

MODÉLISATION DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES FEUILLES : ÉTAT DE L'ART, PERSPECTIVES ET APPLICATIONS EN TÉLÉDÉTECTION

Stéphane Jacquemoud¹ et Laurent Bousquet²

1. Université Paris 7, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France, jacquemo@ccr.jussieu.fr
2. Université Paris 7, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France, lbousque@ccr.jussieu.fr

RÉSUMÉ

Les propriétés optiques des feuilles expliquent en grande partie la réflectance spectrale des couverts végétaux mais aussi sa variation directionnelle à certains angles de visée. Les signaux radiométriques issus d'une feuille sont complexes car ils mélangent les photons ayant interagi avec les tissus foliaires, ceux réfléchis en surface seulement, et ceux émis par fluorescence. Bien que des modèles physiques tentent d'expliquer ces phénomènes depuis une quarantaine d'années, les mécanismes mis en jeu lors de l'absorption, de l'émission ou de la diffusion des photons par les molécules et les cellules végétales sont loin d'être compris et maîtrisés. Par exemple la séparation du rôle des différents pigments photosynthétiques dans la réflectance ou la transmittance hémisphérique d'une feuille reste une gageure ; les premiers modèles de BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) ou de fluorescence chlorophyllienne des feuilles en sont encore à leurs balbutiements. Or les nouvelles générations de capteurs dédiés à l'observation de la Terre mesureront la radiance dans des bandes spectrales de plus en plus étroites, selon des directions de visée de plus en plus nombreuses. Les modèles seront alors extrêmement utiles pour extraire de nouvelles informations sur la composition biochimique des feuilles ou l'état physiologique des plantes, pour mieux distinguer la structure anatomique des feuilles de l'architecture des couverts végétaux. Cet article fait le point sur les derniers travaux de modélisation des propriétés optiques des feuilles. Nous essayerons de montrer leur intérêt dans la définition de nouveaux instruments de télédétection et dans le développement de méthodes toujours plus performantes d'extraction de l'information à partir du signal radiométrique dans le domaine optique.

INTRODUCTION

La variation spectrale de la réflectance des couverts végétaux est principalement déterminée par les propriétés optiques des feuilles et la réflectance du sol. Leur connaissance est donc essentielle pour mieux comprendre et interpréter le trajet de la lumière dans la végétation. Les premiers travaux expérimentaux visant à mesurer la réflectance (fraction de lumière réfléchie), la transmittance (fraction de lumière transmise) et l'absorptance (fraction de lumière absorbée) des feuilles datent du début du 20^{ème} siècle. Dès lors, environ un millier d'espèces ont été étudiées, donnant lieu à autant de publications. Les approches sont cependant demeurées longtemps très descriptives : les premiers modèles physiques de propriétés optiques des feuilles datent en effet seulement des années 1960-1970. Le développement des systèmes spectro-imageurs dans les années quatre-vingt a relancé les travaux de modélisation et, par exemple, le modèle PROSPECT fut l'un des premiers capable de simuler avec une bonne précision la réflectance et la transmittance hémisphériques de feuilles très variées (monocotylédones, dicotylédones ou feuilles sénescentes) sur tout le domaine solaire (de 400 à 2500 nm).

Dans le visible, le rayonnement électromagnétique est à plus de 80% absorbé par les pigments foliaires participant à la photosynthèse. Une fraction de l'énergie absorbée est réémise par la chlorophylle *a* sous forme de lumière rouge et proche infrarouge : cette émission est la fluorescence chlorophyllienne dont le signal, très faible mais mesurable, se superpose à celui de

la réflectance et de la transmittance dans les conditions naturelles d'éclairage. Des projets de capteurs capables de mesurer la fluorescence passive de la végétation dans les bandes de Fraunhofer ou celles de l'oxygène ont vu le jour récemment et motivé un effort de modélisation tant au niveau de la feuille que du couvert végétal.

Enfin, l'hypothèse reprise par la plupart des modèles de réflectance des couverts végétaux selon laquelle les feuilles sont des surfaces lambertiennes est simplificatrice. Même si cela n'a pas été formellement démontré, on pressent aujourd'hui que la réflexion spéculaire à la surface des feuilles est susceptible de modifier la distribution angulaire de la lumière réfléchie par la végétation et par conséquent de fausser l'interprétation des données de télédétection acquises par la dernière génération de capteurs multi-angulaires spatiaux. Les variations directionnelles de la lumière réfléchie (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) ou transmise (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*) par les feuilles sont moins connues et étudiées que les variations spectrales. Une des raisons provient de la rareté des mesures expérimentales, elle-même liée à l'absence de goniophotomètres commerciaux adaptés.

