

**UNIVERSITE PARIS 7 - DENIS DIDEROT
UFR DE PHYSIQUE**

Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France

DOCTORAT DE 3^{EME} CYCLE

Spécialité Méthodes Physiques en Télédétection

Laurent BOUSQUET

Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles



Thèse dirigée par Stéphane Jacquemoud

Soutenue le 2 avril 2007

Devant le jury composé de :

Serge Berthier
Frédéric Baret
Xavier Briottet
Michaël Chelle
Jean-Luc Widlowski
Stéphane Jacquemoud

Professeur à l'université Paris 7, président du jury et examinateur
Directeur de recherche à l'INRA Avignon, rapporteur
Chargé de mission politique scientifique à l'ONERA Toulouse, rapporteur
Chargé de recherche INRA Grignon, examinateur
Chercheur au EC JRC Ispra, examinateur
Professeur à l'université Paris 7, directeur de thèse et examinateur

Thèse effectuée au laboratoire :

Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154
Equipe Etudes Spatiales et Planétologie
Case 89,
4 place Jussieu,
75252 Paris Cedex 05

Mots-clés

Télédétection, Optique, Feuille, Mesure, Modèle, Spectral, Directionnel, Spéculaire, Plante, Végétation, BRDF

Résumé

L'estimation du contenu biochimique des feuilles ou la simulation de leur apparence reposent sur la connaissance de leurs facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption de la lumière. L'objectif de cette thèse est de modéliser les variations spectrales et directionnelles de ces propriétés optiques apparentes. Un spectro-photo-goniomètre est utilisé pour mesurer les facteurs de réflexion et de transmission des feuilles dans le visible et le proche infrarouge, pour quatre directions d'éclairement et 200 directions d'observations. Ces données montrent que la réflexion de surface, spéculaire, produit de fortes variations directionnelles essentiellement déterminées par l'indice de réfraction et la rugosité de surface des feuilles mais indépendantes de la longueur d'onde, alors que la réflexion et la transmission de volume sont marquées spectralement par l'absorption des constituants foliaires et ne varient que faiblement avec les directions. Le modèle analytique développé durant la thèse est validé en inversion sur les mesures optiques pour estimer les paramètres de surface ainsi que la contribution spéculaire en réflexion et l'angle solide dans lequel elle s'inscrit. Il est ensuite couplé avec le modèle spectral Prospect pour aboutir à une modélisation analytique des propriétés spectrales et directionnelles des feuilles. Enfin, les propriétés optiques d'une feuille de hêtre sont simulées par lancer de rayon sur une maquette tridimensionnelle reconstruite à partir de coupes histologiques et de mesures biochimiques. Ces simulations sont comparées aux données expérimentales pour mieux comprendre le rôle de la structure interne dans le transfert radiatif.

Keywords

Remote sensing, Optics, Leaf, Measurement, Model, Spectral, Directional, Specular, Plant, Vegetation, BRDF

Abstract

Plant leaves are the main organs where photosynthesis takes place. Their anatomy is adapted to this role, leading to particular optical properties. Leaf structure and biochemical content determine their reflectance, transmittance, and absorptance. Spectral properties are explained by absorption features of pigments, water and dry matter. Directional properties are associated with the numerous air spaces inside the blade, causing isotropic scattering, and leaf surface roughness, affecting the specular reflection of light. Measurements and models are needed to describe the light-leaf interaction and many applications may be found in remote sensing, plant physiology or computer graphics. In this work, a laboratory device is used to measure optical properties of leaves in the range 500-880 nm, at 4 incidence angles and 200 viewing directions. The water, dry matter and chlorophyll contents have been determined using destructive methods. The leaf tri-dimensional structure is examined under a microscope to measure the cell size and the air space fraction for each tissue. This information is available for various Monocots and Dicots. Data are used to develop a physical model of light-leaf interaction based on geometric optics. Inversion of this model allowed to estimate leaf anatomy and biochemistry, two parameters useful in remote sensing. From microscope observations, a virtual tri-dimensional leaf was built and its optical properties studied with ray-tracing techniques. Hemispherical and bidirectional reflectance, together with the transmittance, and light fluxes have been simulated and compared to measurements.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Stéphane Jacquemoud qui m'a fait partager sa passion pour les propriétés optiques de la végétation et qui a dirigé cette thèse avec patience et bienveillance,

Serge Berthier, Frédéric Baret, Xavier Briottet, Jean-Luc Widlowski et Michaël Chelle, pour leur participation au jury de cette thèse,

Ismaël Moya et son équipe, Sophie Lachérade et Didier Combes pour leur aide apportée à la partie expérimentale de ce travail,

Zoran Cerovic et Naïma Ben-Ghozlen pour les conseils et les mesures biochimiques du contenu foliaire,

Thierry Deroin qui m'a initié à l'art des coupes histologiques,

Thomas Lavergne, Yves Govaerts et Jean-Luc Widlowski, pour leur aide dans la simulation du transfert radiatif,

les équipes Etudes Spatiales et Planétologie de l'IPGP et de l'ancien Laboratoire Environnement et Développement qui m'ont accueilli en leur sein pour la préparation de cette thèse,

et enfin mes parents, Christian et Françoise, ainsi que ma soeur, Agnès, pour leur confiance et leur soutien.

Table des matières

Introduction générale p. 1

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur les propriétés optiques des feuilles p. 5

1. Introduction du chapitre
2. La feuille des angiospermes
 - 2.1. Structure
 - 2.2. Composition biochimique
 - 2.3. Absorption des constituants foliaires
3. Propriétés optiques des feuilles
 - 3.1. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
 - 3.2. Variations spectrales
 - 3.3. Variations avec l'angle d'incidence
 - 3.4. Facteurs anatomiques
4. Propriétés optiques bi-directionnelles
 - 4.1. La fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle
 - 4.2. Méthodes d'estimation des réflectances bi-directionnelles
 - 4.3. Appareils de mesure
 - 4.4. Composante diffuse et composante spéculaire
 - 4.5. Revue des mesures des propriétés bi-directionnelles des feuilles
5. Introduction de la réflexion spéculaire dans les modèles de transfert radiatif du couvert végétal
6. Conclusion du chapitre

Chapitre 2

Mesure des réflectances et transmittances bi-directionnelles et spectrales p. 33

1. Introduction du chapitre
2. Le spectro-gonio-photomètre
 - 2.1. Philosophie et historique
 - 2.2. Caractéristiques
 - 2.3. Description
 - 2.4. Etude de l'instrument
 - 2.5. Calibration spectrale et directionnelle
3. Du signal brut aux réflectances et transmittances
 - 3.1. Etude théorique du signal mesuré
 - 3.2. Calcul des réflectances et transmittances bidirectionnelles
 - 3.3. Calcul des réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques
 - 3.4. Protocole expérimental
4. Etude des réflectances et transmittances bi-directionnelles des feuilles
 - 4.1. Sélection des échantillons et présentation des mesures
 - 4.2. Analyse des mesures de la campagne 2003
 - 4.3. Analyse des mesures de la campagne 2005
5. Discussion
6. Conclusion du chapitre

Chapitre 3

Modélisation des réflectances bi-directionnelles et applications

p. 63

1. Introduction
2. Réflexion de la lumière par les surfaces
 - 2.1. La notion de rugosité
 - 2.2. La surface rugueuse comme un ensemble de facettes
 - 2.3. Application aux feuilles
3. Le modèle de réflectance diffuse et spéculaire des feuilles
 - 3.1. Modélisation géométrique de la surface de la feuille
 - 3.2. Calcul de l'éclairement et de la luminance
 - 3.3. Fonction de distribution des orientations des facettes
 - 3.4. Atténuation d'origine géométrique
 - 3.5. Ecriture finale de la réflectance bi-directionnelle
 - 3.6. Relations géométriques
4. Comparaison avec d'autres modèles
 - 4.1. Torrance et Sparrow 1967
 - 4.2. Cook et Torrance 1981
5. Etude directe de la composante spéculaire
 - 5.1. Facteur de réflexion de Fresnel
 - 5.2. Réflectance bi-directionnelle
 - 5.3. Facteur de réflexion directionnel-hémisphérique
6. Inversion du modèle et applications
 - 6.1. La méthode d'inversion
 - 6.2. Variations directionnelles de la composante spéculaire
 - 6.3. Invariance spectrale de la composante spéculaire
 - 6.4. Angle solide spéculaire et contribution au facteur de réflexion directionnel-hémisphérique
 - 6.5. Couplage avec le modèle Prospect
7. Conclusion du chapitre

Chapitre 4

Simulation des propriétés optiques des feuilles par lancer de rayon

p. 87

1. Introduction
2. Le code de lancer de rayon Raytran
3. La maquette DICOLEAF
 - 3.1. Description
 - 3.2. Contenu en eau, chlorophylle et matière sèche
 - 3.3. Synthèse et visualisation
4. Les simulations de 1996
5. Les simulations de 2006
 - 5.1. L'échantillon de hêtre
 - 5.2. Propriétés physiques des constituants biochimiques
 - 5.3. Maquettes DICOLEAF
6. Analyse des simulations DICOLEAF 22
 - 6.1. Profils des flux lumineux
 - 6.2. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
 - 6.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles
7. Simulation des les tissus séparés

- 7.1. Profils des flux lumineux
- 7.2. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
- 7.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles
- 8. Conclusion du chapitre

Conclusion générale p. 123

Annexes

- A. Classification des angiospermes p. 127
- B. Absorption du rayonnement p. 131
- C. Photométrie p. 143
- D. Le spectro-gonio-photomètre p. 149
- E. Réflexion spéculaire sur une surface rugueuse p. 167
- F. Electromagnétisme et optique p. 173
- G. Protocole pour la campagne de mesure Juillet 2005 p. 181
- H. Publications p. 189

Références bibliographiques p. 191

Introduction générale

Achard (1778) rapporte que, à son époque, les physiciens sont en désaccord sur les causes de la couleur des feuilles. Certains attribuent leur couleur verte au fer ou au cuivre que l'on retrouve dans leurs cendres. D'autres veulent prouver que les couleurs "sont dues à l'existence d'un principe colorant particulier qui, indépendamment du tissu des corps avec lesquels il est uni, produit toujours la même couleur". Achard s'oppose à cette idée et suppose que "les couleurs sont une suite de l'arrangement des parties". Ce débat illustre la différence entre les couleurs physiques (Berthier 2003), comme celles l'arc-en-ciel dues à la dispersion de la lumière par les gouttelettes d'eau, et les couleurs chimiques, comme le vert des feuilles dû à l'absorption de la lumière par la molécule de chlorophylle dont le nom a été cité pour la première fois par Pelletier et Caventou (1818). Les feuilles contiennent des principes colorants, ou pigments, qui produisent leurs couleurs, mais l'arrangement de leurs parties, c'est à dire leur structure anatomique, modifie aussi leur aspect, par le biais d'une couche de cire qui les rend brillante dans certaines conditions d'observation, ou bien par des inhomogénéités de structure qui, en favorisant la diffusion puis l'absorption de la lumière, les rendront plus foncées. Ainsi, le débat rapporté par Achard reste d'actualité et de nombreux liens restent à faire entre l'apparence des feuilles, leur structure, et leur contenu biochimique.

L'apparence des feuilles est le fruit de milliards d'année d'évolution. Alors que les animaux trouvent les protéines qui leur sont nécessaires en se nourrissant d'autres formes de vie, les plantes sont capables d'élaborer elles-mêmes les molécules consommées pour leur développement. Les réactions chimiques produisant ces molécules sont activées par l'absorption d'énergie lumineuse. L'ensemble du processus se nomme photosynthèse et prend place dans les chloroplastes logés au sein des cellules végétales. Ces organites, délimités par une membrane biologique, contiennent de l'information génétique qui vient s'ajouter à celle contenue dans le noyau cellulaire. Du point de vue de l'évolution, les chloroplastes pourraient être issus de cyanobactéries, organismes photosynthétiques procaryotes, apparues il y a 3,5 milliards d'années environ. Depuis lors, la machine photosynthétique s'est perfectionnée et les plantes ont conquis la surface terrestre. Les tissus végétaux se sont différenciés pour former des organes aux fonctions différentes. Les feuilles se sont spécialisées dans la photosynthèse et leurs propriétés optiques se sont adaptées à ce rôle.

Lors de la photosynthèse, les plantes puisent dans l'atmosphère terrestre du dioxyde de carbone et y relâchent du dioxygène. Ainsi, depuis des milliards d'années, ce processus contribue à modifier la composition chimique de l'atmosphère en remplaçant un gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone) par un gaz nécessaire à la respiration animale (le dioxygène). Aujourd'hui, en brûlant la plupart des matières fossiles qui lui sont accessibles, l'Homme renvoie dans l'atmosphère des quantités de dioxyde de carbone suffisante pour influencer le climat terrestre. Le devenir du dioxyde de carbone ainsi relâché dépend de son cycle bio-géo-chimique à l'échelle planétaire. Les plantes en étant les principales consommatrices, la cartographie de leur activité photosynthétique est devenue un enjeu scientifique majeur pour le suivi environnemental de la planète.

L'étude des propriétés optiques des feuilles est bénéfique à de nombreux domaines de recherche. La végétation représente 99 % de la biomasse vivante (Atjay *et al.*, 1979) et couvre 65 % des terres émergées. Les feuilles en sont les principaux organes photosynthétiques et sont à l'interface de domaines scientifiques en plein essor : d'un côté, la physico-chimie du vivant à l'échelle de la cellule ou de la molécule, de l'autre, la télédétection spatiale à l'échelle du couvert

végétal. Ces domaines ont en commun l'utilisation du rayonnement électromagnétique pour caractériser l'objet étudié. Nous détaillons ci-après le rôle que les propriétés optiques des feuilles y jouent.

En télédétection spatiale, les instruments optiques pour l'observation de la Terre mesurent la quantité de lumière réfléchiée par la surface terrestre. La théorie du transfert radiatif est utilisée pour simuler cette réflexion (Myneni et Ross, 1991). La quantité de lumière réfléchiée dépend de ce qui a été absorbé par les feuilles, cette absorption variant beaucoup avec la longueur d'onde mais peu avec les directions d'éclairement et d'observation. La lumière rouge est fortement absorbée pour nourrir la photosynthèse, alors que la lumière proche infrarouge est presque intégralement réfléchiée ou transmise. Cette différence constitue une signature spectrale unique, appelée *red edge*. Elle est utilisée pour évaluer la couverture végétale à l'échelle mondiale (Tucker, 1979). Par ailleurs, la quantité de lumière réfléchiée par un couvert végétal présente un maximum lorsque les directions d'observation et d'éclairement coïncident (Kuusk, 1991). Ce phénomène, connu sous le nom de *hot spot*, est dû à l'absence d'ombre dans cette configuration de mesure. Ainsi, le facteur de réflexion du couvert dépend des spectres d'absorption foliaires et de l'arrangement spatial des feuilles. Par conséquent, les études sur les propriétés optiques des feuilles se sont concentrées sur les variations spectrales (Gates et al., 1965 ; Woolley, 1971; Gausman, 1985). Cependant, avec les progrès faits dans la modélisation du couvert (Pinty et al., 2004) et dans le développement de capteurs multispectraux et multiangulaires (Maignan et al., 2004), les variations directionnelles des propriétés optiques des feuilles deviennent nécessaires à la simulation du transfert radiatif dans le couvert. Ces variations influencent la diffusion de l'énergie lumineuse dans le couvert et en modifient les facteurs d'absorption et de transmission.

A l'échelle de quelques plantes, le climat lumineux perçu par chacune d'elle est modifié par la présence de ses voisines. Cette modification peut se déduire des propriétés optiques apparentes des divers organes végétaux. Elle influence le développement de la plante en agissant sur le spectre de la lumière perçu par ses organes (Ballaré et al., 1987; Smith, 2000), c'est la photomorphogénèse. Cette perception se fait grâce à deux familles de photorécepteurs, le phytochrome et le cryptochrome, localisés dans toute la plante, et sensibles respectivement au rapport rouge-infrarouge et aux longueurs d'onde dans le bleu. Après avoir interagi une feuille, le spectre du rayonnement est modifié par l'absorption des constituants foliaires. Or cette modification dépend de la direction d'observation. Dans une direction spéculaire, le spectre est très peu modifié. Il faut donc quantifier l'angle solide correspondant à ce type de réflexion. Par ailleurs, il faut estimer la quantité d'énergie qui n'a pas interagi avec les pigments mais seulement avec la surface de la feuille.

La communauté scientifique en synthèse d'image s'emploie à rendre réalistes les images synthétiques. Les plantes font parti de notre environnement quotidien et font par conséquent l'objet de simulations d'apparence (Baranoski et Rokne, 2004). Ces dernières reposent généralement sur des algorithmes de lancer de rayon, simplifiés pour diminuer le temps de calcul (Phong, 1975). Le jeu consiste à mesurer les propriétés optiques apparentes des objets et à trouver les fonctions qui captureront l'essentiel des variations. Ces fonctions étaient souvent empiriques lors des débuts de cette discipline, mais la modélisation physique s'impose peu à peu par ses performances en terme de réduction du nombre de paramètres.

La biologie végétale et l'agronomie s'intéressent au contenu biochimique des feuilles car il est un indicateur de son état physiologique. Pour mesurer la teneur en chlorophylle, par exemple, on extrait cette molécule de la feuille pour la placer dans une solution dont on mesure l'absorption. La quantité de lumière absorbée dépend de la concentration en chlorophylle (Lichtenthaler, 1987). Cette estimation conduit à la destruction de la feuille. Pour doser la

chlorophylle *in vivo* sans modifier la feuille, il est nécessaire de développer des modèles d'absorption dans les tissus biologiques (Fukshansky *et al.*, 1993). Le modèle Prospect (Jacquemoud et Baret, 1990) est largement utilisé à cette fin. Les principales sources d'erreur résident dans l'estimation de l'énergie réfléchi en surface, qui n'interagit donc pas avec l'intérieur, et dans l'évaluation du climat lumineux à l'intérieur de la feuille. Ce climat lumineux représente l'énergie disponible pour la photosynthèse, sa connaissance est donc requise pour la compréhension des processus bioénergétiques dans les végétaux.

