Télédétection, 2006, vol. 6, n° 1, p. 1-8
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

LE PROGICIEL « REFLECT » POUR LA CORRECTION ATMOSPHÉRIQUE D'IMAGES SATELLITES : VALIDATION SUR LA MONTÉRÉGIE, QUÉBEC

Mohamed Yacine Bouroubi[1], Philippe Vigneault[2], François Cavayas[3] et Nicolas Tremblay[4]

[1]. *Département de Géographie, Université de Montréal,*
C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal (Québec) H3C 3J7, Canada.
Courriel : my.bouroubi@umontreal.ca ;
téléphone : 1 514 343 8018 ; télécopieur : 1 514 343 8008

[2]. *Centre de R&D en horticulture, Agriculture et agroalimentaire Canada*
430 boulevard Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec) J3B 3E6, Canada.
Courriel : vigneaultp@agr.gc.ca ;
téléphone 1 450 346 4494 ; télécopieur : 1 450 346 7740

[3]. *Département de Géographie, Université de Montréal,*
C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal (Québec) H3C 3J7, Canada.
Courriel : francois.cavayas@umontreal.ca ;
téléphone : 1 514 343 8016 ; télécopieur : 1 514 343 8008

[4]. *Centre de R&D en horticulture, Agriculture et agroalimentaire Canada*
430 boulevard Gouin, Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec), J3B 3E6, Canada.
Courriel : tremblayna@agr.gc.ca ;
téléphone : 1 450 346 4494 ; télécopieur : 1 450 346 7740

Soumis le 5 juin 2005 ; révisé le 22 mars 2006 ; accepté le 21 avril 2006

Le progiciel REFLECT a été développé par le Laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal. Ce progiciel permet la transformation des valeurs numériques des diverses bandes spectrales d'une image satellite en des réflectances au sol. Il fait appel, entre autres, à différentes routines du code atmosphérique 6S, la méthode des cibles obscures pour le calcul de l'épaisseur optique des aérosols (AOD), ainsi qu'à des modèles de calcul de l'effet d'adjacence. Le but de cet article est de décrire ce progiciel et de montrer les résultats de son application pour l'estimation du NDVI au-dessus de champs situés en Montérégie (Québec). Les possibilités d'améliorer l'exactitude des calculs sont aussi discutées. Cette exactitude est évaluée actuellement à 20 % environ pour le NDVI obtenu avec des images ETM+ de Landsat-7 et ALI d'EO-1 comparativement à des estimations provenant des mesures in situ lors du passage des satellites.

Mots-clés : Corrections atmosphériques, cibles obscures, Code 6S, Réflectance, NDVI, Progiciel REFLECT

THE « REFLECT » SOFTWARE FOR THE ATMOSPHERIC CORRECTION OF SATELLITE IMAGES : VALIDATION OVER THE MONTÉRÉGIE REGION, QUÉBEC

The REFLECT software package was developed by the Remote Sensing Laboratory of the University of Montreal. REFLECT allows the transformation of the numerical values of the spectral bands from satellite images into ground reflectances. It is based on the 6S atmospheric code for the computation of atmospheric parameters, on the dark objects method to estimate the aerosol optical depth (AOD) and on a surrounding effect model. This paper describes the software package and presents its performance in the retrieval of NDVI from fields in the Montérégie région of Québec. The accuracy was about 20 % for the NDVI derived from Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI images in comparison with in situ measurements. Opportunities for improving this accuracy are also discussed.

Keywords : Atmospheric corrections, Dark targets, Reflectance, NDVI, 6S code, Reflect software

1. INTRODUCTION

Le Centre R&D en horticulture d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (CRDH, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec) développe des modèles de prévision des récoltes fondés sur des observations météorologiques pendant le cycle de croissance. Sur une base expérimentale, des mesures acquises in situ ainsi que par capteur aéroporté sont utilisées pour l'estimation des paramètres biophysiques des canopées. Ces paramètres sont des intrants dans les modèles de croissance afin de les ajuster périodiquement et ainsi améliorer leurs prédictions. L'application de cette approche à une échelle régionale (en l'occurrence la Montérégie) bute cependant au fait que les mesures in situ ou aéroportées ne sont pas praticables à une telle échelle, pour des raisons évidentes de logistique et de coût. L'intégration des images satellites apparaît comme une alternative intéressante. Intégrer cependant l'imagerie satellite sur une base routinière signifie principalement deux choses :

a) être en mesure de transformer les valeurs numériques dans les bandes spectrales d'intérêt en réflectance au sol tout en tenant compte des conditions atmosphériques typiques de la région d'application, et
b) être en mesure de s'en servir pour n'importe quelle image optique disponible avec une résolution spatiale adéquate au moment voulu. Particulièrement pour le sud du Québec, cette deuxième condition devient très importante compte tenu des aléas météorologiques (précipitations, couverture nuageuse) mais aussi de la présence de voiles subtiles et d'épisodes de smogs jaunes dus aux particules de pollution transportées par les vents dominants sud-ouest en provenance des industries de la région des Grands Lacs ainsi que de la grande région métropolitaine de Montréal.

