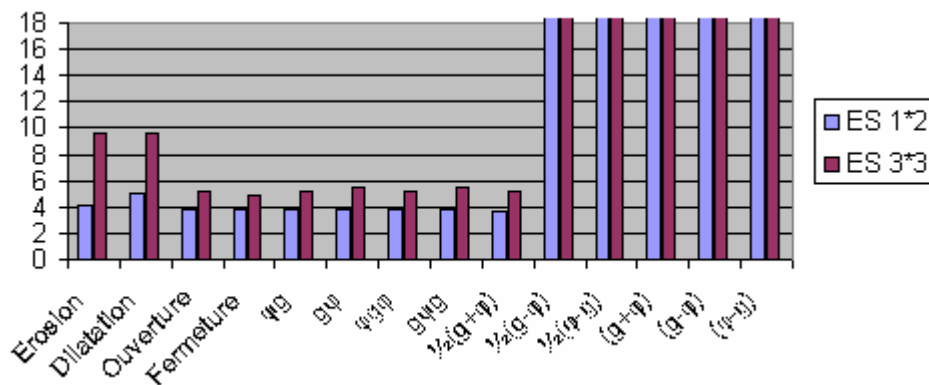


Figure IV.10 : Paramètre ERGAS des images multispectrales originales et synthétisées

Nous remarquons que les valeurs de l'ERGAS, les plus proches de 3 (bonnes valeurs d'après [WAL 02]) sont obtenues en utilisant la combinaison de la demi somme de l'ouverture et de la fermeture (3.716). Nous remarquons aussi que la valeur de l'ERGAS augmente pour le même filtre lorsque la taille de l'élément structurant augmente.

#### 4.4. Signatures spectrales

Nous présentons les signatures spectrales de trois (03) thèmes pour valider l'aspect spectral. Ces dernières sont prises sur la composition colorée de l'image originale et des images synthétisées avec différents types de filtres en utilisant une interpolation par décimation moyenne dans la décomposition et une interpolation bilinéaire dans la recombinaison.

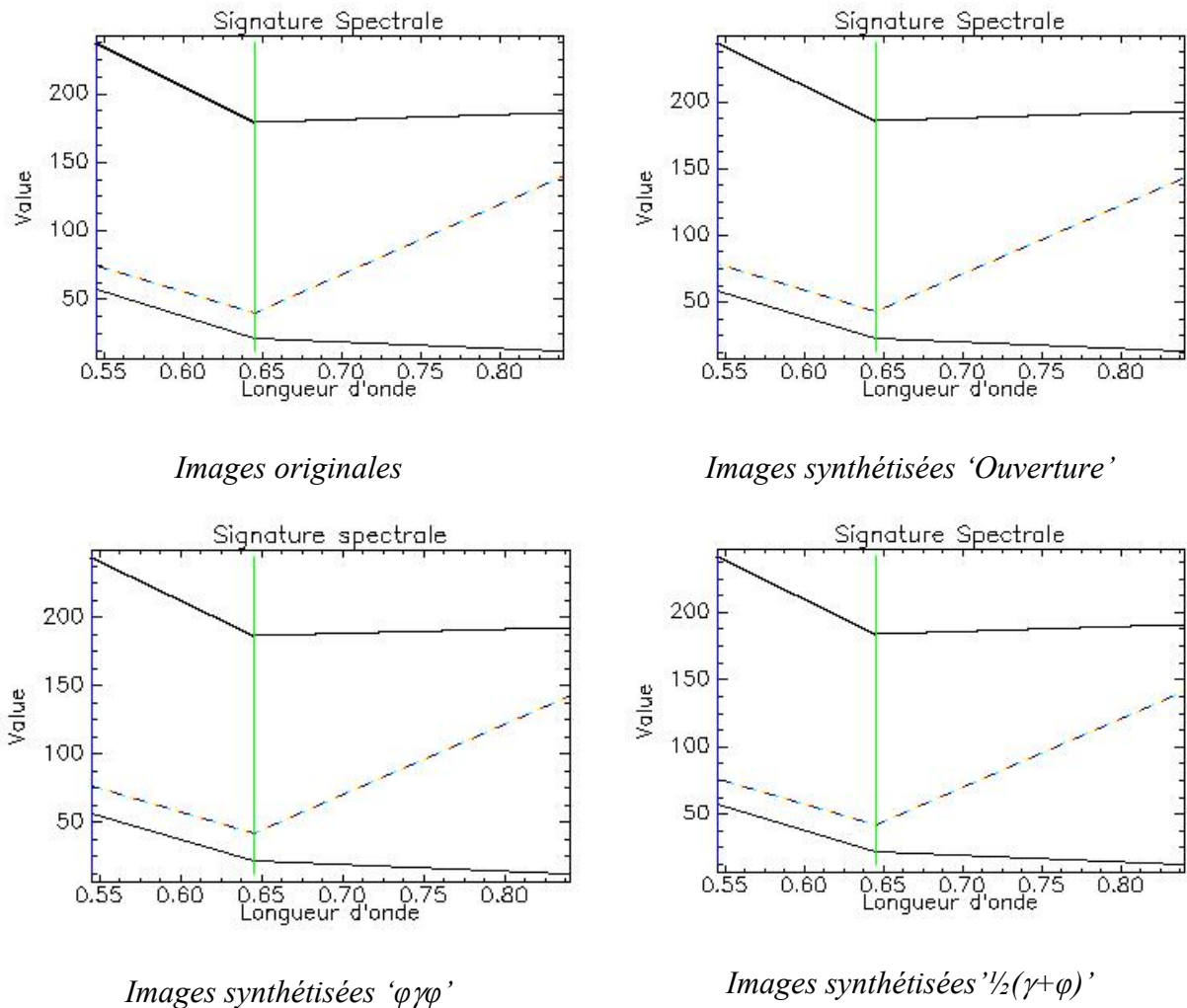


Figure IV.11 : Signatures spectrales de trois thèmes

L'utilisation des signatures spectrales permet de constater que la combinaison des filtres ouverture et fermeture ainsi que la demi somme de l'ouverture et de la fermeture conservent l'information spectrale.