Objectifs de la thèse

L'apparence d'un objet est quantifiée par ses facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption, l'ensemble formant ses propriétés optiques apparentes. Ces dernières sont fonction de la longueur d'onde (propriétés spectrales) du rayonnement et des géométries d'éclairement et d'observation (propriétés directionnelles). Ce travail se concentre sur le facteur de réflexion des feuilles, et plus particulièrement sur sa composante spéculaire. L'étude s'appuie sur des mesures et des modélisations analytiques et numériques. Les objectifs sont :

- Identifier les quantités optiques pertinentes et procéder à de nouvelles mesures.
- Modéliser analytiquement les variations directionnelles de la réflexion par une approche physique dans le cadre de l'optique géométrique.
- Comparer les mesures au modèle et inverser ce dernier pour estimer les caractéristiques de la surface foliaire et de la réflexion spéculaire.
- Proposer un modèle analytique couplant caractéristiques spectrales et directionnelles.
- Simuler numériquement les propriétés optiques d'une maquette de feuille réaliste par lancer de rayons.

Plan de la thèse

Le premier chapitre de la thèse fait une synthèse bibliographique sur la structure, le contenu biochimique, et les propriétés optiques des feuilles. Le second chapitre est consacré aux mesures spectrales et directionnelles des facteurs de réflexion et de transmission des feuilles. Le procédé de mesure ainsi que les résultats pour plusieurs types de feuilles sont présentés. Le troisième chapitre introduit un modèle de réflexion diffuse et spéculaire, utilisé pour estimer les paramètres optiques et structurels de la surface foliaire, et pour quantifier l'intensité et la répartition directionnelle de la réflexion spéculaire. Le quatrième chapitre porte sur la simulation des propriétés optiques des feuilles par lancer de rayon. Les résultats des simulations sont comparés aux résultats expérimentaux établis dans le deuxième chapitre.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique sur les propriétés optiques des feuilles

Plan du chapitre

1. Introduction du chapitre
2. La feuille des angiospermes
 - 2.1. Structure
 - 2.2. Composition biochimique
 - 2.3. Absorption des constituants foliaires
3. Propriétés optiques des feuilles
 - 3.1. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
 - 3.2. Variations spectrales
 - 3.3. Variations avec l'angle d'incidence
 - 3.4. Facteurs anatomiques
4. Propriétés optiques bi-directionnelles
 - 4.1. La fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle
 - 4.2. Méthodes d'estimation des réflectances bi-directionnelles
 - 4.3. Appareils de mesure
 - 4.4. Composante diffuse et composante spéculaire
 - 4.5. Revue des mesures des propriétés bi-directionnelles des feuilles
5. Introduction de la réflexion spéculaire dans les modèles de transfert radiatif du couvert végétal
6. Conclusion du chapitre

1. Introduction du chapitre

Les plantes vasculaires possèdent un réseau de vaisseaux conducteurs capable de transporter rapidement et sur de longues distances de l'eau et des éléments nutritifs solubles. Ces vaisseaux ont permis le développement de grandes plantes, au port dressé et rigide, qui ont conquis la surface terrestre (Hallé, 1999). Ce travail se limite aux plantes à fleurs, ou angiospermes, qui dominent une vaste partie des terres émergées et représentent l'apogée de l'évolution des plantes vasculaires (Bowes, 1996). Environ 250 000 espèces d'angiospermes sont recensées et leur taille varie du millimètre à la dizaine de mètres. Du point de vue de la reproduction, les angiospermes se distinguent par la présence d'un fruit qui enveloppe les graines, alors que dans le groupe voisin des gymnospermes les graines sont nues. La classification du groupe des angiospermes au sein du règne végétal est présentée en annexe A. Dans ce chapitre, la feuille des angiospermes est tout d'abord caractérisée en terme de structure anatomique et de contenu biochimique, puis ses propriétés optiques spectrales bidirectionnelles sont introduites et documentées.

2. La feuille des angiospermes

Les angiospermes possèdent des racines, tiges, fleurs et feuilles. La racine fixe la plante au sol pour y puiser de l'eau et des éléments nutritifs. La tige prolonge la racine vers le haut et supporte les feuilles et les fleurs. Les nutriments produits sont consommés sur place ou distribués dans la plante par l'intermédiaire des vaisseaux conducteurs de sève (figure 1.1). La feuille est l'organe spécialisé dans la photosynthèse. La lumière visible émise par le soleil est absorbée pour la production de molécules organiques (glucose $C_6H_{12}O_6$, par exemple) à partir de molécules inorganiques (principalement l'eau H_2O et le dioxyde de carbone CO_2).

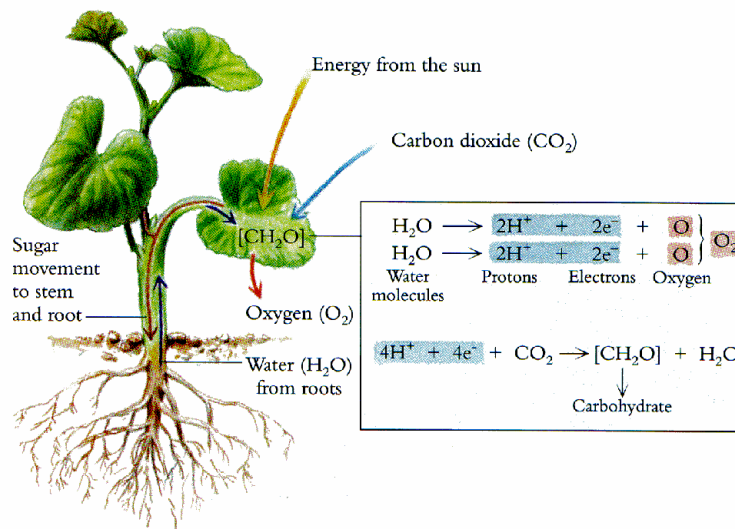


Figure 1.1 : La réaction photosynthétique. Le CO_2 , les protons H^+ et les électrons e^- sont les réactifs permettant la synthèse de CH_2O (image reproduite à partir de Galston, 1994).

L'absorption se fait uniquement dans les chloroplastes qui sont des organites présents dans certaines cellules végétales (figure 1.2). Un chloroplaste se présente sous la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati dont les dimensions avoisinent le micromètre. Il contient les thylakoïdes dont la membrane est le siège de la photosynthèse. A l'échelle moléculaire, cette

membrane comporte des structures appelées photosystèmes. La chlorophylle y est associée à d'autres molécules pour former des complexes antennes absorbant la lumière et des centres réactionnels utilisant l'énergie absorbée pour entretenir des réactions chimiques. Les dimensions de la chlorophylle, des thylakoïdes, des chloroplastes et des cellules végétales sont respectivement de l'ordre de 1 nm, 100 nm, 1 µm et 10 µm. L'absorption de la lumière par une plante dépend de sa structure à toutes ces échelles.

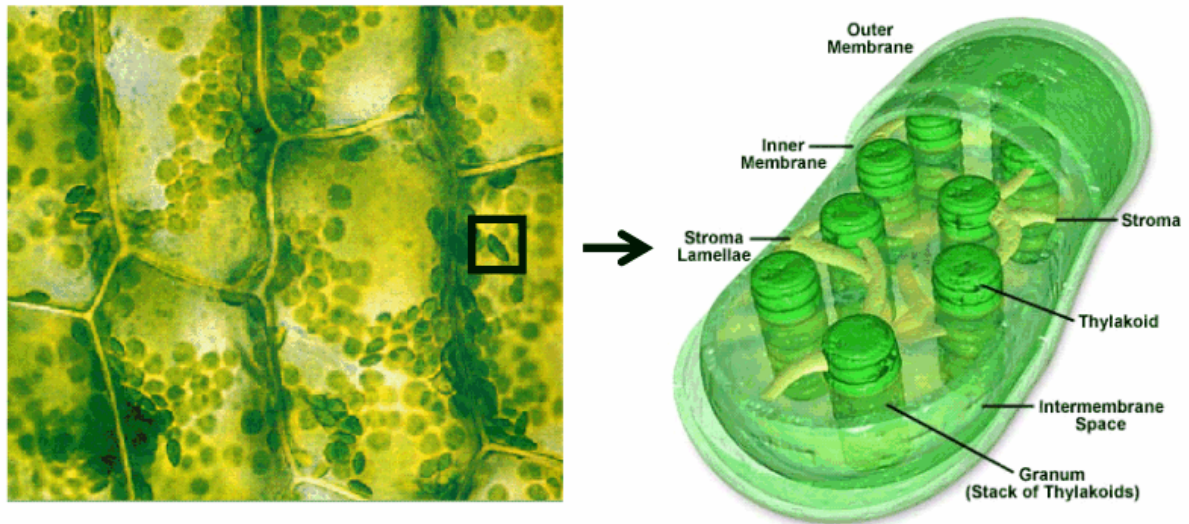


Figure 1.2 : A gauche, chloroplastes dans des cellules vertes (photo D. Kuhn, reproduite à partir de Galston, 1994). A droite, vue d'artiste d'un chloroplaste (<http://www.daviddarling.info/>).

2.1. Structure

Parmi les angiospermes, on distingue les monocotylédones et les dicotylédones. Les monocotylédones ont généralement une feuille allongée, sans pétiole, avec des nervures parallèles à la nervure centrale. Les dicotylédones ont généralement un pétiole et des nervures qui se ramifient à partir de la nervure centrale à différents niveaux. La figure 1.3 présente une feuille typique de dicotylédone fixée à la tige de la plante par un pétiole. De forme cylindrique, tige et pétiole assurent à la feuille un apport de matière puisée dans le sol par les racines. Cette matière est ensuite distribuée dans le limbe foliaire par les nervures. La densité de ce réseau est illustrée sur la figure 1.4, où la feuille, après décomposition partielle, laisse apparaître ses nombreuses ramifications.

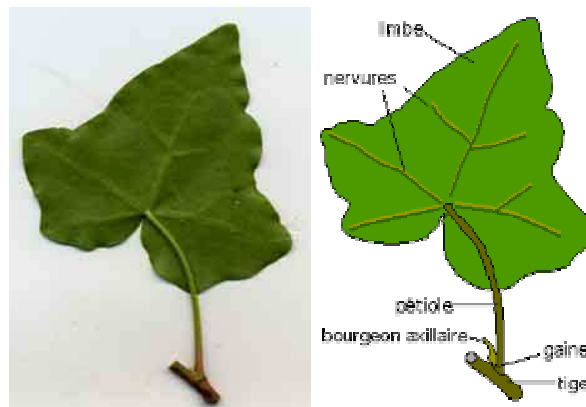


Figure 1.3 : Vue d'ensemble d'une feuille dicotylédone (largeur 10 cm environ). La photo (à gauche) est schématisée (à droite) en indiquant les principales structures (photo et figure "<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/>").

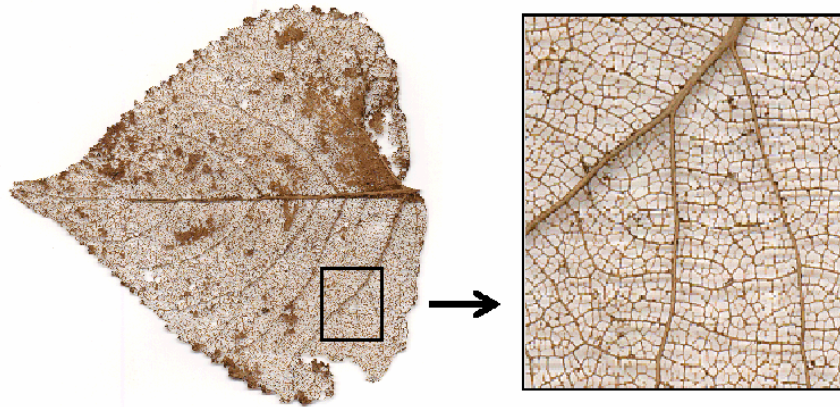


Figure 1.4 : Réseau de veines sur une feuille de dicotylédone (S. Jacquemoud). A gauche : feuille entière en décomposition. On distingue la nervure principale qui est un axe de symétrie de la feuille, puis les nervures secondaires partant presque perpendiculairement de cet axe pour rejoindre les bords du limbe. A droite : grossissement laissant apparaître un réseau de veines de plus en plus fines.

Les dimensions d'une feuille sont de l'ordre de 100 mm en largeur et en longueur contre 0,5 mm en épaisseur. La [figure 1.5](#) présente la photographie d'une coupe transversale d'une feuille de laurier rose (*Nerium oleander*). On y distingue nettement deux types de tissus : le mésophylle, de couleur verte, constitue le coeur de la feuille, il est protégé du milieu extérieur par les épidermes supérieur et inférieur.

Le mésophylle est principalement composé de cellules vertes. Relativement uniforme et compact dans le cas des monocotylédones, il se différencie en parenchyme palissadique et parenchyme spongieux (ou lacuneux) dans le cas des dicotylédones ([figure 1.6](#)). Le parenchyme palissadique est constitué de cellules cylindriques régulièrement arrangées alors que les cellules du parenchyme spongieux ont des formes plus variées, avec un arrangement spatial désordonné. Un des paramètres du rendement de la photosynthèse est la surface de contact entre les parois cellulaires et les espaces intercellulaires remplis d'air. Cette surface est importante dans le parenchyme spongieux où le tissu chlorophyllien présente de grandes lacunes ([figure 1.5](#)). [Slatyer \(1967\)](#) a montré qu'une grande partie de la surface des cellules palissadiques était aussi en contact avec l'air. [Esau \(1965\)](#) et [Turrell \(1936\)](#) ont trouvé, en étudiant la surface interne des parenchymes spongieux et palissadique, que le second avait une surface interne généralement plus grande que le premier.

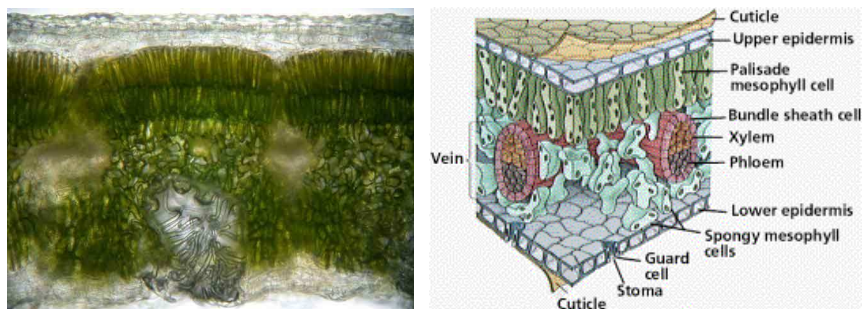


Figure 1.5 : Anatomie des dicotylédones. A gauche : coupe transversale d'une feuille de laurier rose (*Nerium oleander*) observée au microscope optique en couleurs naturelles. (Photo "<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/>"). A droite : schéma de l'anatomie d'une feuille dicotylédone.

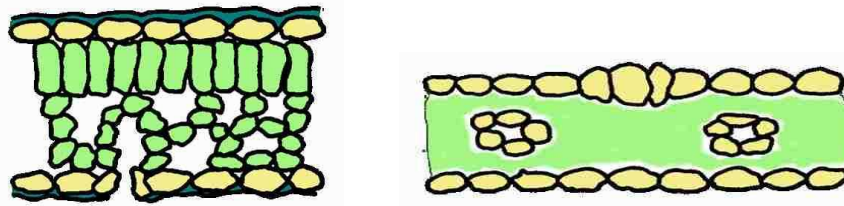


Figure 1.6 : Structure comparée des dicotylédones (à gauche) et monocotylédones (à droite).

Les épidermes sont des couches compactes de cellules qui protègent la feuille de l'extérieur et qui contribuent à son maintien. Leurs cellules ne contiennent généralement pas de chlorophylle. On y trouve des stomates qui assurent la conduction de l'air, sur les deux faces pour les monocotylédones et seulement sur la face inférieure pour les dicotylédones. Les épidermes sont recouverts d'une cuticule, couche de cire protégeant l'intérieur de la feuille d'une évaporation excessive d'eau. Elle peut cristalliser sous forme de paillettes et ainsi diffuser la lumière (Eglinton et Hamilton, 1967; Brakke *et al.*, 1993). Enfin, l'épiderme est parfois recouvert de poils, excroissances cellulaires de dimension variable, qui limitent l'évaporation et diffusent la lumière. Leur forme peut être ramifiée et leur structure est mono ou pluri-cellulaire (Grant, 1987 a).

Les nervures transportent les nutriments foliaires et participent au maintien général du limbe (Figure 1.3). Une enveloppe compacte de cellules entoure les vaisseaux conducteurs de sève brute (xylème) et de sève élaborée (phloème). Les nervures contiennent peu ou pas de pigments photosynthétiques.

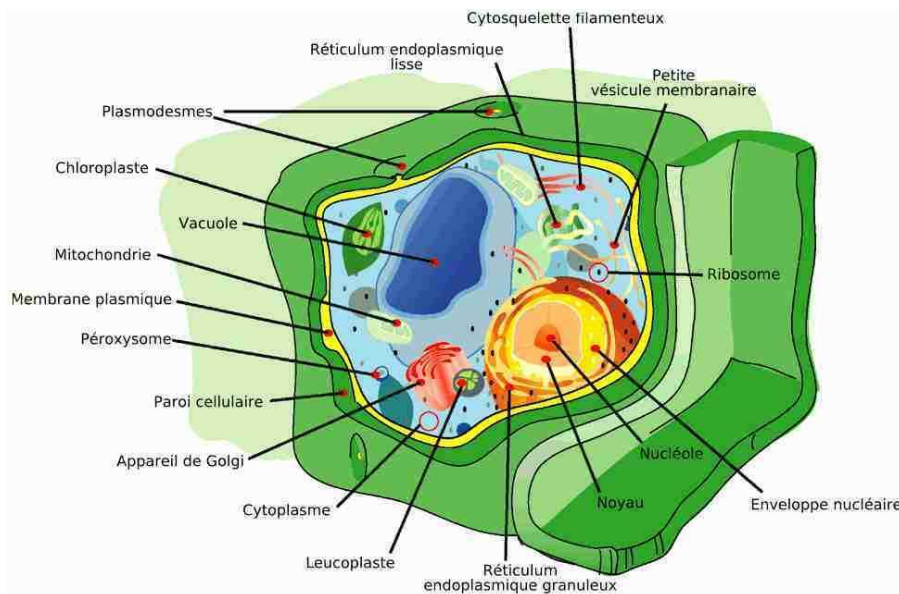


Figure 1.7 : La cellule végétale (image Liquid-2003).

