

ANALYSE ET CORRECTION DES EFFETS DE LA FTM SUR LES IMAGES DE SPOT-HRV

Xing-Fa GU

INRA Station de Bioclimatologie
B.P. 91, 84143 Montfavet CEDEX (France)

RESUME

La fonction de transfert de modulation (FTM) d'un capteur satellitaire représente l'atténuation de l'amplitude de variation du signal d'entrée en fonction de sa fréquence. Elle peut induire d'importantes distorsions dans les luminances des pixels qui sont enregistrées (pouvant atteindre $\pm 80\%$). Une méthode opérationnelle de correction de la FTM du capteur HRV de SPOT est proposée. Elle s'appuie sur un modèle simple qui a été validé à partir de mesures effectuées sur des cibles noires (carrés de 60 m de côté) installées au sol.

Un exemple montre l'intérêt de cette correction dans le sud-est de la France pour une image recouvrant à la fois une zone urbaine et une zone agricole avec des champs de petite dimension. Les améliorations apportées sont analysées pour une image multispectrale et pour une image résultant de la combinaison multispectral-panchromatique. Contrairement aux méthodes de filtrage qui réduisent le contenu en information d'une image, la correction de la FTM du capteur permet de restituer les valeurs radiométriques des différents objets visés tout en faisant ressortir les limites de parcelles et la texture à l'intérieur de celles-ci.

ABSTRACT

The modulation transfer function (MTF) of a satellite sensor corresponds to the attenuation of the amplitude of the input signal as a function of its frequency. It can induce some large distortions in registered pixel radiances (which can reach $\pm 80\%$ in some cases). An operational method is proposed for SPOT HRV sensors. It is based on a simple model validated by measurements performed on square black targets (60 m wide) installed on the ground.

An example shows the interest of such a correction in the south-east France for an image covering both urban and rural areas. The improvement for the visual interpretation is analyzed for a multispectral image and for a multispectral-panchromatic combination. Contrary to filtering methods, which reduce the information content of an image, MTF correction reconstitutes the radiance values of the different objects in the image while at the same time bringing out the boundaries between the different elements and the texture of each.

Mots clés : Télédétection, SPOT, FTM, Prétraitement des données, Amélioration des images.

Key words : Remote sensing, SPOT, MTF, Data preprocessing, Image enhancement.

1. INTRODUCTION

Les images satellitaires dans les domaines du visible et du proche-infrarouge, fournissent des informations radiométriques et spatiales sur les cibles visées. Au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été entrepris pour améliorer la qualité des informations obtenues. Les travaux se sont orientés dans deux directions: la conception des capteurs et les méthodes de correction des données acquises ou d'amélioration des images.

En ce qui concerne la conception des capteurs les améliorations portent sur la réduction des sources de bruit (Leroy, 1990) et l'accroissement des résolutions spatiale (passage de 79 m pour LANDSAT MSS à 10 m pour SPOT panchromatique) et spectrale avec les systèmes spectro-imageurs comme AVIRIS (Goetz et al., 1985).

De nombreux travaux ont été consacrés au cours des dernières années, à la mise au point de méthodes de correction des effets atmosphériques et topographiques sur les images spatiales (Basu et al., 1990; Conel, 1990; Tanré et al., 1990; Kawata et al., 1988; Civco, 1989). Par ailleurs les images panchromatiques de SPOT combinées avec des images multispectrales (SPOT ou Landsat-TM) sont utilisées pour faciliter l'interprétation visuelle (Cliche et al., 1985; Chavez et Bowel, 1988; Carper et al., 1990; Chavez et al., 1991). Cependant, dans tous ces travaux, les distorsions radiométriques introduites par les capteurs spatiaux ont généralement été ignorées. C'est en particulier le cas des effets de la fonction de transfert de modulation (FTM). Le but de cet exposé est donc d'analyser les effets de la FTM sur les valeurs radiométriques des pixels et sur l'interprétation visuelle des images multispectrales de SPOT et des images résultant de la combinaison des données panchromatiques et multispectrales.

