*Télédétection*, 2004, vol. 4, n°3, p. 263–275
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2004 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

# COMPARAISON DES RÉFLECTANCES DE SURFACES NATURELLES DANS LES BANDES SPECTRALES HOMOLOGUES DES CAPTEURS TM DE LANDSAT-5 ET ETM+ DE LANDSAT-7

ABDERRAZAK BANNARI [a], PHILIPPE M. TEILLET [a,b] et ROBERT LANDRY [b]

[a] *Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'environnement, Département de géographie, Université d'Ottawa, 60, rue Université, Ottawa (Ontario) K1N 6N5. Téléphone : (613) 562-5800 (poste 1042) ; télécopieur : (613) 562-5145 courriel : abannari@uottawa.ca ;*

[b] *Centre canadien de télédétection, 588, rue Booth, Ottawa (Ontario) KIA 0Y7*

*(soumis : 28 avril 2004 ; révisé : 22 juillet 2004 ; accepté 30 août 2004)*

En avril 1999, la NASA a mis en orbite le capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) à bord du satellite Landsat-7 pour prendre la relève du capteur TM (Thematic Mapper) de Landsat-5. Bien que l'intervalle spectral nominal soit presque identique entre les bandes homologues de ces deux capteurs, leurs réponses spectrales spécifiques sont légèrement différentes dans le visible comme dans l'infrarouge. Afin de quantifier l'impact de cette différence sur l'extraction de l'information, les réflectances équivalentes apparentes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes ont été analysées et transformées en indices de végétation, soient le NDVI et le SAVI. Les résultats obtenus montrent que l'effet de la différence des réponses spectrales varie en fonction de la cible observée au sol et de la bande spectrale considérée. À l'exception de la neige, notamment dans l'infrarouge à ondes courtes, les réflectances équivalentes apparentes et les indices de végétation, dérivés des données simulées dans les bandes homologues des deux capteurs, sont presque semblables pour toutes les cibles considérées. Les écarts qui ont été mis en évidence peuvent être considérés comme un bruit comparable aux écarts qui peuvent être causés par d'autres problèmes dus aux caractéristiques instrumentales. En outre, les classifications issues des images TM et ETM+ acquises, respectivement en août 1998 et septembre 1999, au-dessus d'un site forestier ont été comparées. Les résultats obtenus de la classification des deux images sont très similaires. Nous pouvons dire que les données provenant des deux capteurs peuvent être utilisées pour différentes applications de la télédétection si les différentes distorsions radiométriques relatives aux capteurs et à l'atmosphère sont corrigées.

*Mots-clefs : TM, ETM+ ; réflectances ; réponse spectrale ; comparaison ; indices de végétation ; classification.*

# COMPARISON OF NATURAL SURFACES REFLECTANCES IN THE HOMOLOGOUS SPECTRAL BANDS OF LANDSAT TM AND LANDSAT ETM+ SENSORS

In April 1999, NASA launched the Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) on Landsat-7 as a follow on to the Landsat-5 Thematic Mapper (TM). The two sensor systems cover the same parts of the electromagnetic spectrum (ETM+ has also a panchromatic band), but the specific spectral response profiles differ slightly in all of the solar-reflective bands. In order to assess the impact of these spectral band differences on information extraction, top-of-atmosphere (TOA) reflectances in the visible, near infrared and SWIR bands were simulated and used to generate vegetation indices (NDVI and SAVI) for analysis. The results indicate that spectral band difference effects depend on spectral band and target type. With the exception of the snow target, especially in the near infrared, the TOA reflectances and vegetation indices in analogous spectral bands of the two sensors are very similar. The errors found in the present analysis can be considered comparable to other error sources due to sensor characteristics. Classifications of TM and ETM+ image data acquired over a forested site were also compared. The classifications resulting from the two sensor images are similar. It is concluded that data from both sensors can be used interchangeably in various remote sensing applications provided that radiometric corrections (sensor drift and atmosphere) are applied.

*Keywords : TM ; ETM+ ; reflectance's ; Relative spectral response profiles ; comparison ; vegetation indices ; classification.*

## 1. INTRODUCTION

Le programme américain *Earth Resources Technological Satellite* (ERTS) utilisant le satellite ERTS-1 dont le nom a été transformé en Landsat (*Land Satellite)* est administré et exploité par la NASA depuis 1972. Il vise à offrir, de façon continue, des images permettant d'assurer une gestion globale et régionale de notre environnement terrestre. Mis à part l'échec du satellite Landsat-6, le 5 octobre 1993, la mise en orbite de la série des satellites Landsat a toujours été un succès et une riche source de données de télédétection. En effet, Landsat-1, lancé le 22 juillet 1972, a fonctionné jusqu'au 6 janvier 1978. Landsat-2, lancé le 5 novembre 1975, a fonctionné

jusqu'au 27 juillet 1983, puis des anomalies ont affecté ses capteurs. Landsat-3, lancé le 5 mars 1978, n'a plus fourni de données après le 7 septembre 1983, à la suite d'une panne dans le dispositif de balayage. Landsat-4, lancé le 16 juillet 1982, n'émet plus de données TM depuis février 1983. Landsat-5, lancé le 3 janvier 1984, et Landsat-7, lancé avec succès le 15 avril 1999, sont encore opérationnels. Entre 1972 et 1982, le programme Landsat a été spécialement dédié aux activités scientifiques des chercheurs de la NASA, avec la perspective de démontrer le potentiel de cette technologie de l'époque pour l'observation et l'analyse des phénomènes et des écosystèmes terrestres. En 1982, les données des capteurs de Landsat ont montré leur potentiel dans plusieurs applications et elles ont été sollicitées par des scientifiques du monde entier, ce qui avait permis une transition historique du stade expérimental au stade commercial (Williams *et al.,* 1984 ; Sheffiner, 1994 ; Williamson, 1997 ; NASA, 1997).

Durant les trois dernières décennies, les données provenant des capteurs RBV (*Return Beam Vidicon*), MSS (*MultiSpectral Scanner*) et TM (*Thematic Mapper*) de Landsat sont les plus utilisées et montrent une excellente performance pour l'étude de la végétation, en particulier, et des ressources naturelles, en général (Tuker, 1978 ; Crist and Cicone, 1984 ; Sheffiner, 1994 ; Goward and Williams, 1997 ; Moran *et al.,* 2001). Elles assurent un excellent compromis entre les données provenant des capteurs de faible résolution spatiale (AVHRR, MODIS et VÉGETATION) et de très haute résolution spatiale (Quickbird, IKONOS, EROS, *etc.*), ce qui garantit une couverture systématique du globe terrestre avec une fréquence temporelle acceptable pour le suivi saisonnier de l'occupation des terres. Afin d'assurer la continuité des données de ce programme pour les scientifiques, les gestionnaires et les décideurs, la NASA a mis en orbite le capteur ETM+ à bord du satellite Landsat-7. Celui-ci passe à l'équateur à 10 h (± 15 minutes), heure locale. La durée d'une révolution est de 98,9 minutes et il repasse tous les 16 jours au-dessus du même point. Il lui faut 233 traces pour couvrir le globe, chaque trace comprenant 248 images. La trace 1 coupe l'équateur à 64,6° O. À cette latitude, le recouvrement entre deux images est de 7,6 %, tandis qu'elle est de 54 % à 60° de latitude. Tous les satellites Landsat (1 à 5) n'ayant pas d'enregistreur embarqué à bord, lors de l'acquisition des images, les données sont acheminées en temps réel aux stations de réception au sol. Quand il ne peut y avoir de liaison directe, les données sont acheminées par des relais en utilisant des satellites de communication TDRS (*Tracking and Data Relay Systems*). Par contre, pour le Landsat-7, il y a une possibilité d'enregistrement à bord.

