Télédétection, 2002, vol. 2, n° 3, p. 177-182
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2002 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

Proposition d'une nouvelle terminologie : l'infrarouge médian

ALAIN ROYER[a*], FRANÇOISE NERRY[b] et FERDINAND BONN[a]

[a] *Groupe de géophysique spatiale de l'atmosphère et de l'environnement, CARTEL*
Université de Sherbrooke, Sherbrooke J1K 2R1, Québec, Canada.
Téléphone : (819) 821 8000, poste 2961 ; télécopieur : (819) 821 7944.
Courriel : aroyer@courrier.usherb.ca ; fbonn@courrier.usherb.ca

[b] *LSIIT/ENSPS, CNRS,*
Université Louis-Pasteur, Boul. Sébastien-Brant, 67400 Illkirch, France.
Téléphone : 33 3 88 65 51 25 ; télécopieur : 33 3 88 65 52 49.
Courriel : francoise.nerry@mail-grt.u-strasbg.fr

(soumis le 18 décembre 2000 ; révisé le 10 avril 2001 ; accepté le 24 avril 2001)

Dans cette note, on propose une nouvelle terminologie relative à une subdivision du spectre électromagnétique dans l'infrarouge moyen (IRM), utilisée en télédétection spatiale pour l'observation de la Terre (fenêtre atmosphérique). On distingue ainsi l'infrarouge médian (IRMe : 3,4-5,2 µm) de l'infrarouge thermique (IRT : 7,5-14 µm). L'IRMe est le domaine spectral dans lequel la réflexion du rayonnement solaire s'additionne à l'émission de la surface si sa température n'est pas extrême. On rappelle brièvement l'intérêt particulier de ce domaine spectral spécifique, au potentiel encore relativement peu utilisé.

Mots-clefs : télédétection ; infrarouge moyen ; infrarouge médian ; rayonnement thermique ; fenêtre atmosphérique ; terminologie.

A new terminology proposal : Middle Wave IR

The objective of this note is to propose a new French terminology for a subdivision of the mid infrared (MIR) regions of the electromagnetic spectrum used in satellite remote sensing for Earth observation (atmospheric window). Within the 3-30 µm, we distinguish the middlewave infrared MWIR (3,4-5,2 µm) from the thermal infrared TIR (7,5-14 µm). The middlewave infrared is the spectral domain for which the solar radiation reflection is added to the surface emission if its temperature is not extreme. We briefly present the relevance of this particular spectral domain still relatively underused in remote sensing applications.

Keywords : remote sensing ; middlewave infrared ; mid infrared ; thermal infrared ; atmospheric window ; terminology.

1. INTRODUCTION

La mise en orbite, au début de cette nouvelle décennie, de nouveaux satellites d'observation de la Terre opérant dans une très large gamme spectrale du rayonnement électromagnétique nous amène à préciser la terminologie utilisée pour définir certains domaines spectraux étudiés.

En effet, aussi bien dans la littérature anglophone que francophone, il existe une certaine confusion dans la définition des différentes parties du spectre électromagnétique de l'infrarouge moyen (IRM) que nous utilisons en télédétection. Par exemple, la bande 4 du capteur VÉGÉTATION sur SPOT-4 comprise entre 1,58 et 1,75 µm est dénommée « bande moyen infrarouge (MIR) » (http://spot4.cnes.fr/spot4_fr/index.htm), une appellation qui n'est pas en conformité avec la terminologie de la Commission de Terminologie de la Télédétection Aérospatiale (COMITTAS) (Paul *et al.*, 1997, 1999). En référence aux recommandations de la COMITTAS, il nous semble ainsi important de clarifier et de tenter d'unifier le vocabulaire francophone en télédétection sur la notion d'infrarouge moyen.