2. LA FONCTION DE TRANSFERT DE MODULATION ET SA CORRECTION

2.1. La FTM d'un capteur satellitaire

La FTM d'un capteur satellitaire représente l'atténuation de l'amplitude de variation du signal d'entrée en fonction de sa fréquence spatiale. Elle dépend des caractéristiques de transfert du signal de nombreux éléments: système optique, détecteur, électronique de traitement du signal, atmosphère... (Leroy, 1990). Pour simplifier l'exposé nous ne considérerons que la FTM globale, résultant de l'addition de toutes les composantes élémentaires. Elle est représentée par un coefficient compris entre 0 et 1 qui dépend de la fréquence spatiale de variation du signal (l'atténuation étant d'autant plus forte que ce coefficient

est plus petit). Elle peut être définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle du capteur (Leroy, 1989). Pour restituer le signal tel qu'il était à l'entrée du capteur il faut donc diviser la transformée de Fourier du signal de sortie par la FTM correspondante.

L'image qui est obtenue à partir d'un satellite correspond à un échantillonnage effectué sur la zone visée, au pas du capteur. Cela correspond, par exemple, à 20m pour HRV de SPOT en mode multispectral et en visée verticale. La fréquence d'échantillonnage f_e est ainsi, pour HRV, de 41,6 kcycles/radian, ce qui équivaut à une fréquence spatiale de 50 cycles par km en visée verticale. Il est évident que l'effet de la FTM sera le plus grand lorsque deux pixels adjacents présenteront un contraste maximum. Cela correspond à une fréquence égale à $f_e/2$ qui est appelée fréquence de Nyquist ou fréquence de coupure. Pour des paysages présentant une fréquence supérieure à la fréquence de Nyquist il se produit un effet dit de "repliement du spectre" qui modifie cette fréquence en une fréquence plus faible, symétrique de la fréquence initiale par rapport à la fréquence de Nyquist. Le capteur idéal est celui pour lequel la FTM est égale à 1 pour les fréquences inférieures à la fréquence de Nyquist et à zéro pour les fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist.

Pour un capteur réel la FTM correspondant à la fréquence de Nyquist (FTM_N) est toujours inférieure à 1. Lorsque la fréquence des variations du paysage diminue, la FTM tend progressivement vers 1. C'est ce que montre la figure 1 qui correspond au capteur Thematic Mapper de Landsat-4 (Schowengerdt et al., 1985).

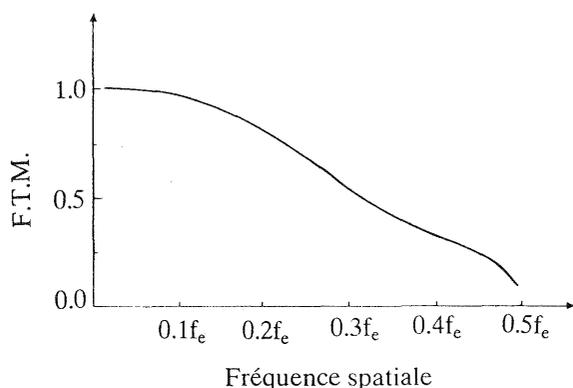


Figure 1 : Variation de la FTM de LANDSAT4 THEMATIC MAPPER en fonction de la fréquence spatiale (adapté d'après Schowengerdt et al., 1985)

2.2. Correction de la FTM des capteurs HRV de SPOT

La FTM des capteurs HRV de SPOT 1 et 2 n'a été mesurée qu'à la fréquence de Nyquist avant le lancement du satellite (en utilisant une mire présentant une variation sinusoïdale de l'intensité). Les mesures ont été effectuées avec les bandes de la mire orientées perpendiculairement et parallèlement à la ligne de détecteurs, afin d'obtenir les valeurs de la FTM selon les lignes et les colonnes de l'image. Selon les lignes, la FTM correspond au passage d'un détecteur au suivant alors que selon les colonnes on

mesure, entre autres, l'effet de filé sur le même détecteur. Les valeurs qui ont été obtenues pour SPOT 2 sont données dans le tableau 1.

Pour corriger les images il nous faut non seulement les valeurs de la FTM pour $f_e/2$, mais également leurs variations en fonction de la fréquence. Comme nous ne disposons pas de telles données nous avons établi un modèle approximatif facilement utilisable pour les applications opérationnelles.