Comparativement aux autres capteurs de la série Landsat, dont les caractéristiques sont résumées sur le tableau 1, la mission de Landsat-7 présente une nouvelle génération de capteurs qui se distingue par une bande panchromatique (0,5 à 0,9 µm) supplémentaire, assurant une résolution spatiale au sol de 15 m et une amélioration significative de la résolution spatiale du canal thermique qui passe de 120 à 60 m. L'expertise développée par la NASA au fil des années dans le cadre des missions spatiales, en général, et les leçons tirés des programmes précédents de Landsat, en particulier, ont permis une amélioration remarquable de la précision des caractéristiques radiométriques et géométriques, ainsi qu'une amélioration de la méthode d'étalonnage à bord du capteur ETM+ (NASA, 1998; Masek *et al.,* 2001 ; Goward *et al.,* 2001). D'après Masek *et al.* (2001), les bandes de ETM+ montrent une réduction de 20 % à 40 % du bruit par rapport au signal, comparativement à leurs homologues du capteur TM de Landsat-5. Il est évident que cette révolution technologique et ces nouvelles capacités techniques, combinées aux 30 ans d'archive d'images couvrant notre planète, font de la série Landsat une excellente base de données pour mieux comprendre le cycle du carbone atmosphérique, l'impact des changements climatiques sur la dynamique des couverts végétaux et sur le cycle de l'eau, et plusieurs autres phénomènes de notre environnement.

Par ailleurs, si nous cherchons à effectuer un suivi multidate d'un phénomène, une analyse de la réponse directionnelle d'une surface quelconque du globe terrestre ou une comparaison entre des paramètres biophysiques et des cartes thématiques, il est généralement nécessaire d'utiliser des données fournies par ces deux capteurs (Guenther *et al.,* 1997).

Cependant, il faut être conscient que la réflectance d'une cible visée au sol par deux capteurs différents peut varier en fonction de l'étalonnage radiométrique des capteurs (Bannari *et al.,* 1999 ; Teillet *et al.,* 2001 ; Thome, 2001), des effets atmosphériques (Tanré *et al.,* 1990), des effets de la BRDF (*Bidirectional reflectance distribution function*) (Engelsen *et al.,* 1997), de l'effet de la topographie (Burgess *et al.,* 1995 ; Proy, 1986), de l'effet de la fonction de transfert de modulation (FTM) (Schowengerdt *et al.,* 1985 ; Guyot *et al.,* 1992), de la non coïncidence des bandes spectrales homologues entre capteurs (Teillet *et al.,* 1997) et de la variation de la fonction de réponse spectrale entre les bandes

spectrales homologues (Markham and Barker, 1985).

En effet, bien que l'intervalle spectral nominal soit presque identique entre les bandes homologues de TM et de ETM+, leurs fonctions de réponses spectrales spécifiques sont légèrement différentes dans le visible comme dans l'infrarouge (figure 1).

La fonction de la réponse spectrale propre à chaque bande spectrale est une combinaison de la réponse spécifique du filtre et de celle des détecteurs qui forment le capteur. D'ailleurs, le signal provenant de la surface terrestre, à l'entrée du télescope, et enregistré par le capteur sous forme numérique doit être transformé en luminance équivalente.

Si $l^*(\lambda)$ est la luminance spectrale observée en entrée de l'instrument ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) en haut de l'atmosphère et si $S(\lambda)$ est la sensibilité spectrale relative du capteur, on définit la luminance équivalente apparente ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), mesurée dans une bande spectrale comprise entre les longueurs d'onde $\lambda_i$ et $\lambda_s$, par la relation suivante (Asrar, 1989 ; Henry *et al.,* 1996) :

$$L^*(\lambda_i - \lambda_s) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} l^*(\lambda) S(\lambda) d(\lambda)}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_s} S(\lambda) d(\lambda)} \quad (1)$$

Cette la luminance équivalente est transformée en réflectance équivalente apparente au capteur au moyen de la formule suivante, en introduisant l'éclairement solaire et l'angle d'incidence solaire :

$$\rho^* = \frac{L^*(\lambda)\ \pi\ D_t^2}{E_s(\lambda)\ \mu_s} \quad (2)$$

où :
$D_t$ : distance Terre-Soleil en unités astronomiques ;
$E_s(\lambda)$ : éclairement solaire ($W/m^2\ \mu m$) ;
$\mu_s$ : $\cos(\theta_s)$, $\theta_s$ étant l'angle zénithal solaire.

TABLEAU 1 Résumé des caractéristiques des capteurs de la série de Landsat. *Summary of characteristics of Landsat sen*sors.

| Les capteurs de la série Landsat | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | RBV | MSS | TM | ETM+ |
| Bandes spectrales (µm) | 0,479 - 0,575<br>0,580 - 0,680<br>0,690 - 0,830 | 0,500 - 0,600<br>0,600 - 0,700<br>0,700 - 0,800<br>0,800 - 1,100 | 1 : 0,450 - 0,515<br>2 : 0,525 - 0,605<br>3 : 0,630 - 0,690<br>4 : 0,730 - 0,900<br>5 : 1,550 - 1,750<br>6 : 10,40 - 12,5<br>7 : 2,090 - 2,350 | 1 : 0,450 - 0,515<br>2 : 0,525 - 0,605<br>3 : 0,630 - 0,690<br>4 : 0,730 - 0,900<br>5 : 1,550 - 1,750<br>6 : 10,400 - 12,500<br>7 : 2,090 - 2,350<br>Pan : 0,520 - 0,900 |
| Codage | Caméra vidéo analogique | | 8 bits | 8 bits |
| Altitude nominale (km) | 915 | | 705 | 699 |
| Angle d'ouverture | 11° 56 | | 14° 8 | |
| Taille du pixel au sol (m) | 40 | | 1 à 5 et 7 : 30<br>6 : 120 | 1 à 5 et 7 : 30<br>6 : 60 ; Pan. : 15 |
| Taille de l'image (km) | 170 × 185,2 | | | |

