

ETUDE ET EXTRACTION DES PROPRIETES DE SURFACE PAR TELEDETECTION SPATIALE DANS LES COURTES LONGUEURS D'ONDE

Bernard Pinty* and Michel M. Verstraete**

*LERTS, 18 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

**AOSS, The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2143, U.S.A.

RESUME

Les satellites constituent *a priori* un excellent moyen expérimental pour caractériser et assurer le suivi, à des échelles de temps et d'espace adéquates, des propriétés des surfaces continentales. Ils peuvent donc apporter beaucoup à l'analyse des phénomènes climatiques mettant en cause les perturbations de ces propriétés de surface. Que ce soit pour valider des résultats de modèles climatiques, pour spécifier leurs conditions initiales à la limite inférieure, ou pour extraire des informations physiques quantitatives de données de télédétection spatiale, des modèles physiques représentant le transfert de rayonnement à la surface sont nécessaires. Un modèle analytique nouveau exprimant la réflectance bidirectionnelle sur des surfaces est présenté. Les surfaces sont considérées comme des milieux poreux constitués d'éléments optiquement homogènes. Une attention particulière est accordée au traitement des effets dus à l'orientation des éléments et à leur arrangement relatif dans le milieu. Ce modèle a été inversé et validé à partir de mesures effectuées au laboratoire, sur le terrain et par avion. Ce modèle offre de nouvelles perspectives quant à l'analyse et l'interprétation de données satellitaires, et permet de spécifier des conditions limites sur les continents dans les modèles de climat.

INTRODUCTION

La menace d'une modification du climat de la terre potentiellement causée par les activités humaines a motivé la mise en place par les organismes internationaux du Programme International Géosphère Biosphère (PIGB). Parmi les axes majeurs définis par le PIGB, les études du comportement des écosystèmes terrestres occupent une place de choix aussi bien du point de vue de leurs modifications possibles et de leurs adaptations à des changements climatiques, que du point de vue de leurs effets de rétroaction sur ces mêmes changements climatiques. Les enjeux sont évidemment d'une importance majeure. Ils débordent largement le cadre strictement écologique et concernent, par exemple, aussi bien les activités économiques dans les secteurs industriels et agricoles à court et moyen termes, que, à plus long terme, les modes de vie des habitants de nombreuses régions sensibles du globe.

Les changements climatiques identifiables font intervenir plusieurs aspects, avec des effets de rétroaction dans la biosphère plus ou moins marqués. Parmi ces aspects, le plus connu est certainement l'effet de serre directement causé par l'augmentation en concentration de gaz tels que le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), et les chlorofluorocarbones (CFCs) dans l'atmosphère. Cette augmentation résulte à la fois des injections directes à partir de diverses sources liées aux activités humaines, et de la destruction de la biomasse active par des opérations de déforestation. Cette dégradation de la couverture végétale entraîne deux effets : d'une part une diminution de la capacité de fixation du gaz carbonique atmosphérique et d'autre part une augmentation importante des émissions dans l'atmosphère de CO₂, CH₄, N₂O et d'autres gaz. En plus de cette contribution directe de la déforestation à l'effet de serre, cette opération modifie également de manière drastique et immédiate l'état des surfaces concernées à travers l'albédo, la rugosité, le ruissellement et d'autres paramètres physiques qui conditionnent les bilans d'énergie et d'eau à la surface. Cet exemple de la déforestation illustre le fait que les changements d'origine anthropogénique ou naturelle de l'état des surfaces terrestres ont donc globalement deux types d'impact sur le climat en modifiant les flux biogéophysiques et les flux biogéochimiques. La chaîne des interactions possibles entre climat et état de surface est extrêmement longue et difficile à décrire, notamment parce qu'elle fait intervenir, à des échelles de temps et d'espace qui sont très variables, des phénomènes dont les mécanismes sont insuffisamment connus et documentés.