2. FENÊTRES ATMOSPHÉRIQUES

Sur les figures 1, 2 et 3, on a mis en évidence les différents domaines du spectre électromagnétique où l'atmosphère est plus ou moins transparente, ce qui correspond aux longueurs d'onde dans lesquelles l'observation de la Terre par satellite est possible (fenêtres atmosphériques) hors du domaine des hyperfréquences. Ce sont ces fenêtres atmosphériques qui nous intéressent pour la télédétection des surfaces terrestres. Les domaines spectraux où la transparence de

[*] Correspondant principal

l'atmosphère est nulle ou quasi nulle sont le résultat de l'absorption du rayonnement électromagnétique par l'ensemble des gaz qui constituent l'atmosphère, soit principalement O_2, N_2, H_2O, CO_2, CO, N_2O, NO_2, NO et CH_4. C'est cette absorption qui rend l'atmosphère opaque à certaines longueurs d'onde (voir la figure 2 montrant la transmission totale de l'atmosphère et de certains gaz entre 2,8 et 4,2 µm et la figure 3 montrant la transmission totale de l'atmosphère entre 3,0 et 5,5 µm).

Entre 0, 3 et 15 µm (figures 1 et 3) , il apparaît clairement six fenêtres atmosphériques :

(0,4-0,78 µm), (0,8-1,1 µm), (1,1-2,5 µm),
(3,4-4,2 µm), (4,5-5,2 µm) et (7,5-14 µm).

Sur le tableau 1, on présente ces plages spectrales avec la nomenclature proposée par la COMITTAS (Paul *et al.*, 1997, 1999) et regroupées dans trois grands domaines : le visible, le proche infrarouge (PIR) et l'infrarouge moyen (IRM). Cependant, dans l'infrarouge moyen, il existe deux domaines spectraux différents qu'il convient de différencier : l'infrarouge médian (IRMe) et l'infrarouge thermique (IRT). L'infrarouge médian, terme que nous proposons, est défini dans la section suivante.

3. L'INFRAROUGE MÉDIAN

Si, pour le PIR et l'IRT, il y a généralement consensus sur leur définition, il en va différemment pour l'IRM couvrant un domaine spectral très étendu de 3 à 30 µm (Paul *et al.*, 1997). Nous proposons de différencier le sous-domaine spectral compris entre 3, 4 et 5, 2 µm par un qualificatif particulier, infrarouge médian (*middle wave IR*) afin de l'identifier clairement (tableau 1, figures 1 et 3).

En effet, entre 3,4-5,2 µm, le rayonnement reçu au niveau du capteur visant une surface terrestre à température normale (–10° à + 50 °C) est une combinaison de deux sources de rayonnements (figure 4). On y mesure, d'une part, le rayonnement solaire réfléchi par la surface et rétrodiffusé par l'atmosphère et, d'autre part, le rayonnement émis par cette surface et par l'atmosphère.

