Etude de l'hypothèse d'extrapolation du bilan de qualité

Des distances et bilans de qualité ont été recommandés pour la démarche de l'évaluation de la qualité des produits de fusion dans le chapitre précédent. Ce chapitre est consacré à la vérification de l'hypothèse d'extrapolation du bilan de qualité (BQ). Nous rappelons que cette hypothèse concerne la vérification de la propriété de synthèse. Comme aucune référence n'est disponible à la haute résolution spatiale pour comparer les produits de fusion, on suggère de se placer à une échelle de plus faible résolution. L'hypothèse d'extrapolation consiste à admettre que le BQ établi à *res1* est assez proche, voire moins bon que celui qui aurait pu être établi à la haute résolution *res0*, si le capteur MS considéré avait été conçu pour proposer la haute résolution spatiale. Or nous avons vu que, en théorie, cette hypothèse n'est pas vérifiée à coup sûr, mais qu'elle l'est parfois. En fait, on peut se poser les questions suivantes :

- Est-ce que cette hypothèse est souvent vérifiée ?
- Quel est son domaine de validité ?
- Est-il possible de prédire, à coup sûr, les cas pour lesquels l'hypothèse est ou non valide ?

Ce chapitre se structure de la manière suivante : une première partie 3.1 est consacrée à la description de la démarche suivie pour l'étude. La partie 3.2 liste les images et extraits sur lesquels nous avons procédé à l'étude empirique. Ensuite, la partie 3.3 indique les bilans de qualité choisis pour cette étude. Le paragraphe 3.4 présente des exemples de résultats obtenus pour deux extraits de paysage complètement différents en terme de signature spectrale et variabilité spatiale. Les résultats font l'objet de la partie 3.5 en proposant une approche progressive dans la vérification de l'hypothèse proposée. Leur interprétation est donnée dans la partie 3.6 qui offre des explications quant à l'origine de la vérification ou non de l'hypothèse.

3.1 Démarche suivie

Pour vérifier le protocole, l'idéal serait de posséder un ensemble MS fusionné B^* et de référence B, à basse résolution *res1* (bilan de qualité entre B_1 et B_1^*) et à haute résolution spatiale *res0* (entre B_0 et B_0^*). Mais dans la réalité, cet ensemble B_0 n'existe pas. Pour observer l'évolution du BQ avec les échelles, nous avons été contraints de déplacer le problème dans les échelles, et de comparer les bilans aux résolutions *res1* et *res2*, et quand nous en avions la possibilité, entre des résolutions encore plus grossières (*res2* et *res3*, *res3* et *res4*).

Le déplacement du problème dans les échelles a nécessité le développement d'une méthode capable de synthétiser des images de référence à plusieurs résolutions pour les mêmes ensembles *A* et *B* placés en entrée, d'y appliquer ensuite une méthode de fusion et enfin de délivrer des BQ aux diverses échelles. L'outil mathématique qui nous permet d'atteindre des résolutions plus grossières en simulant des images de plus basse résolution spatiale est l'analyse multirésolution (Mallat 1989). A partir des résolutions initiales des images des ensembles *A* et *B*, on procède à une décomposition pyramidale hiérarchique de l'information en créant des versions de plus en plus grossières d'une image, appelées approximations successives, auxquelles on applique la méthode de fusion choisie. Ainsi, à chaque image fusionnée correspond une référence issue de cette décomposition hiérarchique. L'algorithme de décomposition hiérarchique de l'information que nous avons utilisé est la transformée en ondelettes « à trous » *ATWT*, acronyme pour *A Trous Wavelet Transform* (Dutilleux 1989). Cette transformée a pour caractéristique d'être dyadique, non-décimée et non-orthogonale.

L'objet de l'étude relative à ce chapitre n'est pas la méthode de fusion en elle-même, mais l'évolution du bilan de qualité dans les échelles pour une méthode de fusion donnée. Nous avons arbitrairement choisi la méthode *ATWT-M2* du concept *ARSIS* (Ranchin et Wald 2000). Cette méthode est dite 'globale' puisque la transformation des données extraites de l'ensemble *A* puis injectées dans *B* s'applique sur toute l'image, indépendamment de la région considérée. Elle est détaillée dans le chapitre 5 consacré à la description du concept et à ses principales implantations.

3.2 Images sélectionnées pour l'étude

Nous avons construit une base de données d'images offrant une bonne variabilité des paysages, aussi bien en terme de contenu spectral, que spatial (rivières, forêts, montagnes, cultures différentes, bâtiments, routes, ...). Cet échantillon de la population des images n'est certes pas suffisant pour servir de référence à toutes les tâches qui peuvent être accomplies en fusion d'images multispectrales, mais nous avons tenté de couvrir les paysages complexes ou moins complexes usuellement rencontrés par les utilisateurs d'images satellites.

Notre jeu de données comporte quatorze images satellites pour le ratio 2 et quinze pour le ratio 4. Les images satellites que nous avons sélectionnées ont été préalablement corrigées géométriquement. Les extraits sélectionnés sont de taille de 512 par 512 pixels. En ce qui concerne le ratio 2, nous avons travaillé avec des images provenant des satellites SPOT2 et SPOT5. Pour SPOT2, Il s'agit d'un extrait couvrant la ville de Barcelone avec une résolution spatiale de 20 m en mode multispectrale. Nous avons synthétisé des produits de fusion aux résolutions spatiales de 20, 40 et 80 m.

Du satellite SPOT5, nous disposions de deux sites géographiques : Marseille et Toulouse. La résolution spatiale des modalités multispectrales est de 10 m et nous avons été en mesure de produire des images fusionnées à 10, 20 et 40 m. Les extraits pour ces deux sites sont :

- Marseille : deux extraits qui couvrent le centre ville, deux des collines faiblement urbanisées, un des îles Frioul situées au large de Marseille, un des champs en périphérie de la ville d'Aubagne et enfin un dernier extrait en pleine mer Méditerranée,
- Toulouse : deux extraits du centre ville, deux extraits de parcelles agricoles dans la banlieue toulousaine, deux de quartiers résidentiels et une dernière qui permet de visualiser des entrepôts en zone industrielle.

Pour le ratio 4, nous avons travaillé sur de l'imagerie provenant des satellites Quickbird et Ikonos. Voici une synthèse des extraits sélectionnés. Pour le satellite Ikonos :

- Hasselt (Belgique) : deux extraits du centre ville, deux extraits comprenant des champs et des forêts et enfin un dernier extrait comprenant quelques habitations avec des jardins et quelques routes,
- Fredericton (Canada) : un extrait en centre ville, un extrait en pleine rivière

Les extraits Quickbird concernent les villes suivantes :

- Madrid (Espagne) : deux extraits du centre ville, n comprenant une forêt, un qui montre à la fois quelques arbres et des herbes rases et 1 extrait qui comprend quelques habitations avec leurs jardins et quelques chemins,
- Fredericton (Canada) : un extrait en centre ville, un extrait montrant des champs d'exploitation agricole et un extrait d'un échangeur autoroutier.

La modalité HR du satellite SPOT5 propose une résolution spatiale de 5 m. Ainsi, comme la résolution des modalités multispectrales est de 10 m, ce satellite offre l'opportunité de travailler avec un rapport de résolution de 2. Il existe une autre modalité de très haute résolution spatiale, appelée THR, est échantillonnée à 2.5 m. Mais la résolution spatiale annoncée de THR n'est qu'une approximation. En effet, cette modalité est particulière puisqu'elle est synthétisée à partir de

l'information provenant de deux barrettes CCD correspondant à une résolution de 5 m, placées l'une sous l'autre et décalées d'un demi-pixel. Par ailleurs, avant d'être mise à disposition, l'image THR a subi un échantillonnage en quinconce suivi d'un rééchantillonnage (Latry 2003). Les extraits du satellite SPOT5 auraient pu constituer autant de cas pour le ratio 4. Cependant, à cause de ces prétraitements, étant donné que l'image THR finale n'a pas été directement acquise par un capteur comme le sont les autres images de notre base de données image, nous avons préféré omettre dans la présentation l'ensemble de ces résultats. Notons toutefois que les tests avec ces images ne contredisent pas les résultats obtenus pour les autres images de ratio 4. La figure 3.1 suivante montre la diversité des images de notre étude.