Après plusieurs tests, effectués sur les images d'Alger, en exploitant les différents filtres que nous avons mis en œuvre, nous remarquons du point de vue évaluation spatiale et spectrale, que l'utilisation des filtres  $\gamma\phi$ ,  $\phi\gamma$ ,  $\gamma\phi\gamma$ ,  $\phi\gamma\phi$  et  $1/2(\phi+\gamma)$  permet de synthétiser des images multispectrales à haute résolution spatiale dans lesquelles, on retrouve les détails de l'images panchromatique avec des valeurs de paramètres statistiques encourageantes. Le filtre demi somme de l'ouverture et fermeture semble donner les meilleurs résultats sur les plans spatial et spectral.

Alors que les images synthétisées avec les filtres  $(\phi+\gamma)$ ,  $(\gamma-\phi)$ ,  $1/2(\gamma-\phi)$ ,  $(\phi-\gamma)$  et  $1/2(\phi-\gamma)$  sont de mauvaise qualité. Ceci est dû au fait que les filtres, bien qu'ils soient à

base des combinaisons des filtres morphologiques ils ne répondent pas aux caractéristiques des filtres passe-bas.

Dans la section suivante, nous présentons quelques modifications que nous avons apportées sur la méthode que nous avons développée.

## 5. CONTRIBUTIONS

Dans le but d'améliorer les résultats de la fusion ainsi que la valeur du paramètre ERGAS, nous avons gardé le principe de base de la méthode de fusion par la pyramide morphologique et nous avons introduit quelques modifications. Ces améliorations sont les suivantes :

- utilisation d'un filtre médian,
- modélisation des images de détails.

### 5.1. Evaluation des résultats 'Filtre médian'

Etant donné que les filtres non linéaires de base de la morphologie mathématique sont la dilation et l'érosion. Ceux-ci consistent à remplacer la valeur du pixel central dans un voisinage par la valeur minimale ou maximale. Pour cela, nous avons exploité cette idée pour implémenter le filtre médian qui est aussi non linéaire et permet de remplacer la valeur traitée dans un voisinage par la médiane. Nous proposons de synthétiser des images multispectrales à haute résolution en utilisant le filtre médian tout en gardant le principe de la pyramide morphologique.

Pour cela, nous exploitons les paramètres suivants :

- filtre médian de taille  $3 \times 3$ ,
- interpolation par décimation moyenne,
- interpolation bilinéaire.

L'évaluation des résultats de la fusion se fait comme suit :

- évaluation de l'information spatiale,
- évaluation de l'information spectrale.

#### 5.1.1. Apport de l'information spatiale

L'évaluation statistique de l'information spatiale des images synthétisées est donnée dans le tableau suivant :

Paramètres statistiques	PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*
Différence des variances Relativement à la variance vraie	179.77 35.07%	221.42 43.19%	217.61 42.45%
Ecart type Relativement à la moyenne	5.06 9.87%	5.65 11.03%	14.36 28.00%
Différence de l'entropie Relativement à l'entropie vraie	0.44 9.70%	0.46 10.06%	0.46 10.18%

Tableau IV.6 : Evaluation spatiale des images synthétisées 'filtre médian'

La comparaison des valeurs du tableau IV.6 et celles obtenues avec les filtres morphologiques, nous permet de constater une augmentation des valeurs statistiques. Ceci explique que l'utilisation du filtre médian introduit moins l'information spatiale.

### 5.1.2. Apport de l'information spectrale

Les paramètres statistiques présentés dans le tableau IV.7 permettent une évaluation de la conservation de l'information spectrale.

Paramètres statistiques	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*
Biais Relativement à la moyenne vraie	-0.42 -0.57%	-0.55 -0.88%	-0.41 -0.63%
Coefficient de corrélation	0.95	0.92	0.94
RASE	6.75		
ERGAS	3.50		

Tableau IV.7 : Evaluation spectrale des images synthétisées en utilisant un filtre médian

Nous remarquons que le processus de fusion développé en remplaçant les filtres morphologiques par le filtre médian améliore les valeurs du coefficient de corrélation, le RASE et l'ERGAS comparativement au filtre demi somme de l'ouverture et de la fermeture qui donne les meilleurs résultats.

### 5.2. Evaluation des résultats de la fusion "Normalisation des détails"

Nous proposons de multiplier les détails par un facteur de compensation comme illustré dans la figure IV.12.