		Unité	Gamme	Moyenne	Ecart-type
Epaisseur	(feuille)	µm	86,4 - 780,0	194,5	114,9
Eau		% (masse)	44,9 - 92,39	66,4	11,0
Eau		mg cm ⁻²	4,6 - 40,5	11,5	6,7
Matière sèche		mg cm ⁻²	1,9 - 13,5	4,5	10,7
Total		mg cm ⁻²		16,0	
Matière sèche	Cellulose	mg cm ⁻²	0,31 - 5,45	1,08	0,72
	Hemicellulose	mg cm ⁻²	0,02 - 3,32	0,8	0,64
	Lignine	mg cm ⁻²	0,03 - 3,05	0,6	0,57
	Protéine	mg cm ⁻²	0,48 - 1,72	0,96	0,29
	Amidon	mg cm ⁻²	0 - 0,98	0,11	0,15
	Total	mg cm ⁻²		3,55	
Pigments	Chlorophylle a	µg cm ⁻²	12,8 - 64,2	36,9	11,4
	Chlorophylle b	µg cm ⁻²	3,7 - 21,3	11,7	3,8
	Caroténoïdes	µg cm ⁻²	3,7 - 19,4	10,5	3,6
	Total	µg cm ⁻²		59,1	
Eléments	Carbone	mg cm ⁻²	0,79 - 6,65	2,53	1,20
	Azote	mg cm ⁻²	0,09 - 0,33	0,16	0,05
	Total	mg cm ⁻²		2,69	

Tableau 1.1 : Contenu biochimique des feuilles de la base de données LOPEX 93 (Hosgood *et al.*, 1994). Le pourcentage d'eau est relatif à la masse totale de la feuille.

2.2. Composition biochimique

La cellule végétale est schématisée sur la [figure 1.7](#). Ses dimensions sont de l'ordre de 10 µm. Elle est l'élément de base des tissus et contient la majeure partie des constituants foliaires. L'expérience LOPEX 93 (Hosgood *et al.*, 1994) a quantifié le contenu biochimique moyen d'une feuille sur 70 échantillons de plantes ligneuses ou herbacées ([tableau 1.1](#)). Une stoechiométrie du vivant est disponible dans [Sternier et Elser \(2002\)](#).

L'eau représente 50 % à 90 % de la masse d'une feuille fraîche. Elle se trouve en majeure partie dans les vacuoles des cellules. Le reste des composants est regroupé sous le terme générique de matière sèche (Fourty *et al.*, 1996). Les parois cellulaires sont composées de cellulose, hémicellulose et lignine. La [figure 1.8](#) présente les formules chimiques de la lignine, la cellulose et l'amidon. La cellulose, polymère de glucose ($(C_6H_{10}O_5)_n$ avec $200 < n < 14000$), est la molécule organique la plus abondante sur Terre (Alberts, 1989). Elle représente environ 50 % de la biomasse et 100 milliards de tonnes produites par an. La lignine est un composé phénolique ; c'est le polymère organique le plus abondant sur Terre après la cellulose. La lignine est très résistante à la compression et confère leur solidité aux parois cellulaires. L'amidon est un polysaccharide, comme la cellulose. C'est la principale molécule de stockage énergétique des végétaux. La cuticule contient de la cutine et des cires (Wilkinson, 1979). Les feuilles contiennent encore un grand nombre de protéines, la plus abondante étant la rubisco, ayant des fonctions diverses.

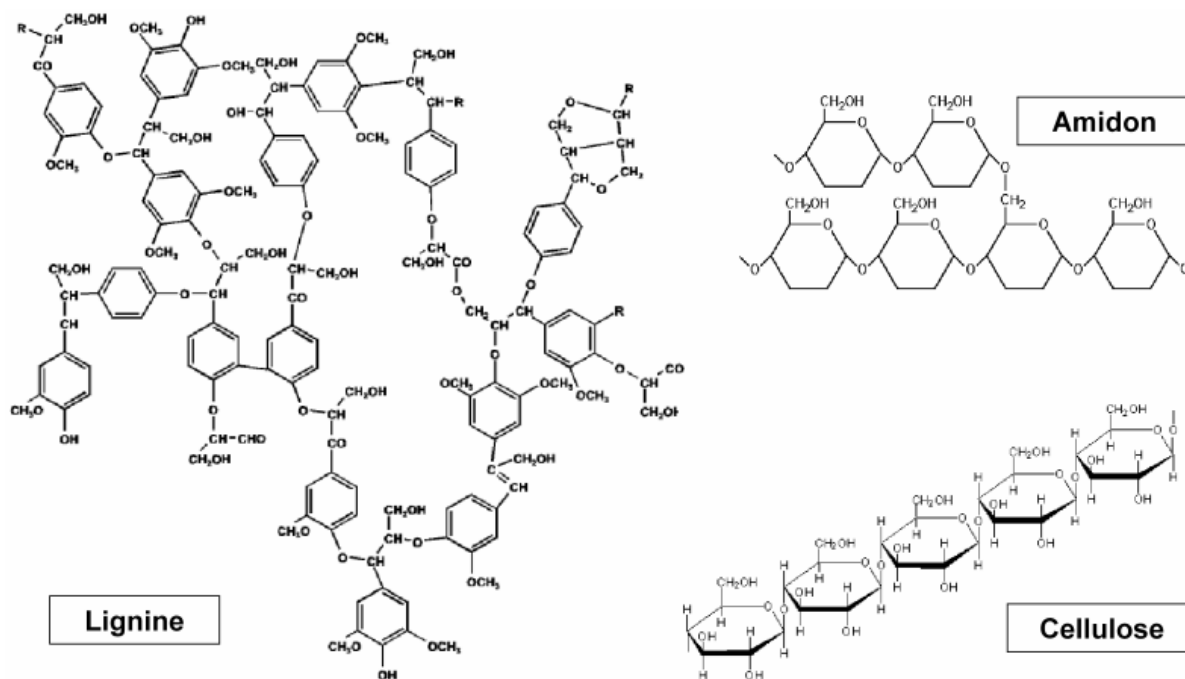


Figure 1.8 : Composition chimique de la cellulose (à gauche) et de l'amidon (à droite).

Les pigments foliaires sont les molécules responsables de la couleur des végétaux. Leur contribution à la masse de la feuille est négligeable (environ un millième). Les pigments chlorophylliens sont les molécules absorbant la lumière pour la photosynthèse. Ils regroupent la chlorophylle et les caroténoïdes. La chlorophylle est le plus important d'entre eux, en quantité et pour son rôle photosynthétique. De couleur verte, elle est contenue dans les chloroplastes. C'est une chlorine contenant un atome de magnésium. Elle existe sous deux formes dans les feuilles : la chlorophylle *a* et la chlorophylle *b*. La première est environ trois fois plus abondante que la seconde. Leurs formules chimiques et masses molaires sont données dans le [tableau 1.2](#). Les caroténoïdes sont des pigments regroupant le α -carotène, le β -carotène et les xanthophylles (lutéine, violaxanthine, *etc.*). Ce sont des pigments rouge, orange ou jaune, accessoires pour la photosynthèse et contenus dans les chloroplastes.

Les polyphénols sont des pigments regroupant les anthocyanes et les flavonoïdes. Ils n'interviennent pas dans la photosynthèse. Ils sont présents dans le cytoplasme des cellules de l'épiderme principalement. Les anthocyanes ont une couleur allant du rouge au bleu. Les polyphénols sont responsables de l'apparition de pigments bruns dans la feuille (voir [figure 1.4](#)). La [figure 1.9](#) présente des molécules de chlorophylle *a*, β -carotène et anthocyane. Chacune d'elle contient une dizaine ou une centaine d'atomes, ce qui produit une trop grande complexité pour simuler leur spectre d'absorption aujourd'hui.

	chlorophylle <i>a</i>	chlorophylle <i>b</i>	carbone
Formule chimique	C ₅₅ H ₇₂ O ₅ N ₄ Mg	C ₅₅ H ₇₀ O ₆ N ₄ Mg	C
Masse molaire (g mol ⁻¹)	893,5	907,5	12

Tableau 1.2 : Formules chimiques et masses molaires des chlorophylles *a* et *b*.

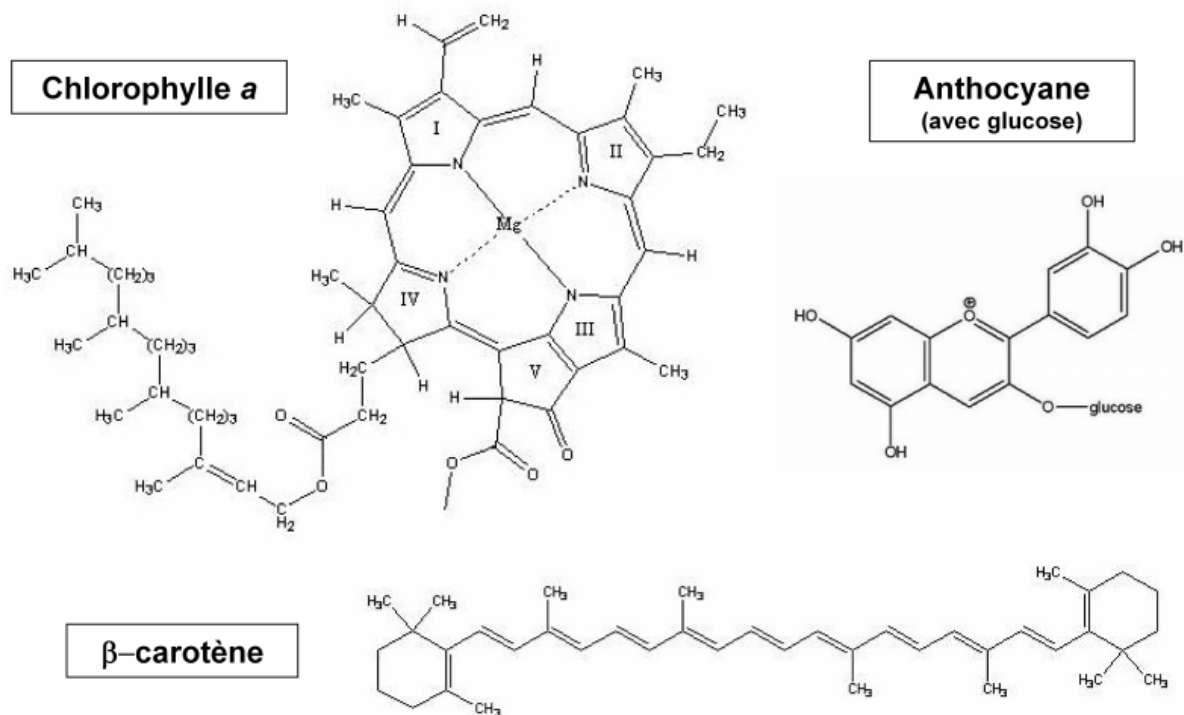


Figure 1.9 : Formule chimique de la chlorophylle *a*, du β -carotène et du complexe anthocyane+glucose.

2.3. Absorption des constituants foliaires

L'eau représente généralement plus de 50 % de la masse foliaire et se trouve sous forme liquide dans les vacuoles cellulaires. Les spectres d'absorption de l'eau dans la feuille et de l'eau pure sont presque identiques (Jacquemoud, communication personnelle). La [figure 1.10](#) représente le coefficient linéique d'absorption de l'eau pure (défini dans l'[annexe B](#)). L'absorption est négligeable dans le visible (400 nm – 700 nm), faible dans le proche infrarouge (700 nm – 1300 nm), et forte dans l'infrarouge moyen (1300 – 2500), avec des pics d'absorption à 1450 nm et 1950 nm. Les [figures 1.10 et 1.11](#) présentent l'absorbance de la matière sèche foliaire et des principaux pigments : chlorophylle, β -carotène et anthocyanes. L'absorbance est utilisée en biochimie pour quantifier l'absorption (voir [annexe B](#)). Elle est souvent présentée sur une échelle arbitraire pour comparer qualitativement des spectres d'absorption. La chlorophylle et les caroténoïdes absorbent la lumière bleue. La chlorophylle absorbe fortement le bleu et le rouge, et apparaît donc verte. Les anthocyanes, qui absorbent surtout le vert, sont responsables de la couleur rouge des feuilles à l'automne.

Pour mesurer l'absorption des constituants foliaires, il faut d'abord les isoler un à un. Cela ne pose pas de problème pour l'eau ou la cellulose. En revanche, les pigments chlorophylliens sont arrangés en photosystèmes au sein des chloroplastes, et l'absorption de molécules *in vitro* (par exemple en solution dans le méthanol) diffère de celle des molécules *in vivo*. Une perspective intéressante consiste à mesurer *in vitro* l'absorption d'un chloroplaste dans son ensemble. La membrane biologique du chloroplaste l'isole de son environnement, ce qui diminue la différence entre les spectres d'absorption *in vivo* et *in vitro*.

Les mécanismes d'absorption moléculaire sont décrits en terme de transition électronique et de transition de vibration des liaisons chimiques. Le **tableau 1.3** identifie des longueurs d'onde d'absorption des feuilles et les relie aux liaisons chimiques des constituants.

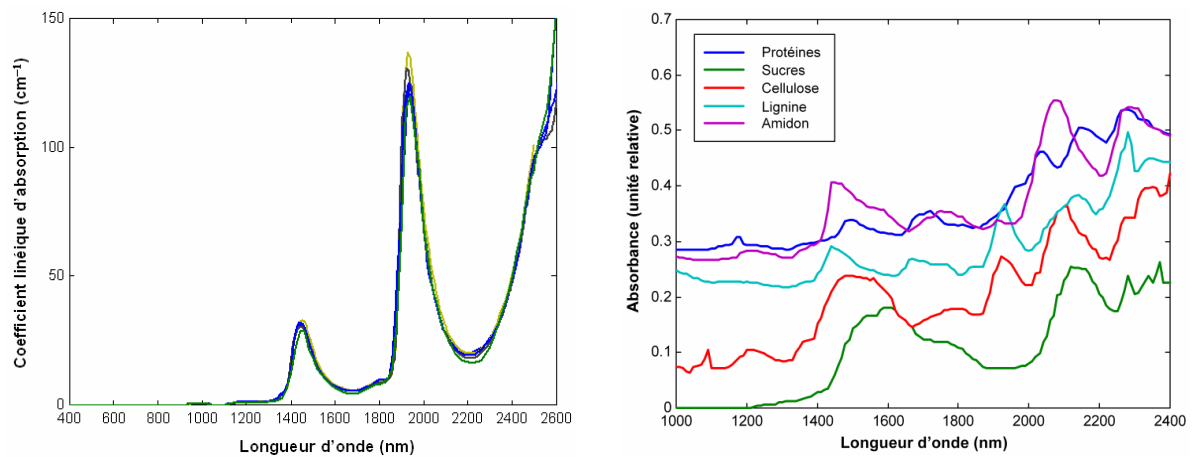


Figure 1.10 : Spectres d'absorption de l'eau (à gauche, données Segelstein, 1981), et de la matière sèche (à droite, données Wessman, 1990).

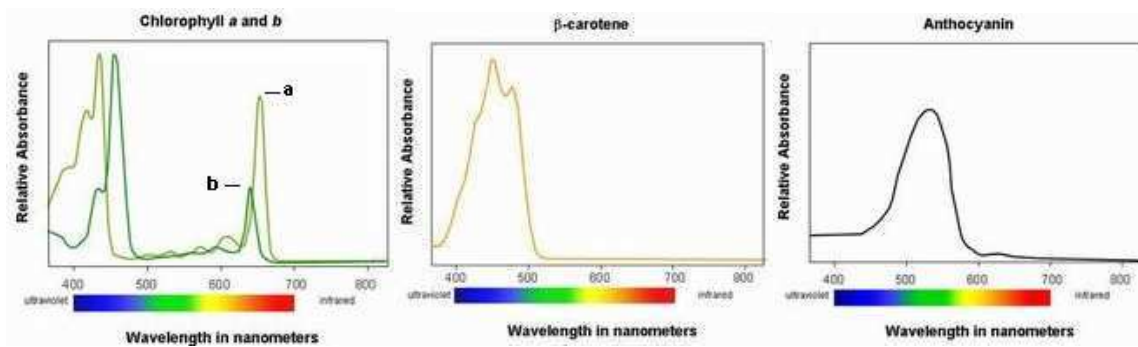


Figure 1.11 : Spectres d'absorption des chlorophylles *a* et *b* (à gauche), du β -carotène (au milieu) et des anthocyanes (à droite). Source "<http://harvardforest.fas.harvard.edu/research/leaves/>".

