



HAL
open science

Evaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT

Marc Mangolini, Thierry Ranchin, Lucien Wald

► **To cite this version:**

Marc Mangolini, Thierry Ranchin, Lucien Wald. Evaluation de la qualité des images multispectrales à haute résolution spatiale dérivées de SPOT. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 1995, 137, pp.24-29. hal-00464717

HAL Id: hal-00464717

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00464717>

Submitted on 28 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EVALUATION DE LA QUALITE DES IMAGES MULTISPECTRALES A HAUTE RESOLUTION SPATIALE DERIVEES DE SPOT

(1,2) Marc MANGOLINI, (2) Thierry RANCHIN, (2) Lucien WALD

(1) Aérospatiale, Service Télédétection, BP 99, 06332 Cannes la Bocca cedex

(2) Ecole des Mines de Paris, Groupe Télédétection & Modélisation, BP 207, 06904 Sophia Antipolis cedex

De nombreuses méthodes ont été proposées afin de produire des images SPOT multispectrales avec une résolution spatiale simulée de 10 m. L'objet de la présente communication est de présenter une démarche et un ensemble de critères quantitatifs permettant d'évaluer la qualité de ces produits, en supposant que la préoccupation majeure de l'utilisateur soit la conservation de l'information multispectrale. Ces critères portent sur les qualités radiométriques et spectrales des produits. Cinq ensembles de critères ont ainsi été définis. L'importance du paysage observé dans l'estimation de la qualité est soulignée et est prise en compte dans les critères. L'aspect visuel des images n'est pas traité ici, car il est difficile à quantifier. Les méthodes retenues sont la simple duplication de pixels, la méthode du CNES, appelée P+XS, et la méthode ARSIS. L'application des critères quantitatifs permet de mesurer la qualité des produits fournis par une méthode relativement à une autre, ainsi que par rapport à une "vérité" à 20 m. On peut ainsi sélectionner une méthode en fonction de ses performances vis à vis des critères les plus importants pour l'application considérée.

A large number of methods have been proposed to produce SPOT multispectral images with enhanced spatial resolution (10 m) owing to the presence of a panchromatic channel. Most of them aim at providing a better visual perception of the information. Some claim to provide an image close to reality, which are the only ones dealt with here. The assessment of the quality of the products is lacking most of the time. We propose an approach and some criteria to provide a quantitative assessment of the spectral quality of the products. Five sets of criteria are defined, dealing with the radiometric content and with the multispectral aspects. The visual aspect of the products is not taken into account because of difficulties in quantifying it easily. The large influence of the type of landscape in the scene upon the assessment of the quality is underlined. Three different methods are applied to a portion of a scene of Barcelona (Spain) as an illustration: the CNES method, the ARSIS method, recently proposed (Mangolini et al. 1992, 1993; ranchin et al. 1993, 1994) and the duplication method. Though not making benefit of the panchromatic image, the latter method is retained because it is widely used. Because of the lack of truth at 10 m, the quality is assessed by degrading the resolution of P and XS to respectively 20 and 40 m, and by applying each method to synthesize an estimated image at 20m, which is compared, pixel per pixel, to the original XS image. These differences are reduced to a few criteria which qualify the ability of a method to reproduce the radiometry of a channel when increasing the resolution. Other criteria deal with the three channels altogether and describe the performances of a method to reproduce the multispectral information when increasing scale. This text presents only the case of SPOT for the sake of simplicity. This approach for quality assessment has been applied to other sensors and other spectral bands (Ranchin 1993).

Mots clés : fusion, qualité, évaluation quantitative

Keywords: fusion, quality, quantitative assessment

1. INTRODUCTION

Les données SPOT se présentent sous la forme d'un ensemble d'images multispectrales, offrant deux résolutions spatiales. Sur SPOT 1-2-3, les données XS ont une résolution spatiale de 20 m, tandis que les données panchromatiques P ont une résolution de 10 m. Il est souvent bénéfique dans les applications cartographiques notamment, d'associer la haute résolution spectrale (ou la diversité spectrale) à la haute résolution spatiale, et donc de synthétiser des images multispectrales possédant la meilleure résolution spatiale disponible au sein du jeu de données. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de produire des images SPOT multispectrales avec une résolution spatiale simulée de 10 m (Anonymous, 1986; Carper et al., 1990; Chavez et al., 1991; Munechika et al., 1993; Pellemans et al., 1993). L'objet de la présente communication est de présenter une démarche et un ensemble de critères quantitatifs permettant d'évaluer la qualité de ces produits, en supposant que la préoccupation majeure de l'utilisateur soit la conservation de l'information multispectrale. Ceci exclut d'emblée toutes les méthodes dont les buts sont essentiellement visuels, comme celle donnée par Carper et al. (1990).