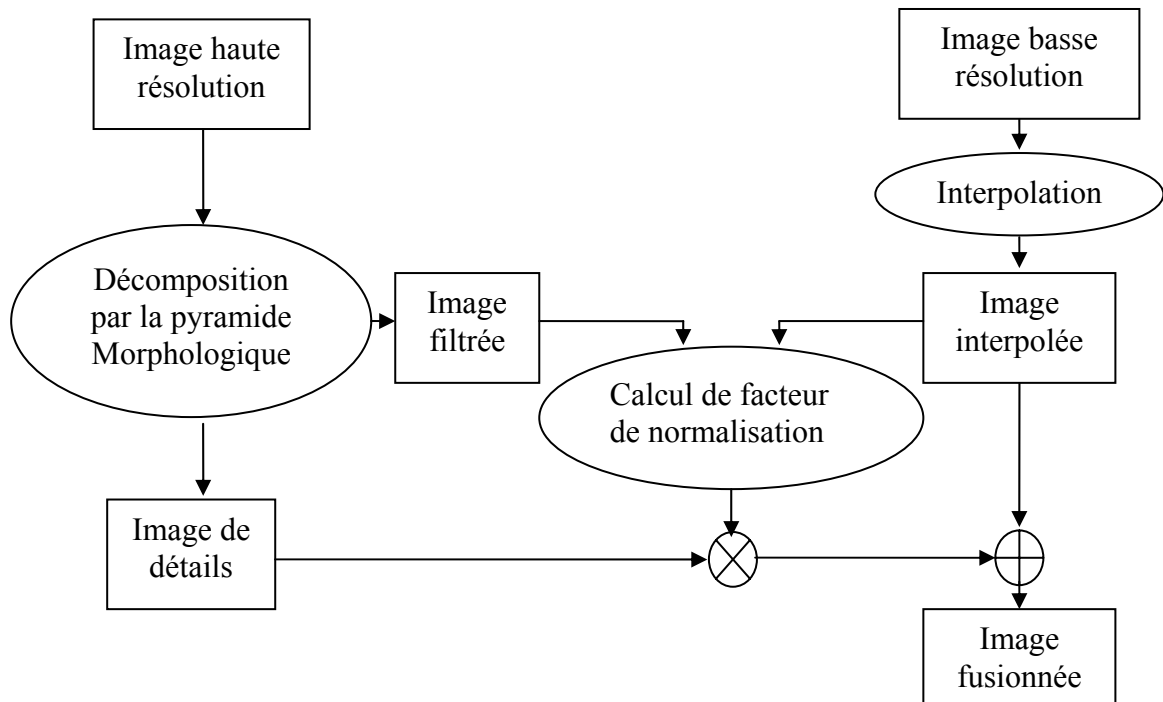


Figure IV.12 : Principe de la fusion par la pyramide morphologique avec modélisation des détails

Cette normalisation des détails est due au fait que les images à fusionner ne présentent pas les mêmes caractéristiques spectrales. Les étapes à suivre pour synthétiser des images multispectrales à la résolution de l'image panchromatique sont comme suit :

- décomposer l'image haute résolution (panchromatique) afin de calculer l'image filtrée et l'image de détails,
- interpoler l'image multispectrale à la résolution de l'image panchromatique,
- calculer le facteur (A) de compensation entre l'image filtrée et l'image multispectrale interpolée,
- multiplier l'image de détails par le facteur de compensation,
- Recomposer l'image multispectrale en injectant les détails calculés.

Pour cela, nous proposons deux modèles et le facteur A est calculé par les relations suivantes :

### Facteur 1

C'est un modèle qui met en jeu les moyennes des images.

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{moy}(I_{XS}(m, n))}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{moy}(I_F(m, n))}} \quad (\text{IV.11})$$

Où :

$I_{XS}$  : Image multispectrale interpolée à la taille de l'image panchromatique,

$I_F$  : Image panchromatique filtrée par un filtre morphologique.

Ce facteur est défini comme étant le rapport de la somme des moyennes, calculées sur des fenêtres carrées de dimension  $(2n+1) \times (2n+1)$  de l'image multispectrale interpolée et l'image panchromatique par un filtre morphologique.

### Facteur 2

C'est un modèle qui exploite les variances des images.

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{var}(I_{XS}(m, n))}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \text{var}(I_F(m, n))}} \quad (\text{IV.12})$$

Ce facteur est défini comme étant le rapport de la somme des variances, calculées sur des fenêtres carrées de dimension  $(2n+1) \times (2n+1)$  de l'image multispectrale interpolée et de l'image panchromatique par un filtre morphologique.

Nous appliquons les deux facteurs de normalisation que nous avons proposés et l'évaluation des résultats est présentée ci-dessous.

#### 5.2.1. Apport de l'information spatiale "facteur 1"

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons l'évaluation spatiale des images synthétisées avec l'utilisation du facteur 1.

Paramètres statistiques	PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*	PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*
	Élément structurant 1×2			Élément structurant 3×3		
Différence des variances Relativement à la variance vraie	117.23 22.87%	201.59 39.32%	188.26 36.72%	81.84 15.96%	173.88 33.92%	165.197 32.22%
Ecart type Relativement à la moyenne	4.55 8.88%	4.23 8.24%	13.84 26.98%	4.27 8.33%	4.44 8.66%	13.60 26.53%
Différence de l'entropie Relativement à la entropie vraie	0.31 6.88%	0.17 3.90%	0.22 4.91%	0.33 7.21%	0.19 4.15%	0.25 5.57%

Tableau IV.8 : Paramètres statistiques de l'image panchromatique et des images multispectrales synthétisées avec le facteur 1

Nous constatons que la multiplication des détails par un facteur de compensation 'modèle 1' tend à réduire les valeurs du paramètre différence des variances et à augmenter les valeurs des autres paramètres statistiques. Ceci explique que ce modèle introduit moins l'information spatiale.

### 5.2.2. Apport de l'information spectrale "facteur 1"

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons l'évaluation spectrale des images synthétisées avec l'utilisation du Facteur 1.

Paramètres statistiques	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*
	Elément structurant 1×2			Elément structurant 3×3		
Biais Relativement à la moyenne vraie	-0.061 -0.08%	-0.064 -0.10%	-0.05 -0.87%	-0.39 -0.54%	-0.42 -0.67%	-0.37 -0.57%
Coefficient de corrélation	0.93	0.921	0.923	0.922	0.91	0.908
RASE	7.54			8.52		
ERGAS	3.92			4.43		

Tableau IV.9 : Paramètres statistiques des images multispectrales originales et synthétisées avec le facteur 1

Nous remarquons que la normalisation de l'image de détails par le facteur de compensation conduit à réduire la valeur du coefficient de corrélation et d'augmenter les valeurs des paramètres biais, RASE et ERGAS. Ceci veut dire que le facteur de normalisation ne permet pas de conserver l'information spectrale.