Wavelength (μm)	Electron Transition or Bond Vibration	Chemical(s)
0.43	Electron transition	Chlorophyll a
0.46	Electron transition	Chlorophyll b
0.64	Electron transition	Chlorophyll b
0.66	Electron transition	Chlorophyll a
0.91	C—H stretch, third overtone	Protein
0.93	C—H stretch, third overtone	Oil
0.97	O—H bend, first overtone	Water , starch
0.99	O—H stretch, second overtone	Starch
1.02	N—H stretch	Protein
1.04	C—H stretch, C—H deformation	Oil
1.12	C—H stretch, second overtone	Lignin
1.20	O—H bend, first overtone	Water , cellulose, starch, lignin
1.40	O—H bend, first overtone	Water
1.42	C—H stretch, C—H deformation	Lignin
1.45	O—H stretch, first overtone, C—H stretch, C—H deformation	Starch, sugar, lignin, water
1.49	O—H stretch, first overtone	Cellulose, sugar
1.51	N—H stretch, first overtone	Protein, nitrogen
1.53	O—H stretch, first overtone	Starch
1.54	O—H stretch, first overtone	Starch, cellulose
1.58	O—H stretch, first overtone	Starch, sugar
1.69	C—H stretch, first overtone	Lignin , starch, protein, nitrogen
1.78	C—H stretch, first overtone/O—H stretch/H—O—H deformation	Cellulose , sugar, starch
1.82	O—H stretch/C—O stretch, second overtone	Cellulose
1.90	O—H stretch, C—O stretch	Starch
1.94	O—H stretch, O—H deformation	Water , lignin, protein, nitrogen, starch, cellulose
1.96	O—H stretch, O—H bend	Sugar, starch
1.98	N—H asymmetry	Protein
2.00	O—H deformation, C—O deformation	Starch
2.06	N=H bend, second overtone/N=H bend/N—H stretch	Protein, nitrogen
2.08	O—H stretch/O—H deformation	Sugar, starch
2.10	O=H bend/C—O stretch/C—O—C stretch, third overtone	Starch , cellulose
2.13	N—H stretch	Protein
2.18	N—H bend, second overtone/C—H stretch/C—O stretch/C=O stretch/C—N stretch	Protein, nitrogen
2.24	C—H stretch	Protein
2.25	O—H stretch, O—H deformation	Starch
2.27	C—H stretch/O—H stretch/CH ₂ bend /CH ₂ stretch	Cellulose, sugar, starch
2.28	C—H stretch/CH ₂ deformation	Starch, cellulose
2.30	N—H stretch, C=O stretch, C—H bend, second overtone	Protein, nitrogen
2.31	C—H bend, second overtone	Oil
2.32	C—H stretch/CH ₂ deformation	Starch
2.34	C—H stretch/O—H deformation/C—H deformation/O—H stretch	Cellulose
2.35	CH ₂ bend, second overtone, C—H deformation, second overtone	Cellulose, protein, nitrogen

Tableau 1.3 : Origine physico-chimique de l'absorption des feuilles (Curran, 1989 et Ustin et al., 2004).

3. Propriétés optiques des feuilles

Parmi les diverses propriétés optiques d'un objet, il faut distinguer celles qui dépendent des géométries d'éclairage et d'observation, le facteur de réflexion par exemple, de celles qui n'en dépendent pas, l'indice de réfraction par exemple. Les premières sont qualifiées d' 'apparentes', et les secondes d' 'inhérentes'. Dans la modélisation physique, les propriétés inhérentes servent à prévoir les propriétés apparentes, et *vice versa*. Par exemple, l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption d'un milieu sont utilisés dans le cadre de l'optique géométrique pour calculer les facteurs de réflexion et de transmission de ce milieu.

Les propriétés optiques apparentes des feuilles caractérisent leur capacité à absorber, réfléchir ou transmettre la lumière. Lorsqu'une quantité de rayonnement incident Φ_0 interagit avec une feuille, une partie Φ_R est réfléchi et une partie Φ_T est transmise. La quantité de rayonnement absorbé Φ_A est transformée en une autre forme d'énergie. On négligera ici le phénomène de fluorescence étudié par [Lenk et al. \(2007\)](#). L'énergie totale se conservant, ces quatre quantités sont donc reliées par :

$$\Phi_0 = \Phi_R + \Phi_T + \Phi_A \quad \text{Eq. 1.1}$$

Le facteur de réflexion ou réflectance (R), le facteur de transmission ou transmittance (T) et le facteur d'absorption ou absorptance (A) sont définis par :

$$R = \frac{\Phi_R}{\Phi_0} \quad \text{Eq. 1.2}$$

$$T = \frac{\Phi_T}{\Phi_0} \quad \text{Eq. 1.3}$$

$$A = \frac{\Phi_A}{\Phi_0} \quad \text{Eq. 1.4}$$

$$R + T + A = 1 \quad \text{Eq. 1.5}$$

Les propriétés optiques apparentes R, T et A dépendent de la longueur d'onde du rayonnement (variations spectrales) et des géométries d'éclairage et d'observation (variations directionnelles). Elles quantifient ce qu'on appelle communément la couleur ou l'apparence d'un objet. Ainsi, les feuilles sont de couleurs vertes car leur réflectance spectrale atteint son maximum dans le visible pour 550 nm environ. Les miroirs sont des objets brillants car leur réflectance directionnelle est forte dans une direction et pratiquement nulle dans les autres. [Nicodemus et al. \(1977\)](#) ont proposé une nomenclature précise des propriétés optiques apparentes. Pour étudier les variations spectrales des propriétés optiques, on mesure généralement la réflectance et la transmittance directionnelle-hémisphérique. Cela signifie que le flux lumineux incident provient d'une direction bien définie mais que les flux réfléchi et transmis sont intégrés sur tout l'hémisphère.

3.1. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques

Pour étudier les variations spectrales des propriétés optiques apparentes, on peut utiliser une source de lumière polychromatique et un spectromètre, ou bien une source monochromatique et un compteur de photons. Les quantités accessibles à la mesure sont la réflectance et la transmittance. L'absorptance s'en déduit par Eq. 1.5. Lorsque la lumière interagit avec une feuille, la réflexion et la transmission se font dans toutes les directions. Si l'on veut connaître les quantités totales d'énergie réfléchie ou transmise, alors il faut sommer sur toutes les directions d'observation. Pour cela, on utilise une sphère intégrante (Rabideau *et al.*, 1946; www.labsphere.com) dont le fonctionnement est schématisé sur la figure 1.12.

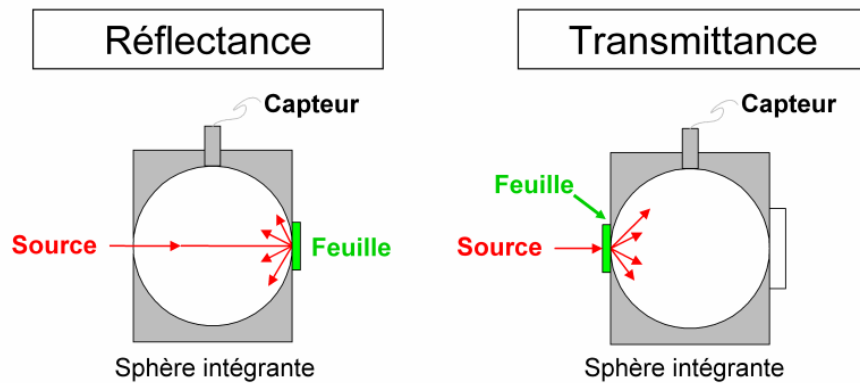


Figure 1.12 : Mesures directionnelles-hémisphériques avec une sphère intégrante.

La figure 1.13 présente les spectres de réflectance, transmittance et absorptance de la base de données LOPEX (Hosgood *et al.*, 1994), mesurés sur des feuilles vertes et fraîches. La réflectance et la transmittance des feuilles sont sensiblement égales. Cette caractéristique est probablement utile à la diffusion de l'énergie au sein du couvert végétal. La répartition, entre réflectance et transmittance, de l'énergie non absorbée dépend de la structure interne de la feuille. La feuille est constituée en moyenne de 70 % d'eau. Elle peut être considérée, de prime abord, comme une couche d'eau plane et homogène (Allen *et al.*, 1969), si bien que sa transmittance devrait être supérieure à sa réflectance, ce que l'on observe seulement chez les feuilles dont le mésophylle est de type compact. Le trait anatomique premier responsable de la diffusion est la présence de nombreux espaces intercellulaires où circulent les gaz nécessaires à la photosynthèse (Willstätter *et Stoll*, 1918). Ces espaces d'air causent de brusques discontinuités d'indice de réfraction, résultant en une forte probabilité de réflexion. Par ailleurs, la réflectance est d'autant plus grande que les cellules sont de forme irrégulière et de contenu hétérogène. Cela est cohérent avec l'augmentation de la réflectance résultant d'une augmentation de diffusion due aux inhomogénéités. L'étude des variations spectrales fait l'objet de la section suivante.

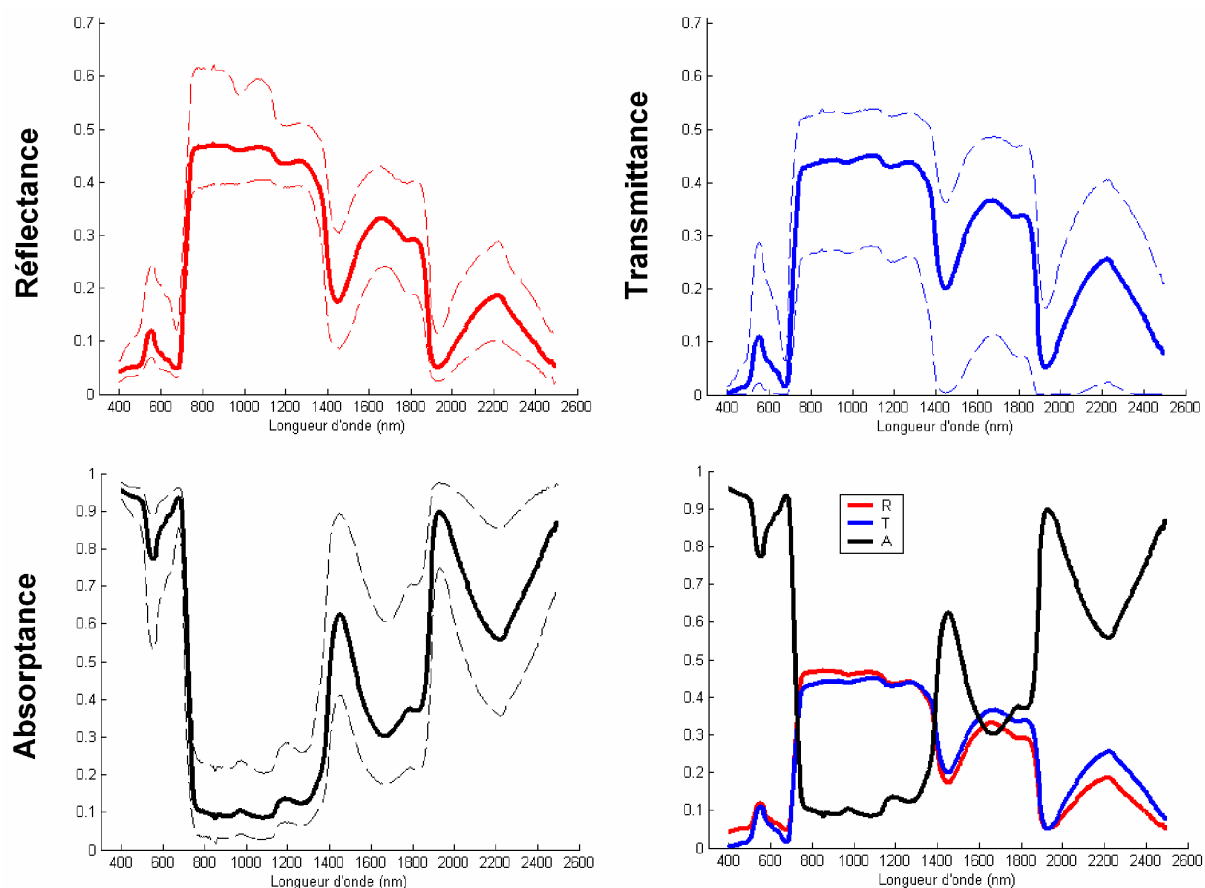


Figure 1.13 : Mesures directionnelles-hémisphériques. Spectres de 62 feuilles issus de la base de données LOPEX (Hosgood *et al.*, 1994). Spectres moyens, minimums et maximums de réflectance (en haut à gauche), transmittance (en haut à droite) et absorbance (en bas à gauche). Comparaison des spectres moyens de réflectance (R), transmittance (T) et absorbance (A) (en bas à droite).

3.2. Variations spectrales

Les feuilles se sont adaptées à l'éclairement solaire (tableau 1.4) qui leur fournit l'énergie nécessaire à la photosynthèse. Le spectre solaire est présenté sur la figure 1.14 où l'on distingue les principaux domaines spectraux : l'ultraviolet (UV), correspondant aux longueurs d'onde allant de 200 nm à 400 nm, le visible (VIS) de 400 nm à 700 nm, et l'infrarouge (IR) de 700 nm à 2500 nm environ. L'ensemble UV-VIS-IR constitue le domaine optique ou solaire.

Puissance radiative émise sur tout le spectre	$3,86 \times 10^{26}$ W
Eclairement au sommet de l'atmosphère sur tout le spectre	1373 W m^{-2}
Température équivalente du corps noir	5780 °K
Longueur d'onde du maximum d'émission	$\approx 500 \text{ nm}$
Eclairement global au sol entre 400 nm et 800 nm	$\approx 600 \text{ W m}^{-2}$

Tableau 1.4 : Caractéristiques de l'éclairement solaire. L'éclairement au sol entre 400 nm et 800 nm est rapporté par Meyzonnette et Lépine (2003) selon les données de US standard 76 sans aérosol.

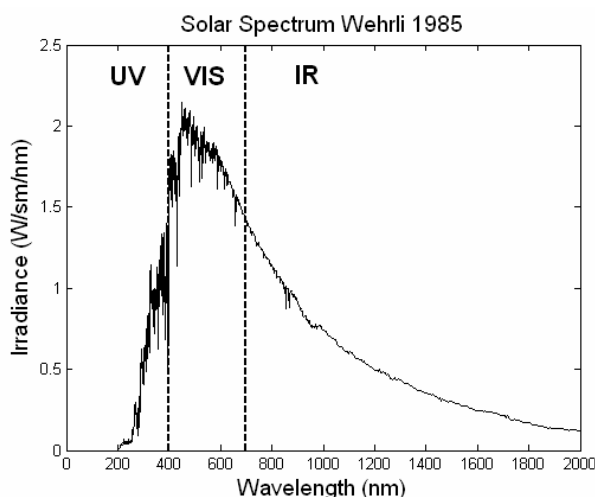


Figure 1.14 : Eclairage solaire au sommet de l'atmosphère ($W m^{-2} nm^{-1}$) en fonction de la longueur d'onde (nm), données issues de **Werhli (1985). On distingue le domaine ultraviolet (UV) aux très courtes longueurs d'onde, le domaine visible (VIS) entre 400 nm et 700 nm et le domaine infrarouge (IR) aux plus grandes longueurs d'onde.**

Gates et al. (1965), *Gausman (1985)* et *Guyot (1997)* fournissent des études très complètes sur l'absorption foliaire. Leurs résultats montrent que, à l'exception de l'infrarouge entre 700 nm et 2000 nm, l'absorption est supérieure à 50 % du rayonnement incident pour toutes les longueurs d'onde allant de 200 nm à 10 000 nm. En revanche l'absorption est faible, environ 10 % ou moins de l'énergie incidente, entre 700 nm et 1300 nm (domaine proche infrarouge). La transition brutale entre faible et forte absorption à 700 nm est une signature spectrale typique des feuilles qui porte le nom de *red edge*. L'absorption pour chaque domaine spectral est décrite ci-dessous et la **figure 1.15** présente simultanément des spectres d'absorption de la feuille, de l'eau et de la chlorophylle :

- Dans l'ultraviolet (200 nm - 400 nm), le rayonnement peut influencer le développement de la plante ou détériorer son système photosynthétique. Une protection est fournie par les épidermes et la cuticule qui atténuent fortement le rayonnement incident, alors qu'ils sont presque transparents dans le visible (*Krauss et al., 1997*). Les responsables de cette absorption sont des composants non pigmentaires tels que les acides nucléiques et phénoliques (*Grant et al., 2003; Solovchneko et Merzlyak, 2003; Pfündel et al., 2006*).
- Dans le visible (400 nm - 700 nm), l'éclairage solaire est maximum et les feuilles en absorbent environ 80 %. Cette absorption est principalement due aux pigments foliaires : les chlorophylles *a* et *b* présentent des pics d'absorption dans le bleu (450 nm) et le rouge (660 nm), et les caroténoïdes absorbent essentiellement le bleu. D'autres pigments, tels les plastoquinones et les composés flavonoïques, évoluent vers des pigments bruns au cours de la sénescence. Tous les pigments foliaires deviennent transparents au-dessus de 700 nm.
- Dans le proche infrarouge (700 nm - 1300 nm), les constituants foliaires absorbent peu. L'absorption totale est de 10 % environ, et l'énergie est presque intégralement réfléchi ou transmise.
- Enfin dans le moyen infrarouge (1300 nm - 2500 nm), l'absorption de l'eau devient prépondérante, avec des maxima à 1,45, 1,95 et 2,5 μm , et masque la faible absorption de la matière sèche.

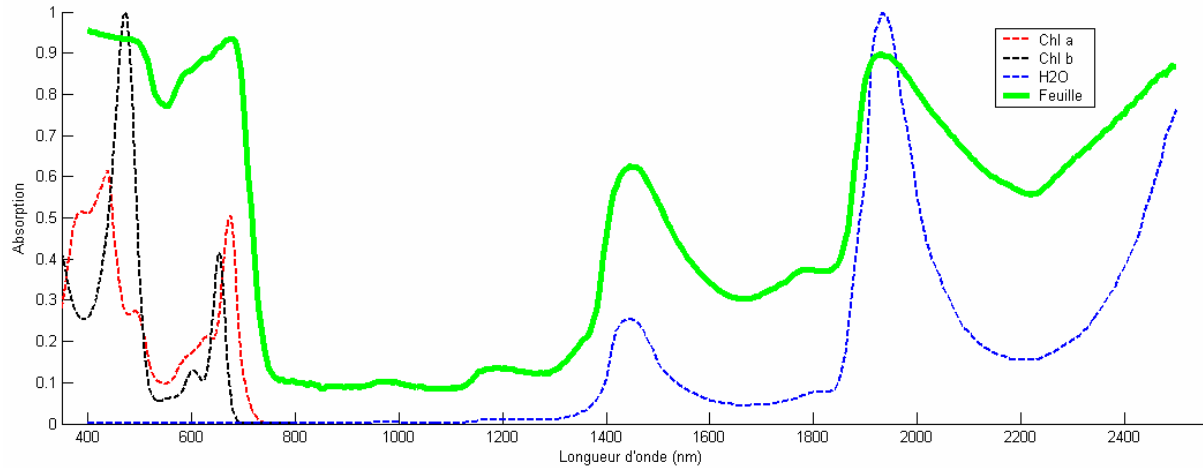


Figure 1.15 : Absorption d'une feuille (trait plein vert) et des constituants foliaires *in vitro* : eau (pointillés bleu), chlorophylle *a* (pointillés rouge) et chlorophylle *b* (pointillés noir). Sources : absorbance moyenne d'une feuille (LOPEX), spectres d'absorption normalisés arbitrairement : eau (Segelstein, 1981), chlorophylles *a* et *b* (Maier, 2000).