C'est dans ce contexte que le Laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal en collaboration avec le CRDH a développé le prototype du progiciel REFLECT (Cavayas *et al.*, 2003). Ce progiciel est largement inspiré du progiciel TASIC développé au Centre canadien de télédétection (CCT) pour la correction atmosphérique des images Landsat (Ahern *et al.*, 1979). Au cœur de REFLECT, nous retrouvons diverses routines du code atmosphérique 6S (Vermote *et al.* 1997a). Son application à des images ETM+ Landsat a donné des résultats encourageants au niveau du calcul des réflectances au sol comparativement à des mesures in situ en concomitance avec le passage du satellite. Il a été ainsi décidé de passer à la phase d'opérationnalisation du progiciel. Les travaux effectués jusqu'à présent sont décrits dans la première partie de cet article. Dans la seconde partie, les résultats obtenus en appliquant le progiciel avec à images ETM+ de Landsat et ALI d'EO-1 sont présentés et commentés. Dans la troisième et dernière partie de cet article, nous discutons des possibilités d'amélioration des résultats du progiciel.

2. FONDEMENTS DU PROGICIEL REFLECT

Le calcul de la réflectance au sol comprend d'abord une étape de transformation de la valeur numérique mesurée par le capteur en luminance apparente, généralement par une fonction linéaire. La plupart des organismes chargés de la distribution d'images satellites fournissent les coefficients d'étalonnage nécessaires à cette transformation ainsi que les courbes de sensibilité des différentes bandes spectrales. Ces données ont été intégrées dans REFLECT afin de permettre les calculs à partir des images de plusieurs capteurs dont le ETM+ de Landsat et l'ALI d'EO-1. La transformation des luminances apparentes en réflectance au sol se fait en tenant compte des effets additifs et multiplicatifs de l'atmosphère sur la luminance provenant du sol. Tel que mentionné, REFLECT incorpore diverses routines du code 6S pour l'estimation de ces effets lors du passage du satellite.

2.1. Le code 6S : bref aperçu

Brièvement, ce code divise l'atmosphère en une série de couches parallèles, chacune caractérisée par son contenu en molécules de gaz et en aérosols. Le nombre de couches est calculé à partir du niveau moyen de la mer, mais l'utilisateur peut l'ajuster en introduisant l'altitude du lieu à l'étude. Le sol est supposé horizontal avec des caractéristiques de réflexion particulières. Trois types de sol (cibles) sont pris en compte :

a) une cible lambertienne s'étendant à l'infini,
b) une cible lambertienne finie entourée d'une surface infinie de réflectance lambertienne différente de la cible et
c) une cible non-lambertienne s'étendant à l'infini.

Le modèle du transfert radiatif dans le système atmosphère-sol est unidimensionnel, en d'autres mots, les propriétés atmosphériques ne varient que dans la direction verticale. Le code assume aussi l'indépendance des processus d'absorption par les molécules de gaz et de diffusion atmosphérique par les molécules et les aérosols. Dans sa dernière version, une certaine dépendance peut être prise en compte particulièrement pour les premières couches de l'atmosphère en faisant interagir la vapeur d'eau et les aérosols. Tous les détails sur ce code ainsi que sur sa formulation sont donnés dans Vermote *et al.* (1997 a et b). Pour ne pas alourdir le texte, une formulation simplifiée est présentée par la suite, ce qui permet de mieux comprendre les différents modules du progiciel REFLECT. Toute référence à la longueur d'onde est également omise.

Le code 6S effectue tous ses calculs sur la base des facteurs de réflectance. Le facteur de réflectance apparente aux confins de l'atmosphère, R^*, est calculé en normalisant la valeur de luminance mesurée par le capteur, L_{SAT}, par la luminance d'une cible lambertienne, L^*_{LAMB}, de réflectance unité placée au sommet de l'atmosphère, exposée au soleil et visée par le capteur sous les mêmes conditions que le sol :

$$R^* = L_{SAT} / L^*_{LAMB} \quad \text{.....(1)}$$

avec :

$$L^*_{LAMB} = (1/\pi) E_0 \, d^2 \cos\theta_s \quad \text{.....(2)}$$

où E_o est l'éclairement solaire exoatmosphérique, d est un facteur d'ajustement de l'éclairement solaire pour la distance terre-soleil au moment d'acquisition des images et θ_s est l'angle zénithal du soleil. Dans le cas le plus simple d'indépendance complète entre absorption et diffusion, la réflectance apparente peut s'écrire :

$$R^* = T_{gas} \left(R_{ATM} + R^*_{SOL} t^{\uparrow}_{dir} + \langle R_{ENV} \rangle t^{\uparrow}_{dif} \right) \quad \text{.....(3)}$$