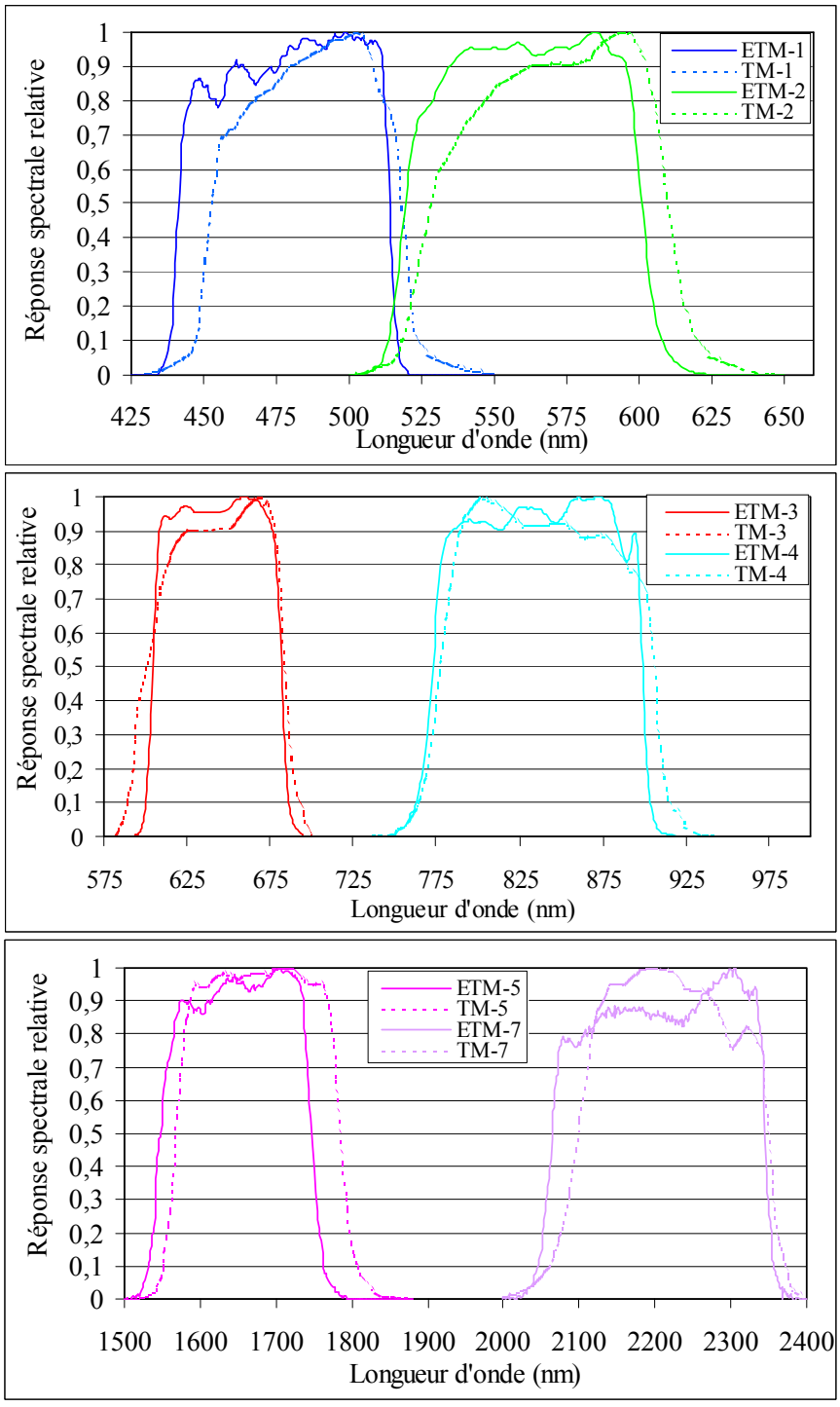



FIGURE 1 Variation de la réponse spectrale relative dans les bandes homologues des capteurs ETM+ de Landsat-7 et TM de Landsat-5. *Relative spectral response profiles showing the spectral band differences between Landsat ETM+ and Landsat TM.*

Sur la figure 1, on illustre la différence de sensibilité spectrale relative entre les bandes homologues des capteurs TM et ETM+, dans le visible comme dans l'infrarouge. Évidemment, cette différence se traduit par des différences sensibles des réflectances équivalentes apparentes, qui peuvent être positives ou négatives en fonction de la nature de la cible observée au sol. Par conséquent, des erreurs peuvent se propager lors de la comparaison des réflectances et des paramètres biophysiques (Robinov, 1982 ; Barker *et al.,* 1984 ; Guyot et Gu, 1992).

Dans cette étude, nous ne tenons compte que de l'effet de la variation de la fonction de réponse spectrale entre les bandes homologues. Autrement dit, nous analysons l'impact de cette variation en comparant les réflectances équivalentes apparentes de différentes cibles au sol, simulées dans les six bandes homologues (visible et infrarouge) des capteurs TM et ETM+. Afin de quantifier l'impact de cette variation sur des paramètres très utilisé, les réflectances dans le visible et le proche infrarouge sont analysées et transformées en indices de végétation, le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), développé par Rouse *et al.* (1974), et le SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), mis au point par Huete (1988).

Le modèle de simulations CAM5S (*Canadian Modified Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (O'Neill *et al.,* 1996), alimenté par des spectres de différentes cibles mesurées au sol, a été utilisé pour calculer les réflectances équivalentes en haut de l'atmosphère dans chacune des bandes spectrales, en considérant les caractéristiques propres à chaque capteur. En outre, nous comparons les résultats des classifications provenant de deux images TM et ETM+, acquises, respectivement en août 1998 et septembre 1999, au-dessus d'un site forestier en Alberta.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Dans cette section, nous discutons des données spectroradiométriques et des images utilisées dans le cadre de cette recherche. Nous résumons, entre autres, les conditions de simulation en exploitant le modèles de transfert radiatif CAM5S.

### *2.1. Données spectroradiométriques et conditions de simulations*

Afin de mettre en évidence les problèmes que suscite la comparaison des données acquises par les capteurs TM et ETM+, nous avons utilisé des mesures spectroradiométriques acquises au sol au-dessus de différentes cibles : forêt de sapins blancs, champ de blé, champ de résidus de cultures et zone de sols nus (secs et humides). Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un spectroradiomètre portatif GER-3700 entre 350 et 2500 nm. Elles ont été prises vers l'heure zénithale, suivant une direction de visée verticale, afin de tenir compte de l'effet bidirectionnel de la réflectance de la cible, qui dépend à la fois de l'angle d'illumination et de l'angle de visée (Jackson *et al.,* 1980). Les mesures réalisées par Huete (1984) au-dessus d'un champ de coton ont été aussi utilisées. Entre autres, nous avons considéré les signatures spectrales des six cibles intégrées dans le modèle de transfert radiatif CAM5S (O'Neill *et al.,* 1996), à savoir : une végétation photosynthétiquement active, de l'eau claire, du sable, un lac ainsi que de la neige fraîche et molle. Toutes ces mesures ont été rééchantillonnées dans les bandes spectrales homologues des deux capteurs.

Le modèle CAM5S a été utilisé pour la simulation des réflectances apparentes, en considérant les caractéristiques spectrales propres à chacun des deux capteurs. Pour ne mettre en évidence que la variation de la fonction de réponse spectrale entre les bandes homologues, les simulations ont été réalisées en considérant toutes les cibles homogènes sans effet de l'environnement. Ainsi, nous avons considéré une atmosphère US standard-62 sans aérosols, avec des teneurs en vapeur d'eau et en ozone, respectivement, de 1,42 g/cm$^2$ et de 0,344 cm-atm (Tanré *et al.,* 1990). Pour les conditions géométriques, les angles d'observations ont été fixés au zénith, l'angle solaire et l'azimut solaire sont, respectivement, de 41° et 133°. La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est égale à l'unité (en unités astronomiques).

### *2.2. Données images*

Deux images TM et ETM+ ont été acquises au-dessus d'un site forestier en Alberta (54° 51' N et 115° 57' O), respectivement, le 13 août 1998 à 10 h 19 et le 9 septembre 1999 à 10 h 34, heure locale. Elles ont subi une correction combinée des effets atmosphériques et de l'étalonnage radiométrique propre au capteur. Par la suite, elles ont été corrigées géométriquement, ce qui facilite leur superposition et aussi l'analyse des résultats de la classification. Les capteurs TM et ETM+ utilisent chacun 16 détecteurs. Sur les imagettes de la figure 2, on peut comparer leurs radiométries brutes (comptes numériques). Le capteur ETM+ est doté d'un excellent système d'étalonnage à bord. En effet, l'imagette du capteur TM est plus sensible aux effets du dérayage (*striping*), causé par la variation entre les détecteurs. Cette dégradation de la qualité radiométrique de TM a été d'ailleurs soulevée par Masek *et al.* (2001) et

Vogelmann *et al.* (2001). Toutefois, après les opérations d'étalonnage radiométrique propres aux capteurs et aux corrections des effets atmosphériques, les réflectances su sol montrent une forte ressemblance sur les deux imagettes (figure 3). Afin d'avoir plus d'information sur la standardisation radiométrique entre les images provenant de ces deux capteurs nous renvoyons le lecteur aux travaux réalisés par Teillet *et al.* (2001), Masek *et al.* (2001) et Vogelmann *et al.* (2001).