Cet article de synthèse se compose de trois parties : dans un premier temps seront décrites succinctement les différentes approches physiques pour reproduire les propriétés optiques des feuilles ; une deuxième partie détaillera le modèle PROSPECT avec ses dernières améliorations ; enfin nous discuterons de l'utilité de ces modèles en télédétection et des perspectives d'avenir.

MODÉLISATION DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES FEUILLES

Des années soixante jusqu'à nos jours, diverses approches déterministes ont été proposées parallèlement aux mesures expérimentales, nécessaires pour comprendre les mécanismes d'interaction entre la lumière et les feuilles et pour valider les modèles. Ces derniers se distinguent par la physique sous-jacente et par le degré de complexité de la représentation de la feuille. Les plus simples considèrent une couche unique à bords parallèles diffusant et absorbant la lumière ; les plus compliqués décrivent en détail les cellules végétales (forme, taille, position dans le mésophylle, composition biochimique). Par ordre de complexité croissante, on peut classer ces modèles en différentes catégories (i, ii) :

1. **Modèles de couches** : dans cette approche la feuille est assimilée à une lame homogène éclairée en lumière isotrope qui réfléchit, transmet et absorbe la lumière (iii). Un indice de réfraction et un coefficient d'absorption suffisent donc à reproduire le spectre de réflectance et/ou de transmittance d'une feuille de monocotylédone dont la structure anatomique est de type compact. Ce modèle peut être étendu au cas d'une feuille de dicotylédone considérée comme un empilement de N couches séparées par $N-1$ espaces intercellulaires (iv). Le modèle PROSPECT (*Leaf Optical Properties Spectra*) aujourd'hui largement diffusé dans la communauté scientifique et que nous détaillerons dans la deuxième partie est conçu sur ce principe (v).
2. **Modèles à N-flux** : ils découlent de la fameuse théorie de Kubelka-Munk, simplification de l'équation fondamentale du transfert radiatif, et considèrent la feuille comme un milieu diffusant et absorbant. La résolution des équations pour un système à deux (vi) ou quatre (vii, viii, ix) flux permet d'en calculer le coefficient d'absorption et de diffusion. Une version plus sophistiquée divise la feuille en quatre couches parallèles – épiderme supérieur, parenchyme palissadique, parenchyme lacuneux, épiderme inférieur – chacune étant caractérisée par des propriétés optiques propres et reliée à la suivante et/ou la précédente par des conditions aux limites (x).
3. **Modèle de Melamed** : il considère un milieu constitué de particules sphériques identiques et adjacentes formant une couche compacte uniforme déposée sur un substrat homogène de réflectance connue. Le modèle LIBERTY (*Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields*) qui repose sur ce principe a été imaginé pour calculer la réflectance d'un empilement d'aiguilles de pins fraîches ou sèches (xi). C'est à ce jour le seul adapté aux feuilles en forme d'aiguilles.

4. **Equation de transfert radiatif** : la plupart des modèles décrits dans cette partie sont en fait des simplifications de l'équation de transfert radiatif. Quelques tentatives d'utiliser directement cette équation ont été faites mais le peu d'information dont on dispose généralement sur la structure anatomique des feuilles et sur la distribution des absorbeurs rend cette approche difficile à mettre en oeuvre (xii). On pourra cependant citer le modèle LEAFMOD (*Leaf Experimental Absorptivity Feasibility MODeL*) qui a été couplé à un modèle de réflectance des couverts végétaux (xiii).
5. **Modèles stochastiques** : il s'agit d'une approche originale dans laquelle le transfert radiatif est simulé par une chaîne de Markov (xiv). La feuille est divisée en plusieurs compartiments correspondant chacun aux tissus foliaires et les probabilités de changement d'état du rayonnement (incident, réfléchi, absorbé et transmis) sont définies entre chacun d'entre eux sur la base de leurs propriétés optiques. La réflectance et la transmittance de la feuille sont obtenues à l'issue d'un processus itératif lorsque l'état stationnaire du système est atteint. Le modèle SLOP (*Stochastic model for Leaf Optical Properties*) est la version la plus élaborée de cette approche (xv).
6. **Modèles de lancer de rayons** : ils représentent la façon la plus complexe de représenter la propagation des photons à l'intérieur d'une feuille. Ils requièrent une description détaillée de la structure interne des feuilles telle qu'on l'observe au microscope et la connaissance de l'indice de réfraction et des coefficients d'absorption spécifiques des matériaux et pigments présents dans la feuille. Les lois de l'optique géométrique permettent alors de suivre le trajet optique des photons virtuels incidents sur une maquette 2D (xvi, xvii, xviii) avec, par exemple, les modèles ABM (*Algorithmic BDF Model*) et FSM (*Foliar Scattering Model*) ou 3D (xix, xx) avec le modèle RAYTRAN.