avec:

$$R^*_{SOL} = \frac{T\downarrow \; R_{SOL}}{\left(1 - S_{alb} \langle R_{ENV} \rangle\right)} \quad \text{.....(4)}$$

où T_{gas} est la transmittance gazeuse totale (trajet descendant et ascendant), R_{ATM} est la réflectance atmosphérique (réflectance de parcours), R^*_{SOL} est la réflectance totale de la cible, $t^{\uparrow}_{dir}$ est la transmittance directe dans le trajet cible-capteur, $t^{\uparrow}_{dif}$ est la transmittance diffuse du signal réfléchi par l'environnement dans la direction de visée du capteur, $\langle R_{ENV} \rangle$ est la réflectance de l'environnement de la cible, et $T\downarrow$ est la transmittance totale (directe et diffuse) dans le trajet descendant, S_{alb} est l'albédo atmosphérique. L'équation (4) décrit la réflectance totale d'une cible du deuxième type tel qu'expliqué ci-haut. C'est le cas typique employé en ce moment dans REFLECT.

Pour le calcul des termes de transmittance et de réflectance atmosphériques, les intrants sont :

a) les profils verticaux de température et de pression atmosphérique,
b) le contenu total de l'atmosphère en ozone et en vapeur d'eau,
c) les caractéristiques d'absorption des autres gaz atmosphérique
d) l'épaisseur optique des molécules et des aérosols,
e) la structure des aérosols et de ses propriétés de diffusion. Particulièrement pour les aérosols, les calculs font appel à leur épaisseur optique totale à 550 nm.

2.2. Adaptation pour le calcul à partir des images satellites

Succinctement, les modifications suivantes ont été apportées pour adapter le code 6S au calcul avec des images satellites couvrant la région de la Montérégie :

a) L'altitude de chaque pixel de l'image peut être connue via un MNA intégré dans la base de données avec les images satellites orthorectifiées.
b) Le contenu en vapeur d'eau w de l'atmosphère peut être estimé à partir de mesures d'humidité relative ϕ r et de température de l'air T, provenant des stations météorologiques locales, selon la formule de Leckner rapportée dans Iqbal (1983) : $w = 0.493 . \phi_r p_s / T$ où ps est la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air saturé donnée par l'équation semi empirique suivante :
$p_s = \exp(26.23 - 5416/T)$.
Pour le contenu en ozone, des données tabulaires, fonctions de la latitude et de la date, peuvent être utilisées (Iqbal, 1983).
c) Les transmittances des différents gaz sont calculées selon les conditions d'observation, les bandes spectrales du capteur et pour des altitudes caractéristiques de la région et stockées dans des tables de correspondance. Pour un pixel quelconque de l'image, elles sont alors calculées par interpolation en utilisant son altitude.
d) Les paramètres de diffusion des molécules de gaz sont calculés pour les dix longueurs d'onde entre 250 et 3 000 nm, tel que défini par le code 6S, pour les conditions d'observation et pour des altitudes caractéristiques de la région et stockées dans des tables de correspondance. Pour les pixels de l'image, ils sont alors calculés par interpolation en utilisant son altitude.
e) Le calcul de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) à 550 nm se fait selon la méthode des cibles obscures localisées sur les images (Teillet and Fedosejevs, 1995). Les cibles obscures (de réflectance très faible, stable et connue dans certaines bandes spectrales) de type « eau claire et profonde » et « forêt dense » ont été utilisées pour estimer l'épaisseur optique des aérosols (AOD) à 550 nm par un processus itératif. Les réflectances choisies pour les cibles obscures sont : pour l'eau claire, 0,015 dans le bleu, 0,011 dans le vert, 0,009 dans le rouge et 0,000 dans le proche infrarouge et pour la forêt dense, 0,012 dans le bleu et 0,015 dans le rouge. La recherche des cibles obscures fait appel à un seuillage d'histogramme dans différentes bandes spectrales. Ainsi :

- Pour les pixels d'eau claire et profonde, la condition est :

$$(0 < VN_{PIR} < MIN_{PIR}) \text{ et } (0 < VN_{bleu} \leq MOD_{bleu}) \text{ et } (0 < VN_{vert} \leq MOD_{vert}) \text{ et } (0 < VN_{rouge} \leq MOD_{rouge})$$

MIN et MOD représentent respectivement le premier minimum et le premier mode de l'histogramme des valeurs numériques (VN) dans les bandes indiquées.

- Pour les pixels de forêt dense :

$$(VN_{PIR} - VN_{ROUGE} > S_1)$$

et

$$S_2 \le VN_{ROUGE} < S_3)$$

Les seuils S1 et S3 assurent des réflectances faibles dans le rouge et fortes dans le PIR. S2 sert à éviter les pixels limitrophes des lacs et le pourtour des zones ombragées par les nuages.

f) L'effet d'adjacence (effet de l'environnement) est pris en compte en se servant d'une méthode similaire à celle des « anneaux » (Vande Castle and Vermote, 1996).