2. PROPRIETES DES IMAGES SYNTHETIQUES

Les images synthétiques doivent présenter les trois propriétés suivantes. Premièrement, l'image synthétique à 10 m, notée XS10, une fois ramenée à 20 m par moyenne de pixels, doit être la plus proche possible de l'image originale XS. Ceci doit inclure la prise en compte des différences entre les effets atmosphériques affectant les images P et les images XS. Deuxièmement, l'image XS10 doit être la plus proche possible de ce qu'observerait le capteur de SPOT, s'il avait une résolution de 10 m. Troisièmement, l'ensemble multispectral XS10 (i.e. l'ensemble des triplets XS10) doit être le plus proche possible de la réalité.

L'énoncé de ces propriétés fait ressortir les difficultés de leur vérification, pour les deuxième et troisième. En effet, il est fait mention d'une réalité, qui n'est pas connue puisqu'il n'existe pas d'images SPOT-XS à 10 m. On tournera cette difficulté en adoptant la démarche suivante, déjà utilisée par Munechika et al. (1993) et Mangolini et al. (1992, 1993). Les images XS et P ont été sous-échantillonnées à respectivement 40 et 20 m. Les méthodes à évaluer sont alors appliquées à ces nouvelles images pour synthétiser des images à 20 m. Ces images estimées sont comparées aux images XS originales, qui constituent donc la vérité. On supposera ensuite que la qualité déduite de cette comparaison donne une première approximation de la qualité atteinte à 10 m.

Le type de paysage observé et utilisé pour l'estimation de la qualité des images synthétiques possède une forte influence sur cette estimation. La qualité du produit final sera d'autant meilleure que la variation du signal avec l'échelle est prédictible, et ceci indépendamment de la méthode. Sur des zones paraissant très homogènes à 20 m de résolution, comme par exemple l'océan ou des grandes surfaces agricoles, l'erreur commise en supposant ces zones également homogènes à 10 m sera faible. Par contre, les zones urbaines ou le petit parcellaire agricole sont les cas les plus difficiles car ils présentent de nombreuses structures d'échelles différentes. De tels objets ne possèdent pas de propriété d'auto-similarité, c'est-à-dire que ces structures à la résolution 10 m, ne peuvent pas être prédites précisément à partir de leur observation aux résolutions inférieures. C'est dans ces cas que l'apport de l'image panchromatique est maximal. Les images tests doivent donc contenir essentiellement des zones présentant de nombreuses structures de petite échelle, afin de bien mettre en évidence la capacité d'une méthode à traiter les cas les plus difficiles pour la réalisation d'images à haute résolution spatiale. De même, ces images devront présenter une grande variabilité spectrale afin de vérifier la qualité de la restitution spectrale.

Les cinq scènes SPOT utilisées pour cette étude ont été restreintes à des sous-scènes présentant ces cas les plus difficiles. Elles sont variées et comprennent principalement de l'urbain, des infrastructures routières et ferroviaires, et des petites parcelles agricoles. Les résultats obtenus sont très similaires d'une scène à l'autre, ce qui explique pourquoi seule une sous-scène de Barcelone (Espagne) est détaillée ici. Elle comprend en outre une portion de zone montagneuse à couverture végétale de type méditerranéenne.

3. LES CRITERES D'EVALUATION DE LA QUALITE IMAGE

Les capacités d'une méthode à produire des images multispectrales synthétiques s'approchant le plus possible de la réalité perçue avec une résolution fictive de 10 m (deuxième et troisième propriétés) se traduisent par un ensemble de critères quantitatifs. Cinq ensembles de critères ont ainsi été définis. Les premiers traitent chaque bande spectrale séparément et portent donc davantage sur la radiométrie de chaque canal. Les autres fournissent une estimation de la capacité de la méthode à restituer l'information multispectrale.