3.3. Variations avec l'angle d'incidence

La réflectance et la transmittance directionnelles-hémisphériques sont susceptibles de varier avec la direction de l'éclairement. Dans l'expérience LOPEX, l'échantillon et la sphère intégrante sont disposés à l'intérieur de l'enceinte du spectromètre. Il est possible de sortir l'échantillon et la sphère et de relier cette dernière au spectromètre par une fibre optique pour le transport de l'énergie lumineuse. Hume *et al.* (2002) ont développé un tel dispositif instrumental présenté sur la figure 1.16. Les auteurs mesurent la transmittance directionnelle hémisphérique $T(\theta_s)$ en fonction de l'angle zénithal d'éclairement et la comparent à sa valeur en incidence normale. Pour cela, ils définissent la quantité $\tau_{rel}(\theta_s)$:

$$\tau_{rel}(\theta_s) = \frac{T(\theta_s)}{T(\theta_s = 0)} \quad \text{Eq. 1.6}$$

Les valeurs mesurées de $\tau_{rel}(\theta_s)$ sont présentées dans le tableau 1.5. On constate que la transmittance décroît fortement lorsque l'incidence augmente, ce qui se traduit par une décroissance de $\tau_{rel}(\theta_s)$.

	Bande spectrale (nm)	Angle zénithal d'éclairement θ_s				
		15°	30°	45°	60°	75°
Dicotylédones	725 - 1100	0,99	0,89	0,68	0,40	0,15
	580 - 680	0,98	0,82	0,57	0,32	0,18
Monocotylédones	725 - 1100	0,94	0,84	0,65	0,42	0,20
	580 - 680	0,92	0,76	0,54	0,33	0,18

Tableau 1.5 : Valeurs de τ_{rel} mesurées sur 7 dicotylédones et 9 monocotylédones par Hume *et al.*, (2002).

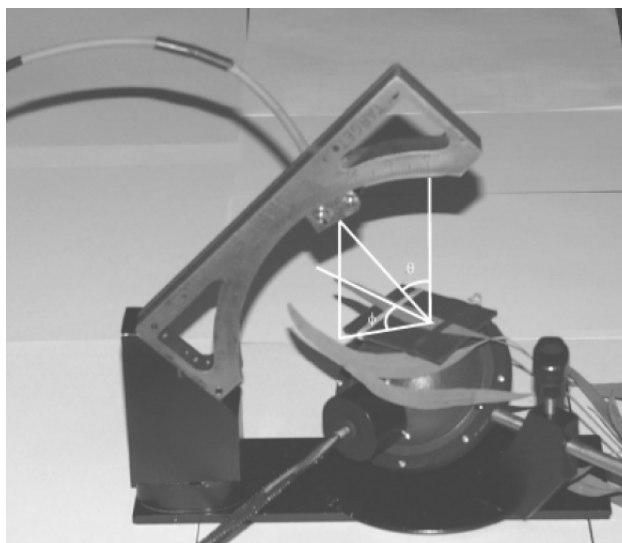


Figure 1.16 : Dispositif pour la mesure de la DHTF des feuilles, reproduit à partir de Hume *et al.* (2002) avec l'aimable autorisation de Michael Roderick.

Brandt et Tageyeva (1967), cités par Ross (1981), étudient aussi l'absorption en fonction de l'angle d'incidence. La source est un projecteur de cinéma de 500 W et les espèces étudiées sont la laitue (*Lactuca sativa*) et la rose de chine (*Hibiscus rosa sinensis*). Leurs résultats présentés dans le tableau 1.6 suggèrent que la transmission décroît avec l'angle d'incidence en accord avec Hume *et al.* (2002) bien que cette décroissance soit plus faible chez Brandt et Tagayeva. En contrepartie la réflectance augmente et l'absorptance reste stable jusqu'à 60° d'incidence puis décroît. Notons enfin que Woolley (1971) avait déjà observé l'augmentation de la réflectance directionnelle-hémisphérique avec θ_s sur des feuilles de maïs.

	Laitue (fine, vert pâle)		Rose de Chine (épaisse, brillante)	
	$\theta_s = 0^\circ$	$\theta_s = 75^\circ$	$\theta_s = 0^\circ$	$\theta_s = 75^\circ$
R	0,14	0,25	0,065	0,13
T	0,175	0,10	0,06	0,04
A	0,685	0,66	0,875	0,83

Tableau 1.6 : Réflectance, transmittance et absorptance dans le visible mesurées par Brandt et Tageyeva (1967), reproduit à partir de Ross (1981).

3.4. Facteurs anatomiques

L'épaisseur de la cuticule comme la présence de poils jouent sur la réflectance des feuilles. La figure 1.17 présente des photographies de laurier et de noisetier (Okayama, 1996). La première apparaît brillante car une cuticule lisse et épaisse recouvre son épiderme supérieur alors que la seconde apparaît mate car sa cuticule est plus fine et son épiderme porte un fin duvet de poils. Dans le cas d'une forte densité de poils (face inférieure des feuilles du peuplier blanc *Populus alba* par exemple), la réflectance peut atteindre des niveaux anormalement élevés (Billings et Morris, 1951; McClendon, 1984). Chez les dicotylédones, la réflectance de la face inférieure est généralement plus élevée que celle de la face supérieure. Cela est dû à la forte diffusion dans le parenchyme spongieux qui contribue à la réflectance de la face inférieure.



Figure 1.17 : Feuilles de laurier (à gauche), de noisetier (au milieu) et de peuplier blanc (à droite).

La feuille est un organisme vivant dont l'anatomie et le contenu biochimique évoluent au cours du temps. On distingue les feuilles jeunes, matures ou sénescentes. Les jeunes feuilles sont plus compactes et homogènes que les matures, elles transmettent plus de lumière qu'elles n'en réfléchissent. Elles deviennent moins homogènes en vieillissant et leur réflectance augmente. Chez la feuille mature, la chlorophylle de couleur verte masque les caroténoïdes de couleur jaune-orange et les anthocyanes de couleur rouge. Durant la sénescence, l'absorption diminue au profit de la réflectance et de la transmittance (Brakke *et al.*, 1989). Les parois cellulaires des feuilles dicotylédones s'affaissent, laissant plus de place aux espaces d'air Boyer *et al.* (1988). Parallèlement, la dégradation des chlorophylles remplacées par des pigments bruns commence par le haut du mésophylle.

La teneur en eau agit indirectement sur la réflectance et la transmittance pour toutes les longueurs d'onde, puisque l'eau, principal constituant foliaire, contribue à l'homogénéité de la feuille (Maracci *et al.*, 1991). Cela est vérifié par des expériences sur des feuilles infiltrées avec de l'eau ou de l'huile afin de diminuer l'hétérogénéité sans modifier le contenu en pigments (Woolley, 1971). La structure interne de la feuille est aussi influencée par le climat lumineux et l'on distingue par leur structure les feuilles d'ombre et de lumière. Du point de vue des pigments, certaines espèces contiennent de fortes concentrations en anthocyanes dans l'épiderme. Il est aussi possible d'obtenir des feuilles albinos dépourvues de chlorophylle d'où une très faible absorption (Maas et Dunlap, 1989).

La structure de la feuille modifie ses niveaux de réflectance et de transmittance sur tout le spectre. Ces derniers servent donc d'indicateurs pour la caractérisation de l'anatomie foliaire. Cependant l'information sur la répartition angulaire des flux lumineux est perdue lors du recours aux sphères intégrantes pour la mesure. Cette répartition angulaire dépendant elle aussi de la structure de la feuille, son étude doit aider à comprendre l'interaction feuille-lumière.

4. Propriétés optiques bi-directionnelles

Cette section définit le concept de fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle et présente les méthodes et appareils utilisés pour la mesurer. La distinction entre composante spéculaire et diffuse est ensuite introduite, avant de passer en revue les mesures sur les feuilles ayant donné lieu à publication.

4.1. Fonction de distribution de la réflectance bi-directionnelle

Les nombreuses études sur les propriétés optiques bi-directionnelles des feuilles utilisent des grandeurs physiques telles que l'indicatrice de luminance, le facteur de réflexion bi-directionnel ou la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (BRDF). Cette dernière s'est imposée aujourd'hui pour la caractérisation des propriétés optiques bidirectionnelles des surfaces. Elle a été introduite au sein d'une nomenclature générale de la réflectance par [Nicodemus *et al.* \(1977\)](#) et étendue au cas de la transmission ([Woolley, 1971](#); [Dereniak *et al.*, 1982](#)) avec la Bidirectional Transmittance Distribution Function (BTDF). Une revue récente des nomenclatures en télédétection est disponible dans [Schaepman-Strub *et al.* \(2006\)](#).

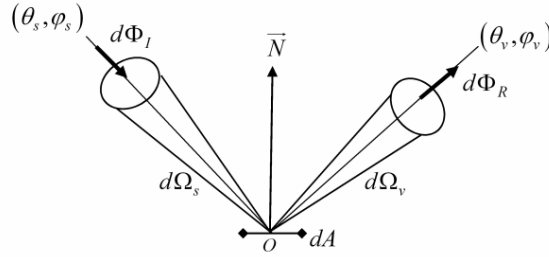


Figure 1.18 : Schéma illustrant la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (BRDF).

La BRDF ([figure 1.18](#)) est un concept physique mettant en oeuvre des quantités infinitésimales. Considérons les points (x, y) d'une surface infinitésimale dA éclairée dans l'angle solide $d\Omega_s$ autour de la direction (θ_s, φ_s) et observée dans l'angle solide $d\Omega_v$ autour de la direction (θ_v, φ_v) . Le flux incident et le flux réfléchi sont respectivement $d\Phi_i$ et $d\Phi_r$. On a :

$$BRDF = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. 1.7}$$

ce qui s'écrit :

$$BRDF = \frac{dL_r}{dE} \quad \text{Eq. 1.8}$$

en appelant luminance la quantité :

$$dL_r = \frac{d\Phi_r}{dA \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. 1.9}$$

et éclairement la quantité :

$$dE = \frac{d\Phi_i}{dA} \quad \text{Eq. 1.10}$$

La BRDF peut s'interpréter ainsi : la luminance L émise par un échantillon est la conséquence de l'éclairement E qu'il reçoit. On suppose une relation linéaire entre la cause (l'éclairement) et la conséquence (la luminance) : $L = BRDF \times E$ où la BRDF est indépendante de E . Dans certaines circonstances, la BRDF peut dépendre de l'éclairement mais cela sort du cadre de cette thèse. La BRDF est une caractéristique de l'échantillon qui dépend des directions d'éclairement et d'observation, ainsi que de la longueur d'onde.

La BRDF quantifie l'énergie réfléchie dans une direction particulière. L'énergie réfléchie dans toutes les directions de l'hémisphère est quantifiée par la réflectance directionnelle-hémisphérique (Directional Hemispherical Reflectance Factor, DHRF) :

$$DHRF = \int BRDF(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. 1.11}$$

Ces notions de photométrie sont détaillées dans l'[annexe C](#).

4.2. Méthodes d'estimation des réflectances bi-directionnelles

D'après sa définition, la BRDF correspond à des faisceaux lumineux incident et réfléchi compris dans des angles solides infinitésimaux. En pratique, ces angles solides sont finis et la quantité mesurée est l'intégrale angulaire de la BRDF sur les domaines correspondants. Cela amène à définir une nouvelle quantité, bi-conique plutôt que bi-directionnelle. Pour la simplicité de l'exposé, le terme BRDF sera utilisé pour désigner les mesures bi-coniques. Cette confusion est d'autant moins importante que les angles solides incident et réfléchi sont petits.

Pour calculer la BRDF d'un échantillon, il faut mesurer sa luminance et l'éclairement qu'il reçoit. Afin d'éviter les calibrations fastidieuses exigées par ces mesures, il existe des méthodes nécessitant une information sur l'échantillon ou bien sur un échantillon de référence ([Briottet et al., 2004](#)). La première repose sur la mesure de la BRDF d'un échantillon dont on connaît le Directional Hemispherical Reflectance Factor (DHRF). Ce dernier permet d'exprimer l'éclairement en fonction de la luminance de l'échantillon et par conséquent rend superflu la mesure de l'éclairement. Soit ρ la facteur de réflexion directionnel-hémisphérique :

$$\rho = \int BRDF(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v = \int \frac{L(\theta_v, \varphi_v)}{E} \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. 1.12}$$

On en déduit l'éclairement :

$$E = \frac{1}{\rho} \int L(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. 1.13}$$

que l'on peut remplacer dans la définition de la BRDF pour obtenir :

$$BRDF = \rho \frac{L(\theta_v, \varphi_v)}{\int L(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. 1.14}$$

Cette première méthode sera utilisée pour estimer la BRDF de notre échantillon de référence dont on connaît le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique.

La deuxième méthode repose sur la mesure de la BRDF d'un échantillon par rapport à un échantillon de référence de BRDF connue. Les définitions de la BRDF pour la référence 'ref' et l'échantillon 'feuille' s'écrivent :

$$BRDF_{ref} = \frac{L_{ref}}{E} \quad \text{Eq. 1.15}$$

$$BRDF_{feuille} = \frac{L_{feuille}}{E} \quad \text{Eq. 1.16}$$

Si l'éclairement est le même dans les deux équations, alors on peut écrire la BRDF de la feuille en fonction de celle de la référence :

$$BRDF_{feuille} = \frac{L_{feuille}}{L_{ref}} BRDF_{ref} \quad \text{Eq. 1.17}$$

où L_{feu} et L_{ref} sont mesurés avec le même éclairement. Les mesures de BRDF des feuilles présentées dans cette thèse reposent sur cette dernière méthode où la BRDF de la référence est supposée connue.

Les deux méthodes présentées ci-dessus doivent se passer de calibration absolue. Vérifions le dans le cas où la luminance L de l'échantillon caractérisé est proportionnelle au signal brut fourni par l'appareil V :

$$L(\theta_v, \varphi_v) = K \times V(\theta_v, \varphi_v) \quad \text{Eq. 1.18}$$

En remplaçant dans [Eq. 1.14](#) et [Eq. 1.17](#), on obtient respectivement :

$$BRDF(\theta_v, \varphi_v) = \rho \frac{V(\theta_v, \varphi_v)}{\int V(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. 1.19}$$

$$BRDF_{feu}(\theta_v, \varphi_v) = \frac{V_{feu}(\theta_v, \varphi_v)}{V_{ref}(\theta_v, \varphi_v)} BRDF_{ref}(\theta_v, \varphi_v) \quad \text{Eq. 1.20}$$

Le facteur de calibration K a complètement disparu. Pour [Eq. 1.19](#) cela n'est possible que si K est indépendant de la direction d'observation. Pour [Eq. 1.20](#) il suffit que K soit indépendant de la nature de l'échantillon.

4.3. Appareils de mesure

La mesure des BRDF s'est développée dans des domaines allant du contrôle industriel à l'étude des régolites planétaires en passant par la télédétection de l'environnement, le diagnostic médical, la métrologie des surfaces optiques, ou encore l'imagerie de synthèse. Les instruments doivent avoir une résolution spectrale, directionnelle et photométrique (ou radiométrique). La Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) généralise la BRDF à tous les cas de diffusion, réflexion ou transmission. [Asmail \(1991\)](#) en a écrit une synthèse bibliographique systématique avec 171 entrées dont 43 concernent la présentation d'un appareil de mesure. Des revues récentes en télédétection de la végétation et des sols peuvent être trouvées dans [Briottet et al. \(2004\)](#) (appareils de laboratoire) et [Bruegge et al. \(2004\)](#) (appareils d'extérieur).

En télédétection de l'environnement, des instruments adaptés aux mesures en extérieur pour divers types de surfaces sont présentés dans Sandmeier et Itten (1999) (végétation et sols), Demircan *et al.* (2000) (surfaces variées), Voss *et al.* (2000) (milieux marins), Abdou *et al.* (2001) (tout type de surface), Painter *et al.* (2003) (neige), Leuning *et al.* (2006) (végétation). D'autres sont conçus pour des mesures en intérieur : Serrot *et al.* (1998) (surfaces variées), Solheim *et al.* (2000) et Biliouris *et al.* (2003) (végétation), Meister (2000) (matériaux urbains). Notons parmi les instruments récents celui de Brissaud *et al.* (2004) dédié à la caractérisation des matériaux planétaires.

Parmi les autres applications, on trouve des instruments pour la métrologie mettant en avant leur grande précision comme le Spectral Tri-function Automated Reference Reflectometer (STARR) du National Institute of Standards and Technology (NIST, Etats-Unis), ou le goniomètre du TNO Institute of Applied Physics (Hollande) présenté par Olij *et al.* (1997). McGuckin *et al.* (1996) ont développé un instrument pour la caractérisation des échantillons de référence (diffuseurs parfait lambertiens). Dereniak *et al.* (1982) présentent leur instrument pour des mesures en réflectance et en transmittance sur des échantillons transparents, White *et al.* (1998) pour la thermométrie radiative. Les spectro-gonio-photomètres sont aussi utilisés pour quantifier la brillance des peintures ou plastiques (Noel *et al.*, 2006 ; Obein *et al.*, 2004). Dans le cadre de l'imagerie de synthèse, Lu *et al.* (1998) ont développé un instrument original pour des mesures sur du velours. L'Institut des Nano-Sciences de Paris (INSP) a développé son propre instrument pour la caractérisation de surfaces variées. Enfin, citons parmi les nombreux goniomètres commerciaux ceux du TNO TPD (<http://www.tno.nl/omt/>), de la Surface Optics Corporation (<http://www.surfaceoptics.com/>), ou de la société Eldim (<http://www.eldim.fr/>).