La figure 1 montre un exemple de calcul des paramètres atmosphériques des équations 3 et 4 reliant la réflectance au sol et la réflectance apparente. Les sensibilités spectrales des capteurs ETM+ et ALI dans les bandes rouge et PIR y sont également présentées.

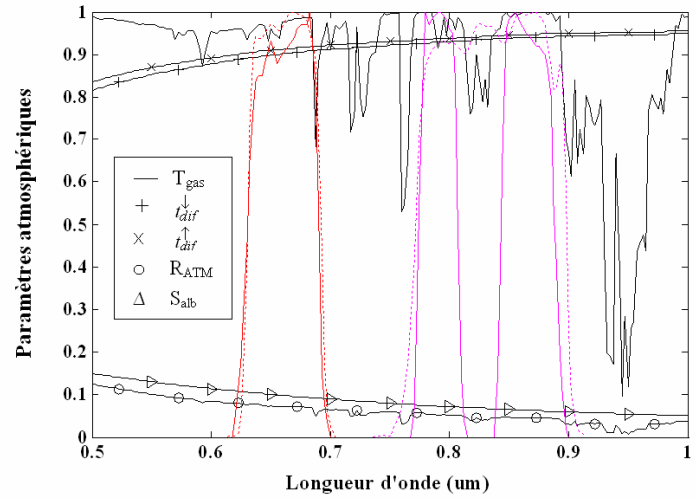


FIGURE 1 : Paramètres atmosphériques utilisés pour passer de R* à RSOL et sensibilités spectrales des capteurs ETM+ (lignes continues) et ALI (lignes discontinues) dans les bandes rouge et PIR. *Atmospheric parameters used to pass from R* to RSOL and spectral sensitivities of the ETM+ (continuous lines) and ALI (discontinuous lines) sensors in the red and NIR bands.*

L'organigramme de la figure 2 illustre l'organisation générale de l'algorithme de calcul de l'AOD et de R_{SOL}. Les routines (du 6S) communes aux deux programmes sont notées (C_i), celles propres au calcul de l'AOD (A_i) et celles relatives au calcul de R_{SOL} sont notées (R_i). L'approche utilisée pour estimer l'AOD sur cibles obscures est une méthode itérative qui permet d'atteindre un bon degré de précision.

Afin de réduire le temps de calcul de la réflectance, une option de « calcul rapide » a été ajoutée. Les paramètres atmosphériques, impliquant les routines multi-itérations du code 6S, sont calculés uniquement pour des valeurs « typiques », calculées par quantification, de l'AOD et de la hauteur (altitude) *H*. L'application à l'image se fait par identification par rapport à H et à l'AOD correspondant aux pixels de l'image. Ceci revient à générer des tables de correspondance (look-up tables) adaptées à chaque cas. Le gain de temps peut être très élevé (> 1000) si la taille de l'image à corriger est importante.

Le programme est doté d'une interface graphique (réalisée sous Visual C++) qui permet de lancer les différents calculs de manière conviviale (figure 3). Elle comprend une hiérarchie de boîtes de dialogue permettant d'exécuter les divers programmes relatifs à chaque étape. La correction peut se faire « étape par étape », ce qui donne la possibilité de choisir un maximum d'options ou bien de façon « automatique », ce qui permet de réduire le nombre d'opérations à faire pour exécuter une correction.

