

Mesure et modélisation des propriétés optiques des feuilles



Laurent Bousquet¹, Stéphane Jacquemoud¹ et Ismaël Moya²



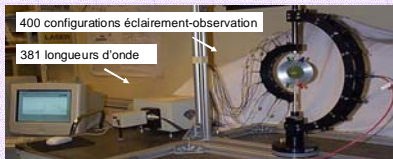
¹ Equipe de Géodésie et gravimétrie, Institut de Physique du Globe de Paris
lbousque@ccr.jussieu.fr jacquemoud@ipgp.jussieu.fr

² Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique, Palaiseau
moya@lmd.polytechnique.fr

1. Introduction

- L'énergie solaire captée par les feuilles permet aux plantes de se développer. Leur anatomie s'est adaptée à cette fonction, conditionnant leurs propriétés optiques.
- Mesure et modélisation de ces propriétés optiques trouvent de nombreuses applications en télédétection, en physiologie végétale ou encore en imagerie de synthèse.

2. Mesure des propriétés optiques des feuilles



Spectro-photo-goniomètre mesurant la réflectance et la transmittance des feuilles pour 4 angles d'éclaircement, 98 angles d'observation et 381 longueurs d'onde de 500 à 880 nm

- Pour une direction d'éclaircement donnée, nous mesurons les proportions de lumière réfléchi, absorbée ou transmise par la feuille.
- Plusieurs détecteurs permettent de multiplier les directions d'observation et d'étudier les variations directionnelles.
- Une source de lumière blanche associée à un spectromètre permettent d'étudier les variations spectrales.
- Les grandeurs physiques obtenues sont les Fonctions de Distribution de Réflectance et de Transmittance Bidirectionnelles (FDRB et FDTB) en sr⁻¹.

4. Formulation analytique de la FDRB

- Les micro-facettes présentes à la surface de la feuille provoquent une réflexion spéculaire indépendante de la longueur d'onde. L'optique géométrique associée à une description statistique de la surface permettent d'évaluer ce phénomène avec deux paramètres : l'indice de réfraction n et la rugosité σ.
- La lumière non réfléchi en surface peut être renvoyée vers le haut après interaction avec l'intérieur de la feuille. C'est la réflexion diffuse indépendante de la direction d'observation mais non de la longueur d'onde: paramètre k_t(λ).

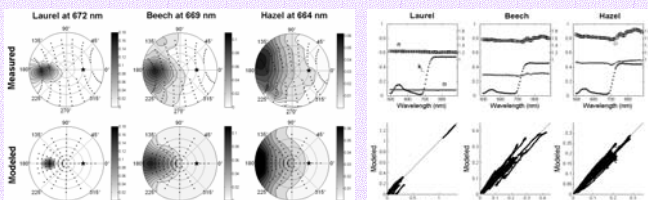
$$\frac{F(n)G.D(\sigma)}{2\pi^2 \cos a \cos b} + k_t(\lambda)/\pi = FDRB$$

Micro-facettes sur la face supérieure d'une feuille de vigne



L'inversion du modèle pour chaque longueur d'onde

- (+) Montre que le modèle peut reproduire les FDRB mesurées
- (+) Confirme l'invariance spectrale de la composante spéculaire
- (+) Permet d'évaluer la quantité de lumière ne pénétrant pas dans la feuille
- (+) Permet d'estimer des indices de réfraction et de rugosité effectifs
- (-) Fournit 3 paramètres dont un dépendant de la longueur d'onde



BRDF mesurées et modélisées au minimum de réflexion

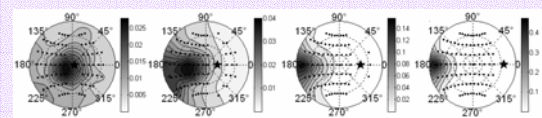
Paramètres après inversion (haut). BRDF mesurées vs modélisées (bas)

6. Conclusion

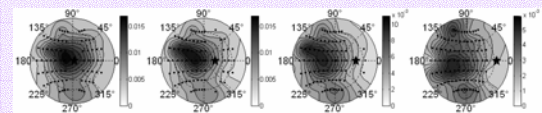
- Les FDRB des feuilles sont anisotropes contrairement aux FDTB. Elles résultent de réflexions spéculaires et diffuses dont les variations spectrales diffèrent.
- Nous proposons un modèle simple capturant ces caractéristiques qui sera par la suite associé au modèle de réflectance et transmittance spectrales Prospect.
- Les recherches en cours devraient permettre de proposer et de valider un modèle complet des propriétés optiques des feuilles.

3. Analyse des mesures

- La répartition directionnelle de la lumière réfléchi montre l'existence d'un effet spéculaire probablement causé par la réflexion en surface. La lumière transmise est quant à elle diffusée dans toutes les directions par la feuille.

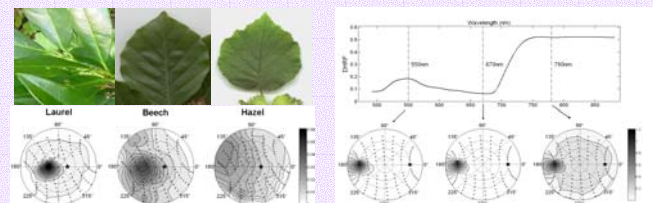


Représentation polaire des FDRB (sr⁻¹) de hêtre à 680 nm pour 4 illuminations [5°, 25°, 45°, 65°]



Représentation polaire des FDTB (sr⁻¹) de hêtre à 680 nm pour 4 illuminations [5°, 25°, 45°, 65°]

- L'effet spéculaire est d'autant plus marqué que la surface de la feuille est lisse.
- Les variations spectrales permettent de distinguer réflexions spéculaire et diffuse.



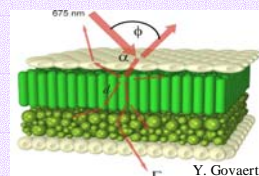
Influence de la rugosité de surface sur la FDRB

Réflectance (haut) et FDRB (bas) en fonction de la longueur d'onde

- La modélisation devrait permettre de relier la réflexion spéculaire aux propriétés de la surface (rugosité) et la réflexion diffuse au contenu biochimique.

5. Modélisation numérique de la FDRB

- Des coupes en série du limbe foliaire sont actuellement réalisées au MNHN (Th. Deroin) afin de reconstruire une maquette numérique de feuille réaliste.
- Parallèlement des mesures de contenu en chlorophylle, eau et matière sèche ont été effectuées en laboratoire.



Maquette numérique de feuille dicotylédone avec épiderme supérieur, inférieur, parenchymes palissadique et spongieux

- Le programme de lancer de rayons RAYTRAN sera ensuite utilisé pour simuler des FDRB et FDTB à comparer aux mesures et au modèle analytique.

Remerciements

Ce travail a reçu le soutien du Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) et du GDR 1536 FLUOVEG (Fluorescence de la Végétation).

Référence

Bousquet, L., Lachérade, S., Jacquemoud, S. and Moya, I. (2005). Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. Remote Sensing of Environment, 98: 201-211