Etant donné le niveau de complexité des interactions entre les différentes composantes du système climatique (l'atmosphère, la biosphère, la terre solide, les océans et la cryosphère), les modèles numériques sont indispensables pour analyser et prédire les changements de climat résultant d'un forçage interne. La qualité des résultats fournis par les modèles est bien évidemment dépendante du niveau de compréhension que l'on a de l'ensemble des processus intervenants et de la qualité de leur représentation sous forme paramétrée aux échelles définies par la maille des modèles, mais également et surtout de la disponibilité en calculateurs suffisamment puissants pour effectuer le volume de calcul nécessaire /1/ (la prochaine génération de calculateurs doit notamment permettre d'augmenter très sensiblement la résolution des modèles). Dans l'état actuel des choses et avec toutes les imperfections et les limitations qui sont reconnues, la plupart des modèles de climat indique une augmentation potentielle marquée de la température de la terre (entre 0.05°C et 0.6°C par décennie) en simulant des scénarios d'émissions continues en gaz à effet de serre /2/. Les principales incertitudes qui existent sur la validité de ces simulations proviennent de traitements encore préliminaires et insatisfaisants de l'effet de rétroaction des nuages, de la réponse des régions glacées aux hautes latitudes, du cycle hydrologique en surface et du couplage des océans avec les autres composantes du système climatique. Les grandes différences qui apparaissent dans ces résultats de simulation concernent les impacts à échelle régionale (au sens de grandes régions climatiques d'ensemble) lorsque ces simulations sont effectuées avec des modèles tridimensionnels permettant de spatialiser les informations /3/. En effet, selon le modèle considéré et pour une région donnée, les résultats peuvent indiquer aussi bien une augmentation de plusieurs degrés en température avec une diminution des précipitations que l'inverse, ou tout autre combinaison de variations de ces deux paramètres météorologiques qui sont

des variables clé pour ce qui concerne la répartition géographique et l'évolution des grands écosystèmes terrestres.

La qualité des simulations du système climatique et leurs améliorations potentielles passent notamment par un contrôle ou une validation des résultats à partir de bases de données d'observation. Du point de vue expérimental, les données satellitaires apparaissent *a priori* comme les seules capables d'apporter des éléments de solutions adaptées aux échelles concernées. L'intérêt majeur de ces données est de permettre l'estimation de quantités moyennées sur un domaine d'espace et avec une résolution temporelle adéquate, tout en assurant une bonne cohérence dans la précision des mesures et une couverture à l'échelle du globe. Mis à part les problèmes techniques tels que la calibration ou la dérive des capteurs, la contrepartie de ces avantages est l'interprétation physique de ces mesures qui est souvent délicate et pas immédiatement en rapport avec des variables importantes pour le bilan d'eau et d'énergie à la surface. Ainsi, les mesures effectuées par satellite correspondent à des mesures radiatives et, seuls les paramètres physiques primaires du milieu qui conditionnent explicitement la luminance dans les courtes longueurs d'onde ou l'émission dans le domaine thermique et micro-onde peuvent être raisonnablement restitués par l'inversion de modèles physiques avec ces mesures. Dans une seconde phase, ces paramètres physiques sont potentiellement utilisables pour inverser des modèles de processus permettant d'estimer un second ensemble de paramètres d'un intérêt plus immédiat pour la modélisation du climat ou l'analyse de situations particulières. Du point de vue de la dialectique entre données de télédétection spatiale et modèles climatiques, on peut raisonnablement considérer que les modèles sont indispensables pour définir les variables importantes à estimer ainsi que la précision nécessaire à atteindre aux échelles d'espace et de temps qui sont judicieux. Dans le contexte actuel, il semble que les efforts doivent tout d'abord porter sur les variables de surface qui contrôlent les flux biogéophysiques.

Pour les mêmes raisons et avec les mêmes limitations que celles mentionnées plus haut, les données satellitaires constituent *a priori* un excellent outil pour suivre l'évolution des écosystèmes terrestres et leurs éventuelles perturbations par des causes naturelles ou anthropogéniques. L'identification et le suivi des phénomènes de déforestation et de désertification, ainsi que la destruction de la biomasse active par les feux sont autant d'exemples simples qui illustrent les apports des données satellitaires dans la problématique du FIGE. Des travaux récents montrent de manière tentatrice que les possibilités d'estimations quantitatives de variables sophistiquées, comme la production primaire /4/ et le flux de CO₂ /5/, existent. La plupart de ces travaux reposent sur des analyses empiriques du Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) qui correspond à une combinaison du canal visible et proche infrarouge du capteur AVHRR embarqué sur les satellites de la série NOAA. Les données issues de ce capteur vont prendre une importance grandissante pour analyser l'état et l'évolution des surfaces car elles constituent un compromis acceptable du point de vue des bandes spectrales utilisées, de la taille des pixels, et surtout de la pérennité des mesures. Ainsi, au moment où les données des futures plateformes EOS seront disponibles, on devrait disposer d'une vingtaine d'années de données AVHRR, ce qui constitue une banque d'informations à partir de laquelle des modifications sensibles des grands écosystèmes terrestres pourraient être identifiables. Cependant, là encore, ce projet ne peut être mené à bien que si l'on est capable d'interpréter le contenu physique des mesures obtenues par télédétection spatiale de manière à suivre l'évolution des paramètres primaires et à savoir s'affranchir de perturbations comme celles dues aux effets atmosphériques ou celles essentiellement causées par des variations des conditions de géométrie d'observation.