Ainsi qu'indiqué plus haut, les images synthétisées (estimées) à 20 m par les différentes méthodes sont comparées aux images XS originales. Les images de la différence, pixel à pixel, entre l'image originale et chacune des images estimées sont ensuite calculées. Ces différences sont ensuite réduites aux quantités statistiques suivantes :

- le biais ainsi que sa valeur relativement à la moyenne de l'image originale. Idéalement, ce biais (différence des moyennes) doit être nul,
- la différence des variances (variance vraie - variance de l'estimée), ainsi que sa valeur relativement à la variance originale. Cette différence permet d'apprécier la quantité d'information introduite ou perdue par une méthode par rapport à l'image originale. Si une méthode apporte trop d'innovation, *i.e.* "invente" trop d'information, ceci se traduira par une différence des variances négative puisque la variance de l'estimée sera plus grande que la variance originale. Dans le cas contraire, la différence sera positive. La valeur idéale est zéro,
- la différence des entropies (entropie vraie - entropie de l'estimée), ainsi que sa valeur relativement à l'entropie originale. L'entropie est définie ici à l'aide d'un logarithme à base 10. Comme la différence des variances, cette quantité permet d'apprécier la qualité de la restitution de l'information. Elle est faible si l'apport ou la perte d'information entre l'image originale et l'estimée est faible, positive s'il y a une perte d'information, négative s'il y a trop d'innovation,
- le coefficient de corrélation entre l'originale et l'estimée, qui doit être le plus proche possible de 1. Il montre la similitude des structures de petite taille entre l'originale et l'estimée,
- l'écart-type des différences, ainsi que sa valeur relativement à la moyenne de l'image originale.

L'erreur au niveau du pixel, résumée dans le critère précédent (écart-type de l'erreur), peut être davantage détaillée en présentant la probabilité d'avoir en un pixel, une erreur relative inférieure, en valeur absolue, à un seuil donné. Cette erreur relative, calculée en chaque pixel, est égale à la différence entre la valeur originale et la valeur estimée, divisée par la valeur originale. L'histogramme de ces erreurs relatives est ensuite calculé, ce qui donne la probabilité de trouver une certaine erreur au niveau du pixel. La valeur idéale de la probabilité est 100% dès le seuil d'erreur de 0,001% (c'est-à-dire nul). Cette probabilité quantifie l'erreur effectuée au niveau du pixel pour restituer l'information vraie, et donc indique l'erreur faite sur la capacité à reproduire ("inventer") les plus petites structures. Plus la probabilité est proche de 100 pour le premier seuil, meilleure sera la restitution.

Les critères suivants qualifient l'aptitude de chaque méthode à restituer les signatures spectrales dans le changement d'échelle. La manière dont l'indépendance entre les différentes bandes spectrales (P et XS) est respectée, peut être représentée par les coefficients de corrélation entre ces bandes. Pour ce troisième ensemble de critères, les valeurs idéales sont celles présentées par l'image originale. On pourra ainsi évaluer la dépendance de l'image estimée vis-à-vis de l'image P.

Le quatrième ensemble quantifie partiellement la reproduction des triplets vrais (XS1, XS2, XS3) par chaque méthode. Il comprend le nombre de triplets différents (nombre de spectres) dans l'image originale et dans les images estimées, ainsi que l'écart par rapport au nombre vrai (nombre original de triplets - nombre estimé de triplets). Une différence positive indiquera que l'image estimée ne présente pas assez de triplets ; une différence négative traduira trop d'innovations spectrales. Cette information est complémentaire de la probabilité de l'erreur au niveau du pixel qui fournit, en combinant les résultats pour les trois canaux, une indication sur le nombre de pixels pour lesquels on trouvera exactement les mêmes triplets que sur l'originale.