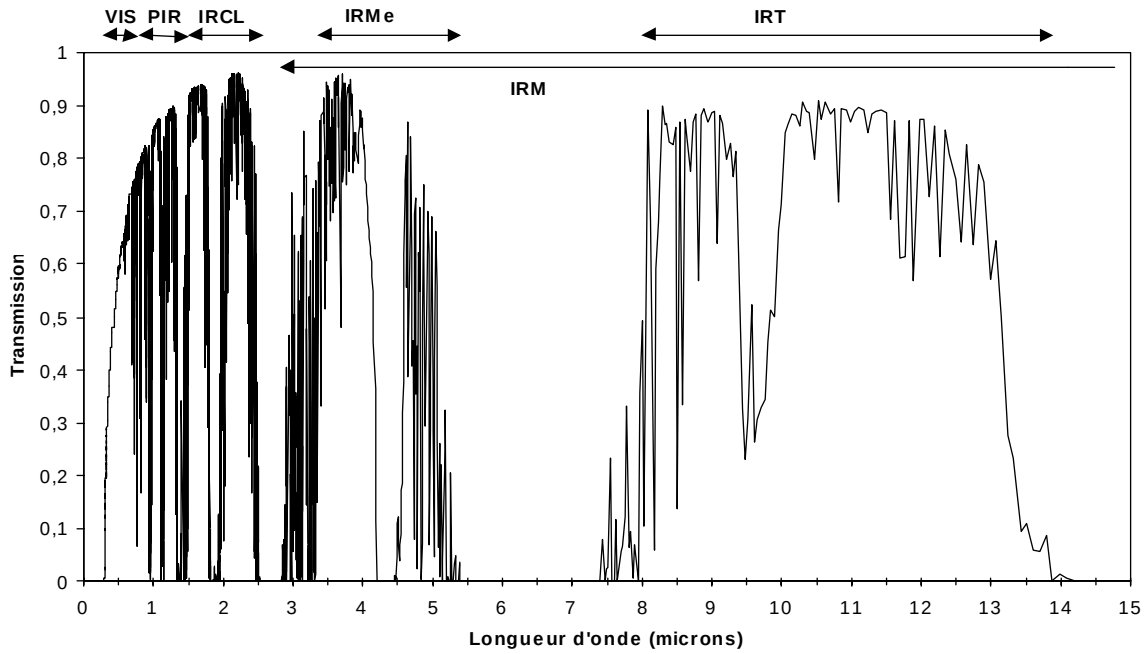


FIGURE 1 Spectre de transmittance de l'atmosphère totale sur un trajet direct en visée nadir, à travers une atmosphère standard *mid-latitude summer* avec des aérosols continentaux (visibilité 23 km), simulé à l'aide du modèle MODTRAN 2. Les cinq « fenêtres atmosphériques » sont indiquées approximativement (voir tableau 1). *Transmittance spectrum of the total for a direct nadir view, through a standard mid-latitude summer atmosphere with continental aerosols (23 km visibility) and simulated with the MODTRAN 2 radiative transfer code. The five atmospheric windows are shown (see Table 1).*