Pour ce qui a trait à la classification, après l'analyse des histogrammes des images (He et Wang, 1987) et plusieurs essais de classification, nous avons retenu huit classes qui sont spectralement homogènes et qui caractérisent l'occupation du sol de la région. La méthode de classification non dirigée, basée sur l'algorithme K-Means de PCI, a été retenue (PCI Geomatics Inc., 2003). Bien entendu, nous ne visons pas une validation de la précision ou de la fidélité de la classification par rapport à la réalité de terrain, ni l'identification de la nature des espèces forestières. Nous cherchons plutôt à mettre en évidence la similitude entre les classes homologues dans les deux classifications. En considérant les statistiques des classifications, nous avons comparé les coefficients de variation des classes homologues.

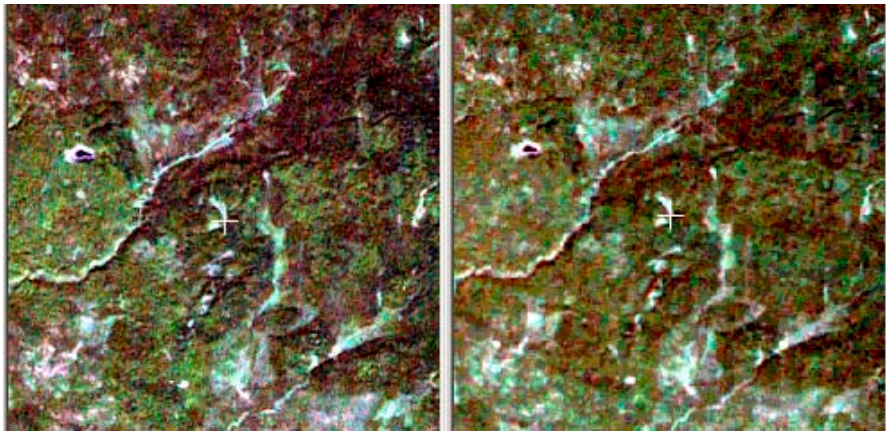


FIGURE 2 Comparaison de la radiométrie brute (CN) des images ETM+ (à gauche) et TM (à droite) acquises au-dessus du même territoire à 13 mois d'écart. *Comparison of raw radiometry (DN) of ETM+ (on the left) and TM (on the right) images acquired above the same area with a difference of 13 months.*

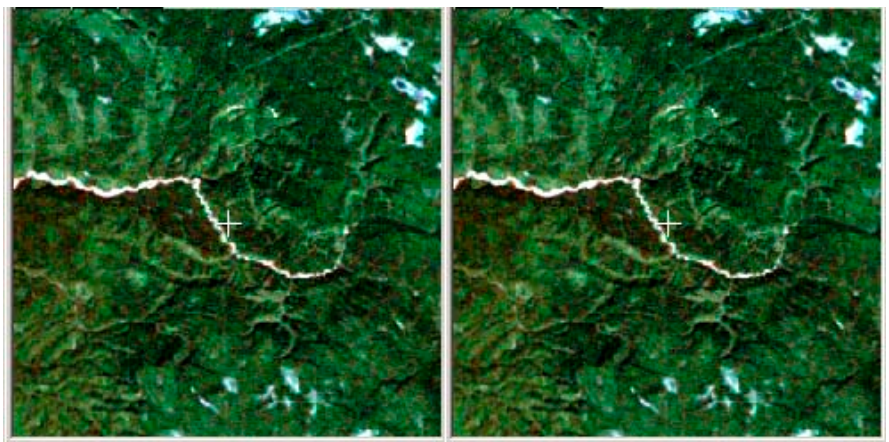


FIGURE 3 Comparaison les réflectances au sol des images ETM+ (à gauche) et TM (à droite) acquises au-dessus du même territoire à 13 mois de différence. *Comparison of the ground reflectances of ETM+ (on the left) and TM (on the right) of images acquired above the same area with a difference of 13 months.*

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### *3.1. Simulations*

Sur la figure 1, on montre la variation significative de la réponse spectrale relative spécifique des six bandes de capteur TM et leurs homologues du capteur ETM+. Afin de quantifier l'impact de cette variation, dans une première étape, nous comparons l'écart relatif entre les réflectances équivalentes apparentes simulées à l'altitude du capteur. Le fait de travailler avec des réflectances apparentes au lieu des luminances apparentes présente deux avantages lors de la comparaison des données provenant des capteurs TM et ETM+ (Teillet *et al.,* 2001). Le premier avantage est l'élimination de l'effet directionnel, causé par l'angle zénithal solaire dû à une différence dans le temps d'acquisition entre les deux capteurs et qui varie de 10 à 30 min. Le second avantage est la minimisation de la différence entre les éclairements solaires causée par la non coïncidence des bandes spectrales homologues et leurs fonctions de réponses spectrales.

Les écarts relatifs entre les réflectances de différentes cibles dans les bandes homologues des capteurs considérés sont résumés sur le tableau 2. Nous remarquons que ces écarts varient en fonction du type de la surface et de la bande spectrale considérée. Ils varient de 0 à 6 % dans le visible et de 0 à 10,6 % dans l'infrarouge. La surface de la neige (fraîche et molle) montre une différence maximale, notamment dans les deux canaux de l'infrarouge à ondes courtes. Mis à part les cibles sur l'eau et la neige, pour toutes les autres cibles, l'écart est, respectivement, de l'ordre de 4 % et 1 % dans les canaux 5 et 7. Indépendamment de la cible considérée, l'écart relatif est de l'ordre de 1,5 % dans le proche infrarouge et négligeable (presque nul) dans le canal du rouge, sauf pour la végétation herbacée brillante (environ 6 %). En revanche, dans le bleu et le vert, c'est la végétation photosynthétiquement active (blé et coton) et l'eau qui montrent un écart maximal de l'ordre de 4 %.

TABLEAU 2 Écart relatif entre les réflectances apparentes de différentes cibles dans les bandes homologues des capteurs TM et ETM+. *Relative variation among apparent reflectances considering various targets types in the homologous bands of TM and ETM+ sensors.*

