Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar

Marc Mangolini, Thierry Ranchin, Lucien Wald

▶ **To cite this version:**

Marc Mangolini, Thierry Ranchin, Lucien Wald. Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS, 1993, Paris, France. pp.199-209. hal-00465561

HAL Id: hal-00465561

https://minesparis-psl.hal.science/hal-00465561

Submitted on 20 Apr 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.

FUSION D'IMAGES SPOT MULTISPECTRALE (XS) ET PANCHROMATIQUE (P), ET D'IMAGES RADAR.

Marc MANGOLINI
Aérospatiale Cannes

Thierry RANCHIN et Lucien WALD
Ecole des Mines de Paris

ABSTRACT

Fusion of multispectral (XS) and panchromatic (P) SPOT images and radar images.

A way of increasing the spatial resolution of SPOT multispectral images (XS) using the corresponding panchromatic image (P) is presented here, as well as the injection of information derived from ERS-1 into the former images. Existing methods for merging P and XS are analysed, before presenting a new method which aims at simulating 10 m resolution multispectral images that contain the same spectral information as the XS images. The following step consists in injecting detectable objets on the ERS-1 image into the SPOT images. These two fusion steps are both implemented using multiresolution analysis and the wavelet transform. Although the present method might be refined, it already provides very interesting results.

RESUME

Cette communication porte sur l'amélioration de la résolution géométrique des images SPOT multispectrales (XS), à l'aide de l'image panchromatique associée (P), et sur l'injection dans ces images résultantes d'informations issues de l'imagerie radar (ERS-1). En ce qui concerne la fusion des images P et XS, les méthodes existantes sont analysées, puis une nouvelle méthode est présentée. L'objectif recherché est de simuler des images multispectrales à 10 m, notées XS-HR, dont les propriétés spectrales sont comparables à celles des images XS. L'étape suivante consiste à injecter dans ces images optiques des objets détectables sur l'image ERS-1. Les outils utilisés pour réaliser ces deux types de fusion sont l'analyse multirésolution et la transformation en ondelettes. Des améliorations de la méthode sont en cours, mais les résultats sont d'ores et déjà très encourageants.

1 INTRODUCTION

Le satellite SPOT fournit des images panchromatiques (P) de résolution spatiale 10 m et multispectrales (XS) de résolution 20 m. De nombreuses applications nécessitent à la fois la haute résolution spatiale de P et l'information spectrale fournie par XS. On voit donc émerger le besoin de fusionner ces données pour simuler des images multispectrales de haute résolution spatiale. A ces données optiques viennent désormais s'ajouter les images radar fournies par ERS-1, dont le contenu est physiquement très différent et très complémentaire. Notre ambition est d'exploiter la synergie des images SPOT et ERS-1 afin de mieux appréhender notre environnement, en portant un intérêt particulier à la planimétrie et aux paysages urbains. L'imagerie radar apporte une information précieuse sur les objets artificiels rencontrés dans de tels paysages.

Un obstacle majeur à la fusion de toutes ces images est leur non superposabilité géométrique liée d'une part aux conditions particulières de prise de vue, d'autre part aux différences de résolutions spatiales entre les capteurs. Les images P, XS, et ERS-1 sont donc recalées géométriquement dans la géométrie de P. Nous simulerons alors des images multispectrales de haute résolution spatiale notées XS-HR, à partir de P et XS. Dans ces images XS-HR, des informations provenant de ERS-1 seront injectées, qui caractérisent des objets d'échelles spatiales prédéterminées et présentant un fort écho

In: "De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS", pp 199-209, Cépaduès-Editions, Toulouse, 574 p., 1993

radar. Des méthodes usuelles d'analyse thématique ou d'extraction d'objets peuvent éventuellement être appliquées à l'ensemble d'images obtenu.

Ne disposant pas d'images P, XS, et ERS-1 sur une même zone, nous avons illustré la démarche précédente en la scindant en deux phases : la synthèse d'images XS-HR a été réalisée sur la ville de Toulouse, et la fusion de P et ERS-1 sur l'aéroport de Marseille-Marignane. La fusion entre XS-HR et ERS-1 est rigoureusement analogue à celle de P et ERS-1.

2 FUSION P ET XS

Ce type de fusion a déjà été envisagé et l'on trouve dans la littérature de nombreuses façons d'aborder le problème. Nous regrouperons les solutions proposées en deux catégories : celles qui combinent les radiométries (ou les luminances) des différentes bandes, et celles qui dissocient information spectrale et information spatiale. Nous allons montrer que pour la première catégorie, l'information spectrale des images XS initiales est fortement altérée. Le cas particulier de la méthode P+XS développée par le CNES sera pris comme référence pour la suite, car elle est commercialement utilisée par SPOT Image pour la réalisation de son produit nommé P+XS [1]. Après avoir présenté et critiqué plusieurs méthodes de la seconde catégorie, nous en proposerons une nouvelle désignée sous le nom d'ARSIS pour "accroissement de la résolution spatiale par injection de structures". Cette méthode a été élaborée dans le but de préserver l'information spectrale des images XS. La méthode ARSIS sera comparée à la méthode P+XS à l'aide de critères visuels et numériques.