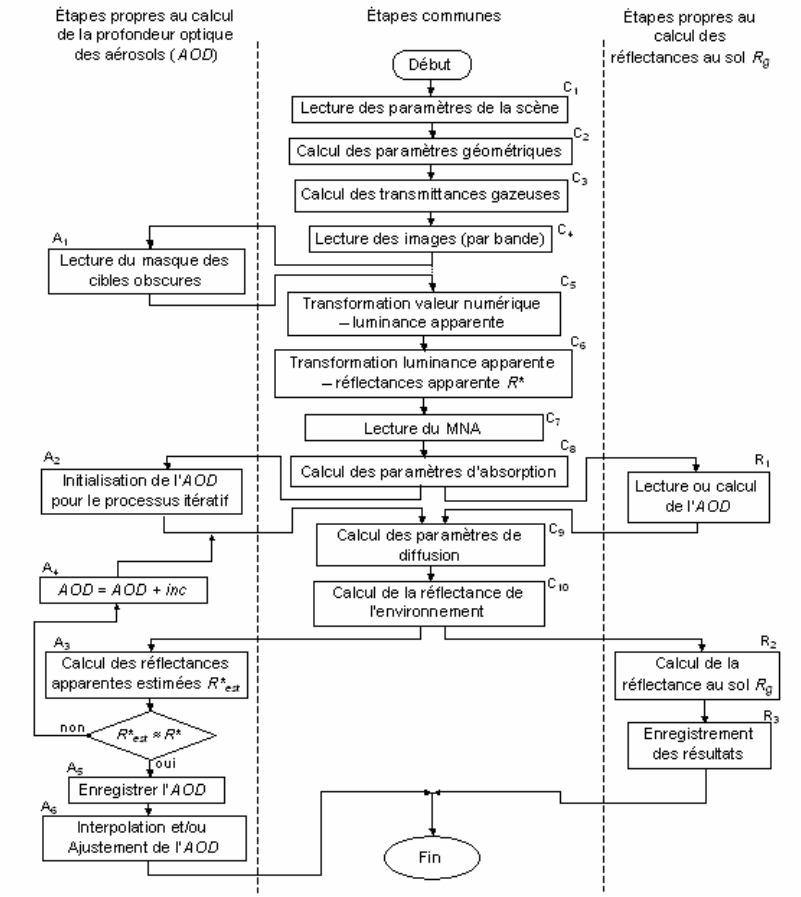


FIGURE 2 : Organigramme du progiciel REFLECT : principe du calcul de l'épaisseur optique des aérosols et de la réflectance au sol. *Outline of the REFLECT software : principle of the calculation of aerosol optical depth and ground reflectance*

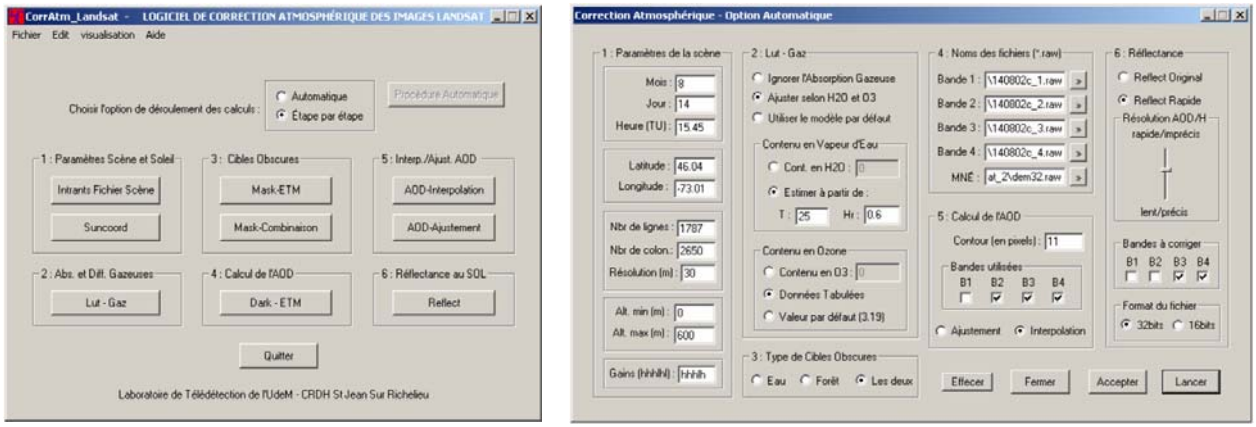


FIGURE 3 : Fenêtre principale et fenêtre de correction automatique de l'interface graphique. *Main window and automatic correction window of the graphic interface*

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La méthodologie a été validée sur les bandes rouge et PIR de quatre scènes ETM+ de Landsat prises au-dessus de champs situés en Montérégie, les 5 juin 2000 (2 champs de pois, 15,8 ha et 18,8 ha), 26 juillet 2001 (une parcelle de haricot et une de maïs sucré, 0,85 ha chacune), 11 août 2001 (maïs sucré, 0,85 ha) et 14 août 2002 (5 champs de maïs sucré, pour un total de 122,51 ha) et d'une scène ALI de EO-1 prise le 4 juin 2002 (5 champs de maïs sucré, pour un total de 122,51 ha). Les figures 4a et 4b illustrent respectivement les scènes ETM+ du 26 juillet 2001 et du 14 août 2002 ainsi que la localisation des champs (encerclés en rouge). Le territoire étudié est abondant en cibles obscures de type « eau claire et profonde » et « forêt dense » (figure 5a et 5b).

Nous avons calculé l'AOD à 550 nm à partir des quatre bandes spectrales (bleu et rouge sur les pixels d'eau profonde et de forêt dense, vert et PIR sur les pixels d'eau profonde uniquement). Les résultats montraient une bonne concordance entre ces quatre valeurs pour l'ensemble des scènes. Pour étendre à toute l'image, nous avons effectué une interpolation et retenu le mode de l'AOD obtenu pour les 4 bandes spectrales sur une fenêtre 5 x 5 centrée sur le pixel (soit le mode de 100 valeurs d'AOD pour chaque pixel).