Si nous nous reportons à la figure 1 nous pouvons remarquer que la variation de la FTM pour Landsat-4 TM entre $0,1f_e$ et $0,5f_e$ est pratiquement linéaire et que, lorsque la fréquence est inférieure à $0,1f_e$ la FTM est égale à 1 (Schowengerdt et al., 1985). C'est pourquoi nous avons choisi pour représenter la variation de la FTM des capteurs HRV, le modèle linéaire qui est représenté sur la figure 2. La FTM correspondant à un couple donné de fréquences horizontale et verticale, est ainsi déterminée par interpolation linéaire, à partir des valeurs données dans le tableau 1 et du modèle de la figure 2.

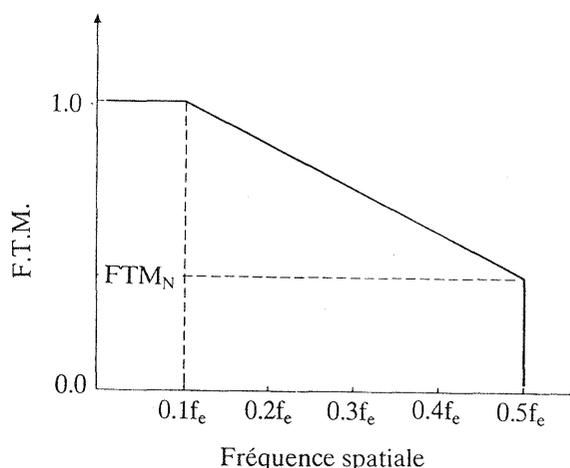


Figure 2 : Modèle utilisé pour la correction de la FTM de SPOT HRV. (FTM_N) valeur de la FTM à la fréquence de Nyquist donnée dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs de la FTM des capteurs HRV de SPOT 1 et 2, mesurées à la fréquence de Nyquist, avant le lancement (SPOT IMAGE, 1986; Henry, 1992).

Bandes	XS1	XS2	XS3	PA
SPOT 1 (HRV 1)				
FTM horizontale	0.41	0.38	0.36	
FTM verticale	0.48	0.41	0.28	
SPOT 2 (HRV 1)				
FTM horizontale	0.42	0.42	0.40	0.21
FTM verticale	0.48	0.44	0.37	0.27
SPOT 2 (HRV 2)				
FTM horizontale	0.42	0.42	0.41	0.22
FTM verticale	0.50	0.47	0.39	0.30

Pour corriger l'image nous avons tout d'abord appliqué sur l'image brute une transformation en série de Fourier à deux dimensions. Nous avons alors corrigé l'image du spectre de Fourier en divisant les valeurs réelles et imaginaires, pour chaque couple de fréquences horizontale et verticale, par la valeur de la FTM correspondante. La transformation inverse, appliquée à l'image du spectre corrigé, nous a alors permis d'obtenir l'image corrigée de l'effet de la FTM.

3 - EFFET DE LA FTM SUR LA VALEUR RADIOMETRIQUE DES PIXELS - VALIDATION DU MODELE DE CORRECTION DE LA FTM

Pour analyser les effets de la FTM sur les données de SPOT et valider le modèle proposé, nous avons profité de l'opportunité qui nous était offerte par l'opération ART*SPOT. Celle-ci a été organisée par la Réserve Géologique de Haute Provence, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et la société SPOT IMAGE, au mois d'Octobre 1989, dans la Plaine de la Crau. Son objectif était la création au sol, sur une surface plane de 1,5 x 1,0 km, du symbole de la Terre (O) formé par l'assemblage de 16 carrés noirs de 60 m de côté.

Les carrés noirs étaient formés par des films de polyéthylène noir tendus au sol. Ils présentaient un fort contraste avec leur environnement constitué par un sol de galets avec une végétation éparsée et sèche. Ils correspondaient ainsi à une surface de 3x3 pixels de SPOT, ce qui permettait d'avoir au moins un pixel pur et un effet maximum de la FTM. La validation du modèle de correction s'est appuyée sur des mesures au sol de la réflectance des carrés noirs et du sol environnant et des caractéristiques de l'atmosphère.