Quelque soit la méthode de fusion utilisée, il faut tout d'abord recaler géométriquement les images P et XS. Nous avons choisi d'effectuer un recalage par points d'appuis de la manière suivante :

- l'image P est sous-échantillonnée d'un facteur 2 pour la ramener à la même résolution que XS,
- à partir d'un fichier de couples de points homologues relevés manuellement sur les images P sous-échantillonnée et XS, on calcule un modèle de déformation polynômial qui représente le passage d'une géométrie à l'autre,
- le calcul de la radiométrie de chaque pixel des nouvelles images XS dans la géométrie de référence P est effectué par interpolation bicubique.

Les images XS ainsi recalées dans la géométrie de l'image P possèdent toujours une résolution de 20 m. Examinons maintenant les différentes manières de les fusionner à l'image P.

Méthodes existantes

La première catégorie de méthodes consiste à combiner les radiométries (ou les luminances) des différentes bandes. En voici quelques exemples :

Méthode P+XS CNES : cette méthode suppose que la bande P est spectralement la somme des bandes XS1 et XS2. La figure 1 montre que cette approximation est assez grossière. Les images multispectrales haute résolution notées XP sont synthétisées en répartissant la luminance de P entre les bandes XP1 et XP2, de telle sorte que le rapport des luminances entre les bandes 1 et 2 soit conservé. En notant L_k la luminance équivalente SPOT dans la bande k, ceci se traduit par :

$$L_{XP1} = 2\,L_P \cdot \frac{L_{XS1}}{L_{XS1} + L_{XS2}} \qquad L_{XP2} = 2\,L_P \cdot \frac{L_{XS2}}{L_{XS1} + L_{XS2}}$$

L'ensemble des structures présentes dans la bande P ou la bande XS2 se retrouvent dans XP1, quelles que soient leurs échelles caractéristiques. On altère donc les structures d'échelles supérieures à 20 m initialement présentes dans XS1, modifiant ainsi le contenu spectral de XP1 par rapport à celui de XS1. Le même inconvénient se produit pour XP2. De plus, cette méthode ne permet pas de créer une image XP3, qui est obtenue par simple duplication des pixels de l'image XS3.

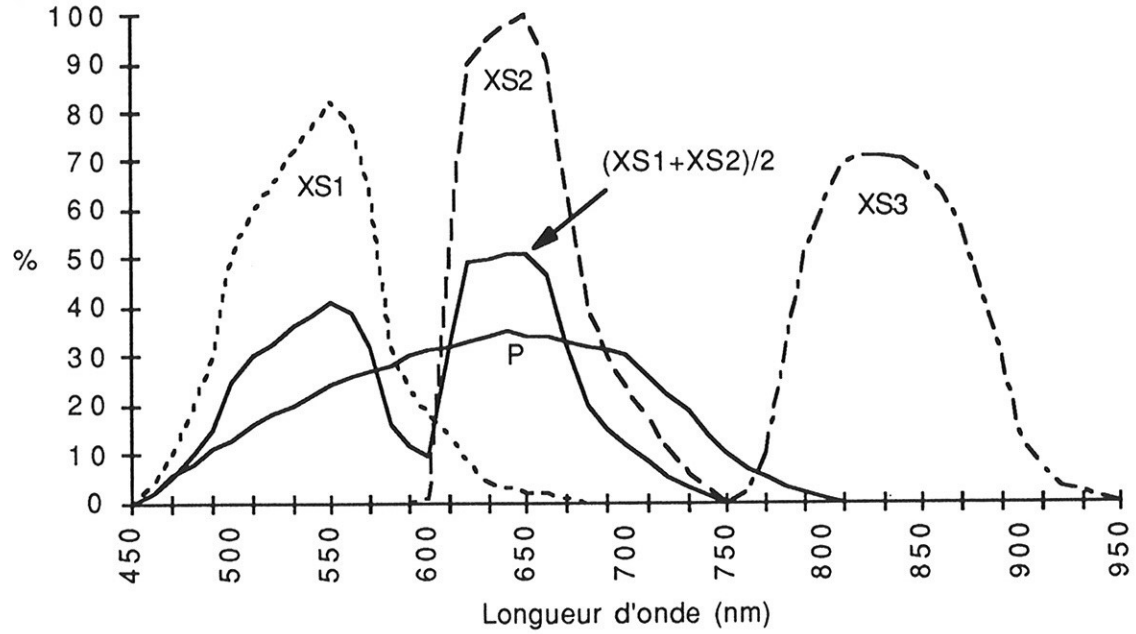


Figure 1 : Bandes spectrales de SPOT

Munechika *et al.* [2] affinent l'hypothèse précédente de recouvrement des bandes spectrales : la bande P peut être considérée comme somme pondérée des bandes XS, les coefficients étant déterminés par régression linéaire à partir de cibles caractéristiques de spectre connu. Cependant, les critiques précédentes concernant l'altération des structures restent valables.

Méthodes de changement de base : dans toutes ces méthodes, on commence par dupliquer les images XS en ligne et en colonne afin d'avoir une correspondance pixel à pixel avec l'image P. On considère alors l'espace vectoriel défini par les trois bandes spectrales XS1, XS2, et XS3. Un changement de repère est effectué de telle sorte que l'un des nouveaux axes représente une information la plus proche possible de celle de la bande P, selon un critère donné. On substitue alors à la projection des images XS sur cet axe l'image P de haute résolution, avant d'appliquer un changement de repère inverse du premier fournissant 3 images spectrales haute résolution. Le repère utilisé peut être défini par analyse en composantes principales (ACP) [3], par la technique IHS (Intensity-Hue-Saturation) [3, 5], ou par d'autres combinaisons des bandes XS [4]. Toutes ces méthodes présentent l'inconvénient majeur de modifier le contenu spectral des bandes XS. En effet, chaque image spectrale haute résolution est obtenue à partir de l'image P et de deux composantes du nouveau repère dont l'information provient des 3 bandes spectrales. Il y a mélange de toutes les bandes donc altération spectrale des images haute résolution.