4.4. Composante diffuse et composante spéculaire

Il existe deux comportements théoriques et opposés dans la réflexion de la lumière sur une surface (figure 1.19). Le premier appelé spéculaire concentre toute l'énergie réfléchie dans une direction donnée appelée direction spéculaire. Le second, diffus, répartit l'énergie réfléchie dans toutes les directions. Les miroirs réfléchissent spéculairement la lumière alors que les feuilles, en première approximation, la diffusent à cause de leur grande inhomogénéité. Pour un échantillon plan et non rugueux, la composante spéculaire est la partie de l'énergie qui est réfléchie suivant la loi de Snell-Descartes en optique géométrique. Cette réflexion se fait dans la direction spéculaire et ne dépend que de la direction d'incidence et de l'indice de réfraction. Si les variations spectrales de ce dernier sont négligeables, alors la composante spéculaire est indépendante de la longueur d'onde. Une surface plane dans son ensemble mais rugueuse à plus petite échelle peut être considérée comme un ensemble de facettes sur lesquelles s'opère la réflexion spéculaire. Il en résulte la même invariance spectrale mais une répartition de l'énergie réfléchie autour de la direction spéculaire. La composante diffuse peut être définie de deux manières. La première consiste à lui attribuer tout ce qui n'est pas spéculaire alors que la deuxième en fait une composante lambertienne.

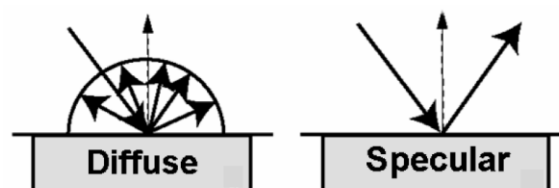


Figure 1.19 : Schématisation de la réflexion diffuse (à gauche) et de la réflexion spéculaire (à droite).

La composante diffuse résulte de l'interaction de la lumière avec le volume de la feuille alors que la composante spéculaire est due à la réflexion en surface. Les pigments chlorophylliens étant situés dans le parenchyme de la feuille et non dans son épiderme, leur absorption marque la composante diffuse et non la composante spéculaire. Il en résulte deux signatures spectrales différentes illustrées sur la [figure 1.20](#). Une autre signature de la composante spéculaire est sa polarisation. D'après les lois de l'électromagnétisme, la réflexion en surface conserve certaines polarisations de la lumière alors que la réflexion de volume, résultant de nombreuses interactions, ne les conserve pas. L'étude de la polarisation de la lumière réfléchie en fonction de celle de la lumière incidente fournit donc un moyen supplémentaire de distinguer les deux composantes.

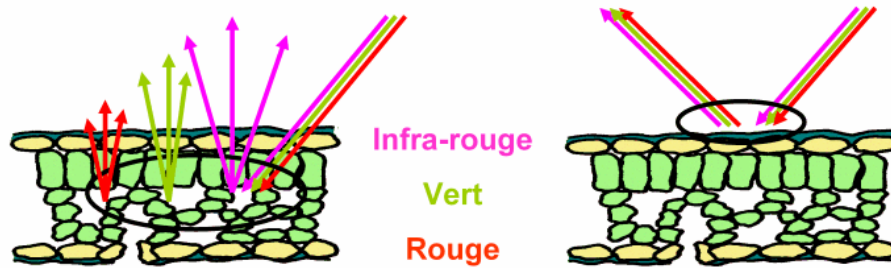


Figure 1.20 : Réflexion de volume (à gauche) et réflexion de surface (à droite).

En transmission, la lumière doit traverser le milieu diffusant de la feuille, par conséquent la composante diffuse est la seule à considérer en transmission. Cette composante, qui a interagi avec tout le volume, porte la signature spectrale des constituants foliaires et dépend peu de la direction d'observation.

4.5. Revue des mesures des propriétés bi-directionnelles des feuilles

Les propriétés optiques bi-directionnelles décrivent les variations de la réflectance, la transmittance et l'absorptance de la feuille avec les directions d'éclairement et d'observation. La feuille étant un objet inhomogène, elle diffuse la lumière incidente dans toutes les directions ([Willstätter et Stoll, 1918](#)). En étudiant la distribution angulaire des rayonnements réfléchis et transmis, [Seybold \(1933\)](#) conclut que cette diffusion n'est pas lambertienne ([définition en annexe C](#)). [Metzner \(1957\)](#) est l'un des premiers à publier des mesures de réflectance bidirectionnelle ([figure 1.21](#)). Le [tableau 1.7](#) présente un récapitulatif qui se veut exhaustif des mesures optiques bi-directionnelles de feuilles ayant donné lieu à publication. Les lignes de ce tableau sont classées par ordre chronologique.

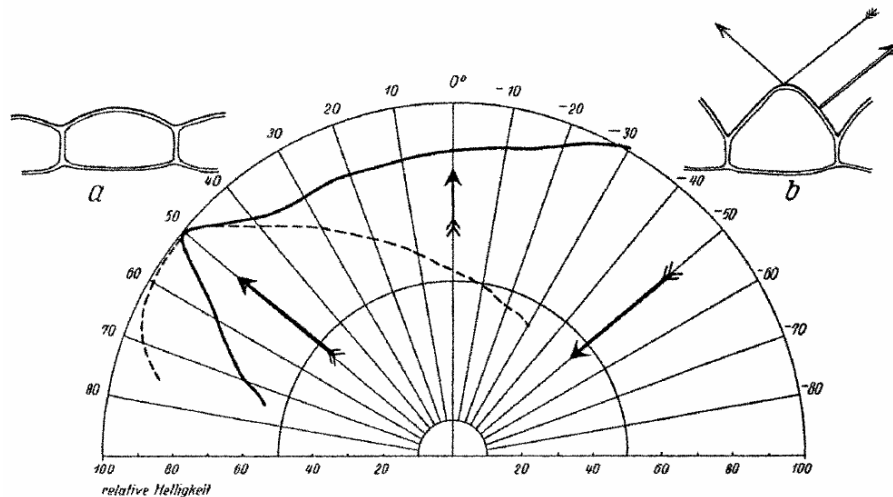


Figure 1.21 : Réflectance bi-directionnelle d'une feuille *Philodendron surinamense*. En trait pointillé : face supérieure (schéma a). En trait plein : face inférieure (schéma b). Reproduit à partir de Metzner (1957).

Entre 1960 et 1966, de nombreuses publications sont parues dans des revues russophones dont certaines ont été traduites en anglais. Les principaux auteurs sont Shul'gin, Moldau et Khazanov. Ce dernier a développé un goniomètre dont les mesures montrent que la réflectance des feuilles n'obéit pas à la loi de Lambert (Shul'gin *et al.*, 1960). Ils observent une composante diffuse qui augmente avec l'épaisseur de la feuille. Shul'gin et Khazanov (1961) utilisent la polarisation pour discerner la composante spéculaire puis Shul'gin et Moldau (1964) proposent d'utiliser le degré de polarisation comme indicateur de processus physiologiques affectant la surface de la feuille. Moldau (1965) observe que la composante polarisée ne varie pas avec la longueur d'onde, réunissant ainsi deux signatures de la composante spéculaire. Ces travaux serviront notamment à développer un modèle d'interaction feuille-lumière (Moldau, 1967).

Ces travaux vont être repris en Europe et aux Etats-Unis à partir des années 70. L'année 1971 est marquée par la publication de trois articles importants : Breece et Holmes (1971), Woolley (1971) et Howard (1971). Breece et Holmes (1971) sont les premiers à utiliser le concept de fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) introduit par Nicodemus (1968) et depuis largement répandu. Ils définissent aussi son équivalent en transmission, la fonction de distribution de transmittance bi-directionnelle (BTDF). Ils observent que, dans le proche infrarouge où la lumière est peu absorbée, la répartition directionnelle est principalement diffuse alors que, dans le visible où l'absorption est forte, la réflexion spéculaire entraîne une forte anisotropie. Woolley (1971) fournit une étude approfondie des propriétés optiques des feuilles. Il trouve que la composante spéculaire est jusqu'à 10 fois plus importante que la composante diffuse dans certaines directions d'observation. Il estime à 50 % la contribution du spéculaire à la réflexion dans le visible et à un stéradian l'angle solide correspondant. Il note aussi que, pour des feuilles rugueuses, le maximum de réflexion n'est pas observé dans la direction spéculaire correspondant à un échantillon plan mais à des angles zénithaux plus importants, phénomène étudié sous le nom de *off specular reflection* par Torrance et Sparrow (1967) sur des surfaces optiques. Il procède aussi à des mesures de polarisation identifiant la contribution spéculaire dans la direction du maximum de réflexion. Enfin l'auteur n'identifie pas de phénomène de *hot spot* contrairement à Howard (1969, 1971). Le *hot spot* est connu à l'époque en interprétation de photographies aériennes et caractérisé par une forte luminosité dans les zones de l'image où l'ombre est minimisée. Pour des feuilles de laurier à l'aspect brillant, un maximum local de réflectance est observé lorsque l'angle de phase (angle entre les directions d'incidence et d'observation) est nul. Il est responsable d'une augmentation de la réflectance de 20 % environ. L'intensité du *hot spot* est maximale en incidence normale et sa forme (en pic centré autour de l'angle de phase nul) s'accroît lorsque l'incidence augmente.

Référence	RT	θ_s (°)	θ_v (°)	ϕ_v (°)	λ (nm)	Espèce	P	
Seybold, 1933	RT						N	
Metzner, 1957	R	50		PP				
Shul'gin <i>et al.</i> , 1960	R	0	10 → 80	PP	400 → 600	~30 espèces	N	
Shul'gin et Khazanov, 1961							O	
Shul'gin et Moldau, 1964								
Moldau, 1965	R	0, 30, 60	-60 → 60	PP	495, 725		O	
Howard, 1969	R		$\theta_v = \theta_s$	PP		<i>Eucalyptus</i>	N	
Breece et Holmes, 1971	RT	0, 15, 30, 45, 60	0 → 90	PP	19 bandes dans 375 → 1000	<i>Glycine max</i> , <i>Zea mays</i>	N	
Howard, 1971	R	0, 15, 30, 45, 60	0 → 90	PP	VIS	<i>Eucalyptus</i>	N	
Woolley, 1971	R	15, 45	15 → 80	PP	VIS	<i>Glycine max</i> , <i>Philodendron</i> , <i>Zea mays</i>	O	
McClendon, 1984	R	60	0 ; 60	PP	632,8	<i>Populus alba</i>	N	
Vanderbilt <i>et al.</i> , 1985								
Vanderbilt et Grant, 1986	R	55	55	PP	5 bandes dans 450 → 730		O	
Grant, 1987a								
Grant <i>et al.</i> , 1987b	R	idem Vanderbilt et Grant 1986					<i>Sorghum bicolor</i>	
Grant <i>et al.</i> , 1987c	R	idem Vanderbilt et Grant 1986					<i>Coleus blumei</i>	
Salisbury <i>et al.</i> , 1987	R	8 → 50	8 → 50	PP	400 → 800	4 espèces		
Woessner et Hapke, 1987	R	0, 60		PP	4 bandes dans 400 → 820	<i>Trifolium repens</i>	O	
Kestner <i>et al.</i> , 1988	RT	0, 30, 60	0 → 70	PP	632,8	<i>Acer rubrum</i> , <i>Quercus rubra</i>	N	
Vanderbilt et De Venecia, 1988								
Brakke <i>et al.</i> , 1989	RT	Voir Kestner <i>et al.</i> (1988)					<i>Acer rubrum</i> , <i>Quercus rubra</i>	N
Sarto <i>et al.</i> , 1989	R	0 → 82	0 → 82	0 → 360	VIS	<i>Magnolia</i>	O	
Walter-Shea <i>et al.</i> , 1989	RT	20, 45, 70	0 → 75	10 → 350	2 bandes, VIS et PIR	<i>Glycine max</i> , <i>Zea mays</i>	N	
Brakke, 1992	RT	0, 30, 60	0 → 90	PP	Deux bandes en 590 et 910	<i>Acer rubrum</i> , <i>Liriodendron tulipifera</i> , <i>Quercus rubra</i>	N	
Brakke <i>et al.</i> , 1993	RT	Voir Kestner <i>et al.</i> (1988), ajout de la polarisation					<i>Acer rubrum</i> , <i>Liriodendron tulipifera</i> , <i>Quercus rubra</i>	O
Grant <i>et al.</i> , 1993	R	Même instrument que Vanderbilt et Grant 1986					Environ 18 espèces	O
Brakke, 1994	RT	Voir Brakke 1992					<i>Acer rubrum</i> , <i>Quercus alba</i> , <i>Quercus rubra</i>	O
Sanz, 1994	RT	Varié	0 → 80	PP	645, 840	<i>Alocasia macrorrhizia</i> , <i>Ipomoea fistulosa</i>	N	
Shuplyak <i>et al.</i> , 1994							O	
Okayama, 1996							N	
Shuplyak <i>et al.</i> , 1997	RT	70	0 → 90	PP	400 → 850	<i>Solanum tuberosum</i>	O	
Atrashevsky <i>et al.</i> , 1998	R	60, 70	15 → 80	PP	4 bandes VIS et PIR	<i>Acer platanoides</i>	O	
Belyaev <i>et al.</i> , 2000	RT	70	0 → 90	PP	380 → 1080	<i>Solanum tuberosum</i>	O	
Combes, 2002	RT	0, 20, 40, 60	0 → 85	0 → 360	450 → 900	<i>Julian regia</i> , <i>Prunus laurocerasus</i> , <i>Sorghum halepense</i>	N	

Tableau 1.7 : Articles de 1933 à 2002 présentant des mesures des propriétés optiques bi-directionnelles des feuilles. PP : Plan Principal, R : Réflectance, T : Transmittance, P : polarisation.

Les études sur les propriétés bidirectionnelles des feuilles se multiplient dans les années quatre vingt. Vanderbilt et Grant en seront les principaux auteurs. Suite au travail de thèse de Grant (1985), Vanderbilt et Grant (1986) présentent un photomètre fonctionnant en lumière polarisée pour la mesure de réflectance bidirectionnelle des feuilles. Les principaux résultats à l'échelle de la feuille et leurs conséquences à l'échelle du couvert sont résumés dans Vanderbilt *et al.* (1991). Notons aussi qu'une revue des réflexions spéculaires et diffuses est donnée dans Grant (1987a). Peu après, Kestner *et al.* (1988) présentent les efforts faits par le NASA/Goddard Space Flight Center pour caractériser la diffusion de la lumière par les sols et la végétation. Brakke *et al.* (1989) poursuivent le travail avec cet instrument et proposent un modèle empirique de réflectance ajustant les mesures. Les mesures de Kestner *et al.* (1988) étant faites en lumière monochromatique à 632,8 nm et non polarisée, Brakke (1992) illumine la feuille dans deux bandes spectrales, une dans le visible et l'autre dans le proche infrarouge. Brakke (1993) ajoute la résolution en polarisation et Brakke (1994) utilise les deux simultanément. Parallèlement au développement de l'instrumentation, l'auteur complète ses travaux avec des images au microscope électronique des surfaces foliaires et s'intéresse aux modifications de la feuille lors de la sénescence.

Suite à la thèse de Woessner (1985), Woessner et Hapke (1987) publient leurs travaux sur la polarisation de la lumière par des feuilles et un couvert de trèfle (*Trifolium repens*). Les auteurs utilisent les techniques développées pour la modélisation de la réflectance des régolithes planétaires (Hapke, 1993). Ils concluent que la première variable contrôlant le degré de polarisation est l'angle de phase. Par ailleurs, la polarisation perpendiculaire au plan de diffusion et la réflectance sont inversement corrélées, ce qui peut aider à estimer l'une à partir de l'autre. Enfin le *hot spot* au niveau du couvert n'est pas dû au faible *hot spot* au niveau de la feuille mais aux phénomènes d'ombrage entre les feuilles. Autre signature au niveau du couvert végétal, mais spectrale plutôt que directionnelle, le *red edge* est étudié par Salisbury *et al.* (1987) au niveau de la feuille. Les auteurs évaluent l'influence de la configuration de mesure sur le rapport infrarouge/rouge en réflectance et sur la longueur d'onde du *red edge*, définie comme étant le point d'inflexion de la réflectance spectrale entre 700 nm et 750 nm. Cette dernière ne semble pas être influencée par la configuration de mesure (à moins de 2 nm près). En revanche le rapport infrarouge/rouge est très sensible à la configuration avec des variations d'un facteur deux ou plus. Ils concluent que les données de télédétection concernant ce rapport doivent être interprétées avec prudence.

Dans les années 90 enfin, Shuplyak et ses collaborateurs fournissent de nombreuses publications parmi lesquelles Shuplyak *et al.* (1994), Shuplyak *et al.* (1997), Atrashevsky *et al.* (1998), Belyaev *et al.* (2000) et Belyaev *et al.* (2001). Atrashevsky *et al.* (1998) s'intéressent à des feuilles d'érable (*Acer platanoides* L.), arbre fréquent à Minsk pour divers stades de végétation et de dépérissement. Plus de 1000 distributions ont été mesurées entre 1993 et 1995 dans diverses conditions écologiques. Les auteurs établissent que les caractéristiques de polarisation changent avec l'état de la feuille.

Notons enfin le travail de Sanz (1994) qui propose un modèle physique pour la réflexion testé sur des mesures de laboratoire. Les feuilles sont typiques d'une surface lisse ou duveuteuse. Les mesures confirment les précédents résultats expérimentaux mais le modèle n'arrive pas à les reproduire.