Au niveau d'un satellite, la luminance qui est mesurée correspond à celle de la cible visée, atténuée par la transmission atmosphérique et à laquelle s'ajoutent la luminance de l'atmosphère et la contribution de l'environnement de la cible (à cause de la diffusion atmosphérique). La luminance apparente peut être transformée en réflectance apparente en introduisant l'éclaircissement équivalent du soleil hors de l'atmosphère. On écrit ainsi:

$$R^* = R_{ae} + T.R$$

avec:

- R*: réflectance apparente;
- R_{ae}: somme de la réflectance de l'atmosphère et de la contribution de l'environnement;
- T: transmittance de l'atmosphère.
- R: réflectance de la cible, mesurée au sol.

Si on connaît les réflectances apparentes et les réflectances au sol de deux surfaces voisines (même environnement) relativement contrastées (les carrés noirs et leur environnement), on peut alors déduire facilement R_{ae} et T en résolvant les deux équations linéaires obtenues, à condition toutefois que la FTM ne vienne pas perturber les

données acquises par le satellite. Par ailleurs, les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la composante R_{ae} peuvent être également calculées à l'aide du modèle 5S (Tanré et al., 1990) qui a été préalablement validé sur le site (Gu et al., 1991).

La procédure utilisée a consisté à comparer au niveau du satellite d'une part les valeurs de la réflectance apparente des surfaces noires et d'autre part les valeurs de la transmittance et de la réflectance de l'atmosphère, telles qu'elles peuvent être déduites des valeurs numériques des images corrigées de la FTM et telles qu'elles peuvent être estimées à partir des mesures au sol après la prise en compte des effets atmosphériques.

Le tableau 2 présente ainsi les réflectances apparentes de la cible noire. On peut remarquer que les écarts entre les valeurs déduites de l'image et celles fournies par le modèle 5S décroissent sensiblement après la correction de la FTM. Il faut noter qu'avec les cibles de petite dimension, présentant un fort contraste avec leur environnement, les corrections des effets de la FTM sont très importantes.

Le tableau 2 montre également que les écarts relatifs dépendent de la bande spectrale considérée car deux phénomènes se sont conjugués. La FTM est plus faible pour XS3 que pour XS1 (Tableau 1) et le contraste entre la cible noire et son environnement est plus grand pour XS3 que pour XS1. Cela conduit ainsi à un écart relatif entre données corrigées et données brutes de 5% pour XS1 et de 79% pour XS3.

Tableau 2 : Comparaison des valeurs de la réflectance apparente de la cible noire R*_{noir} et de son environnement R*_{crau}. (Image SPOT-1 HRV 1, 16 Octobre 1989)

Bandes	XS1	XS2	XS3
R* _{crau}	0.160	0.200	0.244
R* _{noir} (NC)	0.106	0.113	0.147
R* _{noir} (C)	0.101	0.088	0.082
R* _{noir} (5S)	0.102	0.084	0.074
R* _{noir} (5S)-R* _{noir} (NC)	-0.004	-0.029	-0.073
R* _{noir} (5S)-R* _{noir} (C)	0.001	-0.004	-0.008

(NC) : valeur non corrigée des effets de la FTM

(C) : valeur corrigée des effets de la FTM

(5S) : valeur calculée à partir du modèle 5S

Le tableau 3 présente les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la contribution de l'atmosphère et de l'environnement à la réflectance, qui sont déduites de l'image SPOT ou calculées à l'aide du modèle 5S. Avant la correction de la FTM on observe des valeurs tout à fait aberrantes (par exemple : transmittance atmosphérique pour XS1 plus grande que pour XS3). Par contre, après la correction les valeurs obtenues sont en bon accord avec

celles de la littérature (Tanré et al., 1979). De plus les écarts entre les valeurs obtenues à partir de l'image et calculées à l'aide de 5S, sont faibles. Ces résultats ainsi que ceux du tableau 2, nous permettent ainsi de valider la méthode proposée pour la correction des effets de la FTM de SPOT.

Tableau 3 : Comparaison des valeurs de la transmittance de l'atmosphère T et de la somme de la réflectance de l'atmosphère et de la contribution de l'environnement R_{ae} , déduites de l'image SPOT (avec et sans correction de la FTM) et déterminées à partir du modèle 5S.