Les méthodes de la seconde catégorie dissocient information spectrale et information spatiale. Elles extraient certaines structures géométriques de l'image haute résolution P, pour les injecter successivement dans chaque image spectrale XS. Chaque image spectrale haute résolution résulte donc du mélange de l'image XS correspondante et de l'image P, mais pas des autres bandes spectrales. On peut donc espérer, grâce à ces méthodes, simuler ce que produirait réellement le capteur multispectral s'il possédait une résolution spatiale de 10 m.

Méthode de filtrage passe-haut : l'idée est ici d'extraire l'information spatiale haute résolution de l'image P en lui appliquant un filtre passe-haut qui fournit une image des hautes fréquences spatiales. Cette image est alors ajoutée, pixel à pixel, aux images multispectrales XS [3]. Le principe est assez séduisant, mais les résultats de cette méthode dépendent du filtre, de sa taille, et de sa forme. En outre, à supposer que le filtrage fournisse exclusivement les structures d'échelle 10-20 m, leur injection par addition des images gomme toute relation entre compte numérique et luminance. Il y a donc modification du contenu spectral.

Méthode de Pradines : on raisonne ici indépendamment sur chaque superpixel de taille 20 m des images XS. On cherche à diviser ce superpixel entre quatre pixels XPj de taille 10 m correspondant à quatre pixels Pj de l'image P. En notant X le superpixel de la bande XS considérée, la radiométrie des pixels XPj est donnée par [2] :

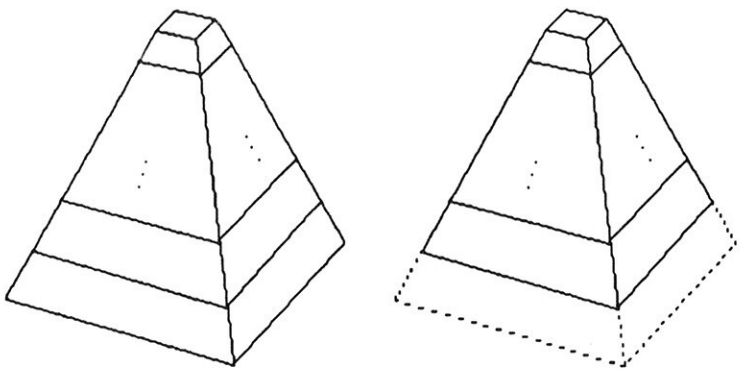
$$XPj = X \cdot \frac{Pj}{P1+P2+P3+P4} \qquad (j=1, ..., 4)$$

La somme des radiométries des pixels XPj est égale à la radiométrie du superpixel X. Pour que la moyenne radiométrique des pixels XPj soit égale à la radiométrie de X, il suffit de multiplier la valeur de XPj par 4. La méthode a été affinée par Price comme décrit dans [2], mais le concept reste identique. Son inconvénient majeur est la nécessité d'une forte corrélation entre l'image P et chaque image XS. De plus, chaque superpixel étant traité indépendamment de ses voisins, l'image résultante risque d'être très bruitée.

Méthode ARSIS

Pour passer de l'image multispectrale XS à une image multispectrale haute résolution sans en altérer l'information, il faut lui ajouter uniquement les structures manquantes, dont l'échelle caractéristique est comprise entre 10 et 20 m. Ceci pose un double problème : comment extraire exclusivement ces structures, et comment les injecter dans l'image XS pour que sa radiométrie conserve un sens physique ? La méthode ARSIS propose une solution à ce problème, à l'aide de l'analyse multirésolution, qui est un outil permettant de décrire les approximations successives d'une même image à des résolutions de plus en plus grossières, et de la transformée en ondelettes (T.O.) qui permet de modéliser la différence d'information entre deux approximations successives. Grâce à ces deux outils, on peut réaliser une étude détaillée des échelles spatiales caractéristiques des différents phénomènes présents dans une image [6, 7, 8].

Le concept d'analyse multirésolution peut être illustré par une pyramide. A la base de la pyramide, se trouve l'image initiale, que l'on représente par des approximations à des résolutions de plus en plus grossières au fur et à mesure que l'on gravit cette pyramide. Au sommet, l'approximation n'est plus constituée que d'un seul pixel. La différence d'information entre deux approximations est représentée par les coefficients d'ondelettes spécifiques à ces résolutions. L'image P et chaque image XS peuvent être représentées par deux pyramides dont les bases diffèrent d'un facteur 2, comme le montre la figure 2.



Pyramide P Pyramide XSi

Figure 2 : Pyramides multirésolution

Le but est de prolonger la pyramide XS à l'aide de la pyramide P. On va pour cela utiliser les coefficients d'ondelettes contenant l'information comprise entre les résolutions 10 et 20 m dans l'image P. Ces coefficients étants fortement liés aux caractéristiques dynamiques de l'image dont ils sont issus, il n'est pas satisfaisant de les associer directement à l'image XS. Nous établissons donc un modèle entre les coefficients connus de l'image P et de l'image XS à des échelles supérieures à 20 m (fig. 3). A partir de ce modèle et des coefficients précédents issus de P, on peut synthétiser les coefficients de XS représentant l'information comprise entre les résolutions 10 et 20 m. Il ne reste plus qu'à appliquer une transformée en ondelettes inverse à ces coefficients et à l'image XS considérée pour obtenir une image haute résolution XS-HR. Il est important de noter que par construction, l'approximation à 20 m de l'image XS-HR obtenue est identique à l'image XS de départ.