### 5.2.3. Apport de l'information spatiale "facteur 2"

La composition colorée des images synthétisées à haute résolution spatiale de 10m est présentée sur la figure IV.13.

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons l'évaluation spatiale des images synthétisées avec l'utilisation du facteur 2.

Paramètres statistiques	Pan/XS1*	Pan/XS2*	Pan/XS3*	Pan/XS1*	Pan/XS2*	Pan/XS3*
	Elément structurant 1×2			Elément structurant 3×3		
Différence des variances Relativement à la variance vraie	198.82 38.78%	263.20 51.34	247.39 48.26%	169.71 33.10%	247.15 48.21%	235.74 45.99%
Ecart type Relativement à la moyenne	4.60 8.98%	3.67 7.15%	14.28 27.84%	4.10 8.00%	3.06 5.97%	14.03 27.35%
Différence de l'entropie Relativement à la entropie vraie	0.26 5.82%	0.28% 6.20%	0.31 6.88%	0.30 6.56%	0.256 5.57%	0.27 6.01%

Tableau IV.10 : Paramètres statistiques des images panchromatique et multispectrales synthétisées avec le facteur 2

Nous pouvons noter que la multiplication de l'image de détails par un facteur calculé à travers le 'facteur 2' réduit l'information spatiale introduite dans les trois bandes.

#### 5.2.4. Apport de l'information spectrale "facteur 2"

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons l'évaluation spectrale des images synthétisées avec l'utilisation du facteur 2.

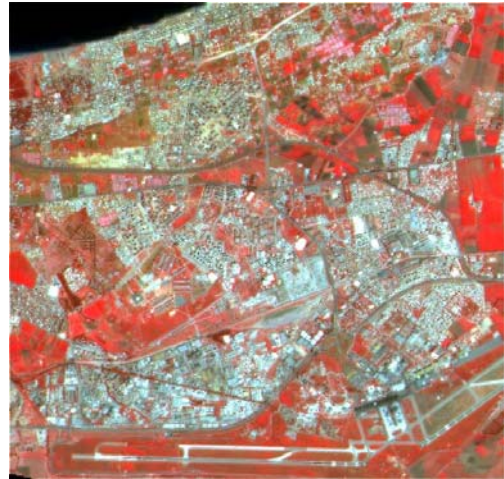
Paramètres statistiques	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*	XS1/XS1*	XS2/XS2*	XS3/XS3*
	Elément structurant 1×2			Elément structurant 3×3		
Biais Relativement à la moyenne vraie	-0.025 -0.034%	-0.022 -0.036%	-0.01 -0.028%	-0.21 -0.29%	-0.19 -0.306	-0.15 -0.24
Coefficient de corrélation	0.98	0.98	0.99	0.97	0.97	0.98
RASE	<b>2.75</b>			4.03		
ERGAS	<b>1.50</b>			2.20		

Tableau IV.11 : paramètres statistiques des images multispectrales originales et synthétisées avec le facteur 2

Nous remarquons que le facteur 2 augmente considérablement l'apport de l'information spectrale dans les trois bandes ainsi qu'une amélioration des valeurs des paramètres RASE et ERGAS.



*Image panchromatique*



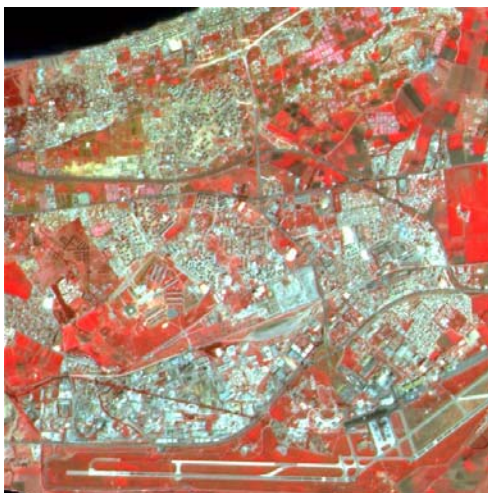
*Composition colorée des images synthétisées  
'filtre médian'*



*Zoom d'une région de l'image  
Panchromatique*



*Zoom d'une région de la composition colorée  
des images synthétisées 'filtre médian'*



*Composition colorée des images synthétisées  
'facteur 2'*



*Zoom d'une région de la composition colorée  
des images synthétisées 'facteur 2'*

*Figure IV.13 : Image panchromatique et composition colorée des images synthétisées à 10m  
'filtre médian et facteur 2' (Alger)*

## 6. COMPARAISON DES FILTRES

Avant de comparer les résultats, nous exploitons la méthode HPF pour synthétiser des images multispectrales à haute résolution spatiale.

Etant donné que le filtre morphologique permet d'extraire les hautes fréquences de l'image haute résolution spatiale, nous avons aussi utilisé le filtre passe haut, vu que son principe est quasiment le même que celui que nous avons développé dans la pyramide morphologique.

La méthode de fusion par le filtre HPF consiste aussi à extraire les hautes fréquences de l'image haute résolution et de les injecter dans l'image basse résolution (Voir chapitre I).

L'apport de l'information spatiale est exprimé par les paramètres statistiques du tableau suivant.

Paramètres statistiques	PAN/XS1*	PAN/XS2*	PAN/XS3*
Différence des variances	-1610.21	-2013.16	-1390.01
Relativement à la variance vraie	-3.14%	-3.92%	-2.71%
Ecart type	20.83	38.78	23.08
Relativement à la moyenne	40.62%	75.60%	44.99%
Différence de l'entropie	0.80	0.78	0.75
Relativement à l'entropie vraie	17.38%	16.98%	16.36%

Tableau IV.12 : Evaluation spatiale des images synthétisées 'méthode HPF'

Nous remarquons que les résultats obtenus par la pyramide morphologique sont meilleurs comparativement à ceux obtenus par la méthode HPF.