Figure 3.1 : diversité des images. a) satellite Ikonos – banlieue de Hasselt en Belgique, b) parcelles agricoles de la même zone géographique, c) échangeur autoroutier, Fredericton au Canada, Quickbird et d) centre ville de Marseille, SPOT5. Copyright respectifs pour Ikonos, Quickbird, et SPOT5 : Space Imaging 2002, Digital Globe 2002, CNES 2000.

3.3 Choix des bilans de qualité (BQ)

Nous distinguons trois catégories de bilans : les BQ monomodaux, multimodaux, et enfin globaux. Pour les BQ monomodaux, nous avons décidé d'étudier quatre BQ : le coefficient de corrélation (*cc*), l'indice *Q*, la réunion entre l'écart-type relatif et le coefficient de corrélation (*cc*), et enfin la réunion entre les deux précédents et la différence des variances relatives à la variance de la référence (*diffVarRel*, *oRel*, *cc*). Notons que dans le chapitre précédent, nous avions aussi recommandé d'utiliser comme distance monomodale le biais. Cependant, comme la méthode de fusion utilisée pour les tests repose sur l'injection de coefficient d'ondelettes dont le premier moment (la moyenne) est nulle, nous avons exclu cette distance qui n'est pas discriminante dans ce cas.

En ce qui concerne les BQ multimodaux, nous avons sélectionné l'indice *SAM* ainsi que les deux distances relatives au vecteur résultant, c'est-à-dire le vecteur résultant moyen sur tout l'image et son écart-type ($M(V_{res})$, $\sigma(V_{res})$). Ce choix est en accord avec les démonstrations mathématiques rapportées au chapitre précédent à savoir que l'indice *SAM* utilisé seul est incomplet et nécessite d'être complété soit par des informations sur les statistiques de la différence des normes, soit sur celles du vecteur résultant que nous avons privilégiées ici.

Et enfin, pour les bilans globaux, nous utilisons l'*ERGAS* déjà exploité par la littérature, la réunion d'une distance monomodale et d'une distance multimodale (*cc*, *SAM*) et enfin le BQ que nous recommandons qui est la réunion entre : *diffVarRel*, σRel , *cc*, *ERGAS*, *SAM*, *M*(*V_{res}*), σ (*V_{res}*). Néanmoins, il manque le coefficient de corrélation entre les hautes fréquences extraites des images fusionnées et de référence car, au moment de cette étude, cette distance n'était pas implantée dans notre plate-forme qualité. Le tableau 3.1 synthétise les différents BQ choisis pour l'analyse.

Indice du BQ	Type de bilan	Distances préconisées
1	monomodal	[<i>cc</i>]
2	monomodal	[<i>Q</i>]
3	monomodal	[σ <i>Rel</i> , <i>cc</i>]
4	monomodal	$[diffVarRel, \sigma Rel, cc]$
5	multimodal	[SAM]
6	multimodal	$[M(Vres), \sigma(Vres)]$
7	global	[ERGAS]
8	global	[<i>cc</i> , <i>SAM</i>]
9	global	[diffVarRel, σ Rel, cc, ERGAS, SAM, M(Vres), σ (Vres)]

Tableau 3.1 : les bilans de qualité considérés pour la validation de l'hypothèse d'extrapolation.

La vérification de l'hypothèse consiste tout d'abord, à effectuer un bilan de qualité monomodal et multimodal par échelle (ou résolution) fusionnée, puis à étudier l'écart existant entre les bilans établis entre deux résolutions successives.

3.4 Exemples de résultats obtenus par la plate-forme qualité

La figure 3.2 correspond à l'extrait d'une image dans la région périphérique de la ville de Marseille, ville située au sud de la France. Le type de paysage que couvre cette image est une zone aride composée de collines recouvertes de garrigue, végétation typique des régions méditerranéennes. Cette image est la modalité Pan du satellite SPOT5, qui présente une résolution spatiale de 5 m au sol. La figure est associée aux tableaux 3.2 et 3.3 qui correspondent aux statistiques mono- et multimodales spécifiées dans la partie précédente. Ces statistiques sont délivrées pour les résolutions spatiales *res l* = 10 m, *res 2* = 20 m, *res 3* = 40 m et enfin *res 4* = 80 m. Pour cette image, nous avions 4 modalités MS disponibles : la modalité MIR pour Moyen InfraRouge, la modalité PIR pour Proche InfraRouge, et les modalités rouge et verte.



Figure 3.2 : image SPOT5, composition colorée PIR, rouge et verte – collines de la région marseillaise – Copyright CNES 2002.

Statisti monome	ques odales	res1 = 10 m	res2 = 20 m	res3 = 40 m	res4 = 80 m
	MIR	-0.5	-0.7	1.8	-0.4
diffUanD al	PIR	-0.9	-0.1	-0.2	-0.2
aijjvarkei	rouge	-1.0	-0.1	0.0	-0.2
	vert	0.5	1.8	3.5	0.8
	MIR	2.7	1.7	1.5	1.9
-D -1	PIR	1.5	0.5	0.5	0.7
σκει	rouge	2.1	0.8	0.7	1.0
	vert	2.9	3.0	3.3	3.0
	MIR	0.995	0.997	0.998	0.997
	PIR	0.998	1.000	1.000	0.999
CC	rouge	0.997	1.000	1.000	0.999
	vert	0.991	0.988	0.981	0.990
	MIR	0.995	0.997	0.998	0.997
0	PIR	0.998	1.000	1.000	0.999
Ų	rouge	0.997	1.000	1.000	0.999
	vert	0.991	0.988	0.980	0.990

Tableau 3.2 : statistiques monomodales pour l'extrait de la figure 3.2.

Statistiques multimodales	res1 = 10 m	res2 = 20 m	res3 = 40 m	res4 = 80 m
ERGAS	1.17	0.93	0.90	0.94
SAM	0.71	0.78	0.80	0.87
biaisRel(diffNorms)	0.023	0.028	-0.026	-0.074
$\sigma Rel(diffNorms)$	2.0	1.3	1.2	1.1
M(Vres)	2.6	2.2	2.1	2.2
$\sigma(Vres)$	1.9	1.4	1.3	1.3

Tableau 3.3 : statistiques multimodales pour l'extrait de la figure 3.2.

La figure 3.3 est une image acquise au-dessus du centre ville de Madrid. L'image, acquise par la modalité Pan du satellite Quickbird (0.7 m de résolution spatiale), montre un grand nombre de routes et de rues plus étroites qui s'intersectent. Les tableaux 3.4 et 3.5 suivent la même logique que celle des tableaux précédents en montrant les résultats obtenus concernant les statistiques mono- et multimodales pour cette image. La fusion a été appliquée sur trois modalités MS dont les bandes spectrales sont situées dans le visible : rouge, verte et bleue. Les résolutions spatiales de synthèse sont 2.8 m et 11.2 m.



Figure 3.3 : centre ville de Madrid (Espagne), composition colorée rouge, verte et bleue – Quickbird – Copyright Digital Globe 2000.

Statistiques monomodales		res1 = 2.8 m	res2 = 11.2 m
	rouge	-16.8	3.9
diffVarRel	vert	-17.2	-3.1
	bleu	-17.9	5.6
	rouge	5.4	1.3
σRel	vert	5.3	3.2
	bleu	5.0	3.5
сс	rouge	0.984	0.996
	vert	0.970	0.962
	bleu	0.944	0.912
Q	rouge	0.981	0.996
	vert	0.967	0.962
	bleu	0.940	0.912

Tableau 3.4 : statistiques monomodales pour l'extrait de la figure 3.3.

Statistiques multimodales	res1 = 2.8 m	res2 = 11.2 m
ERGAS	1.31	0.73
SAM_{moy}	1.03	0.93
biaisRel(diffNorms)	-0.015	-0.387
$\sigma Rel(diffNorms)$	4.8	2.4
M(Vres)	19.1	10.9
$\sigma(Vres)$	14.9	8.4

Tableau 3.5 : statistiques multimodales pour l'extrait de la figure 3.3.