L'hypothèse faite par la méthode ARSIS est une similitude de la variabilité locale des bandes P et XS, représentée par les coefficients d'ondelettes. La validité physique d'une image XS-HR est donc d'autant plus forte que sa bande spectrale recouvre celle de P. L'image XS3-HR pourra donc présenter certaines structures issues de la bande P et normalement invisibles en proche-infrarouge. Cependant, aucune méthode visant à améliorer la résolution de l'image XS3 à l'aide de l'image P n'échappe à cette limitation. Nous allons maintenant comparer visuellement et numériquement les résultats de la méthode ARSIS à ceux de la méthode P+XS CNES.

Evaluation de la qualité des images XS-HR

Les images utilisées ici sont celles de la ville de Toulouse auquelles ont été appliquées les méthodes ARSIS et P+XS CNES. Nous présenterons successivement un exemple visuel puis des critères statistiques d'évaluation de la qualité spectrale des images synthétisées.

Exemple de la Chaussée du Bazacle : cet exemple montre que l'information spectrale des images XP CNES est fortement biaisée, contrairement à celle des images XS-HR. La Chaussée du Bazacle est une chute d'eau réalisée en travers de la Garonne. Les forts courants induisent la formation d'écume sur une vingtaine de mètres en aval. Elle apparaît très brillante sur l'image panchromatique sur laquelle on peut la confondre avec un pont. Par contre, sa réponse est quasi-nulle dans XS1 et XS2. La forte charge turbide de l'eau et de l'écume (image datée de mai) induit une forte réponse dans l'infrarouge nettement visible dans XS3 et dans P, en raison de l'étendue de sa bande spectrale (fig. 1). A ce facteur spectral, s'ajoute l'influence du changement de résolution spatiale. En effet, la largeur de la Chaussée du Bazacle est d'environ 3 pixels en bande P. Sur les images XS de résolution 20 m, la valeur radiométrique de la Chaussée est le résultat de la moyenne de ces pixels 10 m avec les pixels environnants correspondants à la Garonne. Le contraste entre la Chaussée et la Garonne est donc plus faible en XS qu'en bande P.

Les images XP1 et XP2 obtenues par la méthode P+XS font apparaître à tort la Chaussée du Bazacle, contrairement aux images XS1-HR et XS2-HR qui l'accentuent à peine. La planche 1 présente les images P, XS1, XP1 et XS1-HR sur lesquelles a été entourée la Chaussée du Bazacle. Cet exemple a par ailleurs l'intérêt de montrer la nécessité de l'utilisation des bandes multispectrales afin de pouvoir discriminer la Chaussée du Bazacle des ponts. On peut apprécier la richesse des structures de l'image XS1-HR relativement à l'image XS1.

Critères statistiques de qualité : la définition de critères de qualité des images XS-HR et XP est ardue en raison de l'absence de vérité terrain à 10 m. On peut cependant évaluer chacune des méthodes en travaillant à une résolution deux fois moindre. Nous avons donc construit des pseudo-images XS* de résolution 20 m à partir de l'image P dégradée à 20 m et des images XS dégradées à 40 m, en utilisant successivement les deux méthodes. Il est alors possible de comparer les images construites XS* aux images réelles XS. L'image XS3* réalisée par la méthode P+XS résulte d'une simple duplication des pixels de l'image XS3 dégradée à 40 m. Le tableau 1 rassemble quelques résultats statistiques.