En résumé, bien que toute une panoplie de modèles de propriétés optiques des feuilles semble aujourd'hui disponible pour des utilisations en télédétection, cette abondance est trompeuse car très peu d'entre eux ont réellement été validés, c'est-à-dire comparés à des données expérimentales *via* un processus d'inversion, ou couplés à des modèles de réflectance des couverts végétaux pour des applications opérationnelles. Le Tableau 1 résume les caractéristiques des codes actuels.

Tableau 1: Les différentes catégories de modèles de propriétés optiques des feuilles. $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ et $\phi(\lambda)$ désignent la réflectance, la transmittance et la fluorescence hémisphériques.

| Catégorie | $\rho(\lambda) / \tau(\lambda)$ | BDRF / BTDF | $\phi(\lambda)$ |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|
| Modèles de couches | × | × | × |
| Modèles à N-flux | × | | × |
| Modèle de Melamed | × | | |
| Equation de transfert radiatif | × | | |
| Modèles stochastiques | × | | × |
| Modèles de lancer de rayons | × | × | |

LE MODÈLE PROSPECT

Publié pour la première fois en 1990, PROSPECT a depuis fait l'objet de plusieurs transformations visant à améliorer ses performances et à étendre son champ d'application. Le modèle repose sur une description relativement simple de la structure interne et de la composition biochimique des feuilles (Figure 1). Ses variables d'entrée sont le paramètre de structure N, nombre de couches compactes indiquant le nombre moyen d'interfaces air / parois cellulaires dans le mésophylle, et les teneurs en chlorophylle, eau, matière sèche, etc. exprimées en unité de poids par cm². Cette liste n'est pas exhaustive. Ainsi, la prise en compte d'autres constituants biochimiques comme la cellulose + lignine (~carbone) et les protéines (~azote) dont le rapport de masse est un bon

indicateur du taux de minéralisation de l'azote des sols par les micro-organismes et qui sont potentiellement accessibles par télédétection grâce à la présence de bandes d'absorption spécifiques dans le moyen infrarouge a donné lieu à des variantes de PROSPECT (xxi, xxii). La dernière version regroupe ces constituants en une teneur en matière sèche équivalente à la surface spécifique des feuilles (*Specific Leaf Area*), variable importante en écophysologie car associée à la croissance des plantes, donc à l'interception de la lumière et à la photosynthèse.

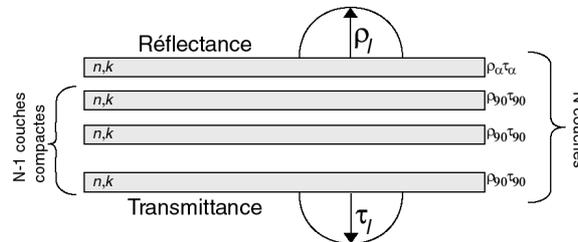


Figure 1 : Nomenclature du modèle PROSPECT de propriétés optiques des feuilles.

Une fraction faible mais mesurable du rayonnement réfléchi et transmis par les feuilles est en réalité une émission de fluorescence par les polyphénols (dans le bleu) et par la chlorophylle a (dans le rouge et le proche infrarouge). La télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne dans les bandes de l'oxygène se révèle être une approche prometteuse pour suivre le fonctionnement des couverts végétaux depuis une plate-forme aéroportée ou spatiale. L'interprétation de ce signal dépendant à la fois de l'environnement de la feuille (qualité et intensité de la lumière incidente, température,...) et de paramètres intrinsèques (état physiologique, espèce, composition biochimique,...) est complexe. Dans le cadre du projet FLUORMOD (*Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model*) financé par l'Agence Spatiale Européenne (xxiii), une nouvelle version de PROSPECT simulant la fluorescence chlorophyllienne et appelée FLUORMODLEAF a été développée. Outre les variables d'entrée citées plus haut, sont requis le rendement quantique de fluorescence, le rapport PSII/PSI, la température, l'espèce et le PAR incident. La Figure 2 présente les premiers résultats obtenus avec FLUORMODLEAF pour une feuille typique de dicotylédone. Bien que le modèle soit encore en phase de développement, ces résultats sont très encourageants même s'il reste à les valider.