3.5 Résultats statistiques pour la vérification de l'hypothèse

3.5.1 Une vérification par cas

Nous avons d'abord étudié le cas où les BQ sont identiques ou assez proches aux différentes résolutions, puis le cas où le BQ à haute résolution est meilleur que celui à basse résolution. Ainsi, nous avons quatre cas :

- Cas 1 : les BQ sont identiques.
- Cas 2 : les BQ sont assez proches.
- Cas 3 : le BQ est meilleur à l'échelle la plus fine.
- Cas 4 : soit les BQ sont assez proches ou identiques, soit le BQ est meilleur à l'échelle la plus fine.

Pour chacun de ces cas, nous comptons le nombre d'images favorables.

La proximité entre deux distances a été définie par des critères. Tout d'abord, nous avons admis que deux distances sont identiques à partir du moment où les points reportés sur un graphique sont « visuellement superposés ». Nous avons calculé la distance maximale à partir de laquelle nous considérons que les deux points ne sont plus superposés. Ces valeurs sont rapportées dans la deuxième colonne du tableau 3.6. De la même façon, nous avons défini des seuils pour l'hypothèse « assez proches ». Les résultats sont placés dans la troisième colonne de ce même tableau. Les valeurs idéales sont rappelées pour chacune de ces distances dans la dernière colonne.

Distances	Intervalle de l'hypothèse « identiques »	Intervalle de l'hypothèse « assez proches »	Rappel des valeurs idéales
diffVarRel	+/- 0.3 %	+/- 2.5 %	0
σRel	+/- 0.02 %	+/- 2.5 %	0
сс	+/- 0.002	+/- 0.025	1
Q	+/- 0.002	+/- 0.025	1
ERGAS	+/- 0.05	+/- 0.5	0
SAM	+/- 0.03°	+/- 0.5°	0
biaisRel(diffNorms)	+/- 0.005 %	+/- 0.05 %	0
$\sigma Rel(diffNorms)$	+/- 0.1 %	+/- 2.5 %	0
M(Vres)	+/- 0.2	+/- 2.5	0
$\sigma(Vres)$	+/- 0.1	+/- 2.5	0

Tableau 3.6 : intervalles de validité des distances pour chaque cas de vérification de l'hypothèse.

Exemple : admettons que l'on considère le BQ correspondant au coefficient de corrélation. Nous avons dégradé une image de manière à créer des produits de fusion à *res1* et *res2*. Un coefficient de corrélation *cc* de 0.955 est obtenu à *res2*. Alors, si le coefficient de corrélation appartient à l'intervalle :

- $cc \in [0.953, 0.957] \Rightarrow$ les BQ sont considérés comme identiques,
- $cc \in [0.93, 0.98] \Rightarrow$ les BQ sont considérés comme assez proches,
- $cc \in [0.955, 1] \Rightarrow$ le BQ à *res1* est meilleur que celui à *res2*,
- $cc \in [0.93, 1] \Rightarrow$ l'hypothèse d'extrapolation est vérifiée.

On remarque que l'hypothèse d'extrapolation (cas 4) correspond à la réunion des cas 2 et 3. Ainsi, si le BQ est constitué d'une seule distance, comme le sont les bilans BQ1, BQ2, BQ5 et BQ7, alors le nombre d'images qui vérifie le cas 4 peut se déduire des deux précédents. Soit α l'ensemble des images vérifiant l'hypothèse du cas 2 et β celui du cas 3. Si on définit le nombre d'images pour ces deux cas par leur cardinal card(α) et card(β), alors le cardinal pour le cas 4 correspondant à l'hypothèse d'extrapolation représente la somme des cardinaux à laquelle on a soustrait le cardinal de l'intersection :

card $(\alpha \cup \beta) = card(\alpha) + card(\beta) - card(\alpha \cap \beta)$

Eq. 3.1

3.5.2 Présentation de la forme des résultats

Les résultats sont récapitulés sous forme de tableaux, avec un tableau différent par BQ. Au départ, neuf BQ ont été sélectionnés. Néanmoins, seulement huit tableaux de résultats vont être présentés car le coefficient de corrélation et le coefficient Q ont donné des résultats équivalents avec une différence n'excédant jamais 5 % des images. La redondance des pourcentages ne présentait aucun intérêt pour notre interprétation. La structure générale d'un tableau de résultats est la suivante (tableau 3.7) :

		Ratio 2		Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images				
Cas 1				
Cas 2				
Cas 3				
Cas 4				

Tableau 3.7 : forme du tableau de résultats pour un BQ donné

Les tableaux de résultats comportent deux colonnes principales qui distinguent les images de ratio 2 de celles de ratio 4. Pour le ratio 2, trois sous-colonnes permettent l'étude de l'évolution du BQ entre *res2* et *res1*, entre *res3* et *res2* et entre *res4* et *res3* lorsque nous en avions la possibilité. Pour le ratio 4, une seule colonne nous donne l'évolution du BQ entre *res2* et *res1*. Pour chacune de ces sous-colonnes, nous avons répertorié le nombre total de cas disponibles.

Chaque tableau comporte quatre lignes de résultats qui reprennent les quatre cas de la vérification de l'hypothèse d'extrapolation. Ces cas permettent d'aboutir à la dernière ligne, qui délivre véritablement les résultats concernant notre hypothèse de travail. Le nombre d'images recensé pour chacune des cas est donné en nombre d'images, suivi entre parenthèses du pourcentage par rapport au nombre total d'images.

	Ratio 2			Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	53	53	29	59
Cas 1	19 (36 %)	35 (66 %)	14 (48 %)	8 (14 %)
Cas 2	44 (83 %)	43 (81 %)	25 (86 %)	27 (46 %)
Cas 3	30 (57 %)	49 (92 %)	25 (86 %)	51 (86 %)
Cas 4	50 (94 %)	49 (92 %)	27 (93 %)	59 (100 %)

3.5.3 Résultats pour les BQ monomodaux

Tableau 3.8 : BQ1 = [cc], résultats à peu près équivalents pour BQ2.

		Ratio 2		Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	53	53	29	59
Cas 1	3 (6 %)	15 (28 %)	10 (34 %)	2 (3 %)
Cas 2	41 (77 %)	42 (79 %)	24 (83 %)	22 (37 %)
Cas 3	10 (19 %)	19 (36 %)	20 (69 %)	34 (58 %)
Cas 4	46 (87 %)	48 (91 %)	27 (93 %)	54 (92 %)

Tableau 3.9 : BQ3 = $[\sigma Rel, cc]$

	Ratio 2			Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	53	53	29	59
Cas 1	3 (6 %)	15 (28 %)	3 (10 %)	0 (0 %)
Cas 2	39 (74 %)	42 (79 %)	15 (52 %)	4 (7 %)
Cas 3	10 (19 %)	18 (34 %)	20 (69 %)	34 (58 %)
Cas 4	46 (87 %)	48 (91 %)	26 (90 %)	47 (80 %)

Tableau 3.10 : BQ4 = [*diffVarRel*, σ *Rel*, *cc*]

3.5.4 Résultats pour les BQ multimodaux

	Ratio 2			Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	16	16	9	17
Cas 1	4 (25 %)	4 (25 %)	3 (33 %)	4 (24 %)
Cas 2	14 (88 %)	16 (100 %)	8 (89 %)	11 (65 %)
Cas 3	13 (81 %)	8 (50 %)	5 (56 %)	12 (71 %)
Cas 4	14 (88 %)	16 (100 %)	9 (100 %)	16 (94 %)

Tableau 3.11 : BQ5 = [SAM]

	Ratio 2			Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	16	16	9	17
Cas 1	2 (13 %)	3 (19 %)	4 (44 %)	2 (12 %)
Cas 2	14 (88 %)	16 (100 %)	8 (89 %)	3 (18 %)
Cas 3	6 (38 %)	8 (50 %)	7 (78 %)	7 (41 %)
Cas 4	14 (100 %)	16 (100 %)	9 (100 %)	8 (47 %)

Tableau 3.12 : BQ6 = [$M(Vres), \sigma(Vres)$]

3.5.5 Résultats pour les BQ globaux

		Ratio 2		Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	16	16	9	17
Cas 1	3 (19 %)	3 (19 %)	2 (22 %)	4 (24 %)
Cas 2	11 (69 %)	13 (81 %)	8 (89 %)	10 (59 %)
Cas 3	7 (44 %)	7 (44%)	6 (67 %)	11 (65 %)
Cas 4	11 (69 %)	13 (81 %)	9 (100 %)	15 (88 %)