L'évaluation spectrale des images multispectrales synthétisées à haute résolution spatiale par la méthode HPF est présentée dans le tableau IV.13.

Paramètre statistique	XS1/XS*1	XS2/XS2*	XS3/XS3*
Biais	0.058	0.077	0.058
Relativement à la moyenne vraie	0.08%	0.12%	0.08%
Coefficient de corrélation	0.54	0.44	0.42
RASE	47.49		
ERGAS	24.67		

Tableau IV.13 : Evaluation spectrale des images synthétisées 'méthode HPF'

Comparativement aux résultats de la pyramide morphologique, nous constatons que les valeurs du biais des images synthétisées avec la méthode HPF sont faibles, alors que le coefficient de corrélation est moins bon. Les valeurs des paramètres RASE et ERGAS sont très importants par rapport aux valeurs obtenues avec la pyramide morphologique.

Nous présentons les valeurs du paramètre ERGAS obtenues avec les différents filtres et modèles utilisés.

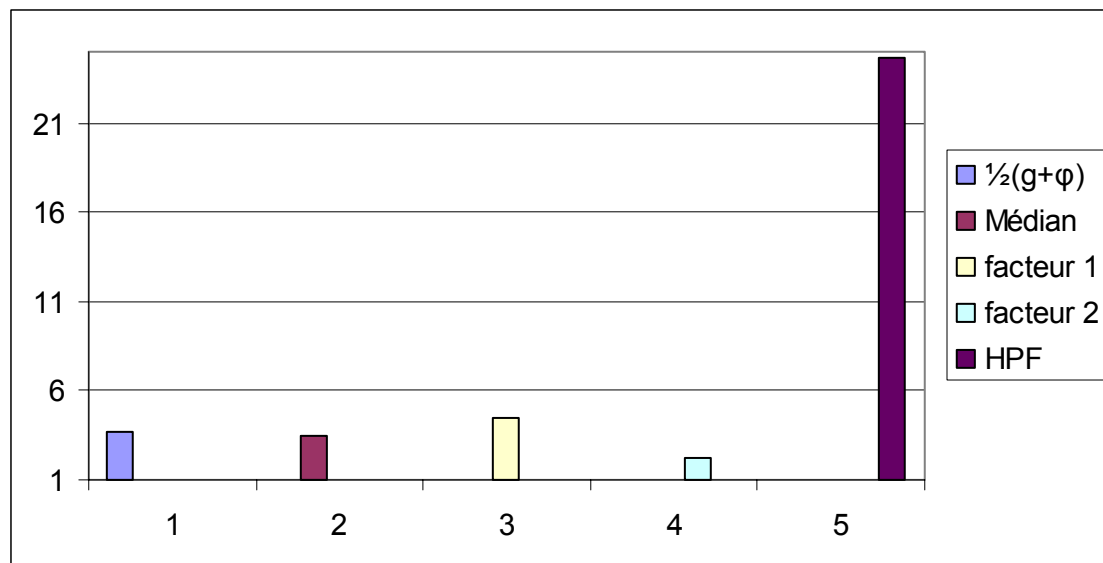


Figure IV.14 : Comparaison des filtres par le paramètre "ERGAS"

Nous pouvons donc dire que la pyramide morphologique permet de synthétiser des images multispectrales à la résolution de l'image panchromatique. Cette méthode possède l'avantage d'injecter l'information spatiale nécessaire et de conserver le mieux possible l'information spectrale. Nous constatons que le facteur de modélisation 2 permet d'améliorer les résultats et ce dernier donne une valeur minimale de l'ERGAS de 1.507.

En conclusion, toutes les méthodes développées ont fait l'objet d'une conception d'un logiciel nommé FPPM (Fusion par la Pyramide Morphologique) qui a été réalisé en utilisant le langage IDL (Interactive Data Language) sous environnement ENVI version 5.5.

Le logiciel est présenté par la fenêtre principale (Figure IV.15). Une interface multifenêtres avec un système de menu très simple donnant accès à toutes les fonctions.



Figure IV.15 : Fenêtre principale du logiciel

## 7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné le principe de la fusion par la pyramide morphologique, en donnant les différents paramètres utilisés pour extraire les détails de

l'image panchromatique et pour synthétiser l'image multispectrale à haute résolution spectrale. Nous avons aussi donné d'une manière générale la démarche suivie pour évaluer les résultats de la fusion ainsi que les paramètres utilisés.

Puis, nous avons évalué les résultats obtenus avec différents paramètres. Nous avons constaté que les paramètres qui donnent les meilleurs résultats sont :

- Un filtre demi somme de l'ouverture et de la fermeture et un élément structurant linéaire  $1 \times 2$ ,
- Une interpolation par décimation moyenne,
- Une interpolation bilinéaire et cubique.

Nous avons proposé plusieurs modifications en normalisant les détails injectés dans l'image basse résolution. Nous avons comparé les résultats de la pyramide morphologique avec d'autres filtres et finalement, nous avons comparé les résultats obtenus en remplaçant les filtres morphologiques par le filtre médian.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de la fusion des images satellitaires consiste à mettre à profit la haute résolution spatiale de l'image panchromatique pour générer des images multispectrales de haute résolution spatiale. Le choix d'une méthode de fusion dépend principalement de la contrainte d'une meilleure préservation des propriétés spectrales.

Pour cela, notre travail a consisté en l'étude et la mise en œuvre d'une méthode de fusion basée sur la pyramide morphologique en utilisant une image à haute résolution spatiale et d'une image multispectrale à basse résolution d'une même scène.