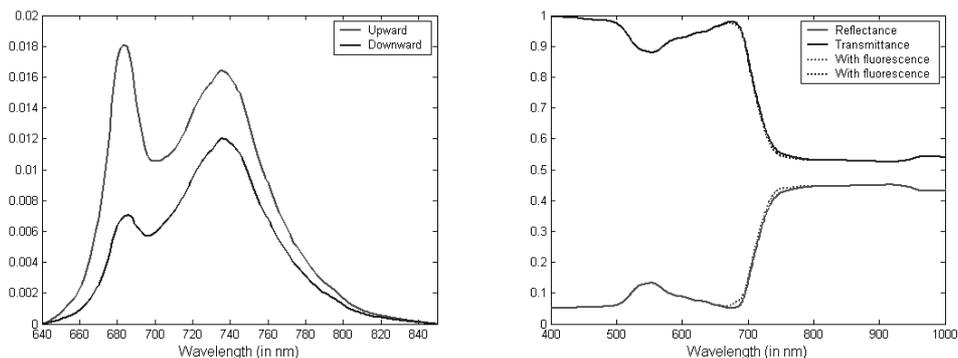


Figure 2 : Simulation par FLUORMODLEAF de la fluorescence chlorophyllienne des faces supérieure et inférieure (gauche) et de la réflectance et transmittance avec ou sans fluorescence (droite). Paramètre de structure : $N = 1.5$, concentration en chlorophylle a+b : $C_{ab} = 33 \mu\text{g cm}^{-2}$, épaisseur équivalente en eau : $C_w = 0.025 \text{ cm}$, teneur en matière sèche : $C_m = 0.01 \text{ g cm}^{-2}$, rendement quantique de fluorescence : $\Phi = 0.04$, température : $T = 20^\circ\text{C}$, espèce : haricot, stochiométrie PSII/SPI : $Sto = 2.0$.

Comme nous l'avons signalé en introduction, le déterminisme des propriétés optiques directionnelles des feuilles est encore aujourd'hui très mal connu, même si la structure de l'épiderme semble être un facteur déterminant. La cuticule, fine couche de cire amorphe recouvrant la surface de certaines feuilles les protégeant ainsi contre les rigueurs climatiques, les insectes ou la déshydratation, agit comme un miroir qui renvoie la lumière dans la direction

spéculaire ; au contraire, les poils absorbants ont tendance à disperser la lumière dans toutes les directions. Cette dualité entre une surface spéculaire idéale et une surface parfaitement diffusante est caractéristique de la réflectance directionnelle des feuilles. Les spectres de réflectance simulés par PROSPECT, incluant ou non la fluorescence, sont des valeurs moyennes intégrées sur un hémisphère qui ne représentent que partiellement la manière dont la surface des feuilles diffuse la lumière. Des BRDF ont été récemment acquises sur plusieurs espèces de plantes grâce à un goniophotomètre de laboratoire dans 391 longueurs d'onde et 98 directions de visée : ces mesures (Figure 3) ont été ajustées avec succès par un modèle de réflexion spéculaire (Cook-Torance) couplé à PROSPECT pour simuler la réflexion diffuse (xxiv).