Tableau 3.13 : BQ7 = [ERGAS]

		Ratio 2		Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	53	53	29	59
Cas 1	5 (9 %)	11 (21 %)	7 (24 %)	4 (7 %)
Cas 2	38 (72 %)	44 (83 %)	24 (83 %)	22 (37 %)
Cas 3	28 (53 %)	24 (45 %)	19 (66 %)	41 (69 %)
Cas 4	48 (91 %)	49 (92 %)	27 (93 %)	57 (97 %)

Tableau 3.14 : BQ8 = [*cc*, *SAM*]

		Ratio 2		Ratio 4
	res2-res1	res3-res2	res4-res3	res2-res1
Nb total d'images	53	53	29	59
Cas 1	0 (0 %)	6 (11 %)	4 (14 %)	0 (0 %)
Cas 2	17 (32 %)	30 (57 %)	14 (48 %)	4 (7 %)
Cas 3	8 (15 %)	15 (28 %)	15 (52 %)	22 (37 %)
Cas 4	35 (66 %)	44 (83 %)	26 (90 %)	28 (47 %)

Tableau 3.15 : BQ9 = [*diffVarRel*, σ *Rel*, *cc*, *ERGAS*, *SAM*, *M*(*Vres*), σ (*Vres*)]

3.6 Description et interprétation des résultats

3.6.1 Grandes tendances

La profusion des résultats a demandé quelques efforts dans leur interprétation. Une des grandes tendances tirée des différents tableaux est que les pourcentages ont tendance à augmenter en avançant dans les cas. En effet, les pourcentages les plus élevés sont situés en dernière ligne des tableaux correspondant au cas 4, c'est-à-dire la vérification de l'hypothèse d'extrapolation. Excepté pour le dernier BQ qui est le plus contraignant, les pourcentages des dernières lignes de tous les tableaux sont supérieurs à 70 %, ce qui signifie qu'une première conclusion de cette étude est que l'hypothèse d'extrapolation est souvent vérifiée.

Une autre conclusion générale est que les valeurs des pourcentages sont très dépendantes du BQ considéré. Plus le BQ contient de distances, plus celui-ci aura tendance à présenter des pourcentages plus faibles.

Pour le ratio 2, les pourcentages ont tendance à augmenter avec les échelles en passant de l'étude à *res2-res1* à *res3-res2*, mais il est très difficile de conclure pour les échelles plus grossières (*res3-res2* à *res4-res3*) où, là encore, les conclusions dépendent fortement du BQ. Cependant, il faut prendre garde à la signification des pourcentages rapportés vis-à-vis du nombre total d'images dans nos conclusions. En effet, lorsque vingt-neuf images sont disponibles, on incrémente de 3 % à chaque fois qu'une image supplémentaire vérifie un cas, alors qu'on n'augmente que d'un ou deux pourcents lorsque le nombre total d'images s'élèvent à cinquante trois.

Une analyse plus fine des résultats nous permet de comprendre le comportement des différents BQ vis-à-vis des images testées et des différents cas de vérification de l'hypothèse.

3.6.2 Description des tableaux de résultats

Chaque cas est rappelé en gras et en italique. Pour faciliter la compréhension, on se base sur la description du BQ correspondant à l'indice *ERGAS* car la littérature a déjà montré l'intérêt de cet indice (Wald 2002). Ensuite, nos conclusions sont élargies avec l'analyse des autres tableaux.

Cas 1 : Les BQ sont identiques

La première ligne, première colonne, de résultats du tableau *ERGAS* montre que trois images sur les seize disponibles délivrent un *ERGAS* à *res2* identique à celui obtenu à *res1*, soit 19 % des images. On observe que le pourcentage d'images est identique à celui entre *res3* et *res2*, et est équivalent à celui de 22 % obtenu entre *res4* et *res3* parce que le nombre total d'images a été divisé de moitié (neuf images). Pour le ratio 4, 24 % des images répondent favorablement à ce premier cas. Cela signifie que, quel que soit le ratio ou la résolution, environ 80 % des images montrent des *ERGAS* qui ne sont pas identiques aux diverses échelles que nous avons synthétisées.

Comme nous l'avons annoncé dans les grandes tendances, les résultats fluctuent fortement en fonction du BQ. Ainsi, même si les résultats pour le cas 1 sont les plus faibles pour chaque tableau, ils peuvent avoir des valeurs moyennes de l'ordre de quelques pourcents pour le BQ9 à 30 % pour la distance *SAM* qui forme le BQ5. Ceci est en accord avec la remarque sur le nombre de distances qui composent les BQ. En effet, le BQ9 contient sept distances, ce qui minimise la probabilité que toutes les distances valident simultanément la même hypothèse. Les BQ1, 5 et 7 ne sont formés que d'une seule distance et sont donc les moins contraignants. Leurs pourcentages pour ce premier cas sont situés entre 20 % et 30 % des images de la base de données.

En ce qui concerne le ratio 2, les pourcentages de la première colonne qui correspondent aux résolutions spatiales les plus fines sont les plus faibles. Cette conclusion est d'ailleurs valable pour pratiquement toutes les lignes de tous les tableaux. Par contre, le pourcentage de la colonne 2 est plus faible ou équivalent à celui de la colonne 3 pour les BQ3, 5, 6, 7 et 8 mais la conclusion est inversée pour les autres BQ.

Pour le cas 1, si nous comparons les résultats obtenus pour les ratios 2 et 4 entre *res2* et *res1*, les pourcentages sont équivalents pour chaque BQ.

Cas 2 : Les BQ sont assez proches

On relâche la première hypothèse en appliquant un intervalle d'acceptabilité plus large autour de chaque distance grâce aux valeurs définies dans le tableau 3.6. La seconde ligne du tableau du BQ contenant la distance *ERGAS* montre un saut important des pourcentages. Des résolutions spatiales les plus fines vers les plus grossières, les valeurs des pourcentages sont de 69 %, 81% et 89 %. Par conséquent, environ trois images sur quatre valident l'hypothèse que les *ERGAS* sont « assez proches » aux différentes échelles étudiées. Le ratio 4 donne une valeur légèrement moins élevée de 59 % des images, mais fait tout de même pencher la balance en faveur de l'hypothèse puisque le pourcentage excède 50 %.

L'amplification des valeurs des pourcentages se généralise aux autres tableaux. Pour le ratio 2, les valeurs des pourcentages des BQ1, 2, 3, 5, 6 et 8 avoisinent ou dépassent 80 %. La troisième colonne du BQ4 est plus faible que les deux autres mais son pourcentage dépasse 50 %. Les valeurs du BQ9 sont plus faibles : un tiers des images sont favorables lorsque la résolution spatiale est élevée, le pourcentage se rapproche des 60 % pour les échelles intermédiaires pour finalement chuter à 48 % à la basse résolution.

Par contre, pour le ratio 4, les valeurs sont moins élevées. Les BQ contenant le plus de distances (BQ4 et BQ9) donnent seulement un pourcentage de 7 %. Les BQ contenant deux distances (BQ3, 6 et 8) ont des pourcentages entre 20 et 40 % pour atteindre et même dépasser les 50 % pour les BQ avec une seule distance.

Cas 3 : le BQ est meilleur à l'échelle plus fine

Il s'agit maintenant de vérifier le nombre d'images qui valident le second aspect de l'hypothèse d'extrapolation. Si on s'appuie sur le tableau de *ERGAS*, le ratio 2 montre des valeurs plus faibles que pour le cas précédent, ce qui n'est pas vérifié pour le ratio 4. Les valeurs sont identiques entre *res2-res1* et *res3-res2* avec une valeur de 44 %, avec un accroissement de la valeur lors de la comparaison entre BQ à *res3-res4* avec un pourcentage de 67 %. En ce qui concerne le ratio 4, les valeurs des pourcentages augmentent en s'approchant de l'hypothèse d'extrapolation, avec pour ce troisième cas, une valeur de 65 %.