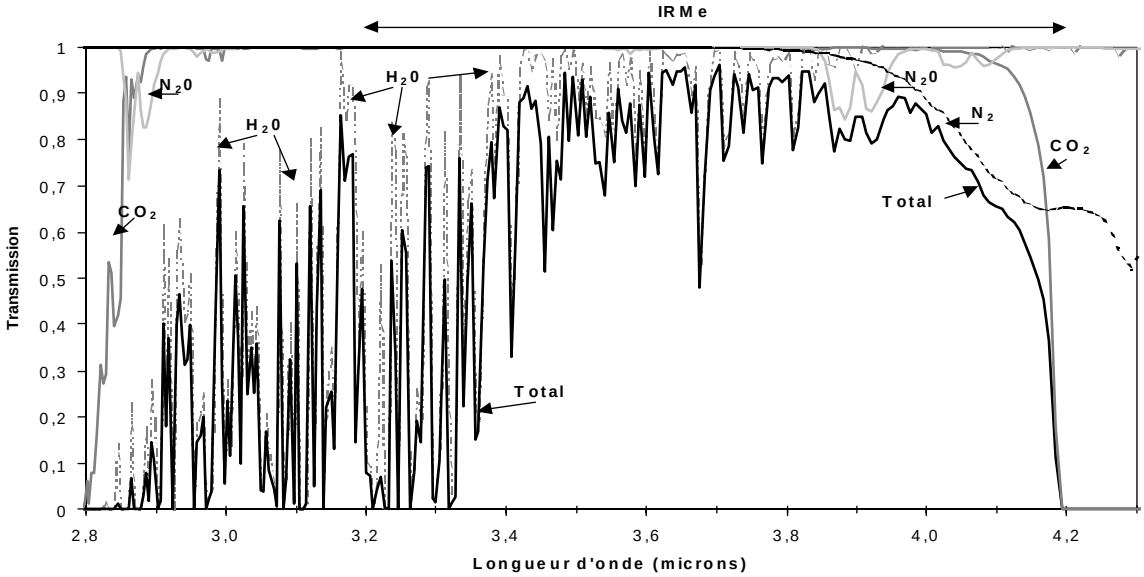


FIGURE 2 Fenêtre atmosphérique de l'infrarouge médian : spectre de transmittance totale de l'atmosphère (trait gras) sur un trajet direct en visée nadir à travers une atmosphère standard *mid-latitude summer* avec des aérosols continentaux (visibilité de 23 km), simulée à l'aide du modèle MODTRAN 2. La contribution à la réduction de la transmitance par l'absorption de la vapeur d'eau (H_2O, trait fin pointillé), de N_2 (trait gras pointillé), du CO_2 (trait gris pâle continu) et de N_2O (trait gris foncé continu) est montré. *Atmospheric window in the middlewave infrared region : transmittance spectrum of the total atmosphere (bold black line) for a direct nadir view through a standard mid-latitude summer atmosphere with continental aerosols (23 km visibility) and simulated with the MODTRAN 2 radiative transfer code. The reduction to the transmission from absorption by water vapour (H_2O, dotted gray line), N_2 (bold dotted line), N_2O (dark gray line) and CO_2 (light gray line) is shown.*

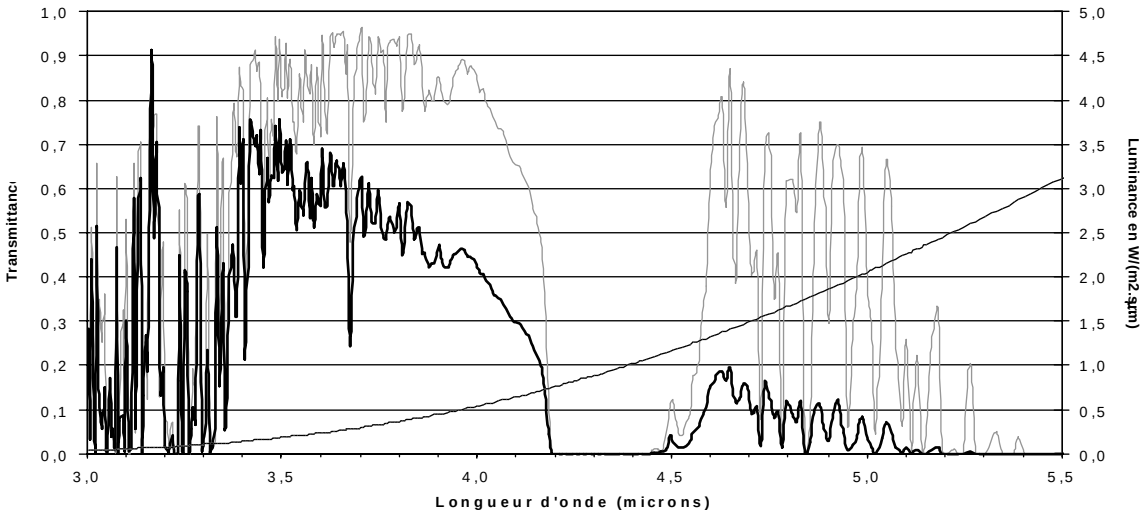


FIGURE 3 Dans le domaine de l'infrarouge médian : spectre de transmittance totale de l'atmosphère (trait gris) sur un trajet direct en visée nadir, spectre de luminance solaire au niveau du sol (trait gras) (angle zénithal solaire : 20°) et spectre de luminance émise par une surface prise comme un corps noir à 20 °C (trait fin continu). Nous avons considéré une atmosphère standard *mid-latitude summer* avec des aérosols continentaux (visibilité de 23 km), simulation réalisée à l'aide du modèle MODTRAN 2. Les luminances sont en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$. *In the middlewave spectral domain : transmittance spectrum of the total atmosphere (gray line) for a direct nadir view, spectral solar radiance at ground level (bold line) (solar zenith angle : 20°) and spectral emitted radiance of a surface considered as a black body at 20 °C (thin line). Simulation made with the MODTRAN 2 radiative transfer code assuming a standard mid-latitude summer atmosphere with continental aerosols (23 km visibility). The radiances are in $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$*