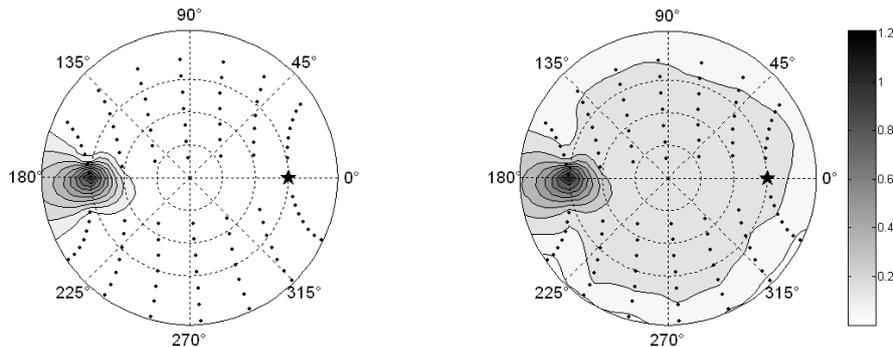


Figure 3 : Représentation en coordonnées polaires de la BRDF de la face supérieure d'une feuille de laurier (*Prunus laurocerasus*) mesurée pour un angle d'incidence $\theta_s = 60^\circ$ à 670 nm (gauche) et 780 nm (droite).

Les limites de PROSPECT sont relativement bien identifiées. Par exemple, les mesures de réflectance et de fluorescence montrent des différences nettes entre les faces supérieure et inférieure des feuilles de dicotylédones car celles-ci possèdent des parenchymes palissadique et lacunaire bien distincts en terme de structure anatomique et de composition biochimique. De par sa construction en N couches élémentaires homogènes, PROSPECT est incapable de reproduire ces différences. Les nervures du limbe forment un réseau dense responsable de ce qu'on appelle l'effet de sève : comment prendre en compte la distribution spatiale des éléments absorbants et diffusants ? L'introduction de nouveaux composés biochimiques pourrait permettre de perfectionner le modèle. Dans le moyen infrarouge, l'expérience a montré que l'estimation de la lignine, de la cellulose, des protéines, etc. prises séparément conduisait à une impasse car leurs effets sont masqués par ceux de l'eau. Dans le visible, les pigments bruns qui apparaissent lors de la sénescence des feuilles ont été récemment introduits par Frédéric Baret de l'INRA d'Avignon (France). Il devrait être aussi possible, à court terme, d'isoler la chlorophylle *a*, la chlorophylle *b*, les caroténoïdes et les anthocyanes car ces pigments foliaires ont des pics d'absorption à des longueurs d'onde décalées : cette distinction est essentielle car elle permettrait d'accéder directement à des informations sur l'activité photosynthétique de la végétation. Enfin les propriétés optiques de surface des feuilles, dont on ignore encore tout des effets sur la BRDF des couverts végétaux, commencent à être étudiées sous l'impulsion des chercheurs en imagerie de synthèse !

Quelles sont les évolutions possibles de PROSPECT ? Il existe plusieurs voies de recherche comme nous venons de le voir. Dans la perspective d'une meilleure compréhension de la propagation des photons dans une feuille, il est toujours possible de complexifier le modèle. Cependant, si l'objectif est de le coupler à un modèle de réflectance de la végétation afin de l'inverser, il faut se demander à chaque fois que l'on souhaite ajouter un paramètre descriptif de la feuille si ce dernier peut être estimé à partir de données radiométriques, tant à l'échelle de la feuille que celle du couvert végétal.

DISCUSSION-CONCLUSION

Par définition un modèle est la représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique permettant d'en simuler son fonctionnement. En télédétection, on cherche à comprendre comment

la lumière interagit avec le milieu et à traduire cette connaissance en équations. Cette démarche permet de relier le signal radiométrique aux caractéristiques biologiques et/ou physiques de la cible observée. Les sorties des modèles de propriétés optiques des feuilles (par exemple PROSPECT) sont les variables d'entrée des modèles de réflectance des couverts végétaux (par exemple SAIL) : ce couplage (par exemple PROSAIL) constitue un outil très puissant pour accéder au contenu biochimique des feuilles à partir de l'espace.

Dans le sens direct, la modélisation permet de développer des techniques de correction des images adaptées à la résolution spatiale et spectrale des capteurs, et donc d'étudier les changements d'échelle. Grâce aux études de sensibilité, par exemple par la méthode des plans d'expériences numériques (xxv), des réponses quantitatives peuvent être apportées quant au choix des bandes spectrales (nombre, position, largeur) et/ou des directions de visée (nombre) des nouveaux capteurs selon les objectifs des futures missions spatiales (Figure 4). Enfin les modèles peuvent aussi servir à construire des indices de végétation spécifiques à la variable d'intérêt, donc plus performants (xxvi).