Les autres BQ montrent eux aussi un accroissement régulier des pourcentages en ce qui concerne le ratio 4. Tous ces pourcentages dépassent 50 % excepté pour les BQ6 et BQ9, où les pourcentages ne sont qu'à 40 % des images. Pour le ratio 2, les valeurs ont tendance à augmenter en décroissant la résolution. Cette observation est valable pour les BQ3, 4, 5, 6, 7 et 9. Par contre, comme le nombre d'images influence fortement les pourcentages, on peut admettre que les pourcentages des BQ1 et 2 pour *res3-res2* et *res4-res3* sont équivalents. Le BQ8 offre un pourcentage un peu plus élevé à haute résolution, mais on peut conclure que les résultats sont comparables, quel que soit le BQ.

Cas 4 : soit les BQ sont assez proches, soit le BQ est meilleur à l'échelle plus fine

La réunion des 'sous-hypothèses' précédentes (cas 2 et 3) aboutit à l'hypothèse d'extrapolation. Les résultats correspondent aux valeurs des statistiques situées dans la dernière ligne des tableaux pour chaque BQ. Comme la théorie nous l'indique lorsqu'une seule distance constitue le BQ, le cardinal de la réunion de deux ensembles se calcule en ajoutant les cardinaux des deux ensembles qui la composent, sans oublier de soustraire le cardinal de leur intersection. Les pourcentages obtenus ont des valeurs comprises entre la somme des deux pourcentages trouvés pour les deux sous-hypothèses précédentes, soit être égaux à l'un d'entre eux. L'identité avec l'un des pourcentage n'est possible que si l'un des sous-ensembles contient le second. Les résultats des tests témoignent que nous sommes en accord avec la théorie puisque les BQ1, BQ2, BQ5 et BQ7 vérifient ces remarques.

La dernière ligne du tableau *ERGAS* présente des valeurs supérieures ou égales à celles contenues dans leur colonne. On remarque qu'on obtient les mêmes pourcentages aux cas 2 et 4 pour les résolutions *res2-res1* et *res3-res2* du ratio 2. Ces résultats signifient que, dans ces deux situations, le cardinal de l'hypothèse du cas 3 est inclus dans celui du cas 2. Les pourcentages augmentent en diminuant la résolution spatiale pour atteindre 100 % des images pour une comparaison des *ERGAS* entre *res4-res3*. Le pourcentage vaut presque 90 % des images pour le ratio 4, ce qui signifie que pour la plupart des images de la base de données images, l'hypothèse est vérifiée.

Les autres tableaux de résultats confirment l'idée que les pourcentages des dernières lignes majorent ceux de chaque tableau par colonne. En ce qui concerne le ratio 2, les pourcentages sont très élevés et donc plutôt en faveur de l'hypothèse d'extrapolation. Tous les pourcentages atteignent 100 %, excepté pour la haute résolution des BQ7 et 9 où la valeur du pourcentage n'est que de 70 % environ. Plusieurs tableaux présentent des résultats très proches de 100 % des images.

Pour le ratio 4, les résultats sont aussi favorables à l'hypothèse d'extrapolation avec sept BQ sur les neuf présentant un pourcentage supérieur à 80 %. Les résultats sont beaucoup plus mitigés pour le BQ6 qui correspond aux statistiques du vecteur résultant et pour le BQ9 qui correspond à la réunion de toutes les distances où le résultat est à 50 % des images. Pour ces deux BQ, aucune des deux hypothèses, que ce soit l'hypothèse d'extrapolation ou son contraire, n'est privilégiée. On remarque qu'à part pour ces deux cas, les conclusions sur l'hypothèse d'extrapolation ne sont pas sensibles au changement de ratio.

En conclusion, nous pouvons donc affirmer qu'avec les critères que nous nous sommes fixés, l'hypothèse d'extrapolation est souvent vérifiée.

Pour le ratio 4, comme les pourcentages croissent en avançant dans les étapes du protocole, l'hypothèse du BQ meilleur à *res1* qu'à *res2* est plus souvent vérifiée que l'hypothèse « les BQ à ces

deux résolutions sont assez proches ». Cette observation s'inverse en changeant de ratio. En effet, on observe pour le ratio 2 qu'on obtient un nombre d'images plus important qui vérifie cette hypothèse.

Pour la vérification de l'hypothèse d'extrapolation, l'influence de l'intervalle d'acceptabilité des distances est prépondérante. Nous avons choisi arbitrairement les bornes de ces intervalles par l'expérience. On remarque qu'un changement dans les bornes de cet intervalle aura des conséquences importantes sur les pourcentages finaux. Ainsi, si on élargit l'intervalle d'acceptabilité, on augmente d'autant plus le nombre d'images favorables.

Il reste maintenant à identifier les images défavorables afin de finir de cerner le domaine de validité de l'hypothèse d'extrapolation. Ensuite, nous explorons la possibilité des prédire les images qui seraient susceptibles de poser problème et celles qui systématiquement, ne vérifient l'hypothèse. Tout d'abord, nous proposons une analyse critique de notre approche empirique. Ensuite une série d'indices statistiques appliquée à des images en faveur ou non de l'hypothèse, nous a permis d'apporter les premières pierres dans une démarche de prédiction des images défavorables.

3.7 Critique de la démarche de l'étude empirique

3.7.1 Remarque sur la distance Q

Les tableaux correspondant au coefficient de corrélation et à l'indice Q présentent une forte similitude. Or, la distance Q est composée de trois termes, dont celui du coefficient de corrélation. Si les résultats sont redondants, cela signifie que les deux autres composantes de O n'ont que très peu d'influence dans la situation dans laquelle nous nous sommes placé. La complexité de Q ne se justifie pas dans notre cas puisqu'un simple coefficient de corrélation suffisait. La raison de cette proximité est la suivante : hormis le coefficient de corrélation, Q est composé d'un terme basé sur les moyennes et un terme sur les écart-types des images MS de référence et fusionnées. Ces termes valent 1 si ces deux images possèdent la même moyenne et le même écart-type. Le modèle de fusion que nous avons utilisé conserve la moyenne des images d'origine, le terme relatif aux moyennes vaut donc 1. Seul l'autre terme, celui fonction des écart-types, pourrait différencier les deux indices. Cependant, le coefficient de corrélation est lui-même une fonction des écart-types, et la corrélation est ici très élevée puisque sa valeur est supérieure à 0.95. Plus la corrélation est élevée, plus les indices sont proches. En conclusion, lorsque le modèle de fusion ne transforme pas la moyenne des images, et lorsque le coefficient de corrélation est élevé (supérieur à 0.95), alors nous conseillons le recours à un simple coefficient de corrélation au lieu de l'indice Q. Aucun des autres tableaux de résultats ne présente une telle redondance.

3.7.2 Influence de l'algorithme de décomposition multiéchelle

Pour le ratio 2, on remarque que la vérification de l'hypothèse est très fréquemment moins contraignante en remontant dans les échelles. Cette constatation s'explique, au moins partiellement, par le choix de l'algorithme de décomposition multiéchelle. Il s'agit de la transformée en ondelettes 'à trous', qui a pour propriété d'être dyadique, non-orthogonale et non décimée. Elle a pour effet tout d'abord de produire des images qui ont toutes la même taille en termes de nombre de pixels, mais aussi de construire des plans de détails qui présentent des redondances.

Pour synthétiser des images qui servent de référence à des résolutions moindres, les images MS originales ont préalablement été suréchantillonnées pour avoir la même taille que l'image Pan, puis cet algorithme a été appliqué de manière récursive. Ainsi, même les images satellites de référence à *res1* résulte de l'application de cet algorithme. La redondance de l'information produite par l'utilisation de l'ondelette « à trous » se traduit par une corrélation non-nulle entre les détails. De même, les produits fusionnés synthétisés à partir de ces images ont tendance à présenter eux-même des redondances, puisqu'ils sont créés à partir d'images déjà corrélées au départ.

On s'interroge maintenant sur le fait que les images de référence et produits fusionnés semblent être de plus en plus proches en remontant dans les échelles. La figure 3.4 illustre comment la transformée dyadique sépare le spectre fréquentiel des images en deux parties égales à chaque échelle.



Figure 3.4 : spectre d'une image quelconque et résultats successifs de la transformée en ondelettes dyadique. Le spectre de Fourier représenté en fonction des fréquences normalisées est séparée en deux à chaque application de la transformée.