TABLEAU 1 Les trois principaux domaines spectraux et les subdivisions correspondant aux fenêtres atmosphériques sauf les hyperfréquences, d'après la terminologie du COMITTAS (Paul *et al.*, 1997, 1999). Nous y avons ajouté l'infrarouge médian. *Definition of the three main spectral domains and subdivisions corresponding to the atmospheric windows in Earth remote sensing, excluding microwaves, from the COMITTAS terminology (Paul* et al.*, 1997, 1999). We have added the « infrarouge médian » spectral region (Middlewave or Midwave Infrared).*

Grands Domaines spectraux	**Subdivisions**	**Longueur d'onde (µm)**	**Remarques**
Visible (*Visible*) 0,4-0,78 µm	Panchromatique *Panchromatic*	0,4-0,7	Affecté par l'ozone, la diffusion moléculaire, la diffusion et l'absorption par les aérosols. Une bande d'absorption de l'oxygène à 0,76 µm.
Proche infrarouge (PIR) *Near infrared (NIR)* 0,8-3 µm	Proche infrarouge (PIR)	0,8-1,1	Affecté principalement par la vapeur d'eau (0,915-0,97 µm, 1,1-1,16 µm). La diffusion moléculaire et la diffusion ainsi que l'absorption par les aérosols y sont plus faible que dans le visible. Le domaine IRCL comprend en fait deux bandes (1,5-1,8 µm) et (1,95-2,5 µm) à cause de l'absorption de la vapeur d'eau. La diffusion par les aérosols est négligeable.
	Infrarouge de courte longueur d'onde (IRCL) *Short Wave IR (SWIR)*	1,1- 2, 5	
Infrarouge moyen (IRM) *Mid infrared (Mid IR)* 3-30 µm	**Infrarouge médian (IRMe) *Middle Wave IR (MWIR)***	**3,4-5,2**	Le domaine (3,4-4,2 µm) est affecté principalement par la vapeur d'eau entre 3,4 et 4 µm et par l'azote (N2) à partir de 3,9 µm. Le domaine (4,5-5,2 µm) est très affecté par la vapeur d'eau.
	IR thermique IRT *Thermal IR (TIR)* or *Long Wave IR (LWIR)*	7,5-14	Transmission nulle entre 5,5 et 7,5 µm due à la vapeur d'eau. Affecté par l'absorption de l'ozone (9,5 µm). Domaine sensible à la vapeur d'eau.

Il y a donc lieu de distinguer ce domaine spectral de l'infrarouge de courte longueur d'onde (IRCL) dans lequel on ne mesure que la réflexion solaire, sauf si la température de la surface est très élevée, comme pour les feux ou la lave, par exemple. L'IRMe se distingue aussi de l'IRT dans lequel le rayonnement solaire est nul. Dans l'IRMe, nous avons inclus la fenêtre atmosphérique située entre 4, 2 et 5, 5 µm qui est rarement utilisée, car elle est fortement affectée par la vapeur d'eau (figure 3), et l'émission y est faible aux températures prises normalement pour les surfaces naturelles. Cependant, le rayonnement solaire n'y est pas négligeable. À titre d'exemple, la moyenne du rayonnement solaire au niveau du sol entre 3,5 et 4,1 µm est de l'ordre de 4,68 $W.m^{-2}$ et, pour la fenêtre 4,5-5,0 µm, il est de 0,66 $W.m^{-2}$ (figure 3). Ce rayonnement correspond à environ 30 % de l'émission d'un surface à 15 °C dans cette bande spectrale.