Le propos de cet article est de résumer un développement théorique permettant d'interpréter les données de réflectances mesurées dans le domaine des courtes longueurs d'onde. L'approche choisie est conditionnée par la nécessité de satisfaire aux spécifications techniques des modèles climatiques (comme par exemple un faible coût de calcul), et de développer un modèle qui puisse être facilement inversé avec des données de télédétection. Cette stratégie vise donc à assurer un pontage entre diverses communautés scientifiques, en définissant un outil commun aux modélisateurs du climat, aux télédéTECTEURS et aux écologistes.

MODELE DE REFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

En temps que première étape vers une interprétation quantitative généralisée des mesures de réflectance bidirectionnelle, nous avons développé un modèle applicable aux cas de surfaces homogènes et semi-infinies du point de vue de leurs propriétés optiques. Ce type de surface est considéré comme un milieu poreux dont la réflectance dépend des propriétés optiques des éléments composant la surface (c'est-à-dire des grains pour un sol nu ou des feuilles pour les couverts végétaux), mais également de l'orientation moyenne de ces éléments et de leur positionnement relatif dans le milieu. Dans ces conditions, Verstraete *et al.* /6/ et Pinty *et al.* /7/ ont montré que la réflectance bidirectionnelle s'écrit analytiquement de la manière suivante:

$$\rho(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2) = \frac{\omega}{4} \frac{\kappa_1}{\kappa_1 \mu_2 + \kappa_2 \mu_1} \left[\tilde{P}_v(G) P(g) + H(\mu_1/\kappa_1) H(\mu_2/\kappa_2) - 1 \right] \quad (1)$$

où

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \cos \theta_1 \\ \mu_2 &= \cos \theta_2 \\ \cos g &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ H(x) &= \frac{1+x}{1+\sqrt{(1-x)x}} \\ G &= [\tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2 - 2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)]^{1/2} \end{aligned}$$

Dans ces équations, θ_1 et ϕ_1 désignent le sénéth et l'azimut du soleil, θ_2 et ϕ_2 désignent le sénéth et l'azimut du capteur, g est l'angle de phase entre le rayon incident et le rayon réfléchi, ω est l'albédo de diffusion simple des éléments constituant la surface, $P(g)$ est la fonction de phase, κ_1 et κ_2 décrivent la distribution en orientation des éléments de la surface, et le terme $H(\mu_1/\kappa_1) H(\mu_2/\kappa_2) - 1$ approxime la contribution de la diffusion multiple au sein du milieu, d'après Dickinson *et al.* /8/.

$\tilde{P}_v(g)$ est la fonction qui exprime la transmission conjointe du rayonnement incident et réfléchi, et de fait décrit l'effet de 'hotspot' qui est particulièrement marqué aux faibles angles de phase. Cette fonction peut être approximée par la relation suivante:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_v(G) &\approx 1 + \frac{1}{1 + V_p(G)} \\ V_p(G) &= 4 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \right) \frac{G}{2r\lambda} \frac{\mu_2}{\kappa_2} \end{aligned} \quad (2)$$

où r désigne le rayon typique des tâches illuminées sur les éléments inclinés de la surface et A est la densité de ces éléments dans le milieu.

En pratique, pour estimer $\rho(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2)$, Pinty *et al.* /7/ ont suggéré d'utiliser la fonction de Henyey-Greenstein et une paramétrisation proposée par Goudriaan pour exprimer respectivement les fonctions $P(g)$ et κ . Dans sa forme finale, seulement quatre paramètres sont nécessaires pour calculer la réflectance bidirectionnelle d'une surface: ω et Θ qui décrivent les propriétés optiques intrinsèques des éléments par l'albédo de diffusion simple et le facteur d'asymétrie de leur fonction de phase, un paramètre noté χ_ℓ par Goudriaan /9/ qui indique l'orientation moyenne des éléments ($\chi_\ell = 0$ pour une distribution uniforme, $\chi_\ell = 0.6$ pour un milieu planophile et $\chi_\ell = -0.4$ pour un milieu érectophile), et enfin le paramètre noté $2rA$ qui intervient dans la fonction $V_p(g)$ et qui décrit la distance moyenne typique entre les éléments. On peut, si cela est nécessaire, augmenter ce nombre minimum de quatre paramètres pour représenter des effets supplémentaires comme par exemple la composante spéculaire de la fonction de phase. Dans le cas d'un milieu optiquement dense et dans la limite de la diffusion primaire, Dickinson *et al.* /8/ ont évalué analytiquement l'albédo de surface à partir de l'équation (1). Cette solution généralise la formulation proposée par Sellers /10/ qui ne s'applique que pour les cas d'une diffusion homogène.