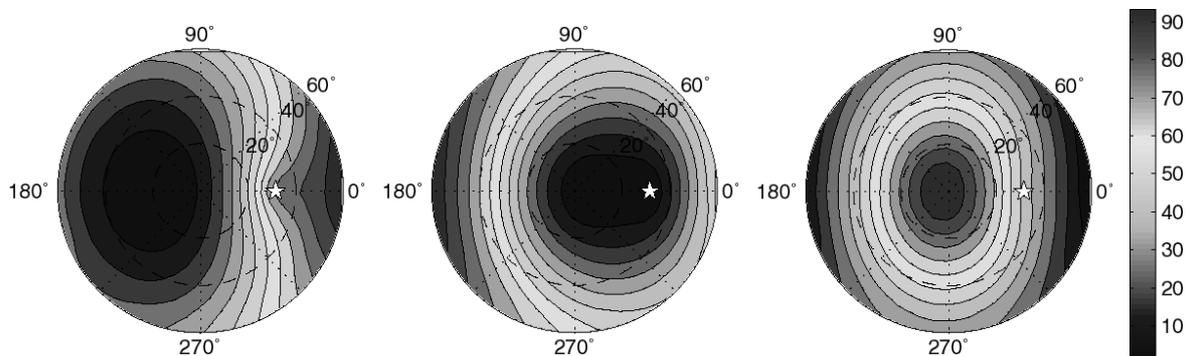


Figure 4 : Sensibilité directionnelle du modèle PROSAIL à la concentration en chlorophylle (gauche), à l'indice foliaire (centre) et à l'inclinaison moyenne des feuilles (droite) dans le visible / proche infrarouge pour un angle zénithal solaire égal à 40° (xxv).

Dans le sens inverse, le principal atout des modèles de transfert radiatif sur les relations semi-empiriques classiquement utilisées (indices de végétation) est qu'en tenant compte de la configuration de mesure et de l'architecture du feuillage, l'information recherchée est *de facto* extraite avec une plus grande précision. En outre, ce couplage est nécessaire lorsque l'on travaille sur des données multispectrales acquises au nadir afin que le nombre de paramètres du modèle soit toujours inférieur ou égal au nombre de mesures expérimentales : c'est la condition *sine qua non* pour avoir un système sur-déterminé. Les applications sont potentiellement nombreuses en agriculture de précision (cf. bilans azotés des cultures), en écologie (cf. bilans de carbone des forêts), ou en gestion des risques naturels (cf. prévention des feux de forêt). Alors que les bases de cette approche ont été jetées il y a une quinzaine d'années, les premières cartes de concentration en chlorophylle n'ont été produites que récemment (xxvii, xxviii, xxix), suivies de celles de teneur en eau (xxx) en attendant celles de teneur en matière sèche qui sont encore en gestation !

En conclusion, des outils perfectionnés d'interprétation de la réflectance des couverts végétaux reposant sur des modèles de transfert radiatif ont été développés et mis à disposition des thématiciens au cours des dix dernières années. Ceux-ci sont pourtant peu utilisés de façon opérationnelle. D'où vient ce décalage ? On peut identifier plusieurs causes : tout d'abord rares sont les modèles diffusés ouvertement... Ensuite, leur maniement et surtout la maîtrise du processus d'inversion, quelle que soit la méthode (itérations, tables de correspondances ou réseaux de neurones), sont souvent perçus comme trop complexes. Il est encore temps de convaincre les utilisateurs du bénéfice qu'ils pourraient en tirer.