Dans l'IRMe, la luminance totale reçue au capteur (L) dans une direction donnée (non mentionnée pour simplifier la notation) est la somme de cinq termes (figure 4) :

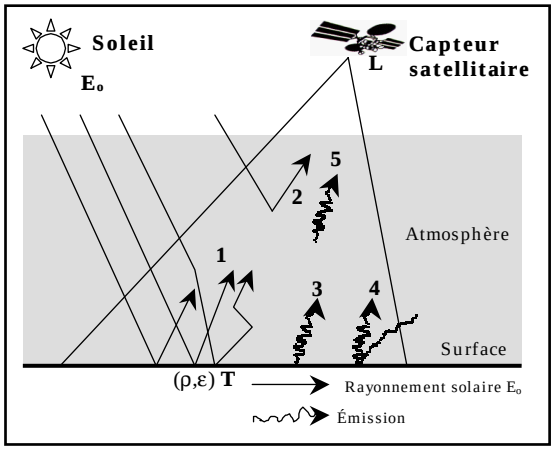


FIGURE 4 Schéma des différentes composantes du rayonnement électromagnétique émis et réfléchi par une cible à température T et de réflectivité ρ (émissivité ε) dans l'IR médian (voir texte pour la desciption des cinq composantes). *Schematic illustration of the different components of the electromagnetic radiation emitted and reflected by a target with a surface temperature T and a reflectivity ρ (emissivity ε) in the middlewave infrared spectral domain.*

$$L = \tau_1 L_1(\rho_b, Eo) + L_2(atmo, Eo) + \tau_3 L_3(T, \varepsilon) + \tau_4 L_4(Ta\downarrow, \rho_b) + L_5(Ta\uparrow) \quad (1)$$

où :

$L_1(\rho_b, Eo)$ = luminance due au rayonnement solaire (Eo) direct et diffus réfléchi par le sol de réflectance bidirectionnelle ρ_b ;

L_2 (atmo,Eo) = luminance due au rayonnement solaire rétrodiffusé par l'atmosphère (gaz et aérosols) vers le capteur ; ce terme est négligeable dans ce domaine spectral, sauf dans le cas de nuages d'aérosols désertiques ;

L_3 (T,ε) = luminance due au rayonnement émis par la surface à la température T et pondérée par son émissivité ε ;

$L_4(Ta\downarrow, \rho_b)$ = luminance due au rayonnement émis vers le sol par l'atmosphère à la température du ciel ($Ta\downarrow$) et réfléchie par le sol selon ρ_b en direction du capteur ;

$L_5(Ta\uparrow)$ = luminance due au rayonnement émis vers le capteur par l'atmosphère à la température du ciel ($Ta\uparrow$).

τ_1 , τ_3 , τ_4 et τ_5 sont les facteurs de transmission atmosphérique pondérant respectivement les luminances L_1, L_3, L_4 et L_5.

Le détail de la formulation rigoureuse de ces termes est décrit dans différents articles récents, mettant en évidence le potentiel de ce domaine spectral (voir par exemple l'article de synthèse de Normand and Becker, 1995 ; Nerry *et al.*, 1998 ; Bonn and O'Neill, 1993). Pour une surface en équilibre thermique, la loi de Kirchhoff permet de lier la réflectivité à l'émissivité :

$$\rho_h(\theta) = 1 - \varepsilon(\theta) \quad (2)$$

où ρ_h est la réflectivité directionnelle hémisphérique selon une incidence (θ) du rayonnement et ε l'émissivité directionnelle. ρ_h est égale à $\pi \rho_b$ si la surface est lambertienne.

Il est à noter que l'équation (1) a une portée générale, les termes L_3 à L_5 étant négligeables comme nous l'avons dit plus haut dans le PIR et l'IRCL, alors que dans l'IRT, ce sont les termes L_1 et L_2 qui sont nuls.

4. APPLICATIONS

Sur le tableau 2, on présente quelques-uns des capteurs satellitaires actuels et futurs ayant des bandes spectrales dans l'IRMe. Ce domaine spectral est depuis longtemps exploité avec le capteur AVHRR de la série des satellites météorologiques NOAA pour la détection des nuages. Ce domaine spectral permet en effet de mieux différencier les nuages de la neige (Derrien *et al.*, 1993). L'IRMe est aussi proposé pour le suivi des feux de surface (Kaufman *et al.*, 1998 ; Lee and Tag, 1990). En effet, d'après la loi de Wien, le maximum d'émission dans l'IRMe correspond à une température de 773 K environ).