Le modèle présenté ci-dessus pouvant être appliqué indifféremment dans les longueurs d'onde visibles et proche infrarouges du spectre, il est facile de proposer une formulation analytique du NDVI pour un couvert optiquement homogène. Pour des raisons de clarté, on peut considérer ici que les éléments de la surface sont isotropes, c'est-à-dire que le flux transmis est égal au flux réfléchi, et que le milieu est suffisamment dense et observé loin des conditions de 'hot spot', c'est-à-dire $\tilde{P}_v(g) \approx 1$. En négligeant la contribution de la diffusion multiple du canal visible, ce qui est raisonnable pour des couverts végétaux, Pinty *et al.* /11/ ont établi la relation suivante:

$$NDVI \approx \frac{\omega_2 H_2(\mu_1/\kappa_1) H_2(\mu_2/\kappa_2) - \omega_1}{\omega_2 H_2(\mu_1/\kappa_1) H_2(\mu_2/\kappa_2) + \omega_1} \quad (3)$$

où les indices 1 et 2 font respectivement référence aux canaux visible et proche infrarouge du capteur AVHRR. Cette relation montre qu'en dépit des simplifications effectuées sur le cas de surfaces simples, des effets directionnels sont encore présents sur le NDVI. Ces effets proviennent de la contribution en diffusion multiple du canal infrarouge qui ne peut être négligée sur un couvert végétal en raison des grandes valeurs prises par le paramètre ω dans cette région spectrale. Compte tenu des biais systématiques sur les angles d'éclairement et d'observation des écosystèmes terrestres en fonction de la latitude, cette dépendance angulaire du NDVI peut perturber l'analyse des variations à échelle globale de cet indice.

EXTRACTION DES PARAMETRES DE SURFACES

Comme cela est indiqué en introduction, la description et le suivi temporel de l'état des surfaces continentales nécessitent la mise au point de procédures permettant d'inverser les mesures de réflectance bidirectionnelle pour en extraire les paramètres physiques primaires du milieu.

Une telle procédure a été proposée et testée par Pinty *et al.* /12/ sur des surfaces de sols nus, puis appliquée à des couverts végétaux /7, 8/. Cette procédure repose sur l'utilisation d'un algorithme itératif permettant de déterminer simultanément les valeurs optimales des quatre paramètres primaires intervenants dans l'équation (1). Les difficultés essentielles proviennent de la non-linéarité de l'équation (1), et les tests de sensibilité effectués par /12,13/ sur un algorithme d'optimisation non-linéaire montrent les limitations et les performances de ce type de procédure. Ces tests de sensibilité concernent la dépendance et la stabilité des résultats vis-à-vis (i) des valeurs initiales données au schéma, (ii) des erreurs aléatoires sur les données de réflectance, (iii) de la relation fonctionnelle entre les paramètres à estimer et la réflectance bidirectionnelle. Une attention particulière doit être accordée aux problèmes relatifs à l'obtention d'une solution unique et à la répartition des erreurs d'entrées sur les valeurs des paramètres physiques restituées par inversion, puisque, les incertitudes expérimentales étant quantifiables, ceci conditionne la précision avec laquelle la valeur des paramètres de surface peut être estimée. L'ensemble de ces points de techniques numériques sont d'une importance fondamentale pour apprécier l'apport potentiel des données satellitaires à l'estimation quantitative de paramètres caractérisant les propriétés radiatives des écosystèmes continentaux.

Pinty *et al.* /7/ ont montré que l'ensemble du schéma (modèle + inversion) fournit des résultats de bonne qualité et donc que les problèmes évoqués ci-dessus peuvent être adéquatement pris en compte. Ainsi, la valeur du résidu de la procédure d'inversion est comprise entre 5 et 10% des valeurs des réflectances, ce qui est comparable aux valeurs des incertitudes sur les observations. De plus, à partir de mesures effectuées sur du soja, Pinty *et al.* /7/ ont validé les résultats du schéma d'inversion en comparant les valeurs des coefficients de transmission, absorption et réflexion des feuilles déduites des résultats de l'inversion (ces coefficients sont calculables explicitement en connaissant les paramètres ω et Θ), avec celles obtenues indépendamment par des mesures de laboratoire. Ces résultats sont très prometteurs, mais ils demandent à être confirmés par des expériences plus complètes. Dans un premier temps, il est raisonnable de faire porter les efforts sur la validation du schéma développé pour les surfaces optiquement homogènes et semi-infinies, avant d'aborder le cas plus réaliste de surfaces complexes constituées par un milieu présentant des hétérogénéités optiques.