L'image originale (courbe en noire) crée par application d'une transformée en ondelettes, une image d'approximation à *res1* que nous appelons A1 pour 1^{ère} approximation, et résulte aussi en une image de coefficients d'ondelettes O1. Récursivement, les approximations A2 et A3 sont synthétisées de même que leurs plans d'ondelettes associés O2 et O3. Ainsi, pour une distribution fréquentielle uniforme dans l'image originale, la quantité d'information de A1 est moitié moindre que celle de l'image originale et deux fois plus importante que celle contenue dans A2. La transformée en ondelettes a pour propriété de conserver l'énergie à chaque échelle, ce qui se traduit mathématiquement par une variance constante des plans d'ondelettes avec les échelles. En effet, plus on remonte dans les échelles, moins il y a de coefficients d'ondelettes, mais plus ils sont par définition énergétiques, c'est-à-dire que leur valeur est élevée. Grâce à ces remarques, on comprend qu'un algorithme de fusion ait tendance à être moins performant à haute résolution spatiale qu'à des résolutions spatiales plus grossières.

Cette observation est en accord avec les résultats empiriques du ratio 2 où les BQ ont tendance à être de plus en plus proches en remontant dans les échelles. Or nous rappelons que l'hypothèse d'extrapolation concerne l'étude de la proximité entre un BQ à *res1* et ce même BQ à *res0*. Les résultats qui sont les plus proches de ceux que l'on aurait pu obtenir si on avait des références à *res0* sont ceux obtenus entre *res2-res1*, avec toutefois un point noir à souligner : les images à *res1* et *res2* ont toutes subi une étape de suréchantillonnage et plusieurs applications successives de la transformée en ondelettes. Elles ne correspondent pas à ce qu'aurait pu obtenir un capteur à ces deux résolutions spatiales.

3.7.3 Identification des images défavorables

Au vu de la séparation dyadique de l'information dans les échelles, nous avons étudié l'influence de la répartition fréquentielle des images. On s'attend à ce que si les hautes fréquences de l'image Pan sont très énergétiques, alors une grande quantité d'information est injectée au moment de la fusion. On suppose en s'appuyant sur notre expérience que la difficulté de synthèse est essentiellement liée à la distribution spectrale de l'énergie et donc à la complexité de la scène.

Il est aussi important d'introduire la notion d'échelle caractéristique des objets d'une scène. Puissant et Hirsch (2004) ont introduit la notion de Résolution Spatiale Optimale (RSO) qui consiste à considérer qu'il existe une échelle, ou un ensemble relativement étroit d'échelles, qui fournit la 'meilleure' représentation de chaque objet géographique observable. Par exemple, une image d'un centre ville montre des objets différents (bâtiments, routes, immeubles, petites maisons) qui seront plus ou moins visibles ou identifiables en fonction de leur taille par rapport à la résolution spatiale d'acquisition. Si la résolution est supérieure à une dizaine de mètres, alors les bâtiments n'occupent que quelques pixels de l'image et il est difficile de distinguer les grands axes de circulation. Par contre, la ville comprend beaucoup d'objets qui possèdent une taille de quelques mètres, comme les voitures, les arbres des rues, la signalisation, les trottoirs, les fenêtres ... Il existe donc ce que l'on appelle une échelle caractéristique où ces objets vont commencer à être résolus de manière simultanée en augmentant la résolution spatiale. Nous nous attendons à ce qu'existe un saut en quantité d'information entre des images Pan à haute résolution spatiale par rapport à cette même modalité dégradée à la résolution de leurs modalités MS.

3.7.3.1 Distances utilisées pour étayer le discours

Pour l'étude de la complexité géométrique des images, nous avons retenu les distances suivantes :

- l'écart-type local moyen de l'image. Cet écart-type correspond à la moyenne des écart-types locaux ramenés à la moyenne locale. Par 'local', on entend un voisinage centré sur le pixel d'intérêt, fixé à une fenêtre de 5 par 5 pixels pour les résolutions des images auxquelles nous travaillons. La valeur moyenne finale est exprimée en pourcents (*σRelLocal(A0)*),
- ♦ le coefficient de corrélation entre les approximations à *res0* et à *res1* de la décomposition hiérarchique du Pan (*cc(A0, A1)*). Plus ces deux plans *A0* et *A1* sont éloignés, plus la valeur du *ccIntra* sera faible,
- dans la même logique que pour le *ccIntra*, on calcule la différence de variances entre les approximations à *res0* et *res1* de l'image Pan, relative à la variance de l'approximation à *res0* (*diffVarRel(A0, A1)*). La valeur est délivrée en %,
- enfin, l'entropie traduit la quantité d'information présente dans une image ; nous proposons de calculer la différence relative de l'entropie entre les approximations à *res0* et à *res1* du Pan (*diffHrel(A0, A1)*).

3.7.3.2 Images favorables et images défavorables

La figure 3.5 présente des extraits d'images Pan à leur résolution spatiale initiale. Les images b et d sont deux images qui ont largement validé l'hypothèse d'extrapolation et ce quel que soit le BQ utilisé. Au contraire, les images a et c représentent des zones exclusivement urbaines qui ont rejeté l'hypothèse. Les valeurs de plusieurs distances relevées à *res1* étaient bien trop éloignées de celles obtenues à *res2*, et l'hypothèse a été invalidée pour ces deux images avec la plupart des BQ.



Figure 3.5 : modalités Pan. a) SPOT5, Marseille (France) centre ville, b) idem, collines provençales, c) Quickbird Madrid (Espagne) centre ville, d) idem, végétation éparse. Copyright CNES (2000) et Copyright Digital Globe (2000)

Nous avons calculé les distances retenues précédemment sur ces quatre extraits. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.16.

$\sigma RelLocal(A0) = 23 \%$	$\sigma RelLocal(A0) = 9\%$
cc(A0, A1) = 0.91	cc(A0, A1) = 0.98
diffVarRel(A0, A1) = 46%	diffVarRel(A0, A1) = 10%
diffHrel(A0, A1) = 7 %	diffHrel(A0, A1) = 1 %
a)	b)
$\sigma RelLocal(A0) = 13\%$	$\sigma RelLocal(A0) = 6 \%$
cc(A0, A1) = 0.90	cc(A0, A1) = 0.95
diffVarRel(A0, A1) = 41 %	diffVarRel(A0, A1) = 22%
diffHrel(A0, A1) = 1 %	diffHrel(A0, A1) = 2 %
c)	d)

Tableau 3.16 : résultats pour les quatre extraits de la figure 3.5.

On remarque que les différences de variance relative et les écart-types locaux sont beaucoup plus élevés pour les images présentant des centres villes que pour les autres. De même, la corrélation

entre les plans d'approximation à *res0* et *res1* est beaucoup plus élevée pour les images b et d. Par contre, la différence d'entropie relative n'offre pas de différence marquée entre les différentes images.

Nous n'avons pas appliqué ces statistiques à un nombre suffisant d'images pour pouvoir définir un seuil systématique de rejet ou d'acceptabilité d'une image donné vis-à-vis de l'hypothèse d'extrapolation. Par contre, on s'attend à ce qu'une Pan qui présente :

- un écart-type local élevé en moyenne,
- un coefficient de corrélation assez faible entre l'image Pan et son approximation à *res1*,
- et une différence en variance relative élevée entre l'image Pan et son approximation à *res1*,

nous indique que il y a une forte probabilité que l'hypothèse d'extrapolation ne soit pas vérifiée et donc un risque à admettre que le BQ de res0 est proche ou meilleur de celui à res1. Encore une fois, les conclusions sur l'hypothèse d'extrapolation dépendent des bornes que l'on s'est fixées pour affirmer que deux BQ sont « assez proches ».

3.7.3.3 Le cas particulier des images à fort signal sur bruit

La figure 3.6a montre un extrait de SPOT5 d'une zone située en pleine mer Méditerranée au large de Marseille. Les images de ce type rejettent aléatoirement l'hypothèse d'extrapolation. On observe des stries obliques inclinées d'environ 15° par rapport à la direction verticale, qui correspondent aux différences de gain des cellules CCD d'une même barrette. Ce bruit de capteur est un problème connu chez SPOT5 pour les capteurs de type push-broom, qui s'appelle le lignage. Ces stries donnent la direction de déplacement du satellite.