Bandes	XS1	XS2	XS3
T(NC)	0.531	0.503	0.408
T(C)	0.583	0.644	0.682
T(5S)	0.568	0.671	0.713
R_{ae} (NC)	0.084	0.094	0.133
R_{ae} (C)	0.077	0.064	0.059
R_{ae} (5S)	0.079	0.059	0.050

(NC) : valeur non corrigée des effets de la FTM

(C) : valeur corrigée des effets de la FTM

(5S) : valeur calculée à partir du modèle 5S

La figure 3 représente la fréquence des corrections appliquées aux différents pixels d'une image. Elle montre que pour plus de la moitié des pixels les corrections sont supérieures à $\pm 10\%$. De plus, les pixels pour lesquels les corrections sont supérieures à 50%, représentent 13% de la population totale.

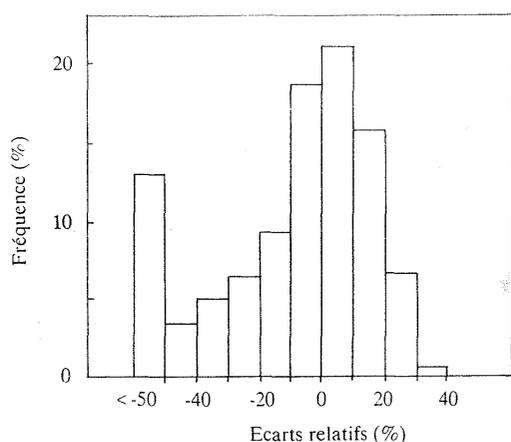


Figure 3 : Fréquence des corrections (en % de la valeur radiométrique) appliquées à l'image SPOT-1 HRV-1 du 16 Octobre 1989 (KJ 49-262).

4 - AMELIORATION DE L'INTERPRETATION VISUELLE DES IMAGES

L'interprétation visuelle des images satellitaires s'appuie sur les informations radiométriques (intensité, saturation et teinte) et spatiale (structure, texture, forme...). Comme cela

a été montré dans le paragraphe précédent on dispose d'informations radiométriques plus précises après les corrections de FTM. En particulier pour des cibles de petite dimension correspondant aux mêmes type et état de surface, on aura la même couleur quel que soit leur environnement.

Les corrections de la FTM permettent également d'améliorer les informations spatiales apportées par les images en faisant disparaître les effets de flou comme le montrent les figures 4A et 4B. Ces deux figures correspondent à un extrait d'une image multispectrale qui recouvre une partie de la ville d'Arles (sud-est de la France), une zone agricole avec des champs de petite dimensions ainsi que les deux bras du Rhône (SPOT-2, 23 Juin 1991).

Lorsque l'on a besoin d'informations spatiales et spectrales détaillées il est nécessaire de combiner des images correspondant à des résolutions spatiales différentes comme la combinaison d'une image panchromatique de SPOT avec une image multispectrale de SPOT ou de Landsat-TM. Quatre méthodes différentes ont été proposées pour effectuer ces combinaisons (Chavez et al., 1991) :

- calcul pixel à pixel avec une fonction mathématique par bande (Cliche et al., 1985; Chavez, 1986);
- à la suite d'une analyse en composantes principales des images multispectrales, remplacement de la première composante par l'image panchromatique avant la restitution (Chavez et Bowel, 1988);
- après une transformation des images multispectrales en images d'intensité, saturation et teinte, remplacement de l'image d'intensité par l'image panchromatique avant la restitution (Welch et Manfred, 1987; Carper et al., 1990);
- application d'un filtre passe haut sur l'image panchromatique et addition avec un coefficient de pondération de l'image résultante aux images correspondant à chaque bande spectrale (Schowengerdt, 1980; Chavez et al., 1991).

Chavez et al. (1991) ayant montré que la dernière méthode est celle qui apporte le moins de distorsions radiométriques, elle a donc été choisie pour combiner les images multispectrale et panchromatique de SPOT (Figures 4C et 4D).