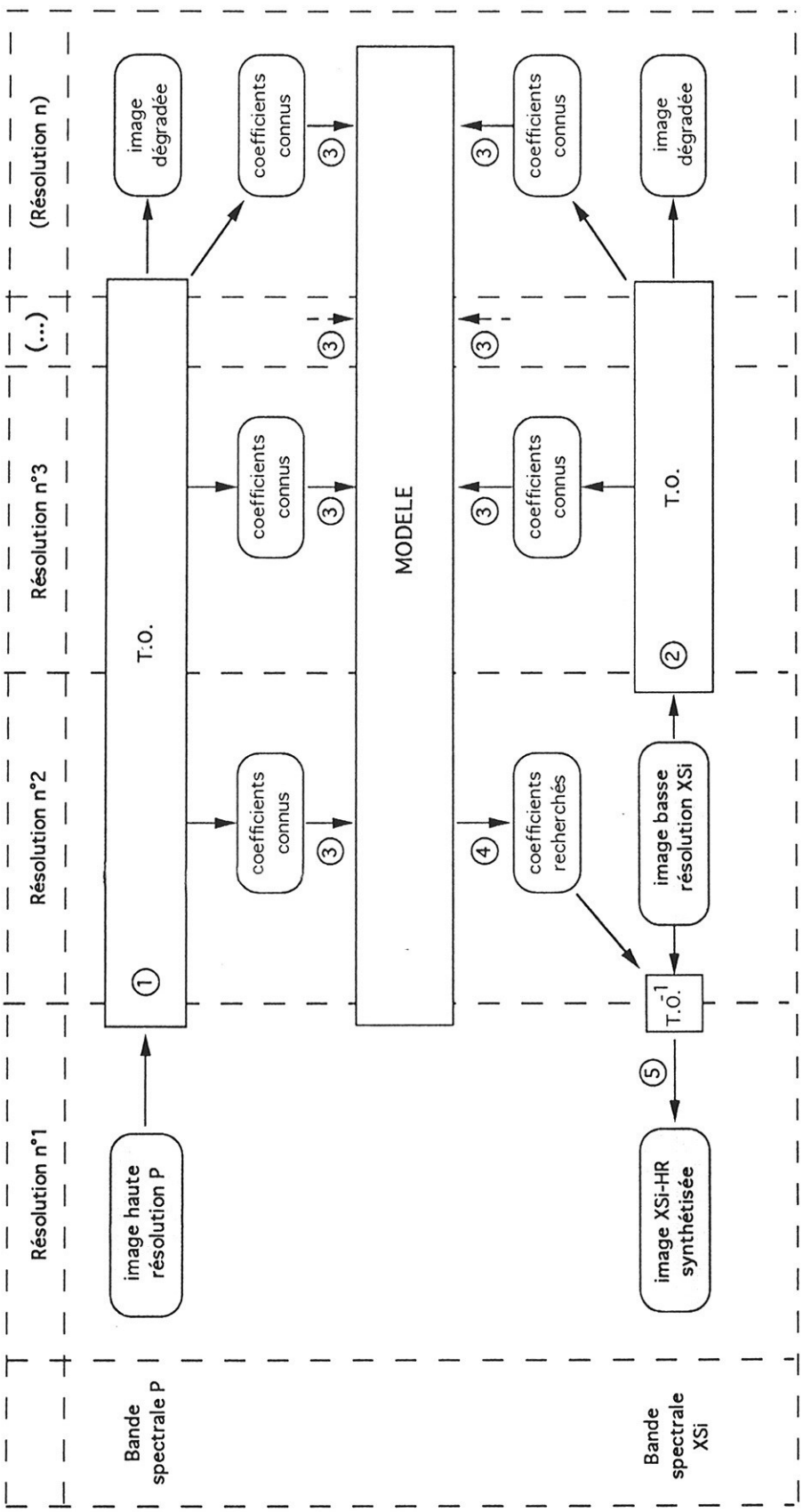


Figure 3 : Principe de la méthode ARSIS

	XS1		XS2		XS3	
	P+XS	ARSIS	P+XS	ARSIS	P+XS	ARSIS
Biais (idéal : 0) relativement à la moyenne de XS	8,67 16,4 %	0,00 0,0 %	8,07 15,9 %	0,00 0,0 %	0,00 0,0 %	0,00 0,0 %
Variance XS* - variance vraie (valeur idéale : 0) relativement à la variance vraie	153 486 %	3 9 %	126 165 %	6 8 %	9 5,4 %	4 2,5 %
Entropie XS* - entropie vraie (valeur idéale : 0) relativement à l'entropie vraie	0,994 31,4 %	0,075 2,4 %	0,540 15,2 %	0,059 1,7 %	- 0,034 - 0,86 %	- 0,014 - 0,36 %
Coefficient de corrélation entre XS et XS* (valeur idéale : 1)	0,41	0,91	0,48	0,92	0,95	0,96
Ecart-type des différences (valeur idéale : 0) relativement à la moyenne de XS	12,44 23,5 %	2,38 4,5 %	12,57 24,6 %	3,49 6,8 %	4,00 5,9 %	3,68 5,4 %

Tableau 1 : Statistiques sur les différences entre XS et XS* (en luminance ou valeur relative) pour les images de Toulouse

Le biais indique une erreur systématique, alors que la différence des variances ou des entropies traduit une modification du contenu informationnel. Le coefficient de corrélation indique la similitude globale des images XS* et XS. Enfin, l'écart-type de l'image différence (XS*-XS) permet d'évaluer la précision de l'estimation. Quelque soit le critère considéré, la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que la méthode P+XS. La méthode P+XS accroît très fortement la quantité d'information pour les deux premières bandes, contrairement à ARSIS qui n'injecte que les petites structures. On peut remarquer la diminution d'entropie pour la bande 3. Pour la méthode P+XS, l'image XS3* contient la même information que l'image XS3 dégradée à 40 m, qui est inférieure à celle de XS3. En revanche, dans le cas d'ARSIS, cette diminition d'entropie est due à des anticorrélations locales relevées entre les images P et XS3.

Le tableau 2 donne la probabilité d'avoir, en un pixel, une erreur relative en valeur absolue inférieure à un seuil donné.

	XS1		XS2		XS3	
Seuils (%)	P+XS	ARSIS	P+XS	ARSIS	P+XS	ARSIS
0,001	1,9	18,6	2,1	14	14,1	13,5
0,1	1,9	18,6	2,1	14	14,1	13,5
1	1,9	18,7	2,1	14	14,6	14,0
2	5,7	50,4	4,6	33,6	38,3	37,5
5	11,5	80,4	11,0	62,8	69,5	70,3
10	23,7	96,9	22,9	89,2	91,5	92,8
20	49,4	99,8	49,0	98,8	98,9	99,5
50	95,0	100	95,1	99,9	99,9	100
100	99,8	100	99,7	100	100	100

Tableau 2 : 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, pour les images de Toulouse. La valeur idéale est 100 pour le seuil de 0,001 %.