Le critère précédent montre la capacité des méthodes à restituer le nombre de triplets vrais, sans garantir qu'il s'agisse des mêmes triplets. Le dernier ensemble de critères permet d'évaluer la qualité de la restitution des triplets vrais les plus

fréquents, qui sont prédominants dans la classification multispectrale. Ceci est effectué à l'aide de plusieurs quantités calculées uniquement pour les triplets dont la fréquence (nombre de pixels) est supérieure à un seuil. Plus ce seuil en fréquence est élevé, moins il y a de triplets, mais plus élevé est le nombre de pixels dans chaque triplet. Pour chacun de ces triplets les plus fréquents, est calculée la différence entre la fréquence vraie et la fréquence estimée. Ces différences sont résumées à l'aide des quantités suivantes :

- le seuil en fréquence, exprimé en valeur relative par rapport au nombre total de pixels (soit 0,01%, 0,05%, 0,1% et 0,5%), et en nombre de pixels correspondant,
- le nombre de triplets vrais, le nombre de triplets coïncidents dans l'image estimée, la différence absolue et relativement au nombre vrai de triplets,
- le nombre de pixels concernés, en valeur absolue ainsi qu'en valeur relative par rapport au nombre total de pixels de la sous-scène,
- la différence du nombre de pixels concernés avec la valeur vraie, également exprimée en valeur relative par rapport à la valeur vraie,
- le biais (moyenne sur les triplets des différences des fréquences, qui est donc un nombre de pixels),
- l'écart-type des différences des fréquences (qui est un nombre de pixels).

4. LES DIFFERENTES METHODES TESTEES

Plusieurs méthodes ont été proposées afin de tirer parti de l'ensemble d'images panchromatique (à 10 m) et multispectrales (XS à 20 m) que peut donner le satellite SPOT (voir par exemple Chavez *et al.*, 1991; Munechika *et al.*, 1993; Pellemans *et al.*, 1993). Leur objet est la production d'images SPOT multispectrales à haute résolution spatiale (10 m). Certaines méthodes ont des buts purement visuels et ne sont pas considérées ici, car elles modifient complètement l'information spectrale originale. Ce sont les méthodes basées sur une reprojection des informations dans l'espace des couleurs, ou encore combinant l'information panchromatique à une reprojection des images multispectrales, par exemple selon les axes d'inertie (voir par exemple, Carper *et al.*, 1990). L'école des mines de Paris et Aérospatiale ont récemment proposé une nouvelle méthode, appelée ARSIS (Mangolini *et al.* 1992, 1993). Outre ARSIS, les méthodes retenues pour illustrer notre propos, sont les plus couramment utilisées, et sont la simple duplication de pixels, et la méthode du CNES, appelée P+XS. Rappelons que dans cette dernière, le canal XP3 est calculée par une simple duplication. Ce choix se justifie par l'utilisation de ces méthodes pour la production de produits commerciaux, pour SPOT (P+XS, ARSIS) ou Landsat (duplication, ARSIS), y compris pour la duplication qui ne tire pas profit de la présence de l'image P.

En ce qui concerne la capacité à reproduire l'image originale XS à 20 m par moyenne de l'image synthétisée à 10 m, on notera que seule la méthode CNES ne satisfait pas cette première propriété pour les deux premiers canaux XS. En effet, les équations de la méthode (Anonymus, 1986) montrent clairement une influence de XS2 et P dans XP1 (image synthétisée à 10 m) qui affecte toutes les structures qu'elles que soient leur taille, et qui ne s'élimine pas lors du passage de 10 m à 20 m. Il en va de même pour XS2.

5. APPLICATION A UNE SOUS-SCENE DE BARCELONE (ESPAGNE)

L'utilisation des critères définis précédemment est maintenant illustrée sur une sous-scène de Barcelone. Les méthodes duplication (dup), CNES et ARSIS sont appliquées aux images XS et P sous-échantillonnées à respectivement 40 et 20 m, pour synthétiser des images à 20 m. Le tableau 1 donne les luminances moyennes, leur écarts-type et l'entropie des images XS et P originales, ainsi que les coefficients d'étalonnage.

	XS1	XS2	XS3	P
Moyenne	58	48	55	53
Ecart-type	12	15	9	15
Entropie	4,02	4,26	3,87	4,40
Coefficient d'étalonnage	1,22181	1,22545	1,29753	1,39198

Tableau 1 Luminances moyennes, écarts-type et entropie des images originales (en $W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1}$).

Examinons tout d'abord les quantités statistiques portant sur la différence, pixel à pixel, des images originales XS et des estimées (tableau 2). Les images estimées par la méthode CNES ont une moyenne plus faible que les images XS originales, tandis que les moyennes des estimées par ARSIS sont identiques à celles des XS à la troisième décimale près (biais nul). En ce qui concerne la duplication, le biais est tantôt positif, tantôt négatif, parfois nul, selon les scènes.