La comparaison des images 4A et 4C permet de constater que la combinaison multispectral panchromatique a permis d'améliorer sensiblement la qualité de l'information spatiale. De nombreux détails apparaissent aussi bien pour la zone urbaine que pour la zone agricole mais cependant l'effet de flou subsiste. La figure 7 représente l'image résultant de la combinaison des images panchromatique et multispectrale mais après les avoir corrigées des effets de la FTM. La comparaison des figures 4C et 4D permet de voir les améliorations notables qui sont apportées notamment en ce qui concerne :

← nord



(A) Image multispectrale HRV-2 sans correction de la FTM;



(B) Image multispectrale HRV-2 après correction de la FTM;



(C) Combinaison des images panchromatique HRV-1 et multispectrale HRV-2 sans correction de la FTM;



(D) Combinaison des images panchromatique HRV-1 et multispectrale HRV-2 après correction de la FTM sur les deux images.

Figure 4 : Extrait de la scène SPOT-2 acquise le 23 Juin 1991 (KJ 49-262) et situé à la limite nord de la ville d'Arles (3.84 x 2.88 km). (Copyright SPOT IMAGE)

- le réseau routier, les petits ponts et les rues de la ville,
- les limites des parcelles agricoles et les haies brise-vent,
- la texture à l'intérieur des parcelles agricoles

Il est bien évident que la comparaison des images 4A et 4D montre tout l'intérêt des corrections de FTM et de la combinaison des images multispectrale et panchromatique.

4. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer l'importance et l'intérêt des corrections de la FTM des capteurs satellitaires. Le modèle très simple qui est proposé pour corriger la FTM de SPOT peut être utilisé de façon opérationnelle. Cependant, il devrait être amélioré dans l'avenir à la suite de déterminations expérimentales de la FTM de SPOT sur son orbite en fonction de la fréquence de variation du paysage, ce qui est prévu dans l'avenir.

Remerciements : Ce travail a été effectué grâce à un financement du Programme National de Télédétection Spatial (PNTS, Contrat AI/0693/1769). L'auteur tient également à remercier le Dr. Gérard Guyot, Directeur de Recherches à l'INRA, qui a supervisé cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Basu S., Tewari M., Agarwal V.K., 1990; A model for retrieval of surface spectral reflectance from satellite radiance measurements using realistic atmospheric aerosol profiles. *Int. J. Remote Sens.*, 11 (3): 395-407.
- Carper W.J., Lillesand T.M., Kiefer R.W., 1990; The use of intensity-hue-saturation transformation for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 56: 459-467.
- Chavez P.S. Jr, Bowell J.A., 1988; Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix, Arizona region. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54: 1699-1708.
- Chavez P.S. Jr, Sides S.C., Anderson A., 1991; Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 57: 295-303.
- Cliche G., Bonn F., Teillet P., 1985; Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51: 311-316.
- Conel J., 1990; Determination of surface reflectance and estimates of atmospheric optical depth and single scattering albedo from Landsat Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sens.*, 11 (5): 783-828.
- Goetz A.F.H., Vane G., Solomon J., Rock B.N., 1985; Imaging Spectrometry for Earth remote sensing. *Science*, 228 : 1147-1153.
- Gu X.F., Guyot G., Verbrugge M., 1990; Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-Interprétation*: 90-1 (5): 39-52.
- Gu X.F., Guyot G., Verbrugge M., 1991; Utilisation de l'opération ART*SPOT pour tester le modèle 5S et la FTM du satellite SPOT; In *Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France) Ed. ESA Publ. Div. ESA SP-319 : 53-56.
- Henry P., 1992. Communication personnelle
- Leroy M., 1990; Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. In *Ecole d'Eté en Télédétection Spatiale: Aspects Physiques et Modélisation*, Août 1988, CEPADUES Ed. (France): 311-363.
- Schowengerdt R.A., 1980; Reconstruction of multispectral, multispectral image data using spatial frequency content. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 46: 1325-1334.
- Schowengerdt R.A., Archwamety C., Wrigley R.C., 1985; Landsat Thematic Mapper image-derived MTF. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51: 1395-1406.
- SPOT IMAGE, 1986; Guide des utilisateurs de données SPOT: SI/GP/86.0005 f, Annexe 02, pages 32-33.
- Tanré D., Deroo C., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y., 1990; Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *Int. J. Remote Sens.*, 11 (4): 659-668.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., de Lefte A., 1979; Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties. *Applied Optics* 18: 3587-3594.
- Welch R., Ehlers M., 1987; Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 53: 301-303.