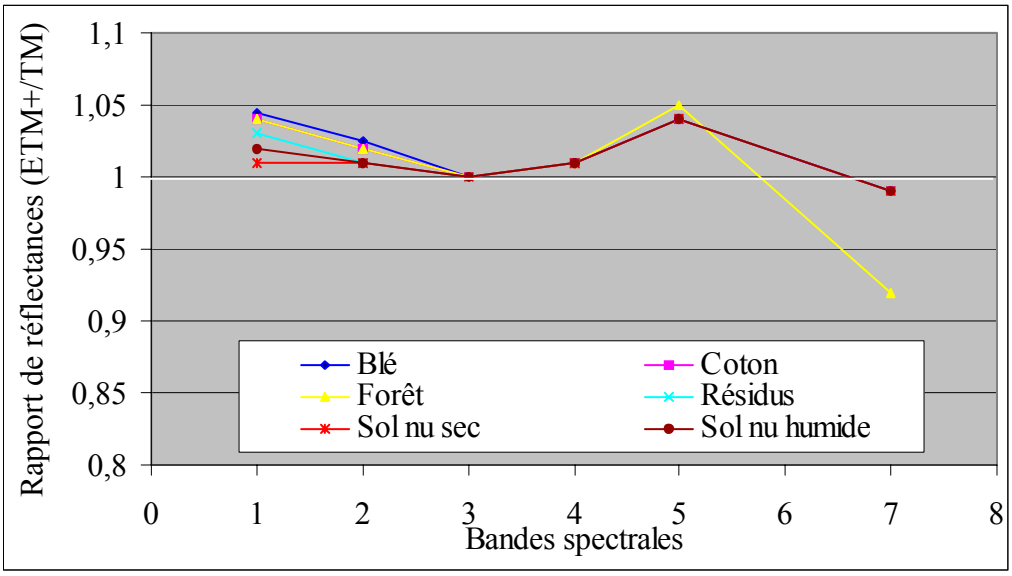
| Cible au sol | Écart relatif : 100 * (ETM+ - TM) / ETM+ (en %) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Canal 1 | Canal 2 | Canal 3 | Canal 4 | Canal 5 | Canal 7 |
| Blé + | + 4,2 | + 2,5 | + 0,2 | + 1,4 | + 4,0 | - 0,9 |
| Coton * | + 3,5 | + 1,7 | 0 | + 1,3 | + 4 | - 1,1 |
| Forêt + | + 4 | + 2,3 | + 0,3 | + 1,4 | + 4 | - 7 |
| Résidus de cultures + | + 2,6 | + 1,3 | + 0,3 | + 1,4 | + 4 | - 1,1 |
| Sol nu sec + | + 1,3 | + 0,7 | + 0,4 | + 1,4 | + 4 | - 1,3 |
| Sol nu humide + | + 2,4 | + 1,2 | + 0,3 | + 1,4 | + 4 | - 1,3 |
| Végétation herbacée | - 2 | + 3 | + 6 | + 1 | + 4 | -3 |
| Eau claire ° | + 3,5 | + 2 | + 0,2 | + 1,5 | 0 | 0 |
| Sable ° | + 1 | -0,2 | + 0,3 | + 1 | + 3,6 | + 0,9 |
| Lac ° | + 2 | + 1,5 | 0 | + 2,6 | 0 | 0 |
| Neige fraîche ° | 0 | + 0,6 | + 0,5 | + 1,5 | - 6,5 | - 10,3 |
| Neige molle ° | 0 | + 0,7 | + 0,5 | + 1,7 | - 10,3 | - 10,61 |

+ Données spectrales mesurées au sol à l'aide du GER
* Données de Huete (1984)
° Données spectrales existantes dans la base de données du CAM5S

Sur la figure 4, on illustre le rapport des réflectances apparentes ($\rho^*_{ETM}/\rho^*_{TM}$) pour toutes les cibles mesurées au sol et l'impact de l'effet de variation de la fonction de réponse spectrale dans les bandes homologues des deux capteurs. En effet, nous constatons que ce rapport s'écarte de l'unité de 5 % et 7 % dans les canaux du moyen infrarouge. Cette différence est aussi significative pour ces deux canaux lorsque nous considérons les cibles intégrées dans le modèle CAM5S (figure 4b), notamment la neige fraîche et molle, la végétation herbacée brillante et le sable. Nous constatons que l'écart relatif est de 4 % en moyenne mais qu'il peut atteindre environ 10 %. Évidemment, cette comparaison est basée sur le principe que chaque cible est homogène, sans aucune interférence qui vient des autres facteurs extérieurs quelle que soit leur nature (autres cibles, effet de l'environnement, effets de l'atmosphère, *etc.*). Cependant, si nous considérons maintenant une

image qui est hétérogène par sa nature en représentant plusieurs classes d'occupation du sol, comment pouvons-nous donc quantifier ces différences et passer au processus de correction afin d'harmoniser les données images provenant des deux capteurs avant d'extraire l'information souhaitée ? Comparativement à d'autres sources d'erreurs qui peuvent affecter une image, ces différences sont-elles significatives ?

**A**




**B**

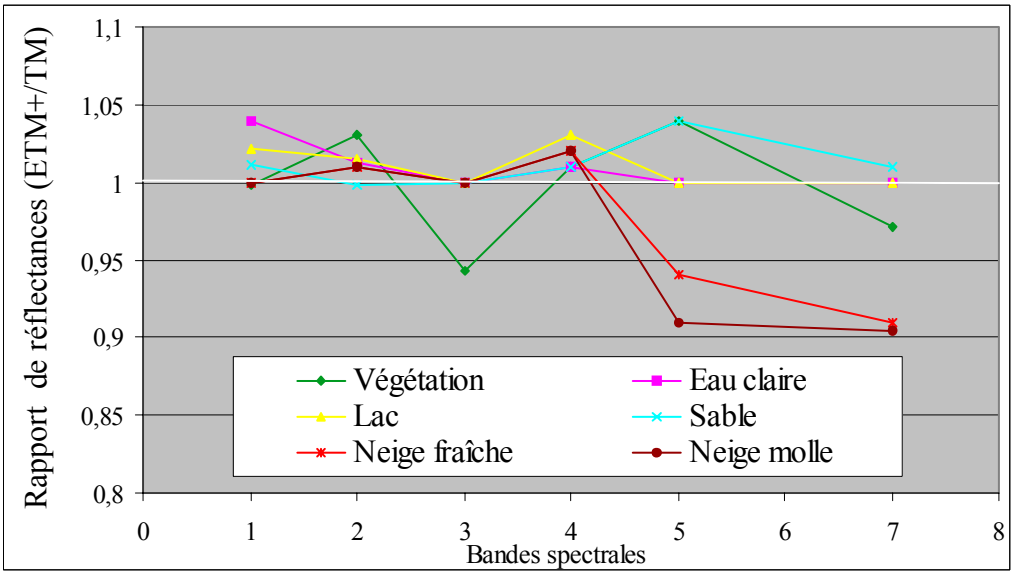



FIGURE 4 Comparaison entre les réflectances équivalentes apparentes simulées dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM et ETM+ : cibles mesurées au sol (A) et cibles intégrées dans CAM5S (B). *Comparison of apparent reflectances ratio simulated in the TM and ETM+ homologous spectral bands for various target types : targets measured on the ground (A) and targets integrated in CAM5S (B).*