 $\sigma RelLocal(A0) = 3 \%$ cc(A0, A1) = 0.54 diffVarRel(A0, A1) = 54 %diffHrel(A0, A1) = 46 %

b)

Figure 3.6 : image SPOT5 - extrait de la mer Méditerranée, zone près de Marseille. Copyright CNES 2000.

Lorsque l'on visualise l'image entière de la ville de Marseille, ces stries sont invisibles. En accord avec nos remarques sur l'analyse visuelle, l'outil de visualisation a étalé la dynamique de l'image pour permettre de mieux distinguer les détails. La dynamique de cette image codée sur 8 bits est très faible, avec une moyenne de 20,3 et un écart-type de 0.79. Le rapport signal sur bruit est très élevé pour un tel extrait puisque les stries présentent des variations de plus ou moins un compte numérique. Mises à part les turbulences des sillons des deux bateaux sur la droite de l'image, les comptes numériques de l'image sont très faibles et regroupées autour de la moyenne de l'extrait.

Les valeurs des statistiques placées en b sur la même figure montrent un très faible écart-type local par rapport aux 4 extraits précédents. La corrélation entre les plans A0 et A1 est aussi beaucoup plus faible que pour les deux extraits correspondant aux deux zones urbaines problématiques. De même, la différence en variance relative et la différence relative en entropie dépassent les valeurs

trouvées pour les extraits problématiques. Donc on se retrouve avec une image qui présente une activité locale très faible, dont une grande partie est assignée à un bruit résiduel inhérent aux barrettes d'acquisition. Nous avons étudié de la même façon l'extrait de la rivière qui traverse la ville de Fredericton au Canada, acquis par Ikonos. Les mêmes tendances sont apparues : un faible écart-type local associé à un coefficient de corrélation faible et une différence en variance élevée.

Ces chiffres montrent qu'à cause du bruit important par rapport au signal d'intérêt, les approximations aux différentes échelles ne sont pas comparables les unes aux autres. Les BQ obtenus avec des produits fusionnés à différentes résolutions ont des valeurs aléatoires qui dépendent de la quantité de bruit et surtout de la répartition fréquentielle de ce bruit dans les échelles. De manière générale, lorsque l'on décroît la résolution, on diminue le niveau du bruit : dans le cas du lignage, le bruit est surtout situé dans les hautes fréquences spatiales, et disparaît donc en partie à cause du lissage utilisé pour synthétiser l'approximation à *res1*. Si une image ne présente que peu de structures, comme dans ces deux extraits, on conçoit que la qualité de la synthèse à basse résolution soit meilleure que celle dressée à haute résolution, ce qui invalide l'hypothèse. Il s'agit de cas particuliers : en présence de bruit et/ou lorsque le signal d'entrée est faible, on aura une plus grande probabilité d'invalider l'hypothèse d'extrapolation.

Notons que, de manière générale, ces images présentent un intérêt limité. De telles images peuvent être par exemple utilisées en détection de navires en pleine mer, mais une étape préalable de débruitage est nécessaire pour s'affranchir des bruits du capteur ou de compression.

3.7.4 Analyse complémentaire : vérification sur des extraits CNES

Les images à *res1* et *res2* sont plus proches en terme de contenu géométrique à cause de la transformée en ondelettes qui a permis de les synthétiser. En effet, nos références ont été synthétisées par l'analyse multiéchelle 'à trous' qui ne simulent pas la chaîne d'acquisition des satellites considérés. On se demande alors si nos résultats et nos conclusions sont généralisables au cas réel, à savoir si des références à *res1* et *res0* avaient été acquises directement par des capteurs satellites. Nous avons eu la possibilité de manipuler des images que nous a confiées le CNES, simulées dans le cadre du projet de lancement d'une constellation de satellites appelées Pléiades. Ces images ont été synthétisées à plusieurs résolutions spatiales à partir d'images aériennes acquises à 26 cm. La chaîne de simulation comprend la prise en compte de la *FTM* des capteurs, une transformée en ondelettes ainsi que plusieurs niveaux de compression. Nous avons procédé à une analyse complémentaire sur 2 extraits Pélican afin de comparer les résultats obtenus avec des références synthétisées par l'algorithme 'à trous' et en utilisant une transformée en ondelettes redondante et avec ceux obtenus par la chaîne de simulation du CNES qui donne des images plus proches de celles qu'un satellite est susceptible d'acquérir.

Nous avions à notre disposition des modalités MS à 40 cm, 80 cm, 160 cm et 320 cm. Il s'agit d'un cas idéal pour étudier l'évolution des BQ dans les échelles pour un ratio 2 ; les images MS à 320, 160 et 80 cm ont pu servir de modalités d'origine pour fusionner des images à 160, 80 et 40 cm, où les références étaient elles aussi disponibles. Nous avons synthétisé les images Pan à chaque résolution avec les coefficients de contribution spectrale relative de chaque modalité MS du satellite Quickbird, par la relation :

 $A = I/(0.35+0.7+0.9+0.87) (0.87 B_{1,0}+0.9 B_{2,0}+0.7 B_{3,0}+0.35 B_{4,0})$ Eq. 3.2 où les indices des modalités MS *I*, *2*, *3* et *4* correspondent respectivement aux modalités PIR, rouge, verte et bleue.

Le tableau 3.17 suivant présente les résultats pour l'extrait 1 pour la vérification de l'hypothèse d'extrapolation. Les mêmes BQ que ceux de la vérification de l'hypothèse ont été utilisés, auxquels nous avons ajouté le BQ monomodal correspondant à la corrélation entre les hautes fréquences spatiales (*ccHF*) de la référence et de l'image fusionnée : c'est le BQ10. Ce tableau de résultats est composé de deux colonnes principales qui distinguent les comparaisons de BQ entre *res1* et *res0* et entre *res2* et *res1*. Ensuite, ces colonnes sont divisées en sous-colonnes, avec une sous-

	res1-res0			res2-res1				
	<i>B3</i>	<i>B2</i>	<i>B1</i>	BO	BO	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
BQ1 = [cc]	1	1	1	1	1	1	1	1
$BQ3 = [\sigma Rel, cc]$	0	0	0	1	1	1	1	1
BQ4 = [diffvarRel, σ Rel, cc]	0	0	0	1	1	1	1	1
BQ5 = [SAM]	0			1				
$BQ6 = [M(Vres), \sigma(Vres)]$	0		1					
BQ7 = [ERGAS]		()				1	
BQ8 = [cc, SAM]	0	0	0	0	1	1	1	1
BQ9 = intersection de toutes les distances	0	0	0	0	1	1	1	1
BQ10 = [ccHF]	1	1	1	1	1	1	1	1

colonne par modalité spectrale. A chaque case de résultat est assignée la valeur 1 ou 0. La valeur 1 indique que le BQ valide l'hypothèse d'extrapolation, et 0 l'invalide.

Tableau 3.17 : résultats pour le premier extrait Pléiades. Pour un BQ donné, 1 signifie que l'hypothèse d'extrapolation est vérifiée, et sinon, la valeur de la case est 0.

Cet exemple contredit ce que l'on pourrait penser intuitivement, à savoir que la qualité devrait être meilleure en diminuant la résolution spatiale car le nombre de structures présentes dans l'image et leur complexité sont généralement supposés décroître lorsque la résolution spatiale diminue. En effet, les BQ montrent une qualité plus faible à la basse résolution spatiale *res2*. Cela confirme que la qualité ne dépend pas uniquement des échelles. Le problème est nettement plus complexe. Nous avons tenté d'identifier les raisons possibles pour lesquelles la qualité à *res1* est la meilleure, suivie de celle à *res0* pour finalement atteindre ses plus mauvais résultats à *res2*.

La qualité à *res1* est meilleure qu'à *res0*, ce qui signifie que cet extrait ne vérifie pas le cas 3. En effet, quelle que soit la distance, la qualité à *res1* est meilleure que celle obtenue à *res0*. Ainsi, les résultats vont fortement dépendre des bornes assignées à la définition de distances « assez proches ». On remarque que les BQ qui s'appuient sur les deux coefficients de corrélation valident systématiquement l'hypothèse. Ses bornes ne sont pas assez contraignantes, car le résultat est toujours très éloigné des bornes fixées. On note empiriquement qu'un seuil de +/- 0.015 serait suffisant pour le cas 2 de la vérification de l'hypothèse. Par contre, pour tous les autres BQ, l'hypothèse n'est pas valide.