La duplication entraîne un appauvrissement de la quantité d'informations (exprimée sous forme de variance et d'entropie) pour toutes les bandes, puisqu'il n'y a pas d'innovation (*i.e.* pas d'apport d'information supplémentaire) lors du changement d'échelle. Cet appauvrissement est plus ou moins marqué selon l'homogénéité spatiale de la scène. La méthode CNES accroît très fortement la quantité d'informations pour les deux premières bandes. Cet accroissement est dû aux renforcements des contours apportés par la bande panchromatique. La méthode ARSIS s'approche le plus de la valeur idéale, sans assez innover.

L'écart-type des différences est faible pour toutes les méthodes et inférieur à 10 % en valeur relative. Là aussi, la méthode ARSIS propose les meilleurs résultats, et la méthode CNES les plus mauvais. Ce critère ne reflète pas la qualité visuelle de l'image, qui est notamment assez médiocre dans le cas de la duplication. L'erreur au niveau du pixel peut être

davantage détaillée, à l'aide de la probabilité d'avoir, en un pixel, une erreur relative inférieure en valeur absolue à un seuil donné (tableau 3). Avec la méthode ARSIS, quasiment tous les pixels (*i.e.* au moins 95 % des pixels) présentent une erreur relative inférieure ou égale à 10 % en valeur absolue. Le même résultat n'est atteint par les autres méthodes qu'au seuil supérieur. On notera également le très fort pourcentage (généralement supérieur à 20 %) de pixels présentant une erreur nulle (*i.e.* inférieure à 0,001 %) dans le cas de la méthode ARSIS. Il est plus élevé que pour les autres méthodes. La méthode CNES fournit les plus mauvais résultats de ce tableau, ce qui met en relief la différence existant entre des critères de qualité visuelle et des critères quantitatifs, les uns n'étant pas garants des autres.

	XS 1			XS 2			XS 3	
	dup	cnes	arsis	dup	cnes	arsis	dup / cnes	arsis
Biais (idéal : 0) relativement à la moyenne de XS	- 0,01 - 0,0 %	0,35 0,6 %	0,00 0,0 %	- 0,00 - 0,0 %	0,26 0,5 %	0,00 0,0 %	- 0,00 - 0,0 %	0,00 0,0 %
Variance vraie - estimée (valeur idéale : 0) relativement à la variance vraie	10 7 %	- 50 - 35 %	6 5 %	12 5 %	- 42 - 19 %	7 3 %	9 11 %	8 9 %
Entropie vraie - estimée (valeur idéale : 0) relativement à l'entropie vraie	0,25 0,6 %	- 0,15 - 3,6 %	0,14 0,3 %	0,02 0,5 %	- 0,08 - 1,8 %	- 0,01 0,3 %	0,06 1,5 %	0,05 1,2 %
Coefficient de corrélation entre XS et estimée (valeur idéale : 1)	0,94	0,97	0,99	0,96	0,98	0,99	0,91	0,95
Ecart-type des différences (valeur idéale : 0) relativement à la moyenne de XS	4,0 7 %	3,8 7 %	1,9 3 %	4,4 9 %	3,1 6 %	1,9 4 %	3,8 7 %	2,7 5 %

Tableau 2. Statistiques sur les différences entre image originale et images estimées (en luminance ou valeur relative).

		0,001	1	2	5	10	20	50	75	100
XS 1	dup	16	17	40	70	91	99	100	100	100
	cnes	9	9	27	58	90	100	100	100	100
	arsis	28	28	63	92	99	100	100	100	100
XS 2	dup	14	14	26	57	82	97	100	100	100
	cnes	12	12	26	60	91	100	100	100	100
	arsis	26	26	48	86	99	100	100	100	100
XS 3	dup	13	13	35	66	88	98	100	100	100
	arsis	16	16	43	76	95	100	100	100	100

Tableau 3. Probabilité (en pour cent) d'avoir en un pixel une erreur relative (en valeur absolue et en pour cent) inférieure ou égale aux bornes indiquées sur la première ligne. La valeur idéale est 100 dès le seuil de 0,001 %.