5. Introduction de la réflexion spéculaire dans les modèles de transfert radiatif du couvert végétal

Le phénomène de réflexion spéculaire a été progressivement introduit dans les modèles de transfert radiatif dans le couvert végétal. La lumière qui est transmise ou réfléchi par une feuille se répartit dans toutes les directions. Cela est dû aux inhomogénéités de la structure foliaire. La répartition exacte étant difficile à mesurer et à modéliser, la plus simple approximation considère que les feuilles sont des diffuseurs lambertiens. Cette approximation simplifie les équations du transfert radiatif dans le couvert végétal. Le modèle SAIL (Verhoef, 1984), largement utilisé en télédétection de la végétation, ne tenait compte à son origine ni des effets de réflexion spéculaire sur la surface des feuilles, ni de l'effet de *hot spot*. Reyna et Badhwar (1985) y ont introduit un terme spéculaire faisant intervenir le facteur de réflexion spéculaire ρ d'une feuille, non détaillé dans leur publication et traité comme un paramètre du modèle. Vanderbilt et Grant (1985) ont étudié le facteur de réflexion spéculaire du couvert et sa polarisation en utilisant le facteur de Fresnel F pour les intensités réfléchies. Ce dernier s'écrit, en distinguant les composantes parallèles F_{\parallel} et perpendiculaires F_{\perp} au plan d'incidence, (Born et Wolf, 1980) :

$$\begin{aligned} \sin \theta_r &= n \sin \theta_i \\ \text{Si } \theta_i \neq 0 \text{ alors } F &= (F_{\parallel} + F_{\perp})/2 ; \text{ avec } \begin{cases} F_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \\ F_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \end{cases} \\ \text{Si } \theta_i = 0 \text{ alors } F &= \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{Eq. 1.21}$$

où n est l'indice de réfraction, θ_i l'angle d'incidence et θ_r l'angle réfracté. Lorsque l'angle d'incidence augmente, le facteur de Fresnel tend vers 1, ce qui n'est pas réaliste pour les feuilles d'un couvert végétal. Pour contrer cet effet, Vanderbilt et Grant introduisent un facteur d'atténuation K compris entre 0 et 1 (sans donner d'expression analytique) et justifie sa présence par la diffusion due aux structures aciculaires observées sur la surface des feuilles. Le facteur K est repris par Nilson et Kuusk (1989) qui en proposent une expression analytique :

$$K(\theta_i) = \exp\left(\frac{-2k \tan \theta_i}{\pi}\right) \quad \text{Eq. 1.22}$$

où k est un paramètre de la surface foliaire. Le facteur de réflexion spéculaire des feuilles écrit comme le produit du facteur de Fresnel par le facteur d'atténuation K sera repris dans Myneni et Ross (1991) et par Kuusk (1995). Ce dernier propose une synthèse des travaux de Verhoef (1984) et Nilson et Kuusk (1989). D'un autre côté, Ross et Marshak (1989) utilisent le facteur de Fresnel sans le facteur K mais introduisent une autre sophistication dans la simulation de la réflexion spéculaire : alors que les modèles précédents considèrent que toute l'énergie réfléchi se concentre dans une direction, Ross et Marshak simulent une fluctuation de l'orientation des feuilles afin de disperser l'énergie spéculaire dans un ensemble plus grand de directions. Finalement, l'expression la plus aboutie est proposée par Chelle (2006) qui associe le facteur de Fresnel F , le coefficient d'atténuation K , et un troisième terme G simulant la dispersion angulaire du spéculaire. Ce dernier s'écrit :

$$G = e^{-\left(\frac{\tan \alpha}{\zeta}\right)^2} / \pi \zeta^2 \cos^3 \alpha \quad \text{Eq. 1.23}$$

où α est l'angle entre la direction spéculaire et la direction de réflexion considérée, et ζ un paramètre. Le facteur de réflexion R d'une feuille s'écrit alors :

$$R = F(n)K(k)G(\zeta) \quad \text{Eq. 1.24}$$

où l'on a explicité seulement les trois paramètres du modèle. Ce dernier est capable de simuler le facteur de réflexion bidirectionnel des feuilles mais les paramètres k et ζ ne sont pas issus d'un traitement rigoureux de la réflexion par une surface rugueuse. Par conséquent, il n'est pas possible de les relier à une caractéristique bien définie de la surface foliaire. Par ailleurs, ces deux paramètres sont redondants puisqu'ils ne sont dus qu'à la rugosité de surface. Il est souhaitable de développer un modèle de réflexion spéculaire qui n'ait que deux paramètres, l'indice de réfraction et un coefficient de rugosité, directement issu des lois de l'optique géométrique. Ce sera l'objet du [chapitre 3](#).

6. Conclusion du chapitre

Ce chapitre bibliographique documente la structure et le contenu biochimique typiques d'une feuille dicotylédone. Les quatre principaux tissus sont l'épiderme supérieur, le mésophylle palissadique, le mésophylle spongieux et l'épiderme inférieur. Les cellules de ces tissus contiennent de l'eau, de la matière sèche et de la chlorophylle, dont les coefficients d'absorption déterminent l'absorption foliaire. Cette dernière se déduit des spectres de réflexion et de transmission mesurés avec un dispositif à sphère intégrante. Lors de telles mesures, l'information sur la répartition directionnelle des flux réfléchis et transmis est perdue, et l'influence de la structure foliaire se résume à la répartition, entre réflexion et transmission, de l'énergie non absorbée. La prise en compte des variations directionnelles précise la nature des interactions feuille-lumière. La réflexion et la transmission se font dans toutes les directions, ce qui montre le caractère diffusant de l'anatomie foliaire. La réflexion contient une composante spéculaire qui dépend de l'état de surface de la feuille. Les quantités les plus appropriées pour caractériser ces phénomènes sont les fonctions de distribution de réflectance et de transmittance bidirectionnelles, ou *Bidirectional Reflectance and Transmittance Distribution Functions* (BRDF et BTDF). Les modèles de BRDF utilisés pour simuler le transfert radiatif dans le couvert ne sont pas satisfaisants. Le [chapitre 3](#) est consacré à la modélisation des BRDF et BTDF à partir des mesures faites dans le cadre de cette thèse et présentées dans le [chapitre 2](#).

Chapitre 2

Mesure des réflectances et transmittances bi-directionnelles et spectrales

Plan du chapitre

1. Introduction du chapitre
2. Le spectro-gonio-photomètre
 - 2.1. Philosophie et historique
 - 2.2. Caractéristiques
 - 2.3. Description
 - 2.4. Etude de l'instrument
 - 2.5. Calibration spectrale et directionnelle
3. Du signal brut aux réflectances et transmittances
 - 3.1. Etude théorique du signal mesuré
 - 3.2. Calcul des réflectances et transmittances bidirectionnelles
 - 3.3. Calcul des réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques
 - 3.4. Protocole expérimental
4. Etude des réflectances et transmittances bi-directionnelles des feuilles
 - 4.1. Sélection des échantillons et présentation des mesures
 - 4.2. Analyse des mesures de la campagne 2003
 - 4.3. Analyse des mesures de la campagne 2005
5. Discussion
6. Conclusion du chapitre

1. Introduction du chapitre

Ce chapitre est dédié au spectro-gonio-photomètre développé pour l'étude des propriétés optiques bidirectionnelles des feuilles. Ce dispositif instrumental est unique de par son échantillonnage, spectral et angulaire, et la taille des échantillons caractérisés. Il a vocation à fournir des mesures des fonctions de distribution de réflectance et de transmittance bidirectionnelles (BRDF et BTDF) des feuilles. Le fonctionnement, les réglages et les calibrations de l'appareil sont tout d'abord présentés. Ensuite, le calcul rigoureux des BRDF et BTDF à partir des mesures brutes est explicité. Enfin, les résultats des campagnes de mesures de 2003 et 2005 sont étudiés avec une attention particulière portée à la réflexion spéculaire, ses variations directionnelles, son invariance spectrale, et sa dépendance vis-à-vis de la rugosité des surfaces foliaires.

2. Le spectro-gonio-photomètre

2.1. Philosophie et historique

L'appareil a été conçu pour étudier en laboratoire la réflexion, la transmission et l'absorption de la lumière par les feuilles, pour plusieurs directions d'observation et d'éclairement, dans le domaine optique : visible (VIS) de 400 nm à 700 nm et proche infrarouge (PIR) de 700 nm à 900 nm. Ses résolutions lui valent l'appellation de spectro-gonio-photomètre (figure 2.1). Une partie mécanique fournit la résolution directionnelle et supporte la source, l'échantillon et le capteur, une partie optique donne les résolutions spectrales et énergétiques grâce à un spectromètre à réseau et à une caméra CCD (Charge Coupled Device), et une partie acquisition permet l'exploitation des signaux. En sortie, un spectre du facteur de réflexion ou de transmission de l'échantillon est obtenu pour chaque direction d'observation en divisant le signal mesuré sur l'échantillon par celui mesuré sur une surface de référence (figure 2.2).

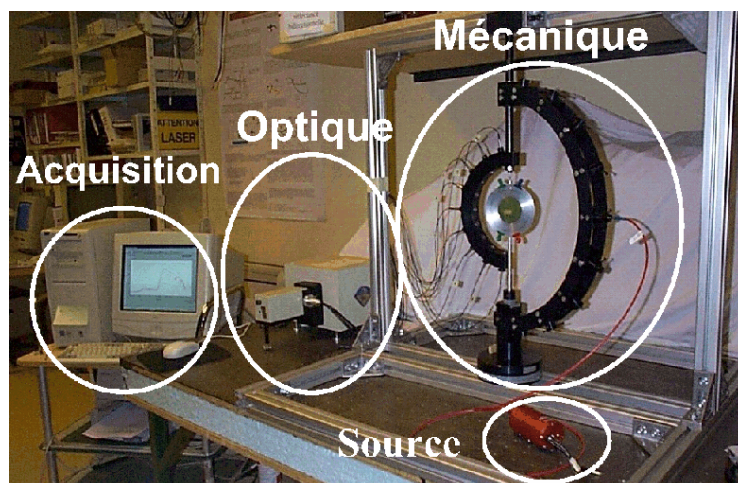


Figure 2.1 : Photo du spectro-gonio-photomètre.

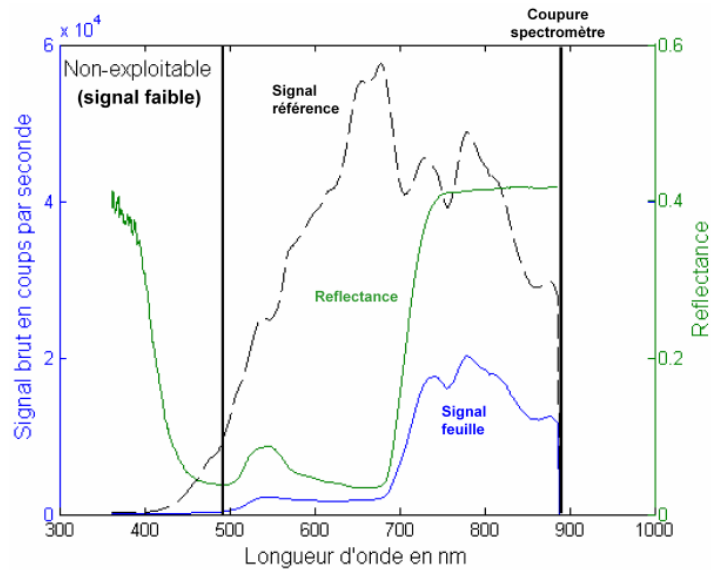


Figure 2.2 : Signaux acquis pour une feuille (en bleu) et un échantillon de référence (en noir). Le rapport du signal de la feuille à celui de la référence donne un facteur de réflectance (en vert).

L'originalité de l'instrument tient dans la mesure simultanée de plusieurs spectres, chacun d'eux correspondant à une direction d'observation. C'est le principe des spectromètres imageurs, ici réalisé avec un seul ensemble spectromètre-CCD et schématisé sur la [figure 2.3](#). Sept fibres optiques collectent la lumière provenant de l'échantillon et se rejoignent en entrée du spectromètre. Les sept faisceaux lumineux correspondants ne se recouvrent pas lors de leur trajet dans le spectromètre et viennent former sept images distinctes sur le capteur CCD bidimensionnel. La dimension verticale permet de distinguer les directions d'observation et la dimension horizontale est utilisée pour analyser la lumière dispersée spectralement par le réseau du spectromètre.

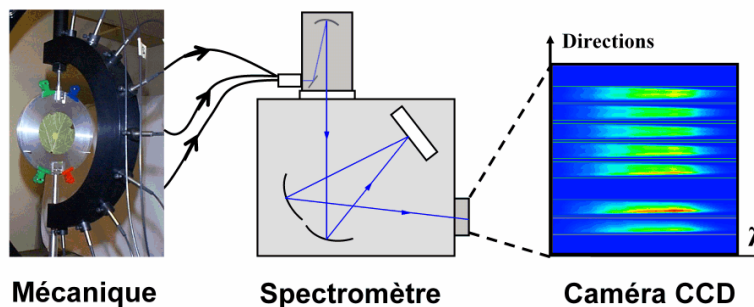


Figure 2.3 : Schéma du spectro-gonio-photomètre.

L'instrument a été développé par Didier Combes dans le cadre de sa thèse ([Combes 2002](#)). Ont participé à son financement l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de Clermont-Ferrand, le Laboratoire Environnement et Développement (LED) de l'Université Paris 7 (UP7) Denis Diderot, le Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE) de l'Université Paris Sud Orsay et le GDR G1536 FLUOVEG. Après établissement d'un cahier des charges, Lancieux et Millard de l'école d'ingénieur IFMA (Institut Français de Mécanique Avancée) ont dessiné les plans de la partie mécanique et la S.A. Chirain de Clermont-Ferrand l'a réalisée. Une fois les parties mécaniques et optiques assemblées,

deux stagiaires d'école d'ingénieur ont contribué au développement de l'instrument (Andlauer, 1999 et Degallaix, 2000). Son utilisation s'est poursuivie en 2003 avec le stage de DEA de Sophie Lachérade (Lachérade, 2003) puis lors du présent travail de thèse.

Les modifications apportées lors de cette thèse sont nombreuses. Tout d'abord la calibration directionnelle a été formalisée après identification d'un défaut d'inclinaison du porte-échantillon. Les directions d'observation ont été modifiées afin de mieux couvrir le plan principal qui contient les directions de réflexion spéculaire. Une procédure de calibration spectrale a été établie, la calibration du constructeur s'avérant obsolète. Les actions, parfois problématiques, du logiciel d'exploitation ont été formalisées. Pour évaluer les performances de l'instrument, la répétabilité des mesures a été quantifiée. Le système optique en détection a été modifié afin de pouvoir choisir entre des faisceaux d'observation parallèles ou coniques. La méthode de calcul des BRDF et BTDF a été modifiée afin de corriger les effets géométriques dus à la variation des zones éclairées et observées de l'échantillon. Elle s'avère aussi plus rigoureuse car une phase de modélisation du signal de référence (échantillon de Spectralon) a été supprimée, cette phase ayant tendance à adoucir l'anisotropie de la BRDF de la référence. Pour l'étude de cet échantillon, la procédure d'intercalibration des détecteurs a été modifiée, l'ancienne s'avérant trop incertaine. Enfin, une méthode d'estimation des réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques a été mise en place.

2.2. Caractéristiques

Le [tableau 2.1](#) résume les caractéristiques générales de l'instrument dédié à la mesure les propriétés optiques apparentes des feuilles. Les facteurs de réflexion et de transmission dépendent de la longueur d'onde et des directions d'éclairement et d'observation. Cependant, d'autres facteurs peuvent modifier les propriétés optiques. Ce sont l'éclairement fourni par la source, les angles solides sous lesquels la source et les détecteurs sont vus depuis l'échantillon, la géométrie des faisceaux lumineux (parallèles ou coniques), la taille des zones éclairées et observées sur l'échantillon, et la polarisation de la lumière. Nous supposons que la luminance des feuilles est proportionnelle à l'éclairement qu'elles reçoivent. Ainsi, leur BRDF, égale au rapport de la luminance à l'éclairement, sera indépendante de la valeur de l'éclairement. Cette hypothèse implique un équilibre entre le rayonnement reçu et celui émis par la feuille. Or, lorsqu'une feuille passe de l'ombre à la lumière, il existe une période transitoire durant laquelle les phénomènes de fluorescence font varier la luminance de la feuille alors que l'éclairement reste le même. Cette période n'excédant pas quelques secondes, on peut supposer dans notre expérience que l'équilibre est atteint entre le moment où la feuille est éclairée et celui où son signal est mesuré. Par ailleurs, l'éclairement fourni par la lampe (425 W m^{-2}) est proche des conditions naturelles en plein jour.

Domaine spectral	400 - 900 nm
Résolution	2,5 nm
Echantillonnage	512 points
Domaine directionnel	
Source (angle zénithal)	0 - 70°
Détecteur (angles zénithaux / azimutaux)	0 - 180° / 0 - 360° (réflexion et transmission)
Précision angulaire	< 2°
Echantillonnage	98 points par hémisphère
Cible	
Mobilité	Non
Taille maximale au nadir	7 mm
Taille minimale au nadir	0,6 mm
Acquisition	
Logiciel	Spectramax (Jobin-Yvon)
Rotation des arcs	Manuelle
Temps pour couvrir l'hémisphère	20 mn
Mécanique et électricité	
Poids	~100 kg
Hauteur	1 m
Puissance électrique	< 1kW
Source	
Lampe halogène	17 mW
Eclairage (sur un disque de 7 mm)	425 W m ⁻²
Angle solide	8 10 ⁻⁴ sr
Faisceau	Parallèle, section 7 mm
Détecteur	
Spectromètre imageur	Caméra CCD 512x512 Réseau 100 traits/mm
Convertisseur analogique-digital	16 bits
Angle solide	4,5 10 ⁻³ sr
Faisceau	Parallèle, section 7 mm
Polarisation	Possible
Rétrodiffusion	Non
Echantillon de référence	Spectralon (Labsphere)

Tableau 2.1 : Caractéristiques de l'appareil.