RÉFÉRENCES

- i Ustin S L, S Jacquemoud, P J Zarco-Tejada & G P Asner, 2004. Remote sensing of the environment: state of the science and new directions. In: Manual of Remote Sensing. Volume 4: Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring, edited by S L Ustin (John Wiley & Sons), 679-729.
- ii Jacquemoud S, 2004. Leaf optical properties. In: Reflection Properties of Vegetation and Soil - with a BRDF Data Base, edited by M von Schönemark, B Geiger & H P Röser (Wissenschaft & Technik Verlag), 56-70.
- iii Allen W A, H W Gausman, A J Richardson & J R Thomas, 1969. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. Journal of the Optical Society of America, 59:1376-1379.
- iv Allen W A, H W Gausman & A J Richardson, 1970. Mean effective optical constants of cotton leaves. Journal of the Optical Society of America, 60:542-547.
- v Jacquemoud S & F Baret, 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. Remote Sensing of Environment, 34:75-91.
- vi Allen W A & A J Richardson, 1968. Interaction of light with a plant canopy. Journal of the Optical Society of America, 58:1023-1028.
- vii Fukshansky L, N Fukshansky-Kazarinova & A Martinez von Remisowsky, 1991. Estimation of optical parameters in a living tissue by solving the inverse problem of the multiframe radiative transfer. Applied Optics, 30:3145-3153.
- viii Martinez von Remisowsky A, J H McClendon & L Fukshansky, 1992. Estimation of the optical parameters and light gradients in leaves: multi-flux versus two-flux treatment. Photochemistry and Photobiology, 55:857-865.
- ix Richter T & L Fukshansky, 1996. Optics of a bifacial leaf: 1. A novel combined procedure for deriving the optical parameters. Photochemistry and Photobiology, 63:507-516.
- x Yamada N & S Fujimura, 1991. Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three-color reflectance and transmittance. Applied Optics, 30:3964-3973.
- xi Dawson T P, P J Curran & S E Plummer, 1998. LIBERTY - Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. Remote Sensing of Environment, 65:50-60.
- xii Ma Q, A Ishimaru, P Phu & Y Kuga, 1990. Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28:865-872.
- xiii Ganapol B D, L F Johnson, P D Hammer, C A Hlavka & D L Peterson, 1998. LEAFMOD: a new within-leaf radiative transfer model. Remote Sensing of Environment, 63:182-193.
- xiv Tucker C J & M W Garratt, 1977. Leaf optical system modeled as a stochastic process. Applied Optics, 16:635-642.
- xv Maier S W, W Lüdeker & K P Günther, 1999. SLOP: a revised version of the stochastic model for leaf optical properties. Remote Sensing of Environment, 68:273-280.
- xvi Allen W A, H W Gausman & A J Richardson, 1973. Willstatter-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing. Applied Optics, 12:2448-2453.
- xvii Kumar R & L Silva, 1973. Light ray tracing through a leaf cross section. Applied Optics, 12:2950-2954.
- xviii Baranoski G V G & J G Rokne, 2001. Efficiently simulating scattering of light by leaves. The Visual Computer, 17:491-505.

- xix Govaerts Y, S Jacquemoud, M M Verstraete & S L Ustin, 1996. Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf. Applied Optics, 35:6585-6598.
- xx Ustin S L, S Jacquemoud & Y Govaerts, 2001. Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis. Plant, Cell & Environment, 24:1095-1103.
- xxi Jacquemoud S, S L Ustin, J Verdebout, G Schmuck, G Andreoli & B Hosgood, 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. Remote Sensing of Environment, 56:194-202.
- xxii Fourty T & F Baret, 1998. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. International Journal of Remote Sensing, 19:1283-1297.
- xxiii Miller J R, M Berger, Y Goulas, S Jacquemoud, J Louis, N Moise, G Mohammed, J Moreno, I Moya, R Pedrós, W Verhoef & P J Zarco-Tejada, 2005. Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model, ESTEC Contract No. 16365/02/NL/FF, Final Report, May 2005 (<http://www.ias.csic.es/fluormod/>).
- xxiv Bousquet L, S Lachérade, S Jacquemoud, I Moya, 2005. Leaf BRDF measurement and model for specular and diffuse components differentiation. Remote Sensing of Environment, soumis.
- xxv Bacour C, 2001. Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales. Thèse de doctorat en physique, spécialité "Méthodes physiques en télédétection", Université Paris 7-Denis Diderot (Paris), 228 pp.
- xxvi Ceccato P, N Gobron, S Flasse, B Pinty & S Tarantola, 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach. Remote Sensing of Environment, 82:188-197.
- xxvii Weiss M & F Baret, 1999. Evaluation of canopy biophysical variable retrieval performances from the accumulation of large swath satellite data. Remote Sensing of Environment, 70:293-306.
- xxviii Zarco-Tejada P J, J R Miller, T L Noland, G H Mohammed & P H Sampson, 2001. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39:1491-1507.
- xxix Bacour C, S Jacquemoud, M Leroy, O Hautecoeur, M Weiss, L Prévot, N Bruguier & H Chauki, 2002. Reliability of the estimation of vegetation characteristics by inversion of three canopy reflectance models on airborne POLDER data. Agronomie: Agriculture and Environment, 22:555-565.
- xxx Zarco-Tejada P J, C A Rueda & S L Ustin, 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. Remote Sensing of Environment, 85:109-124.