Le coefficient de corrélation entre l'image originale et l'image estimée (tableau 2) montre la similitude des structures. La méthode ARSIS présente le coefficient le plus élevé devant soit la méthode duplication, soit la méthode CNES, selon les scènes. La corrélation entre les différentes bandes spectrales (tableau 4), entre P et les canaux XS, et entre les canaux XS eux-même, est plus ou moins bien respectée par les trois méthodes selon les scènes. Ce tableau indique notamment l'augmentation de dépendance de l'image estimée vis-à-vis de l'image P pour les méthodes CNES (bandes 1 et 2) et ARSIS. Pour la méthode CNES, l'augmentation de la corrélation entre P et les canaux XS1 et XS2 entraîne une diminution de la corrélation entre les deux premières bandes et la troisième. Pour ARSIS, l'augmentation de corrélation entre P et les trois bandes entraîne une augmentation de la corrélation entre les trois bandes.

	original	dup	cnes	arsis
P - XS1	0,97	0,91	0,99	0,98
P - XS2	0,97	0,92	0,99	0,99
P - XS3	0,35	0,31	0,31	0,37
XS1 - XS2	0,97	0,97	0,97	0,97
XS1 - XS3	0,34	0,33	0,31	0,36
XS2 - XS3	0,33	0,33	0,32	0,35

Tableau 4. Coefficient de corrélation entre les différentes bandes spectrales pour l'image originale et les différentes estimées. La valeur idéale est celle affichée par l'original.

Examinons maintenant la reproduction des triplets vrais (XS1, XS2, XS3) par chaque méthode. Dans le tableau 5, sont reportées quelques caractéristiques spectrales d'une scène, c'est-à-dire, le nombre de pixels total de la sous-scène, le nombre de triplets présents, le nombre moyen de pixels par triplet (fréquence moyenne : nombre de pixels divisé par nombre de triplets). Ce dernier nombre est exprimé en pourcentage relativement au nombre total de pixel. Il caractérise l'homogénéité spectrale de la scène : plus ce nombre est élevé, moins la scène présente d'objets divers. Pour une scène n'ayant qu'un objet spectral (donc totalement homogène), cette homogénéité spectrale vaudra 100 %.

nombre de pixels	nombre de triplets	nombre moyen de pixels par triplet	homogénéité spectrale (en %)
262 144	45 618	5,7	0,002

Tableau 5. Quelques caractéristiques spectrales pour la sous-scène de Barcelone.

En ce qui concerne la restitution de l'information multispectrale, on notera en particulier la capacité de la méthode ARSIS à reproduire le nombre de triplets vrais (tableau 6). Par comparaison, la méthode par duplication n'en reproduit pas assez par manque d'innovation ; il en manque environ 50 %. A l'opposé, la méthode CNES en invente trop.

	original	dup	cnes	arsis
nombre de triplets	45 618	23 276	53 162	43 918
différence avec l'original (idéal : 0) (en %)	—	22 342 49 %	- 7 544 - 17 %	1 700 4 %

Tableau 6. Capacité à restituer l'information multispectrale. Différences entre le nombre vrai de triplets (XS1, XS2, XS3) et le nombre estimé.

Si l'on détaille l'analyse en se limitant aux triplets prédominants, on observe que les méthodes duplication et ARSIS retrouvent ces triplets ; l'erreur est faible pour la méthode CNES. En ce qui concerne le nombre total de pixels présentant l'un de ces triplets, la méthode ARSIS offre des résultats généralement très satisfaisants pour les différents seuils de prédominance testés. La méthode CNES donne des résultats médiocres. La duplication fournit des erreurs acceptables, ce qui n'a rien d'étonnant puisqu'elle ne fait que reproduire les triplets déjà existants. On peut conclure que, pour les méthodes duplication et ARSIS, la reproduction des fréquences pour les triplets les mieux représentés est correcte. La situation est moins bonne avec la méthode du CNES.

	original	dup	cnes	arsis
nombre de triplets coïncidents	1 549	1 549	1 546	1 549
différence avec l'original (idéal : 0) (en %)	—	0 0 %	3 0 %	0 0 %
nombre de pixels	57 096	58 556	33 918	56 860
différence avec l'original (idéal : 0) (en %)	—	- 1 460 - 3 %	23 178 41 %	236 0 %
biais (nombre de pixels, idéal : 0)	—	- 0,03	0,4	0,00
écart-type (nombre de pixels, idéal : 0)	—	2,2	3,3	1,5

Tableau 7. Capacité à restituer l'information multispectrale. Différences entre la fréquence vraie d'un triplet (XS1, XS2, XS3) et l'estimée pour les triplets les plus fréquents. Chaque triplet comprend au moins 26 pixels, soit 0,01 % du nombre total de pixels. Le nombre de pixels concernés représente 22 % du total.