La combinaison des deux sources de rayonnement dans l'IRMe telle qu'illustré dans la figure 4, a été utilisée pour découpler température et émissivité (Becker and Li, 1990 ; Li and Becker, 1993 ; Goïta and Royer, 1997; Roger and Vermote, 1998 ; Nerry *et al.*, 1998). Connaissant ainsi la température vraie du sol, cette approche très prometteuse permet, en effet, d'estimer l'émissivité de la surface dans les autres domaines spectraux du thermique.

TABLEAU 2 Exemple de capteurs actuels ou futurs ayant des bandes spectrales dans l'infrarouge médian. *Example of present and future sensors with spectral bands in the middlewave infrared.*

Capteurs / satellites	Bandes spectrales dans l'IR médian (µm)	Résolution spatiale (au nadir)	Références
MODIS / EOS-TERRA (NASA, lancé 18-12-1999)	3,660-3,840 3,929-3,989 4,02-4,080	1 km	http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/
SEVIRI / MSG (EUMETSAT , projet 2001)	3,48-4,36	3 km	Satellite géostationnaire http://www.eumetsat.de/fr/
AVHRR / NOAA (NOAA, depuis 1979)	3,55-3,93	1,1 km	http://www.satmos.meteo.fr/ http://www.saa.noaa.gov/
BIRD (DLR, Allemagne, mai 2001)	3,4-4,2	< 300 m	Bispectral Infrared Detection microsatellite mission http://www.ba.dlr.de/NE-WS/projects/bird
IRSUTE (projet CNES, France)	3,5-4,0	40 m	Infrared Satellite Unit for the Thermal Environment Seguin *et al.*, (1999)

Dans l'IRMe, l'émissivité de la surface varie de façon plus significative que dans l'IRT. Elle peut varier typiquement de 0,97 pour la végétation à 0,6 pour un sol nu désertique, par exemple (Nerry *et al.*, 1990). Si cette réflectivité (émissivité) est parfois assez bien corrélée à celle de la réflectance dans le rouge comme pour la végétation (Petitcolin *et al.*, 2001 ; Kaufman and Remer, 1994), elle est parfois assez différente et permet donc une meilleure identification du type de surface, comme par exemple pour la forêt ouverte en zone boréale (taïga) (Goïta *et al.*, 1997) ou tropicale (Achard and Estreguil, 1995). Des images AVHRR de NOAA d'émissivité dans l'IRMe récemment produites par Petitcolin *et al.* (2001) au-dessus de l'Espagne et de la Tunisie, montrent clairement l'intérêt complémentaire de ce domaine spectral et ainsi le potentiel de l'IR médian pour l'identification des surfaces.

Cependant, l'estimation de l'émissivité dans l'IRMe est assez difficile à mettre en œuvre et l'utilisation de l'émissivité relative définie à partir d'un rapport d'émissivité à plusieurs longueurs d'ondes (dans l'IRMe et l'IRT par exemple) est relativement plus facile. Petitcolin *et al.* (2001) ont aussi montré que ces indices d'émissivités relatives sont bien découplés de la température de surface et qu'ils varient significativement en fonction de la couverture du sol.

5. CONCLUSION

L'utilisation de plus en plus généralisée des différents domaines du spectre électromagnétique, rendue possible avec la venue de nouveaux capteurs sur les satellites d'observation de la Terre comme MODIS sur EOS/TERRA, nous amène à proposer un qualificatif particulier pour l'infrarouge médian compris entre 3,4 et 5,2 µm. Ce domaine spectral encore relativement peu exploité en télédétection, quoique très spécifique et très intéressant, doit être distingué de l'infrarouge de courte longueur d'onde situé entre 1,5 et 2,5 µm ainsi que de l'infrarouge thermique (7,5-14 µm).