L'objectif est donc de synthétiser des images multispectrales à haute résolution spatiale qui permettent une meilleure interprétation thématique. Le travail effectué a comporté quatre parties essentielles :

✓ La première partie a consisté à implémenter les opérateurs de base de la morphologie mathématique (érosion et dilatation), les filtres ouverture et fermeture, les combinaisons de ces filtres  $\phi\gamma$ ,  $\gamma\phi$ ,  $\phi\gamma\phi$ ,  $\gamma\phi\gamma$ ,  $\gamma+\phi$ ,  $(\gamma-\phi)$ ,  $\frac{1}{2}(\gamma-\phi)$ ,  $(\phi-\gamma)$ ,  $\frac{1}{2}(\phi-\gamma)$  et  $\frac{1}{2}(\gamma+\phi)$ . Ces filtres ont été mis en œuvre avec différentes formes, tailles et origines de l'élément structurant.

✓ La seconde partie a porté sur l'étude de la pyramide morphologique et sa réversibilité pour l'exploiter dans le processus de la fusion.

La décomposition a été étudiée en fonction des paramètres suivants, à savoir :

- pas et algorithmes de sous échantillonnage,
- pas et algorithmes d'interpolation,
- taille, forme et origine de l'élément structurant,
- plusieurs types de filtre.

La recombinaison a été étudiée en fonction du pas et algorithmes d'interpolation.

✓ Dans la troisième partie, nous avons étudié et implémenté le processus de fusion par la pyramide morphologique avec les différents paramètres. Dans le cadre de notre travail, ces méthodes ont été évaluées sur une scène d'image satellitaire couvrant la région EST d'Alger.

✓ Les images résultats obtenues sont évaluées dans la dernière partie. Nous avons validé les résultats de la méthode mise en oeuvre de deux manières différentes :

- évaluation du contenu spatial,
- évaluation du contenu spectral,

La méthode de la fusion d'image par la pyramide morphologique que nous avons mise en oeuvre permet d'obtenir des images satellitaires dont l'information spectrale est conservée quand nous introduisons de l'information spatiale. En effet, la fusion par cette méthode permet une bonne extraction des formes, des transitions et des contours des objets ainsi qu'une fusion d'images dont le rapport des résolutions n'est pas dyadique. Un autre avantage de la fusion par la pyramide morphologique est de séparer à chaque niveau les structures des objets en fonction de leurs réflectances par rapport au voisinage. La taille de l'élément structurant inférieure au rapport des résolutions entre les images haute et basse résolution, nous donne la possibilité de récupérer les détails propres de la première image. Mais l'inconvénient de cette méthode, est qu'elle dépend de plusieurs paramètres, donc différentes combinaisons et l'évaluation des résultats est une tâche difficile.

Les résultats ont été comparés à la méthode HPF et le filtre demi somme de l'ouverture et de la fermeture a donné les meilleurs résultats. Ils sont encourageants et méritent d'être améliorés en implémentant d'autres algorithmes de fusion et tests sur différents types d'images.

Dans le cadre du travail réalisé, nous prévoyons une suite dans le domaine de la fusion par une étude comparative avec les méthodes issues des algorithmes pyramidaux telles que les ondelettes associées à l'analyse multirésolution et l'application sur des images dont le rapport des résolutions n'est pas dyadique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AIA 02] **B. Aiazzi, S. Alparone, S. Baronti, V. Cappelini, R. Carla, L. Mrtelli**, “Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis”, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No.10, 2002, pp. 2300 – 2312.
- [AIA 04] **B. Aiazzi, S. Baronti, M. selva**, “Pan-sharpening of QuickBird multi-spectral images with spectral distortion minimisation”, *Remote Sensing in Transition*, Goossens (ed) (c) 2004 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 007 2, 2004, pp 229 – 235.
- [ACT 00] **S T. Acton, D. P. Mukherjee**, “Scale space classification using area morphology”, *IEEE Transactions on Image processing*, Vol. 9, No. 4, 2000, pp 623 – 635.
- [ABA 03] **M. J. Abásolo, F. J. Perales**, “Wavelet Analysis for a New Multiresolution Model for Large-Scale Textured Terrains”, *Journal of WSCG*, Vol.11, No.1, ISSN, 2003, pp 1213 – 6972.
- [ADE 84] **E. H. Adelson, C. H. Anderson, J. R. Bergen, P. J. Burt, J. M. Ogden**, “Pyramid method in image processing”, *RCA Engineer*, Vol. 29, No. 6, 1984, pp 33 – 41.
- [BUR 83] **P. J. Burt, E. H. Adelson**, “A Multiresolution Spline With Application to Image Mosaics”, in *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 2, No. 4, 1983, pp 217 – 236.
- [CHI 01] **Y. Chibani**, “Méthode et algorithmes de fusion d’images satellitaires dédiées à l’amélioration de l’interprétation”, Thèse de Doctorat d’état, Faculté d’Electronique et d’Informatique, Université USTHB, Alger 2001, 169 p.
- [CHI 03] **Y. Chibani, A. Houacine**, “Redundant versus orthogonal wavelet decomposition for multisensor image fusion”, *Pattern Recognition*, Vol. 36, No 4, 2003, pp 879 – 887.
- [COS 85] **M. Coster, J. L. Chermant**, “Précis d’analyse d’image”, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1985, 512 p.