Pour ce qui est de la comparaison entre *res2* et *res1*, la qualité à *res2* est moins bonne que celle à *res1* donc le cas 3 est vérifié pour toutes les distances. Le tableau 3.18 montre les valeurs obtenues pour la variance globale pour les images Pan à chaque résolution, et indique les différences de variance relative entre échelles successives. Comme les images Pan n'ont pas la même taille en terme de nombre de pixels, nous n'avons pu utiliser que des distances de la catégorie 1 correspondant à la différence entre des distances appliquées à une image. Nous n'avons donc pas pu utiliser le coefficient de corrélation.

Approximation de l'image Pan	Variance globale		
A0	57176	DiffVarRel(A0, A1)	20.03 %
Al	45722	DiffVarRel(A1, A2)	19.86 %
A2	36642	DiffVarRel(A2, A3)	30.20 %
A3	25576		

Tableau 3.18 : variances globales pour l'extrait 1 pour chaque approximation de l'image Pan. Les deux colonnes de droite correspondent à la différence en variance entre résolutions spatiales successives, relative à la variance de l'approximation à l'échelle plus fine.

La variance globale des images Pan diminue avec la résolution spatiale, donc la complexité de la scène diminue bien avec la résolution. Par contre, la différence en variance relative est plus élevée

entre les plans d'approximations A2 et A3 que pour les autres. Lors du passage de A3 à A2 on assiste à un saut de variances de plus de 10 % par rapport aux autres résolutions. Par contre, la valeur de la différence de variance entre A0 et A1 est similaire à celle entre A1 et A2 et le processus de fusion a rencontré plus de difficultés à haute résolution, ce qui est en accord avec ce que l'on pense intuitivement. Ainsi, la qualité de la fusion à une échelle donnée est probablement une fonction à la fois de l'échelle, mais aussi de la complexité de la scène MS à synthétiser à haute résolution spatiale.

Pour s'en convaincre, nous avons traité un second extrait CNES. Les résultats sont rapportés dans les tableaux 3.19 et 3.20.

	res1-res0			res2-res1				
	<i>B3</i>	<i>B2</i>	<i>B1</i>	BO	BO	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
BQ1 = [cc]	1	1	1	1	1	1	1	1
$BQ3 = [\sigma Rel, cc]$	1	0	0	1	1	1	1	1
BQ4 = [diffvarRel, σ Rel, cc]	0	0	0	1	1	1	1	1
BQ5 = [SAM]	0			1				
BQ6 = [M(<i>Vres</i>), $\sigma(Vres)$]	0			1				
BQ7 = [ERGAS]		()			1	[
BQ8 = [cc, SAM]	0	0	0	0	1	1	1	1
BQ9 = intersection de toutes	0	0	0	0	1	1	1	1
les distances	0	0	0	0	1	1	1	1
BQ10 = [ccHF]	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 3.19 : résultats pour l'hypothèse d'extrapolation de l'extrait 2.

Approximation de l'image Pan	Variance globale		
A0	71074	DiffVarRel(A0, A1)	16.86 %
Al	59094	DiffVarRel(A1, A2)	15.48 %
A2	49949	DiffVarRel(A2, A3)	25.32 %
A3	37301		

Tableau 3.20 : variances globales et différences en variance entre résolutions spatiales successives, relatives à la variance de l'approximation à l'échelle plus fine, pour l'extrait 2.

Les résultats du tableau 3.19 sont parfaitement identiques à ceux de l'extrait 1 excepté pour la comparaison des BQ entre les résolutions *res1* et *res0*, où pour le troisième BQ, la modalité PIR valide l'hypothèse. Sinon on retrouve une très bonne qualité de fusion à *res1* générant une vérification systématique de l'hypothèse entre *res2* et *res1*. La variance globale de l'image augmente bien avec la résolution spatiale. Par contre, on retrouve ce saut en différence de variance de 10 % en passant de (A2, A3) à (A1, A2). Malgré une complexité générale moindre, la fusion a donc tendance à être moins performante à *res2* qu'à *res1* puisque la quantité d'information qui sépare les approximations successives est plus importante entre A3 et A2. Les pourcentages de la différence en variance relative des plans (A0, A1) et (A1, A2) sont très proches. Ainsi, comme la scène est plus complexe à haute résolution spatiale, les BQ à *res0* sont plus mauvais qu'à *res1*.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- en aucun cas une étude entre BQ à *res2* et *res1* nous permet de conclure à un quelconque comportement entre *res1* et *res0*,
- la performance d'une méthode de fusion ne dépend pas uniquement de l'échelle considérée,
- la complexité de la scène à synthétiser joue un rôle dans la qualité du produit fusionné final. Des paramètres calculés à partir de l'image Pan et de son approximation à la résolution spatiale d'origine des images MS sont susceptibles de nous renseigner sur la difficulté de fusion. Cependant, nous n'avons pas été en mesure de définir une distance et un critère associé permettant de prédire la qualité de la fusion.

3.8 Conclusion et perspectives

Plusieurs interrogations ont été soulevées, à savoir si le mode opératoire choisi permettait de généraliser au cas réel. En effet, une seule méthode de fusion a été testée, et il serait intéressant de voir si le comportement observée avec la méthode *ATWT-M2* est généralisable aux autres méthodes de fusion. De plus, le résultat est très dépendant du BQ considéré, et on a tendance à augmenter la probabilité d'invalider l'hypothèse d'extrapolation en augmentant le nombre de distances qui composent le BQ. Nous pouvons désormais apporter des éléments de réponse aux trois questions posées en introduction, à savoir :

- Est-ce que cette hypothèse est souvent vérifiée? Avec les nouveaux critères pour les distances, la campagne de tests menée nous permet de conclure qu'il est raisonnable de supposer que pour la plupart des images, la qualité des images synthétiques à *res0* est assez proche et/ou moins bonne de celle trouvée à *res1*, et donc l'hypothèse d'extrapolation est vérifiée. Notons toutefois que ces conclusions ne sont valables que dans le cas de la méthode de fusion testée.
- Quel est son domaine de validité ? Les images qui ne valident pas l'hypothèse sont ceux où la quantité d'information à injecter de l'image Pan vers l'image MS est la plus importante. De manière générale, les scènes complexes rencontrent plus de difficultés pour valider l'hypothèse que des scènes plus simples en terme de quantité de signatures spectrales et structures géométriques. Il est aussi important de souligner que le domaine de validité de l'hypothèse dépend du BQ considéré.
- Est-il possible de prédire, à coup sûr, les images pour lesquelles l'hypothèse est ou non, valide ? A ce stade de l'étude, il n'est pas possible de prédire à coup sûr les images pour lesquelles l'hypothèse serait valide. La qualité d'un produit de fusion est une fonction qui dépend de l'échelle, mais aussi de la quantité d'information à injecter dans les modalités MS. Pour un BQ et une méthode de fusion donnée, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour être susceptible de prédire l'acceptabilité ou non pour une image donnée.

Les analyses nous ont aussi permis de proposer de nouveaux critères, moins restrictifs pour certaines distances, et plus contraignants pour d'autres. Le tableau 3.21 propose de nouveaux intervalles aux distances.

Distances	Intervalle de l'hypothèse « assez proches »	Rappel des valeurs idéales
diffVarRel	+/- 15 %	0
σRel	+/- 10 %	0
сс	+/- 0.015	1
ccHF	+/- 0.015	1
ERGAS	+/- 2	0
SAM	+/- 2°	0

Tableau 3.21 : nouvelles bornes d'acceptabilité et rappel des valeurs idéales pour chaque distance.

Les bornes des intervalles des deux coefficients de corrélation étaient trop permissives ; ils avaient tendance à accepter toutes les images, mêmes pour les scènes les plus complexes. Les contraintes sur les autres distances ont été relâchées.

Ces résultats nous ont aussi montré les limites de certaines distances que nous avions proposées dans le chapitre précédent. En effet, les statistiques concernant la différence des normes des vecteurs spectraux et celles de la norme du vecteur résultant ne sont pas de bonnes distances de la manière dont elles ont été définies. En effet, d'après Wald (2002), une distance multimodale doit être indépendante du nombre de modalités MS, de la dynamique des images ainsi que de la résolution