On voit qu'avec la méthode ARSIS, la quasi totalité des pixels de l'image présentent une erreur relative inférieure à 20 %. On notera aussi que par cette méthode, le pourcentage de pixels présentant une erreur nulle (inférieure à 0,001%) est assez élevé (environ 15 %).

La méthode ARSIS permet donc de réaliser des images multispectrales haute résolution XS-HR de bonne qualité. L'utilisation de ces images pour des applications de classification apportera un résultat plus précis qu'avec les images XS. La fusion de P et XS étant résolue, examinons maintenant le mélange de P et ERS-1.

3 FUSION P ET ERS-1

Le recalage géométrique des images P et ERS-1 est une opération complexe qui nécessite l'utilisation d'un modèle numérique de terrain. L'opération se simplifie en absence de relief, comme par exemple sur l'aéroport de Marseille-Marignane, pour lequel nous avons utilisé une méthode de recalage par points d'appuis analogue à celle décrite précédemment. L'image P, de niveau 1A, date d'octobre 1992. L'image ERS-1 est de niveau PRI (precision image), dont la taille du pixel est 12,5 m ; la date d'acquisition est mai 1992. Cette image une fois recalée sur l'image P aura une taille de pixel de 10 m. Ces deux images sont présentées en haut de la planche 2.

Dans notre application, l'intérêt est porté aux objets artificiels d'au plus quelques dizaines de mètres, comme par exemple les bâtiments ou certains réflecteurs métalliques dans la zone de l'aéroport. Une transformée en ondelettes appliquée à l'image ERS-1 permet de sélectionner les éléments de cette taille, modélisés par les coefficients d'ondelettes. Nous souhaitons garder uniquement les éléments présentant un fort contraste par rapport à leur environnement. Un seuillage des coefficients d'ondelettes, défini à l'aide de leur densité de probabilité, permet d'effectuer cette sélection. Cette opération a également pour conséquence de réduire le speckle. Parallèlement, nous disposons des coefficients d'ondelettes de l'image P obtenus par la même transformée, et de l'image P dégradée à 20 m. On obtient de nouveaux coefficients d'ondelettes par combinaison linéaire des coefficients de P et des coefficients seuillés de ERS-1. La fusion est parachevée par la transformée en ondelettes inverse appliquée à ces nouveaux coefficients et à l'image P dégradée. Au bas de la planche 2 figurent l'image P d'une partie de l'aéroport, et l'image correspondante résultant de la fusion. Sur cette dernière, apparaissent des points sombres ou brillants représentants des points de fort contraste dans l'image radar. La radiométrie de ces points dans l'image "fusion" ne représente plus une information de luminance, mais traduit une transition observée dans l'image ERS-1. L'algorithme actuel ne permet pas de relier l'intensité du pixel (sombre ou brillant) au sens de la transition dans l'imagerie radar. On relève de tel points sur les pistes et autres voies, ainsi qu'une meilleure représentation des bâtiments.

4 CONCLUSION

Nous venons de présenter une démarche de fusion exploitant la synergie des images radar ERS-1 et SPOT multispectrales et panchromatique, notamment pour la cartographie des objets artificiels. Ce but a été atteint grâce à l'analyse multirésolution et à la transformée en ondelettes, outils offrant un cadre théorique complet permettant des développements ultérieurs. Une amélioration de la méthode pourrait viser à une meilleure lecture de l'image résultante, notamment en affinant l'adéquation entre l'information injectée et l'environnement hôte. La démarche peut être étendue à d'autres applications, en modifiant par exemple les critères de sélection des objets dans l'image ERS-1, ou la technique d'injection de l'information radar dans l'image multispectrale ou panchromatique.

5 REFERENCES

[1] ANONYMOUS
Guide des utilisateurs de données SPOT, 3 tomes
Editeurs CNES et SPOT Image, Toulouse France, 1986.

[2] C.K. MUNECHIKA, J.S. WARNICK, C. SALVAGGIO, J.R. SCHOTT
Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **59**, 1, 67-72, 1993.

[3] P. S. CHAVEZ Jr., S. C. SIDES, J. A. ANDERSON
Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and SPOT Panchromatic
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **57**, 3, 265-303, 1991.

[4] A.H.J.M. PELLEMANS, R.W.L. JORDANS, R. ALLEWIJN
Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **59**, 1, 81-87, 1993.

[5] W. J. CARPER, T.M. LILLESAND, R.W. KIEFER
The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **56**, 4, 459-467, 1990.

[6] Y. MEYER, S. JAFFARD, O. RIOUL
L'analyse par ondelettes
Pour la science, 1987.

[7] S.G. MALLAT
A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **11**, 7, 674-693, 1989.

[8] T. RANCHIN, L. WALD
The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images
International Journal of Remote Sensing,**14**, 3, 615-619, 1992.