- [COS 01] **M. Coster, J. L. Chermant**, “Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, 2001, pp 133 – 151.
- [DEB 88] **F. Debaine, C. Mering, Y. Poncet**, “Traitements d’image spatiale appliqués à la recherche archéologique : mise en évidence de réseaux en Inde du Nord”, *Cah. Sci. Hum.*, Vol. 24, No. 3, 1988, pp 417 – 426.
- [DRO 05] **M. Van Droogenbroeck, M. Buckley**, “Morphological erosions and openings: Fast algorithms based on Anchors”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, draft version, 2005, 35 p.
- [FAN 01] **A. Fanelli, A. Leo, M. Ferri**, “Remote sensing images data fusion: a wavelet transform approach for urban analysis”, *IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas*, 2001, pp 112 – 116.
- [FLO 01] **G. Flouzat, O. Amram, F. Laporterie, S. Cherchali**, “Multiresolution analysis and reconstruction by a morphological pyramid in the remote sensing of terrestrial surfaces”, *Signal Processing*, Vol. 81, No. 10, 2001, pp 2171 – 2185.
- [GAR 05] **A. Garzelli, F. Nencini**, “Interband structure modeling for Pan-sharpening of very high-resolution multispectral images”, *International Journal on Information Fusion*, Elsevier, Vol. 6, No. 3, 2005, pp 213 – 224.
- [GEN 98] **R. Gens, Z. Vekerdy and C. Pohl**, “Image and data fusion – Concept and implementation of a multimedia tutorial”, *Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, France, Vol. 28, No. 30, 1998, pp 217 – 222.
- [GOU 00] **J. Goutsias, H. J. A. M. Heijmans**, “Nonlinear Multiresolution Signal Decomposition Schemes—Part I: Morphological Pyramids”, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, No. 11, 2000, pp 1862 – 1876
- [HAD 04] **A. Haddad, O Benkherouf**, “Implémentation des méthodes de fusion pour l’amélioration de la résolution spatiale”, *Mémoire de Projet de Fin d’Etudes*, Faculté d’Electronique et d’Informatique, USTHB, 2004, 70 p.
- [HEI 00] **H. J. A. M. Heijmans, J. Goutsias**, “Nonlinear multiresolution signal decomposition schemes—part II : morphological wavelets”, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, No. 11, 2000, pp 1897 – 1913.
- [HEI 92] **H. J. Heijmans**, “Mathematical morphology: as a tool for shape description”, Paper Presented at the Workshop “Sharpe in Picture”, Driebergen, the Netherlands, 1992, 24 p.
- [HEI 95] **H J. Heijmans**, “Composing morphological filters”. Department of Operations Research, Statistics, and System Theory BS-R9504, 1995, 21 p.
- [HIL 02] **P. Hill, N. Canagarajah, D. Bull**, “Image fusion using complex wavelets”, *BMVC*, 2002, pp 487 – 496.

- [KEM 05] **A. Kemmouche**, "Analyse morphologique et cartographique macrotexturale des objets dans les images satellitaires : application à l'étude du couvert végétal dans les zones semi-arides et du bâti dans le milieu urbain", Thèse de Doctorat d'état, Faculté d'Electronique et d'Informatique, Université USTHB, 2005, 157p.
- [LAP 00] **F. Lapoterie, O. Amram, G. Flouzat, E. Pilich. M. Gay**, "Data fusion thanks to an improved morphological pyramid approach: comparison loop on simulated images and application to SPOT 4 data", In: IGARSS, Honolulu, Hawaii, 2000.
- [LAP 01] **F. Lapoterie, G. Flouzat, O. Amram**, "Mathematical morphology multi-level analysis of trees patterns in savannas", IEEE In: IGARSS, Sydney, Australia, 2001.
- [LAP 02] **F. Lapoterie**, "Représentations hiérarchiques d'images avec des pyramides morphologiques. Application à l'analyse et à la fusion spatio-temporelle de données en observation de la terre", Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, 2002, 180 p.
- [LAP 03] **F. Lapoterie, G. Flouzat**, "Fusion de données multirésolution et multi temporelle par la pyramide morphologique. application a la fusion spot 4 HRVIR/végétation", Bulletin SFPT, No 169, 2003, pp 64 - 72
- [LAP 05] **F. Lapoterie-Déjean, G. Flouzat, E. Lopez-Ornelas**, "Fusion temporelle multi-résolution de séries d'images haute et basse résolutions par pyramide morphologique", Télédétection, Vol. 5, No. 1-2-3, pp 245 – 260.
- [LAN 03] **J. C. Laneri**, "Fusion d'images d'observation de la terre" Rapport de stage technique ESIEA troisième année, Ecole des mines de paris, 78 p.
- [LI 94] **H. Li, B. S. Manjunath, S. K. Mitra**, "Multi-Sensor Image Fusion using the Wavelet Transform", International Conference Image Processing, pp 51 – 55.
- [LI 02] **S. Li, J. T. Kwok and Y. Wang**, "Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images", Information Fusion, Vol. 3, 2002, pp 17–23.
- [LI 05] **S. Li, J. Shawe-Taylor**, "Comparison and fusion of multiresolution features for texture classification", Pattern Recognition Letters, Vol. 26, 2005, pp 633 – 638.
- [LIU 00] **J. G. LIU**, "Smoothing Filter-based Intensity Modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details", International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No. 18, 2000, pp 3461 – 3472.
- [MAL 88] **S. G. Mallat**, "A theory for multiresolution signal decomposition the wavelet representation", Comm. Pure Appl. Math, 41, 1988, pp 674-693.
- [MAN 94] **M. Mangolini**, "Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en télédétection et photo- interprétation", Thèse de Doctorat en