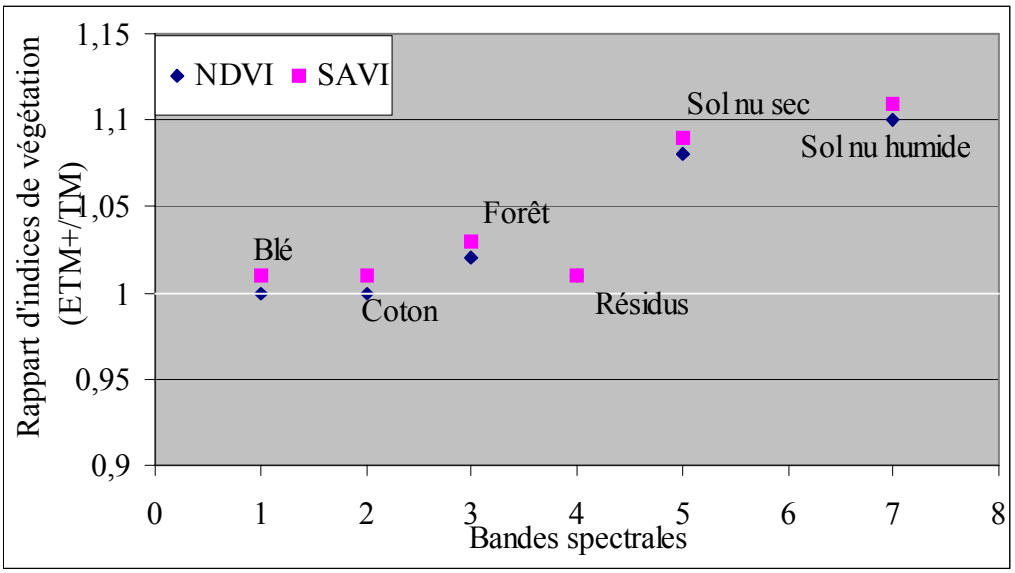
Afin de répondre à ces deux questions, rappelons tout d'abord que la variation de la réflectance équivalente d'une cible dans le domaine spectral couvert par des bandes homologues peut être soit monotone et parfaitement linéaire, comme c'est le cas des sols nus, soit présenter des discontinuités (bandes d'absorption), comme c'est le cas de la végétation vivante ou sénescente (Bannari *et al.,* 2000b). Lorsque la réflectance d'une cible varie de façon linéaire avec la longueur d'onde, le problème se résout facilement et il est alors possible de passer des réflectances dans les bandes du capteur 1 à celles qui sont mesurées dans les bandes homologues du capteur 2, en utilisant un facteur multiplicatif. Par contre, lorsque le spectre de réflectance présente des discontinuités, les corrections de passage d'un capteur à l'autre sont beaucoup plus difficiles à réaliser. Il faut donc connaître la forme exacte du spectre de réflectance de la cible en question et la convoluer avec la courbe de la fonction de réponse spectrale (sensibilité spectrale) du capteur (Guyot et Gu, 1992). Théoriquement cela est possible mais, dans la pratique, on ignore généralement la forme de tous les spectres des surfaces naturelles existant dans une image. Également, les données de réflectances fournies par deux capteurs différents vont probablement présenter d'autres types d'écarts dus aux caractéristiques instrumentales, soit optiques et électroniques (NASA, 1998). Ces derniers peuvent être soit considérés comme un bruit additif, soit comme une différence liée aux caractéristiques spectrales des cibles, ce qui reste quand même très difficile à mettre en évidence. Cette mise en évidence sera d'autant plus difficile à faire lors de l'intercomparaison de deux images lorsque tous ces problèmes seront combinés à d'autres : effets bidirectionnels, effet topographique et variation atmosphérique (Bannari *et al.,* 2000a).

Sur la figure 5, on illustre l'impact de la différence des fonctions de réponses spectrales des deux capteurs lors de la transformation des réflectances équivalentes apparentes en indices de végétation. Si nous considérons que la végétation sénescente (résidus de cultures) et photosynthétiquement active (blé, coton, forêt et végétation herbacée brillante), le rapport entre les indices ($\text{indice}_{\text{ETM+}}/\text{indice}_{\text{TM}}$) s'écarte de l'unité d'une valeur de 3 % dans le cas extrême, pour le NDVI comme pour le SAVI.

Cet écart est de 1,5 % pour l'eau, atteint 10 % environ pour les sols nus (secs et humides) et varie, respectivement, de 20 % à 24 % pour la neige fraîche et la neige molle. On peut ici avancer l'hypothèse que les indices de végétation ont été développés pour l'extraction de l'information sur les couverts végétaux et non pour avoir de l'information sur la neige. Par conséquent, nous pouvons conclure qu'il est indispensable de prendre en considération la différence entre les fonctions de réponses spectrales des deux capteurs lors de l'étude de la neige, puisque l'écart est aussi grand même lors de la comparaison des réflectives, notamment dans l'infrarouge à ondes courtes. Bien entendu, les sols nus (secs et humides) de différentes propriétés optiques, les surfaces d'eau et la végétation (vivante et sénescente) sont souvent les éléments les plus présents dans une image et leur différence doit être analysée attentivement. Toutefois, il est bien évident que, si toutes les corrections radiométriques sont appliquées aux images (atmosphère, étalonnage du capteur et topographie), ces deux indices restent toujours sensibles aux propriétés optiques des sols nus sous-jacents aux couverts, dont les erreurs quadratiques moyennes peuvent atteindre 10 % (Huete and Tucker, 1991 ; Baret *et al.*, 1993 ; Bannari *et al.,* 1996). D'autres chercheurs rapportent que, lorsque les sols sont secs et de couleurs très claires, ces erreurs atteignent facilement, respectivement, 20 % et 12 % pour le NDVI et le SAVI (Rondeaux *et al.*, 1996 ; Bannari *et al.,* 2000a).

En plus de l'effet des propriétés optiques des sols nus et des autres sources d'erreurs instrumentales (optique et électronique) mentionnées ci-dessus, les corrections atmosphériques s'appliquent sur les images en considérant l'atmosphère homogène, bien qu'elle ne le soit pas, et les corrections de l'effet de la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) ne sont pas encore bien maîtrisées (Chen and Leblanc, 1997). Si nous considérons donc tous ces facteurs, nous pouvons dire que l'écart causé par la différence des fonctions de réponses spectrales sur les indices de végétation est négligeable. D'ailleurs, lorsque nous considérons toutes les cibles, sauf la neige, les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 98 % pour ces deux indices, comme pour toutes les réflectances équivalentes apparentes. Ces résultats corro-borent les travaux de Vogelmann *et al.* (2001), qui ont montré que les NDVI dérivés de deux images (ETM+ et TM) acquises la même journée sont très semblables et montrent un coefficient de corrélation de 97,6 %.

A




B

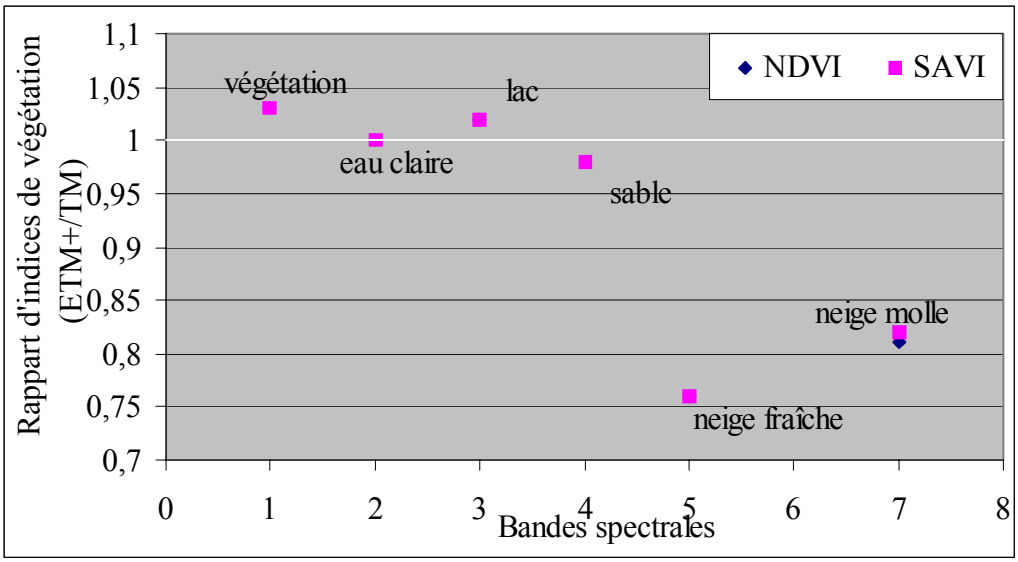



FIGURE 5 Comparaison entre le rapport des indices de végétation simulés dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM et ETM+ : cibles mesurées au sol (A) et cibles intégrées dans CAM5S (B). *Comparison of vegetation indices ratio simulated in the TM and ETM+ homologous spectral bands for various target types : targets measured on the ground (A) and targets integrated in CAM5S (B).*

### *3.2. Données images*

La classification non dirigé des images a été réalisée à l'aide de l'algorithme K-Means de PCI (PCI Geomatics Inc., 2003). Du fait que nous n'avons aucune connaissance *a priori* sur les natures spectrale et thématique des classes existantes dans les images, les histogrammes pour chaque canal des deux images ont été analysés pour localiser les centres initiaux de classes, selon la structure des données. Cette opération consiste à effectuer une agrégation des spectres de réflectances en un nombre restreint de classes spectralement homogènes dans les deux images considérées (He et Wang, 1987).