Les valeurs des tableaux dépendent fortement des scènes considérées. On a noté toutefois que pour tous les paramètres considérés, et toutes les régions, la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que les autres méthodes ; ils sont beaucoup plus proches des valeurs idéales. Ceci est dû au concept avancé de la méthode ARSIS. On a également remarqué que la qualité des résultats fournis par la méthode ARSIS est beaucoup moins dépendante de la scène que ne le sont celles des autres méthodes ; les résultats sont beaucoup plus fiables avec la méthode ARSIS. La richesse du concept permet d'envisager des améliorations sensibles de la qualité de l'image multispectrale à haute résolution spatiale, tant du point de vue spectral que visuel et géométrique.

6. CONCLUSION

On peut observer un foisonnement de méthodes visant à fusionner des images de résolution spatiale différente. Si certaines méthodes n'ont pour but qu'une meilleure perception visuelle de l'ensemble de l'information disponible, d'autres prétendent restituer une vision assez proche de la réalité. Toutefois, très rares sont les estimations de la qualité des images ainsi synthétisées. Si la raison principale en est le manque de critères d'évaluation de cette qualité, nous espérons pallier ce manque par la proposition qui est faite ici, définissant un mode d'évaluation et des critères quantitatifs précis. Nonobstant l'aspect visuel des images, ces critères permettent de qualifier les produits issus d'une méthode. Ils peuvent aussi être utilisés pour sélectionner une méthode parmi d'autres en fonction de ses performances vis-à-vis des critères qui sont les plus importants pour l'application considérée. Ce texte ne présente que le cas des images SPOT P et XS pour des raisons de simplicité. Sans aucune objection, cette démarche peut s'appliquer à d'autres combinaisons de capteurs et bandes spectrales, comme cela a été fait par exemple par Mangolini *et al.* (1992) et Ranchin (1993).

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été en grande partie accompli avec le soutien de la Cellule d'Etudes en Géographie Numérique, Centre Technique des Moyens d'Essais de la Direction Générale de l'Armement, ainsi que du Centre National d'Etudes Spatiales.

8. REFERENCES

- Anonymous, 1986, *Guide des utilisateurs de données SPOT*, 3 tomes. Editeurs CNES et SPOT Image, Toulouse France.
- Carper W. J., T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, 1990, The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56, 4, 459-467.
- Chavez P. S. Jr., S. C. Sides, J. A. Anderson, 1991, Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and SPOT Panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57, 3, 265-303.
- Mangolini M., Ranchin T., Wald L., 1992, Procédé et dispositif pour augmenter la résolution spatiale d'images à partir d'autres images de meilleure résolution spatiale. Brevet n° 92-13961, déposé le 20 novembre 1992.
- Mangolini M., Ranchin T., Wald L., 1993, Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. *De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS*, pp. 199-209, Cepadue-Éditions, 111 rue Vauquelin, Toulouse, France, 574 p.
- Munehika C. K., J.S. Warnick, C. Salvaggio, J.R. Schott, 1993, Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59, 1, 67-72.
- Pellemans A. H. J. M., R. W. L. Jordans, R. Allewijn, 1993, Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59, 1, 81-87.
- Ranchin Thierry, 1993, 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, 146 p.
- Ranchin T., Wald L., Mangolini M., 1993, Application de la transformée en ondelettes à la simulation d'images SPOT multispectrales de résolution 10 m. In *Compte-rendus du 14ème colloque GRETSI*, pp. 1387-1390.
- Ranchin T., Wald L., Mangolini M., 1994, Efficient data fusion using wavelet transform: the case of SPOT satellite images. In *Proceedings of the SPIE's 1993 Int. Symp. on Optics, Imaging and Instrumentation*, vol. 2034, pp 171-178.