Remerciements

Nous remercions Erwann Fillol pour les simulations ModTran, ainsi que MM. F. Becker et B. Séguin pour leurs commentaires très pertinents sur ce document. Ce projet a été financé par le CRSNG (Canada), FCAR (Québec) et le programme de coopération France-Québec du ministère des Relations internationales.

Références

Achard, F. and Estreguil, C. (1995) Forest classification of southeast Asia using NOAA AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, p. 198-208.

Becker, F. and Li, Z.L. (1990) Temperature independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, vol. 32, p. 17-33.

Bonn, F. and O'Neill, N. (1993) Thermal infrared remote sensing of soils: evolution and perspectives. *Remote Sensing Reviews*, vol. 7, p. 281-302.

Derrien, M., Farki, B., Harang, L., LeGléau, H., Noyalet, A., Pochic, D. and Sairouni, A. (1993) Automatic cloud detection applied to NOAA-11 / AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 46, p. 246-267.

Goïta, K. and Royer, A. (1997) Surface temperature and emissivity separability over land-surface from combined TIR and SWIR AVHRR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 3, p. 718-733.

Goïta, K, Royer, A. and Bussières, N. (1997) Characterization of land surface thermal sructure from NOAA-AVHRR data over a northern ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, vol. 60, p. 282-298.

Kaufman, Y.J., Justice, C.O., Flynn, L.P., Kendall, J.D., Prins, E.M., Giglio, L., Ward, D.E., Menzel, W.P. and Setzer, A.W. (1998) Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, nº D24, p. 32 215-31 238.

Kaufman, Y.J. and Remer, L. (1994) Remote sensing of vegetation in the mid-IR : the 3.75 µm channels. *IEEE J. Geoscience Remote Sens*ing, vol. 32, p. 672-683.

Lee, T.F. and Tag, P.M. (1990) Improved detection of hotspots +using the AVHRR 3.7 µm channel. *Bulletin of the Meteorological Society*, vol. 71, nº 12, p. 1722-1730.

Li, Z.L.and Becker, F. (1993) Feasibility of land surface temperature and emissivity from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 43, p. 67-85.

Nerry, F., Labed, J. and Stoll, M.-P. (1990) Spectral properties of land surfaces in thermal infrared. 1. Laboratory measurements of absolute spectral emissivity signatures. *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, p. 7027-7044.

Nerry, F., Petitcolin, F. and Stoll, M.-P. (1998) Bidirectional reflectivity in AVHRR channel 3 : application to a region in northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, p. 298-316.

Norman, J.M. and Becker, F. (1995) Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 77, p. 153-166.

Paul, S., Bardinet, C. et Lenco, M. (1999) Vocabulaire de télédétection : les travaux de la commission de terminologie de la télédétection aérospatiale (1995-1998). *Bulletin SFPT*, nº 156, p. 28-44.

Paul, S., Ducher, G., Jobard, I., Latarche, C.-H., et Lenco, M. (1997) *Terminologie en télédétection et photogrammétrie (Français-Anglais)*. CIFL, PUF, Paris, 455 p.

Petitcolin, F., Nerry, F. and Stoll, M.P. (2001) Directional Emissivity from AVHRR : Application to a Region of Northern Africa and the Iberian Peninsula. 1. Mapping Emissivity in Channel 3. *International Journal of Remote Sensing* (submitted February 2000).

Roger, J.-C. and Vermote, E.F. (1998) A Method to Retrieve the Reflectivity Signature at 3.75 µm from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 64, nº 1, p. 103-114.

Seguin, B., Becker, F., Phulpin, T., Gu, X.F., Guyot, G., Kerr, Y., King, C., Laguarde, J.P., Ottlé, C., Stoll, M.P., Tabbagh, A. and Vidal, A. (1999) IRSUTE : a minisatellite project for land surface heat flux estimation from field to regional scale. *Remote Sensing of Environment*, vol. 68, p. 357-369.