L'AOD à 550 nm estimé varie entre 0,04 et 0,1 ce qui correspond à une atmosphère propre, exception faite pour la scène du 14 août 2002 qui montre (figure 4b) une atmosphère assez chargée en aérosols et pour laquelle l'AOD varie de 0,1 à plus de 0,2 pour les pixels obscurs retenus. Pour cette scène, et du fait que le seuillage d'histogramme s'applique à l'ensemble de l'image, plusieurs pixels de cibles obscures n'ont pas été trouvés par l'algorithme dans les régions où l'atmosphère est la plus épaisse (figure 5b). Ceci entraînera une sous-estimation de l'AOD pour ces régions.

Nous avons calculé la réflectance au sol en appliquant les routines du 6S à chaque pixel de l'image puis en utilisant l'option « rapide » qui est basée sur la génération de « tables de correspondance ». Les deux valeurs de réflectance s'écartent d'une erreur relative absolue de 0,62 % pour la bande rouge et de 0,22 % pour la bande PIR et ce pour un gain de temps de l'ordre de 3 000 (image de 6 M pixels).

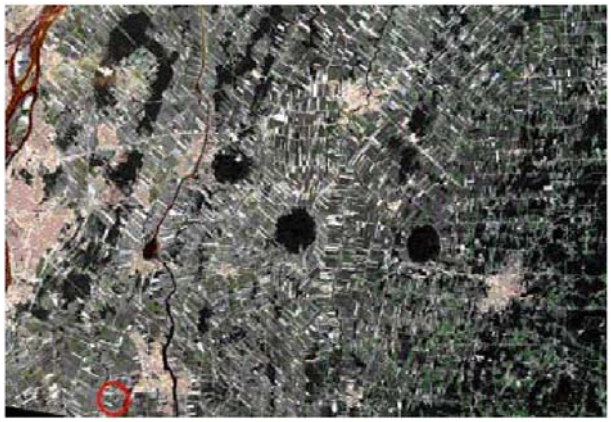


FIGURE 4A : Scène ETM+ du 26 juillet 2001. *ETM+ image of 26 July 2001*

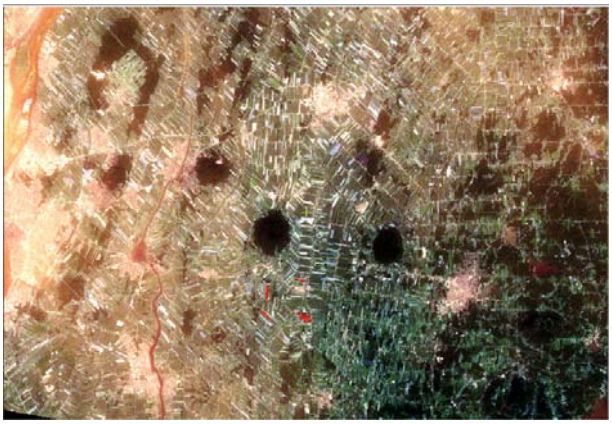
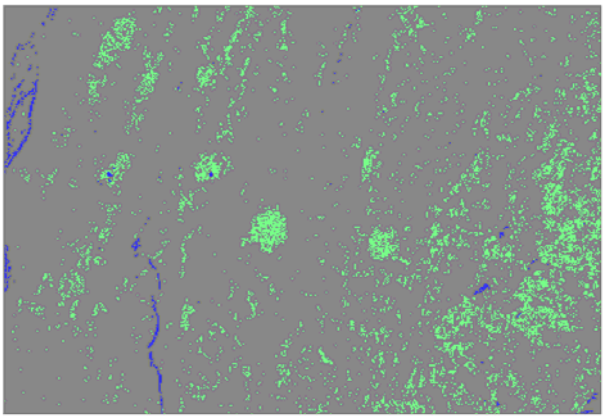


FIGURE 4B : Scène ETM+ du 14 août 2002. *ETM+ image of 14 August 2001*

(a)



(b)

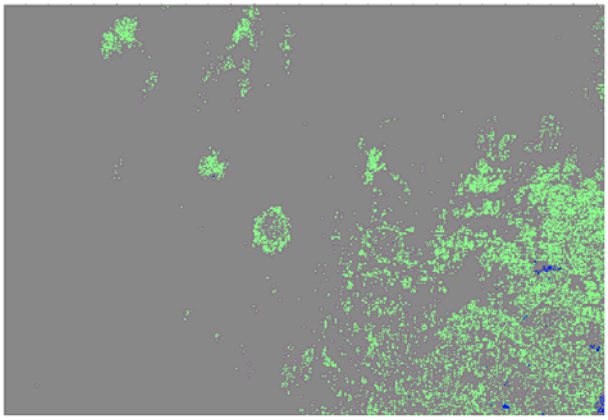


FIGURE 5 : Cibles obscures détectées dans les scènes ETM+ du 26 juillet 2001 (a) et du 14 août 2002 (b) : eau claire et profonde en bleu et forêt dense en vert.. *Dark targets detected on the ETM+ images of 26 July 2001 (a) and 14 August 2002 (b) : clear and deep water in blue and dense forest in green*