CONCLUSIONS

L'interprétation physique des données satellitaires acquises dans le domaine des courtes longueurs d'onde est un des éléments clés qui doivent permettre de décrire quantitativement l'état passé, actuel et futur des écosystèmes continentaux. La stratégie à développer pour extraire les informations utiles du signal doit être élaborée en un minimum de trois phases qui sont (i) la décontamination du signal des effets atmosphériques, (ii) l'inversion des données avec des modèles physiques pour restituer la valeur des paramètres physiques conditionnant le transfert radiatif à la surface, et (iii) l'estimation de paramètres d'environnement par inversion de modèles de processus utilisant, comme données d'entrée, les valeurs des paramètres radiatifs déterminés précédemment.

Le travail présenté dans cet article s'insère dans la deuxième phase de cette stratégie, il fournit des résultats encourageants pour ce qui concerne le traitement de surfaces optiquement simples. Une étude est en cours de développement pour aborder le cas de surfaces mixtes composées d'un maximum de deux milieux possédant des propriétés optiques différentes. Les résultats préliminaires laissent entrevoir que, par rapport au cas précédent, ce problème diffère dans la difficulté par au moins un ordre de grandeur. Il est donc nécessaire de bien asseoir les bases d'une démarche d'ensemble en travaillant de manière plus approfondie et diversifiée sur des surfaces simples. Bien que la démarche apparaisse lourde, voire fastidieuse, c'est le prix à payer pour une utilisation rationnelle de données de télédétection spatiale dans le cadre du PIGB.

REMERCIEMENTS

Une partie du travail présenté ici a été réalisé au National Center for Atmospheric Research (NCAR) en collaboration avec R. E. Dickinson. B. Pinty remercie le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour son soutien. Ce travail a été financé en partie par le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS). M. Verstraete remercie le Department of Atmospheric, Oceanic and Space Sciences de l'Université du Michigan, ainsi que le Eros Data Center du USGS pour leur support financier à ce travail.

REFERENCES

- /1/Verstraete, M. M., Land Surface Processes in Climate Models : Status and Prospects, in *Climate and the Geosciences : A Challenge for Science and Society in the 21st Century*, Edité par A. Berger, S. Schneider, et J. C. Duplessy, Kluwer Academic Publishers, 321-340 (1989).
- /2/Jaeger, J., Developing Policies for Responding to Climatic Change, *World Climate Program Impact Studies*, WMO/TD N°225 (1988).
- /3/Kellogg, W. and Z-C. Zhao, Sensitivity of Soil Moisture to Doubling of Carbon Dioxide in Climate Model Experiments. Part I : North America *Journal of Climate*, **4**, 348-366 (1988).
- /4/Tucker, C. J. and P. J. Sellers, Satellite Remote Sensing of Primary Production, *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1395-1416 (1986).
- /5/Tucker, C. J., I. Y. Fung, C. D. Keeling, and R. H. Gammon, Relationship between Atmospheric CO₂ Variations and a Satellite-derived Vegetation Index, *Nature*, **319**, 195-199 (1986).
- /6/Verstraete, M. M., B. Pinty, and R. E. Dickinson, A Physical Model of the Bidirectional Reflectance of Vegetation Canopies; Part 1: Theory, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 11755-11766 (1990).
- /7/Pinty, B., M. M. Verstraete, and R. E. Dickinson, A Physical Model of the Bidirectional Reflectance over a Vegetative Canopies; Part 2: Inversion and Validation, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 11767-11775 (1990).
- /8/Dickinson, R. E., B. Pinty, and M. M. Verstraete, A Theoretical and Practical Basis for Relating Surface Albedos in GCMs to Remotely Sensed Data, *Agricultural and Forest Meteorology*, **52** (1990).
- /9/Goudriaan, J., Crop Micrometeorology: A Simulation Study, Wageningen Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands, (1977) p. 249.
- /10/Sellers, P. J., Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration, *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1335-1372 (1985).
- /11/Pinty, B., M. M. Verstraete, and R. E. Dickinson, A Physically-based Model for the NDVI, in: *4th AVHRR Data Users' Meeting*, 105-109, Eumetsat, Rothenburg, F.R.Germany (1990).
- /12/Pinty, B., M. M. Verstraete, and R. E. Dickinson, A Physical Model for Predicting Bidirectional Reflectance over Bare Soil, *Remote Sensing of Environment*, **27**, 273-288 (1989).
- /13/Pinty, B. and M. M. Verstraete, Extracting Information from Bidirectional Reflectances, *Journal of Geophysical Research*, in press (1990).