Après six itérations, huit classes spectrales homogènes ont été retenues. Les résultats des classifications montrent une très grande similitude radiométrique entre les différentes classes thématiques des cartes obtenues à partir des deux images TM et ETM+ (figure 6). Les coefficients de variations (CV) calculés à partir des statistiques des classes considérées affichent une différence

non significative entre les classes homologues 1, 3 et 4. Pour les cinq autres classes, l'écart est supérieur à 0,2 % (tableau 3). Généralement, les valeurs des CV sont plus élevées pour les classes provenant de l'image ETM+ que pour celles provenant de l'image TM (tableau 3). Il est certain que ces différences ne peuvent pas être causées par la différence radiométrique entre les deux capteurs. Elles peuvent être causées par l'évolution de la dynamique du couvert d'autant plus que les images ont été acquises à 13 mois de différence (figure 6). En outre, il est probable que, durant cette période, le site peut être sujet à des coupes qui peuvent causer des changements dans l'occupation des terres. Il est aussi probable que ces différences soient augmentées par les effets de la BRDF et de la topographie, qui n'ont pas été corrigées.

Ces résultats concordent avec les travaux de Vogelmann *et al.* (2001), lesquels ont montré la similitude entre les classifications par maximum de vraisemblance dérivées des deux images TM et ETM+ acquises la même journée au-dessus d'un site agricole.

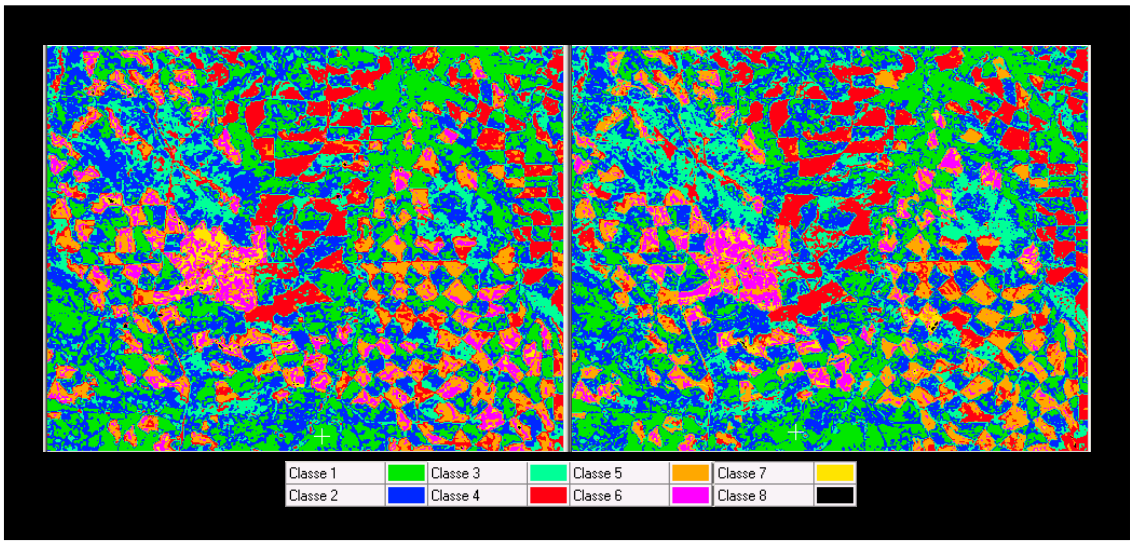



FIGURE 6 Comparaison entre les classifications de l'image TM, acquise en 1998 (à gauche), et l'image ETM+, acquise en 1999 (à droite). *Comparison of classified TM image (acquired in 1998, on the left) and classified ETM+ image (acquired in 1999, on the right).*

TABLEAU 3 Comparaison entre les coefficients de variation obtenus des classifications des deux images TM et ETM+. *Comparison of the variation coefficients obtained from TM and ETM+ classifications.*

| Classe # | CV (Image TM) | CV (Image ETM+) | ΔCV |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,0210 | 0,0223 | 0,0013 |
| 2 | 0,0204 | 0,0231 | 0,0027 |
| 3 | 0,0277 | 0,0286 | 0,0009 |
| 4 | 0,0288 | 0,0297 | 0,0009 |
| 5 | 0,0338 | 0,0366 | 0,0028 |
| 6 | 0,0329 | 0,0351 | 0,0022 |
| 7 | 0,0364 | 0,0408 | 0,0044 |
| 8 | 0,0465 | 0,0690 | 0,0225 |

CV = coefficient de variation

## 4. CONCLUSIONS

Différents facteurs affectent la comparaison de l'information extraite des images acquises par les capteurs TM et ETM+ dans des bandes spectrales homologues. Certains facteurs peuvent être corrigés, tels les effets atmosphériques, les effets topographiques et l'étalonnage radiométrique des capteurs, alors que d'autres facteurs, tels les effets directionnels et la différence des bandes spectrales homologues, sont difficilement maîtrisables, introduisant des différences dans les valeurs des réflectances correspondant à une même cible. Dans cette étude, nous avons analysé l'impact de la différence des fonctions de réponses spectrales entre les bandes homologues des capteurs TM et ETM+ sur les réflectances apparentes de différentes cibles, sur deux indices de végétation et sur la classification de deux images.

Les résultats des simulations ont mis en évidence des écarts qui dépendent de la distribution spectrale. Les réflectances équivalentes apparentes et les indices de végétation dérivés des deux capteurs sont presque semblables pour toutes les cibles considérées, à l'exception de la neige, notamment dans l'infrarouge à ondes courtes. Compte tenu de l'écart aussi grand lors de la comparaison des réflectances de la neige, il est indispensable de prendre en considération la différence entre les fonctions de réponses spectrales des deux capteurs lors de l'étude de la neige. D'ailleurs, dans la littérature, il n'existe aucun seuil de signification des écarts observés soit en fonction des caractéristiques des réponses spectrales des capteurs et des cibles observées. Toutefois, les écarts qui ont été mis en évidence peuvent être considérés comme un bruit ou comme des variations comparables aux écarts qui peuvent être causés par d'autres problèmes liés aux caractéristiques instrumentales. Ils peuvent être aussi considérés inférieurs aux écarts causés par des artefacts liés aux propriétés optiques des sols nus.

Quant aux résultats de la classification, l'analyse des différences entre les CV et l'interprétation visuelle des cartes provenant des classifications montre que les deux images sont très similaires. Bien que nous n'ayons pas de réalité de terrain pour une validation rigoureuse des deux cartes, à la lumière des analyses et des résultats de cette étude, nous pouvons dire que les données provenant des deux capteurs peuvent être utilisées pour différentes applications de la télédétection si les différentes distorsions radiométriques relatives aux capteurs et à l'atmosphère sont rigoureusement corrigées.

***Remerciements***

Nous remercions le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada pour le support financier et le Centre canadien de télédétection pour les images.

***Références***

Asrar, G. (1989) Theory and applications of optical remote sensing. Chapitre 1, *in G. Asrar* (réd.) Wiley Series in Remote Sensing. John Wiley & Sons, New York, 752 p.

Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. et Zacolski, F. (1996) Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, nº 10, p. 1885-1906.

Bannari, A., Teillet, P.M. et Richardson, G. (1999) Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. Journal canadien de télédétection, vol. 25, nº 1, p. 45-59.

Bannari, A, Teillet, P.M., Leckie, D.G. et Fedosejevs, G. (2000a) Impact des conditions internes et externes aux couverts forestiers sur les indices spectraux dérivés de AVHRR. Télédétection, vol. 1, nº 3, p. 157-181.

Bannari. A, Haboudane, D. et Bonn, F. (2000b) Intérêt du moyen infrarouge pour la cartographie des résidus de culture. Journal canadien de télédétection, vol. 26, nº 5, p. 384-393.

Baret, F., Jacquemoud, S. and Hanocq, J. F. (1993) The Soil Line Concept in Remote Sensing, Remote Sensing Reviews, vol. 7, nº 1, p. 65-82.

Barker, J.L., Ball, D.L., Leung, K.C. and Walker, J.A. (1984) Pre-Launch Absolute Radiometric Calibration of Landsat-4 Protoflight Thematic Mapper. Landsat-4 Science Investigations Sum. NASA Conf. Pub. 2326, Greenbelt (Maryland), vol. I, p. 130-139.

Burgess, D. W., Lewis, P. and Muller, J-P.A.L. (1995) Topographic Effects in AVHRR NDVI Data. Remote Sensing of Environment, vol. 54, p. 223-232.

Chen, J.M. and Leblanc, S.G. (1997) A Four-Scale Bidertional Reflectance Model Based on Canopy Archtecture. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, nº 5, p. 1316-1337.

Crist, E.P. and Cicone, R.C. (1984) Comparison of the dimensionality and features of simulated Landsat-4 MSS and TM data. Remote Sensing of Environment, vol. 14, p. 235-246.

Engelsen, O., Pinty, B., Verstraete, M.M. and Martonchik, J.V. (1997) Parametric Bidirectional Reflectance Factor Models: Evaluation, Improvements and Applications. Space Applications Institute, Joint Research Centre, European Commission, Ispra (Italie), 114 p.

Goward, S.N. and Williams, D.L. (2001) Landsat and earth systems science: development of terrestrial monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 63, nº 7, p. 887-900.

Goward, S.N., Masek, J.G., Williams, D.L., Irons, J.R. and Thompson, R.J. (2001) The Landsat-7 mission Terrestrial research and applications for the 21st century. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 3-12.

Guenther, B., Butler, J. and Ardanuy, P. (1997) Workshop on Strategies for Calibration and Validation of Global Change Measurements. Reference Publication-1397, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), 125 p.

Guyot, G. et Gu, X. (1992) Intercomparaison des images satellitaires multicapteurs. International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, XVII Congress, Washington, August 2004, ISPRS, Bethesda, p. 699-704.

Guyot, G., Gu, X.F. et Clastre, P. (1992) Correction de la FTM sur les images SPOT. Photo-Interprétation, nº 1990-6, p. 17-28.

He, D.-C. et Wang, L. (1987) Introduction des centres initiaux pour l'algorithme d'agrégation autour de centres mobiles. International Journal of Remote Sensing, vol. 8, nº 2, p. 237-242.

Henry, P., Dinguirard, M. and Meygret, A. (1996) Synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT. 3e édition, Note CNES, Référence : S-NT-OB1-580-CN, Toulouse, 23 p.

Huete, A.R. (1984) Soil spectral effects on vegetation discrimination. Thèse de doctorat, University of Arizona, 208 p.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

Huete, A.R. and Tucker, C.J. (1991) Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 12, nº 6, p. 1223-1242.

Jackson, R.D., Pinter, P.J., Paul, J., Reginato, R.J., Robert, J. and Idso, S.B. (1980) Hand-held radiometry. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration, Agricultural Reviews and Manuals, ARM-W-19, Phoenix (Arizona), 66 p.

Markham, B.L. and Barker, J.L. (1985) Spectral characteristics of the Landsat-4 MSS sensor. Landsat-4 Science Characterization Early Results, NASA Conf. Pub. 2355, Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), vol. I, p. 23-56.

Masek, J.G., Honzak, M., Goward, S.N., Liu, P. and Pak, E. (2001) Landsat-7 ETM+ as an observatory for land cover Initial radiometric and geometric comparisons with Landsat-5 TM. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 118-130.

Moran, M.S., Bryant, R., Thome, K., Ni, W., Nouvellon, Y., Gonzalez-Dugo, M.P., Qi, J. and Clarke, T.R. (2001) A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 71-82.

NASA (1997) Landsat-7, supplying data users worldwide with low cost, multi-purpose, land remote sensing data into the next century. Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), 12 p. (www.geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/17.html).

NASA (1998) Prelaunch composite detector response functions for Landsat-7 ETM+. Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), 7 p. (www.gsfc.nasa.gov/LANDSAT/IAS_RAD_TESTS/RSR/DATASETS/b1srn.dat).

O'Neill, N.T., Royer, A. and Nguyen, N. (1996) Scientific and Technical Report on the envelopment of a Modified Version of the H5S Code which Incorporates Major Features of the 6S Code. Rapport technique, CARTEL Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 62 p.

PCI Geomatics Inc. (2003) Geomatica-9 Software Solution. http://www.pcigeomatics.com.

Proy, C. (1986) Intégration du relief au traitement d'image de télédétection. Thèse de doctorat, Institut National Polthechnique de Toulouse, Toulouse, 173 p.

Robinov, C.J. (1982) Computation with physical values from Landsat digital data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, nº 5, p. 781-784.

Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F. (1996) Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, vol. 55, p. 95-107.

Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type-III Final Report, Greenbelt (Maryland), 164 p.

Schowengerdt, R. A., Archwamety, C. and Wrigley, R. C. (1985) Landsat Thematic Mapper image-derived MTF. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 51, nº 9, p. 1395-1406.

Sheffiner, E.J. (1994) The Landsat program: recent history and prospect. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 60, nº 6, p. 735-744.

Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J. J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y. (1990). Description of a Computer Code to Simulate Satellite Signal in the Solar Spectrum : The 5S Code. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, nº 4, p. 659-668.

Teillet, P.M., Barker, J.L., Markham, B.L., Irish, R.R., Fedosejevs, G. and Storey, J.C. (2001) Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 39-54.

Teillet, P. M., Staenz, K. and Williams, D. J. (1997) Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions. Remote Sensing of Environment, vol. 61, p. 139-149.

Thome, K.J. (2001) Absolute radiometric calibration of Landsat-7 ETM+ using the reflectance-based method. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 27-38.

Tucker, C.J. (1978) A comparison of satellite sensors bands for vegetation monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, p. 1369-1380.

Vogelmann, J.E., Helder, D., Morfitt, R., Choate, M.J., Merchant, J.W. and Bulley, H. (2001) Effects of Landsat-5 Thematic Mapper and Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus Radiometric and Geometric Calibration and Corrections on Landscape Characteri zation. Remote Sensing of Environment, vol. 78, p. 55-70.

Williams, D.L., Irons, J.R., Markham, B.L., Nelson, R.F., Toll, D.L., Latty, R.S. and Stauffer, M.L. (1984) A statistical evaluation of the advantage of Landsat TM in comparison to multispectral scanner data. IEEE transactions in Geoscience and Remote Sensing, vol. 22, nº 3, p. 294-304.

Williamson, R.A. (1997) The Landsat legacy: remote sensing policy and the development of commercial remote sensing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 63, p. 870-885.