Image P

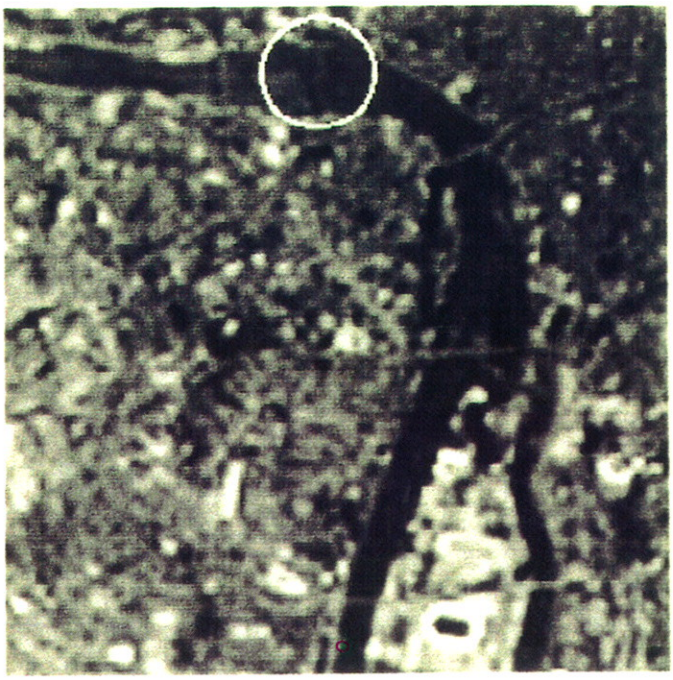


Image XS1

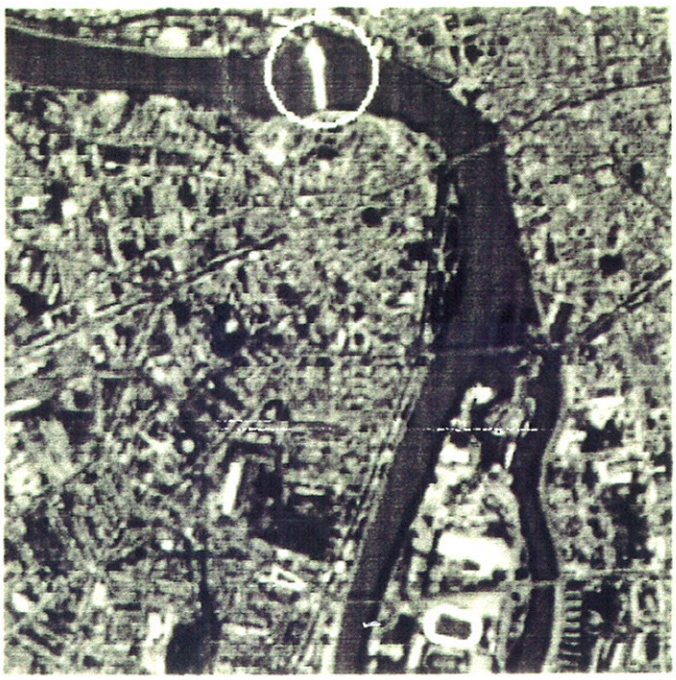


Image XP1

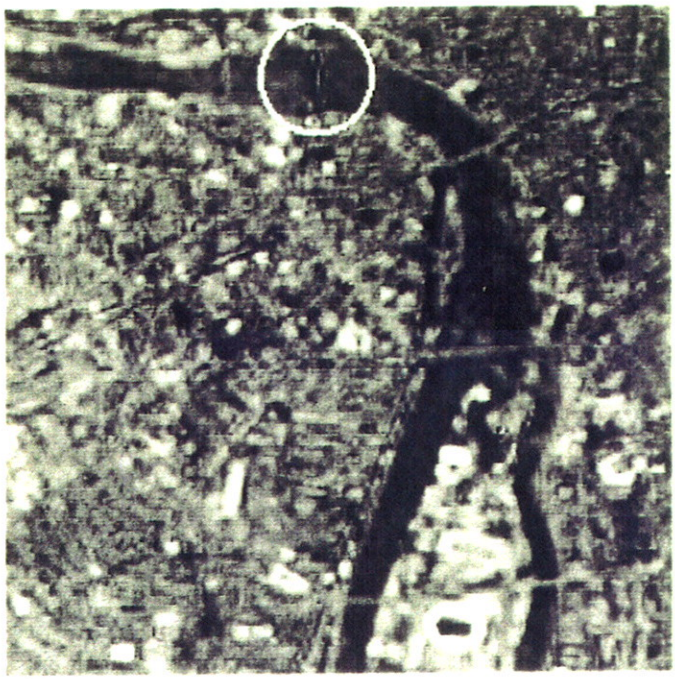


Image XS1-HR

Planche 1 : Images de la ville de Toulouse

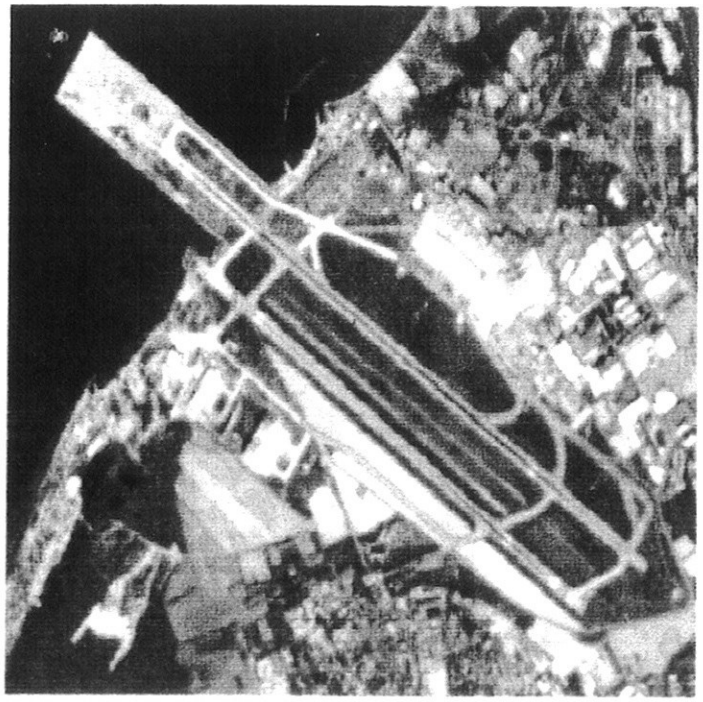