- Sciences de l'Ingénieur, l'Université de Nice- Sophia Antipolis, 1994, France, 125 p.
- [MAR 86] **P. Maragos, R. Schafer**, "Applications of morphological filtering to image analysis and processing", ICASSP 86, TOKYO, 1986, pp 2067 – 2070.
- [MAR 88] **P. Maragos**, "Morphology-Based symbolic image modeling, multi-scale nonlinear smoothing, and pattern spectrum", In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern. Recognition, Ann Arbor, 1988, pp 766 – 773.
- [MAT 94] **G.K.Matsopoulos, S.Marshall, J.N.H. Brunt**, "Multiresolution morphological fusion of MR and CT images of the human brain", IEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing, Vol. 141, No. 3, 1994, pp 137-142.
- [MEE 90] **P. Meer, C. A. Sher, A. Rosenfeld**, "The chain pyramid: hierarchical contour processing", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 4, 1990, pp 363 – 376.
- [MUK 01] **S. Mukhopadhyay, B. Chanda**, "Fusion of 2D grayscale images using multiscale morphology", Pattern Recognition, Vol. 34, No. 10, 2001, pp. 1939 – 1949.
- [MUK 02] **S. Mukhopadhyay, B. Chanda**, "Hue Preserving Color Image Enhancement using Multi-scale Morphology", Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing, 2002, pp 179 - 184.
- [NUN 99] **J. Nunez, X. Otazu, O. Fors, A. Pardes, V. Palà et R.Arbiol** "Multiresolution- based image fusion with additive wavelet decomposition" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 3, 1999, pp 1204-1211.
- [OGD 85] **J. M. Ogden, E. H. Adelson, J. R. Bergen, P. J. Burt**, "Pyramid-based computer graphics", RCA Engineer, Vol. 30, No. 5, 1985, pp 4 – 15.
- [OUA 03] **N. Ouarab, M. Achir, N. Khettal, Y. Smara**, "Spatial Enhancement of Satellite Using Data Fusion Algorithms in the Wavelet Domain", URBAN 2001 Workshop, Roma, Italy, 2001.
- [PET 95] **R. A. Peters II**, "A new algorithm for image noise reduction using mathematical morphology", IEEE Transactions on Image Processing Vol. 4, No. 5, May 1995, pp 554 – 568.
- [PIE 02] **G. Piella, H. Heijmans**, "Multiresolution image fusion guided by a multimodal segmentation", Proceedings Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, Ghent, Belgium, 2002.
- [PET 03] **V. S. Petrovic, C. S. Xydeas**, "Sensor noise effects on signal-level image fusion performance", International Journal of Information Fusion, Vol. 4, 2003, pp 167–183.

- [POH 98] **C. Pohl, and J. L. Van Genderen**, ‘‘Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications’’, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 5, 1998, pp 823 – 854.
- [POH 99] **C. Pohl**, ‘‘Tools and methods for fusion of images of different spatial resolution’’, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32, part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June, 1999, pp 76 – 82.
- [PUI 04] **A. Puissant, C. Weber, A. Serradj and T. Ranchin**, ‘‘Fusion of Quickbird MS and Pan data for urban studies’’, *Remote Sensing in Transition*, 2004, pp 77- 83.
- [RAN 93] **T. Ranchin**, ‘‘Applications de la transformée en ondelettes et de l’analyse multirésolution au traitement des images de télédétection’’, Thèse de Doctorat en Sciences de l’Ingénieur, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1993, France, 110 p.
- [RAN 03] **T. Ranchin, B. Aiazzi, L. Alparone, S. Barontib, L. Wald**, ‘‘Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes’’, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, 2003, pp 4 – 18.
- [ROE 01] **J. B.T.M. Roerdink**, ‘‘Multiresolution maximum intensity volume rendering by morphological adjunction pyramids’’, Institute for Mathematics and Computing Science University of Groningen, 2001, 24 p.
- [SERA 01] **N, Serafini**, ‘‘Implantation d’une librairie de morphologie mathématique sur un processeur DSP’’, Thèse de Doctorat, Ecole d’Ingénieurs de Genève HES, 2001, 110 p.
- [SER 82] **J. Serra**, ‘‘Image analyse and Mathematical Morphology’’, Volume 1, Academic press LONDON, 1982.
- [SER 99] **J. Serra**, ‘‘Set connections and discrete filtering’’, Centre de Morphologie Mathématique, Ecole de Mines de Paris, 1999, 16 p
- [SHI 05] **W. Shi, C.Q. Zhu, Y. Tian, J. Nichol**, ‘‘Wavelet-based image fusion and quality assessment’’, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 6, 2005, pp 241 – 251.
- [SMA 98] **Y. Smara**, ‘‘Contribution au système LATIS évaluation de correspondance terrain-image classifiée et intégration d’images multisources optiques et radar’’, Thèse de Doctorat d’Etat, Institut d’Electronique, Université de l’USTHB, 1998.
- [WAL 02] **L. Wald**, ‘‘Data fusion definitions and architectures, fusion of images of different spatial resolution’’, Ecole des Mines de Paris, ISBN : 2-911762-38-x, 2002, 198 p.
- [WAL 03] **L. Wald, T. Ranchin**, ‘‘The ARSIS Concept in Image Fusion: an Answer to Users Needs’’, *IEEE Information Fusion ISIF*, 2003, pp 168 – 173.

- [WAL 99] **L. Wald**, “Some terms of reference in data fusion”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No 3, 1999, pp. 1190 – 1193.
- [WAN 05] **Z. Wang, D. Ziou, C.Armenakis, D. Li, Q. Li**, “A comparative analysis of image fusion methods”, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 6, 2005, pp 1391 – 1402.
- [YOC 95] **D. A.Yocky**, , “Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform”, Journal of Optical Society of America A, Vol. 12, No. 9, 1995, pp.1834-1841
- [YOU 02] **N. Young, A. N. Evans**, “Psycho-visually tuned area-morphology tools for improved image compression”, Signal and Image Processing Group, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, 2002, pp 185-195.
- [ZHA 05] **Y. Zhang, G. Hong**, “An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images”, Information Fusion, 6, 2005, pp 225 – 234.
- [ZHO 98] **J. Zhou, D. L. Civco, J. A. Silander**, “A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data”, International Journal Remote Sensing, Vol. 19, No. 4, 1998, pp 743 – 757.