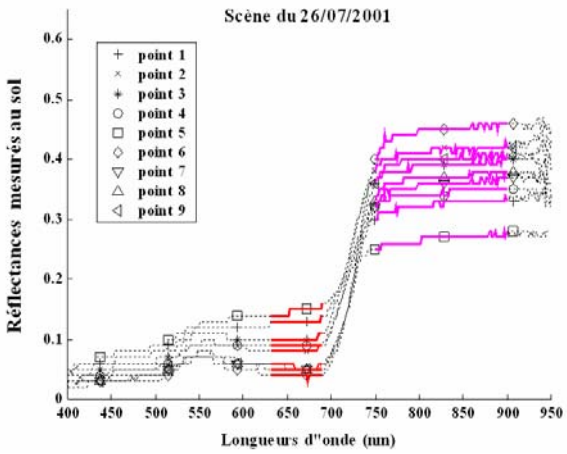


FIGURE 6 : Mesures in situ de la réflectance. *In situ reflectance measurements*

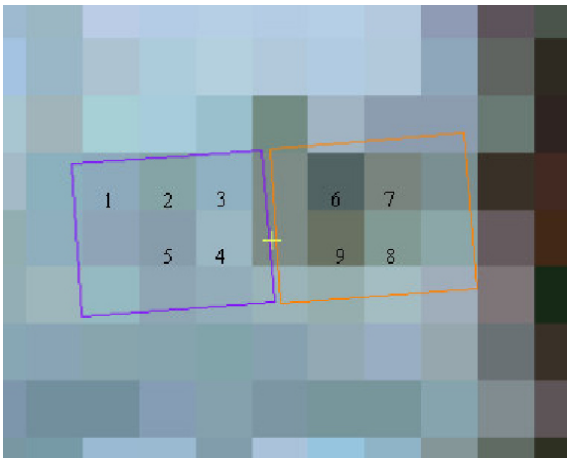


FIGURE 7 : *Localisation des pixels.* Pixel location

Les réflectances au sol calculées sont comparées à des mesures in situ réalisées avec le spectroradiomètre FieldSpec HH Pro d'ASD lors du passage du satellite et sur une surface de 1 m². Les figures 6 et 7 montrent respectivement la réflectance au sol et la localisation des neuf pixels de la scène ETM+ du 26 juillet 2001 (1 à 5 sur le champ de haricot et 6 à 9 sur le champ de maïs).

La comparaison des valeurs mesurées et estimées des réflectances rouge et PIR et du NDVI (figure 8a) permet de voir que le nuage de points ne s'écarte pas trop de la diagonale. Nous pouvons également constater qu'une sous-estimation de la réflectance dans le PIR entraîne le même effet sur le NDVI, sauf lorsque la réflectance dans le rouge est sous-estimée elle aussi. Ce problème est moins marqué pour la scène ALI.

L'erreur relative absolue sur l'ensemble des pixels (toutes les scènes confondues) est de 30 % pour la réflectance rouge, 25 % pour la réflectance PIR et de 20 % pour le NDVI. Les erreurs sont moins importantes pour l'image ALI. L'écart entre les estimations et les mesures au sol peut être dû à la différence entre la surface de mesure et d'estimation de la réflectance qui est respectivement de 1 m x 1 m pour le radiomètre et de 30 m x 30 m pour les images ETM+ et ALI. D'ailleurs, si nous calculons les moyennes parcellaires des points de mesure, le nuage de points estimations-mesures présente moins de points extrêmes et l'erreur relative absolu baisse à 17 % pour le NDVI (figure 8b).

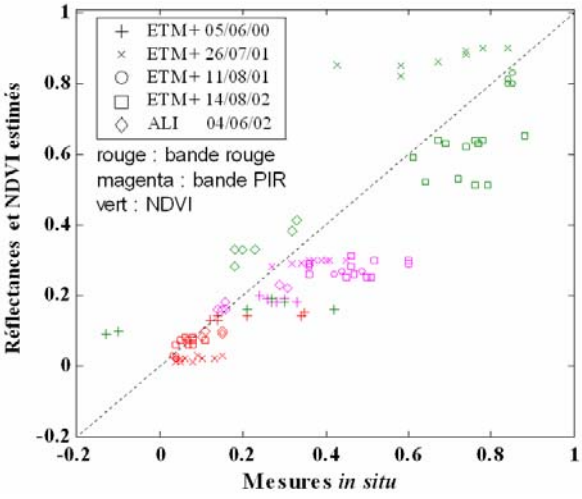


FIGURE 8A : Mesures au sol et estimations ETM+ et ALI des réflectances rouge et PIR et du NDVI. *Ground measurements and ETM+ and ALI estimations of the reflectances in the red and NIR and the NDVI*