Image P

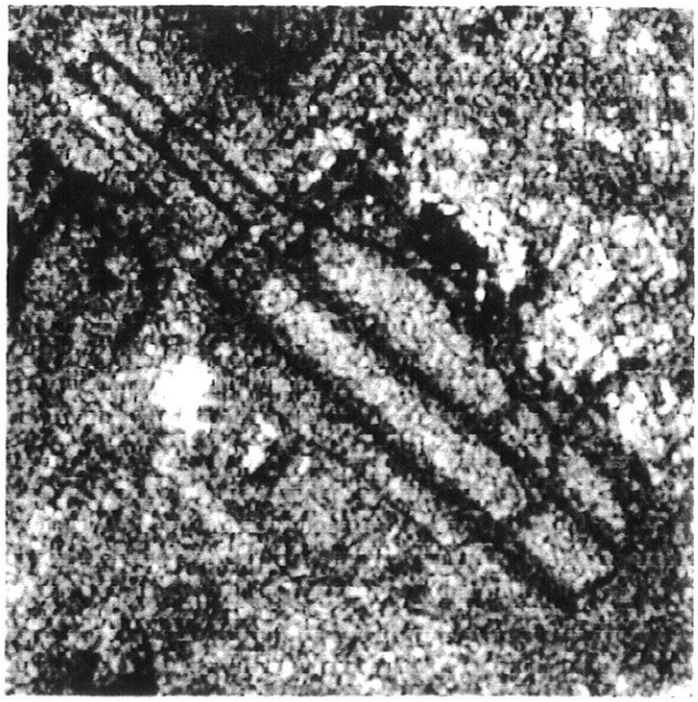
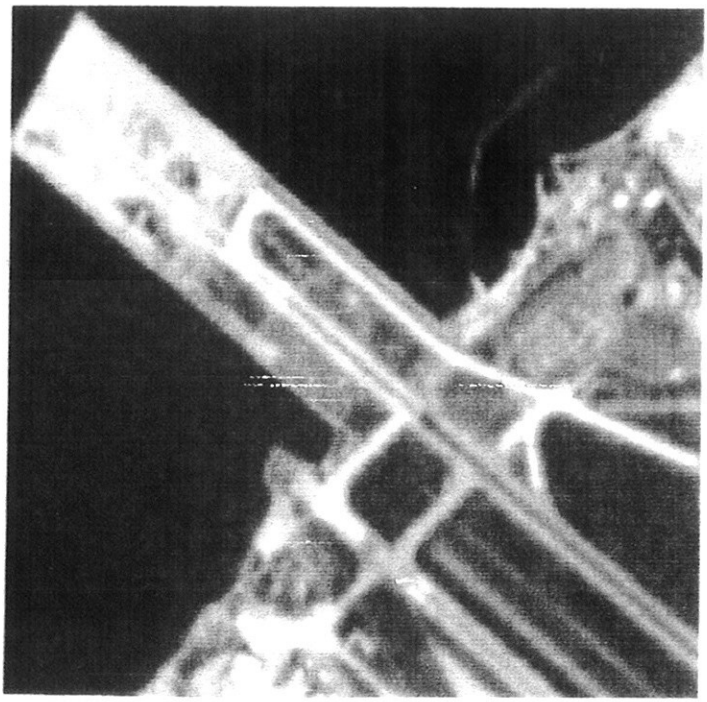
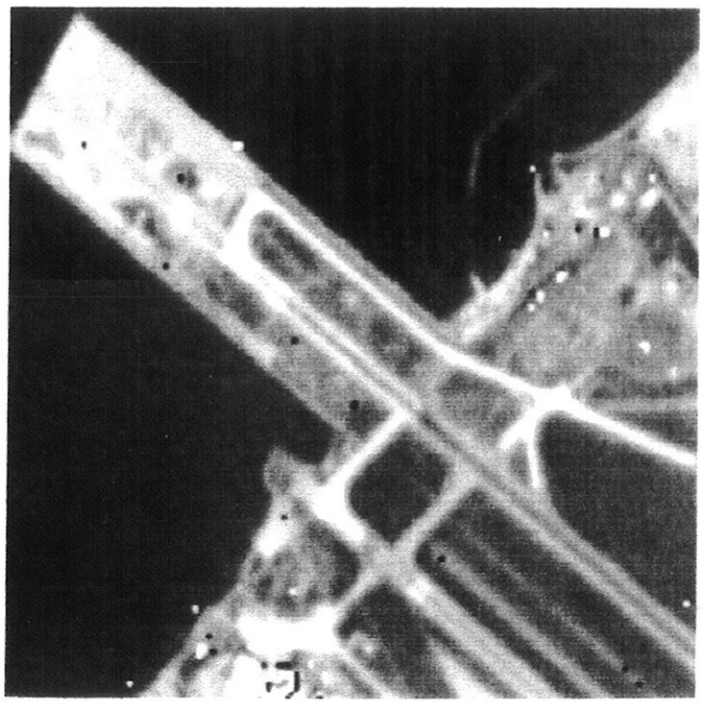


Image ERS-1



Vignette P



Vignette fusion

Planche 2 : Images de l'aéroport de Marseille-Marignane