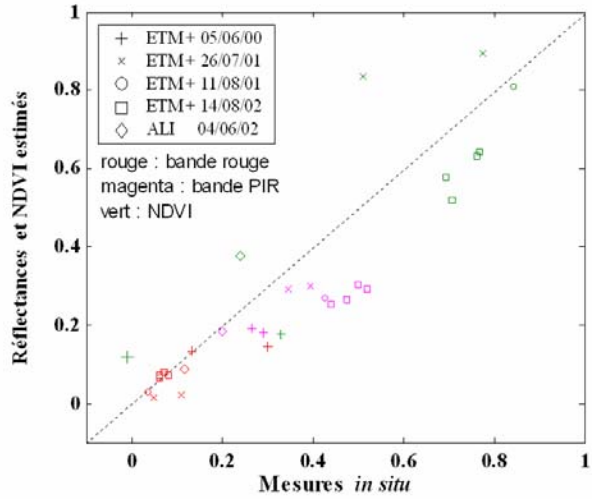


FIGURE 8B : Moyennes parcellaires des réflectances rouge et PIR mesurées et estimées et du NDVI. *Per parcel mean of the measured and estimated reflectances in the red and NIR and the NDVI*

4. CONCLUSIONS

L'algorithme de correction atmosphérique développé possède l'avantage de s'adapter au territoire d'application car l'AOD est dérivée directement de l'image. Il utilise l'approche la plus précise (utilisation de code atmosphérique) sans toutefois nécessiter un temps de calcul trop élevé (quelques minutes).

Cette étude a montré qu'à une résolution spatiale de 30 m, les images satellites demeurent des outils intéressants pour calculer le NDVI dans le cas des champs de grande dimension et ayant une couverture du sol homogène. Le degré de précision obtenu est acceptable notamment pour des applications liées à la prévision des récoltes (Baez-Gonzalez *et al.*, 2005). Ces images peuvent également donner une indication sur la tendance générale à l'intérieur du champ et constituer une application pour l'agriculture de précision.

Toutefois, il reste nécessaire d'améliorer certaines parties de l'algorithme telles que la recherche des cibles obscures et l'évaluation du contenu en eau dans l'atmosphère. En effet, pour le premier problème, nous pouvons observer sur la figure 8 (a et b) que ce sont les points de la scène du 14 août 2002, où plusieurs cibles obscures n'ont pas été détectées, qui s'écartent le plus de la diagonale. Pour le second problème, nous pouvons constater que le capteur ALI, dont la bande PIR est insensible à l'absorption de la vapeur d'eau (figure 1), donne les meilleures estimations de la réflectance dans la bande PIR (figures 8a et 8b).

Il serait également intéressant d'opter pour des indices de végétation moins sensibles aux fluctuations des réflectances estimées. La réflectance dans la bande rouge est difficile à estimer avec précision puisqu'elle est faible pour de la végétation en bonne santé, ce qui peut induire des erreurs considérables pour l'estimation du NDVI.

Références

Ahern F.J., Teillet, P.M. and D.G. Goodenough, D.G. (1979) Transformation of atmospheric and solar illumination conditions on the CCRS image analysis system. Machine Processing of Remotely Sensed Data, Proceedings of the 5th Annual Symposium, West Lafayette (Indiana), U. S., 27-29 June 1979, p. 34-52.

Baez-Gonzalez, A.D., Kiniry, J.R., Maas, S.J., Tiscareno M.L., Macias, J.C., Mendoza, J.L., Richardson, C.W., Salinas, J.G., and Manjarrez J.R. (2005) Large-Area Maize Yield Forecasting Using Leaf Area Index Based Yield Model. Agronomy Journal, vol 97, p. 418-425.

Cavayas, F., Bouroubi M.Y., Vigneault, P. et Tremblay, N. (2003) Algorithme de correction d'images ETM+ de Landsat-7 fondé sur le code atmosphérique 6S et la méthode des cibles obscures, Actes du 25e Symposium canadien sur la télédétection : « De l'image à l'information », Montréal (Québec), 14-17 octobre 2003, Société canadienne de télédétection, format CD.

Iqbal, M (1983) An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Toronto.

Teillet, P.M. and Fedosejevs, G. (1995) On the Dark Target Approach to Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 21, No 4, p. 374-387.

Vande Castle, J.R. and Vermote, E.F. (1996) LTER/NASA Collaboration on Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data. Final Report of the Workshop held at The Long-Term Ecological Research Network Office, University of Washington, Seattle, August 16-18 1996, Internet : edu/technology/nasa/atmcor/

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcette, J.J. (1997a) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S. 6S User Guide version 2, July 1997, (ftp://kratmos.gsfc.nasa.gov/pub/6S/).

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcette, J.J. (1997b) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : An Overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, No 3, p. 675-686.