La géométrie des faisceaux lumineux, parallèles ou coniques, joue sur les angles solides et la taille des zones éclairées et observées. La source et les détecteurs sont vus depuis l'échantillon sous des angles solides valant respectivement $8 \cdot 10^{-4}$ sr et $4,5 \cdot 10^{-3}$ sr. Les faisceaux en émission et en détection sont parallèles car cela correspond à la géométrie considérée dans les modèles de BRDF, et permet d'avoir des tailles raisonnables pour les zones éclairées et observées de l'échantillon. Ces dernières font 7 mm de large au nadir (direction perpendiculaire au plan de l'échantillon) et satisfont deux contraintes dues à l'anatomie foliaire. On souhaite étudier le limbe des feuilles et éviter leurs nervures principales et secondaires. La zone étudiée doit donc être plus petite que la distance moyenne entre deux nervures pour des feuilles de laurier, hêtre ou noisetier, soit 1 cm environ. A plus petite échelle, le limbe est découpé en polygones dont la surface moyenne vaut $0,06 \text{ mm}^2$ environ (Wylie, 1943), soit $0,25 \text{ mm} \times 0,25 \text{ mm}$. La largeur de la zone étudiée doit donc être supérieure à 2,5 mm afin d'observer au moins 100 polygones et moyenner leurs propriétés. Le choix de la valeur de 7 mm satisfait les contraintes imposées par la borne supérieure de 1 cm et la borne inférieure de 2,5 mm. Lorsque que l'angle zénithal θ de la source ou des détecteurs augmente, la surface éclairée ou observée augmente comme l'inverse de $\cos\theta$.

Pour θ égal à 60° , la surface est multipliée par un facteur 2. Cet effet ne remet pas en question la procédure de calcul des BRDF et BTDF. Il est négligeable tant que la surface reste homogène.

L'échantillonnage directionnel est représenté sur la [figure 2.4](#) où l'angle zénithal et l'angle azimutal d'observation (en degrés) correspondent respectivement au rayon et à l'angle des coordonnées polaires. Les points de mesure sont marqués par des ronds noirs et la direction d'éclairement par une étoile noire. Les mesures effectuées pour chaque feuille correspondent à 196 directions d'observation se répartissant de manière égale entre réflexion et transmission. Les directions de mesure en transmission sont les symétriques de celles en réflexion par rapport au plan de l'échantillon. Les détecteurs sont fixés sur un arc de 180° , immobile afin de leur éviter tout mouvement mécanique. Leur nombre est limité à neuf pour que leurs signaux ne se recouvrent pas sur la caméra CCD, soit un détecteur tous les 20° de -80° à 80° . Les positions extrêmes (-80° et 80°) ne sont pas utilisées car trop rasantes. Les mesures en rétrodiffusion ne sont pas possibles car les arcs supportant la source et les détecteurs se gênent. Leur distance angulaire minimale est de 20° . A chaque direction d'observation est associée un spectre. Ces mesures sont répétées pour plusieurs angles d'incidence. En 2003, les angles d'incidence étaient de 8° , 21° , 41° et 60° . Les positions de la mécanique ont été modifiées en 2005 afin d'échantillonner le plan principal en 14 points. Les angles d'incidence valent alors 5° , 25° , 45° et 65° .

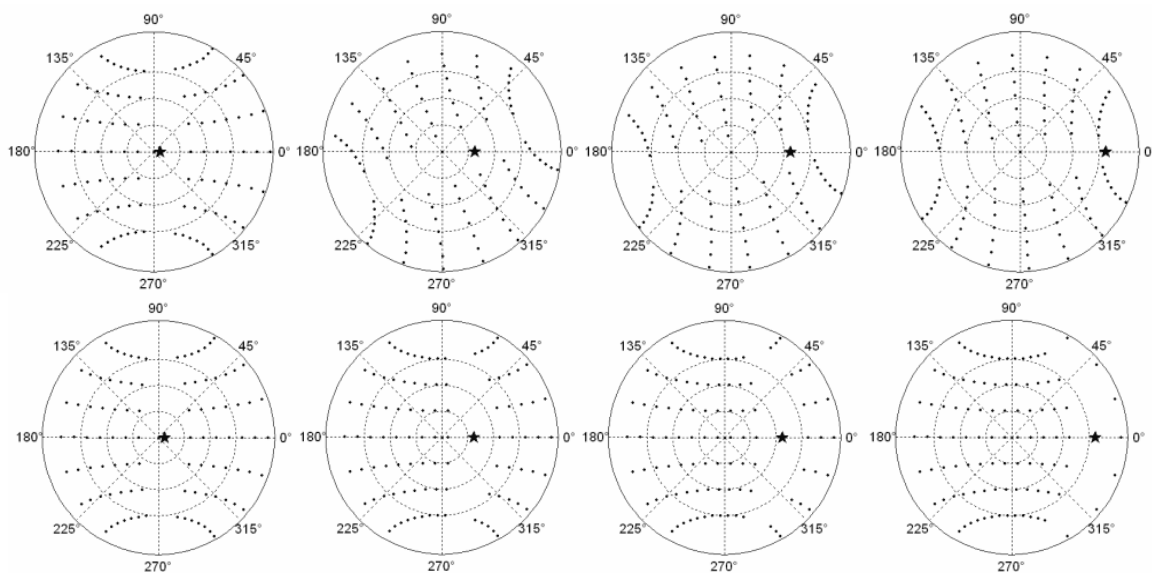


Figure 2.4 : Echantillonnage directionnel de l'hémisphère lors de la campagne de 2003 (en haut) et de la campagne de 2005 (en bas). Les angles d'incidence valent 8° , 21° , 41° et 60° (de gauche à droite) en 2003, et 5° , 25° , 45° et 65° en 2005. Le plan principal correspond aux azimuts 0° et 180° . Lors de la campagne de 2005, il est échantillonné en 14 points quel que soit l'angle d'incidence.

L'échantillonnage spectral se fait avec la caméra CCD. Le domaine 400 - 900 nm se répartit sur 512 éléments, soit un point de mesure tous les nanomètres environ. Les procédures du logiciel d'exploitation Spectramax rééchantillonnent ce spectre en 1024 points. La résolution est de 2,5 nm, déterminée par la largeur à mi-hauteur de la raie d'émission d'un laser Hélium-Néon utilisé lors des réglages.

Enfin, la polarisation ne sera pas abordée dans cette thèse. L'énergie lumineuse produite par la source est transportée jusqu'au goniomètre par une fibre optique aux propriétés dépolarisantes. L'éclairement sera donc supposé non polarisé. De même, la lumière collectée par

l'optique de détection est transportée par des fibres optiques, et la caméra CCD recevra un rayonnement non polarisé quelles que soient les propriétés de l'échantillon.

2.3. Description

Le schéma de principe du goniomètre est présenté dans la [figure 2.5](#). L'émission de lumière est assurée par une lampe halogène dont la sortie fibrée vient se fixer sur un arc d'émission ([figure 2.6](#)). Une lentille convergente concentre le flux incident sur l'échantillon supporté par un porte-échantillon. Les flux réfléchis ou transmis sont collectés par le système de réception composé de plusieurs fibres optiques dont l'une des extrémités est fixée sur l'arc de réception, et l'autre sur un support commun appelé pieuvre de fibres. La lumière pénétrant dans les fibres est concentrée par une lentille convergente puis éclaire la fente d'entrée du spectromètre. Ce dernier la disperse spectralement et forme une image sur la caméra CCD montée en sortie. La caméra convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique par effet photoélectrique. Enfin, une carte d'acquisition assure la communication entre la caméra et un ordinateur de type PC équipé d'un logiciel d'exploitation des données.

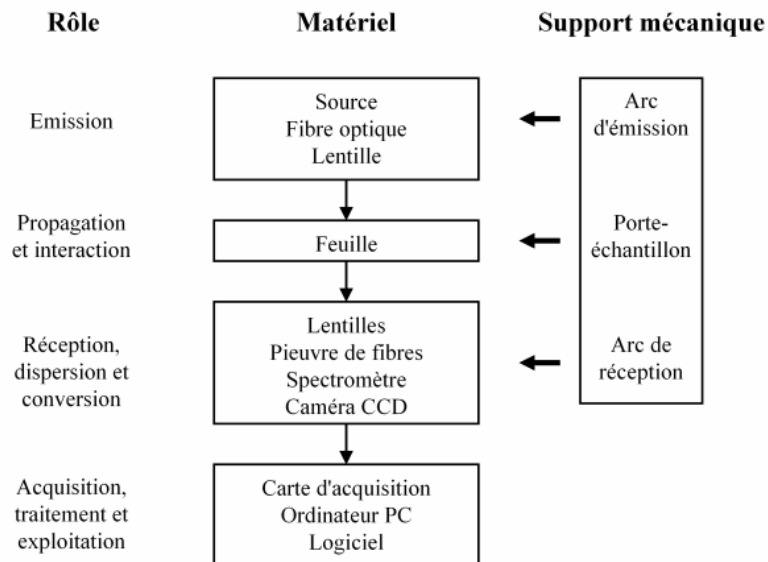


Figure 2.5 : schéma de principe du spectro-gonio-photomètre.

Supports mécaniques

La partie mécanique de l'appareil ([figures 2.6 et 2.7](#)) détermine la configuration de mesure. Le centre du goniomètre est défini comme l'intersection des axes optiques de la source et des détecteurs. Cette intersection coïncide avec le centre du porte-échantillon. La source, l'échantillon et le détecteur ont chacun leur support : ce sont respectivement l'arc d'émission (AE), le porte-échantillon (PE) et l'arc de réception (AR). Tous trois sont fixés sur l'axe principal du goniomètre qui est vertical. La direction d'éclairément est choisie en tournant le porte-échantillon par rapport à l'arc d'émission (angle a_{PE}) puis figée par une vis les solidarissant. L'arc de réception est immobile afin d'éviter le mouvement du circuit de détection, mouvement qui pourrait affecter les réglages ou modifier la transmission des fibres optiques à cause de leur déformation. L'arc

d'émission et le porte-échantillon tournent solidaires autour de l'axe principal (angle a_{AE}) afin de réaliser les différentes directions d'observation pour une même direction d'éclairage.

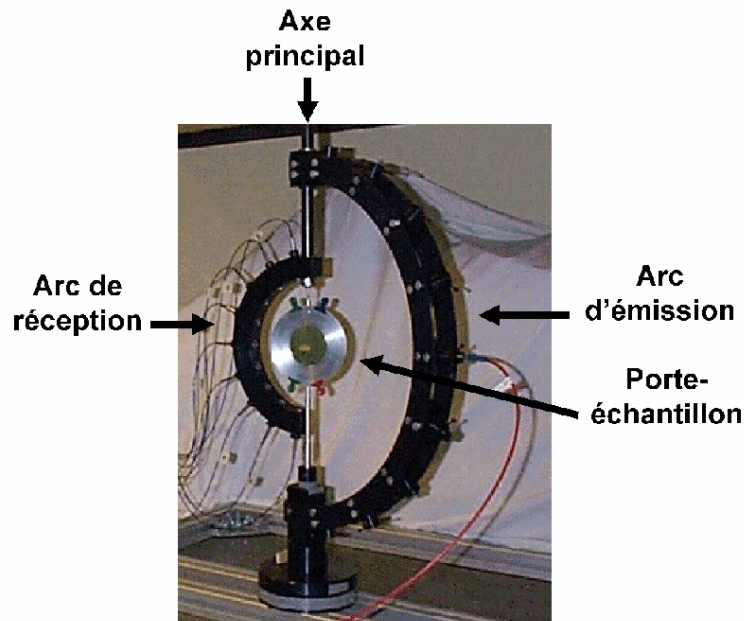


Figure 2.6 : L'axe principal et les trois supports mécaniques du goniomètre.

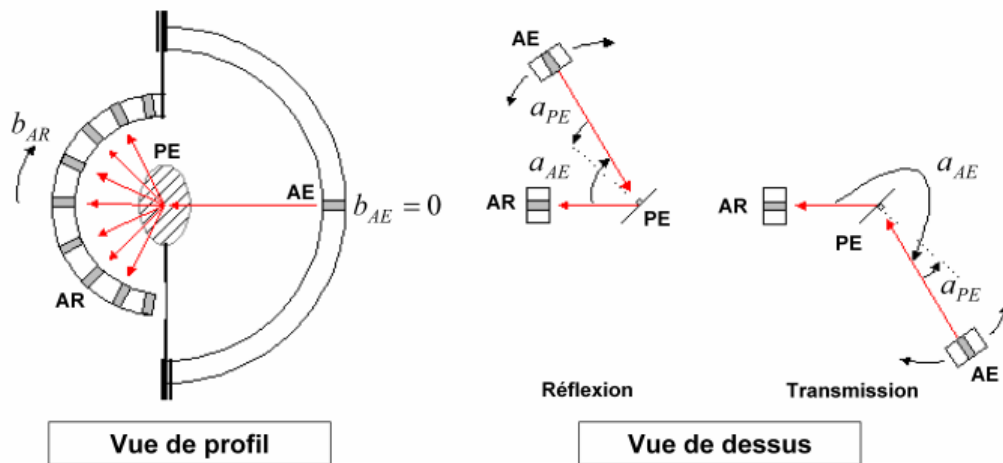


Figure 2.7 : Les angles mesurés avec le goniomètre.

Le porte-échantillon est libre de tourner autour de l'axe du goniomètre mais il peut se fixer à l'arc d'émission au moyen d'une vis. Ainsi, après avoir fait pivoter le porte-échantillon de manière à choisir la direction d'éclairage, ce dernier se fixe à l'arc d'émission et tous deux tourneront solidaires pour réaliser les différentes observations avec un éclairage donné. Le porte-échantillon s'adapte aux feuilles ou aux surfaces de référence (Spectralon) grâce à une pièce interchangeable.

L'arc d'émission est un arc de cercle métallique mobile, percé de sept logements cylindriques (repérés par l'angle b_{AE}) pouvant accueillir le porte-fibre d'émission. Il est libre de tourner autour de l'axe principal en entraînant avec lui le porte-échantillon. Pour assurer une configuration de mesure donnée, il se fixe au moyen d'une vis au socle du goniomètre. La

distance entre le centre du goniomètre et le côté intérieur de l'arc d'émission est de 24 cm. Le porte-fibre d'émission, contenant une lentille, une bague et une fibre optique, occupe généralement le logement central de l'arc d'émission. De cette manière, il est toujours possible de faire des observations dans le plan principal. La direction d'éclairement sera modifiée par la position relative de l'arc d'émission et du porte-échantillon.

L'arc de réception est un arc de cercle métallique immobile, percé de neuf logements cylindriques accueillant les porte-fibres de détection et repérés par l'angle b_{AR} . Dans chacun de ces derniers se logent une lentille convergente, une bague de blocage et une fibre optique dont l'axe optique vise le centre du goniomètre. La distance entre le centre du goniomètre et le côté intérieur de l'arc de réception est de 10 cm.

Emission

La source lumineuse est une lampe halogène HL 2000 de la marque Ocean Optics (voir [annexe D](#)). Elle émet dans le visible et le proche infrarouge et son spectre d'émission tel qu'il est observé avec notre instrument est présenté sur la [figure 2.2](#). La zone exploitable se situe entre 500 nm et 900 nm. En dessous de 500 nm, le signal est trop faible et à 900 nm a lieu la coupure du spectromètre. L'éclairement fourni par la lampe doit être stable dans le temps afin de garantir la répétabilité des mesures : le surdimensionnement de l'alimentation par rapport aux besoins de la lampe assure une meilleure stabilité de la puissance fournie, et un affichage permet de lire en continu la tension et l'intensité du courant fourni.

L'énergie est délivrée dans une fibre optique d'un diamètre de coeur de 600 μm et acheminée jusqu'à une lentille convergente (focale 15 mm et diamètre 10 mm) dont l'axe optique vise l'échantillon. La transmission et l'éventuel effet polarisant de la fibre ne sont pas connus. La lentille et la fibre optique sont maintenues dans un porte-fibre d'émission qui vient se loger dans l'arc d'émission. La distance entre la fibre et la lentille peut être modifiée puis fixée par une vis. En incidence normale et pour un faisceau parallèle, la zone éclairée sur le porte-échantillon fait 7 mm de diamètre. Pour estimer l'éclairement fourni par la lampe, on suppose que les 17 mW en sortie de l'ampoule (voir [annexe D](#)) se répartissent sur cette surface, ce qui correspond à 425 W m^{-2} . Pour comparaison, [Guyot \(1997\)](#) donne des valeurs de l'éclairement solaire comprises entre 300 W m^{-2} et 900 W m^{-2} au niveau du sol selon les conditions atmosphériques et [Liou \(2002\)](#) donne la valeur de 1366 W m^{-2} au sommet de l'atmosphère, toutes longueurs d'onde confondues. Les conditions d'éclairement des feuilles dans le goniomètre restent donc proches des conditions naturelles.

Réception, dispersion et conversion

Les éléments en réception sont schématisés sur la [figure 2.8](#). La lumière diffusée par l'échantillon est recueillie par sept lentilles convergentes (focale 15 mm et diamètre 10 mm) couplées à des fibres optiques (diamètre de coeur de 100 μm et ouverture numérique de 0,22). Les fibres optiques se rejoignent pour former une 'pieuvre' de fibres qui vient se fixer en entrée d'un coupleur à miroir (voir [annexe D](#)). Le coupleur fait l'image de l'objet 'pieuvre' sur la fente d'entrée (8 mm de haut et 50 μm de large) du spectromètre. Ce dernier, un TRIAX 180 (TRiple Imaging AXial, Jobin Yvon) est équipé d'un réseau de 100 traits/mm assurant la dispersion de la lumière. Il fournit une image qui se forme sur la caméra montée sur le port de sortie. La caméra est une CCD 3000 Spectrum ONE (Jobin Yvon). Sa partie photosensible est une matrice de 512×512 photodiodes en silicium (13,82 mm \times 13,82 mm) qui nécessite un refroidissement assuré

par effet Peltier et ventilation. Les caractéristiques complètes du spectromètre et de la caméra sont données en [annexe D](#).

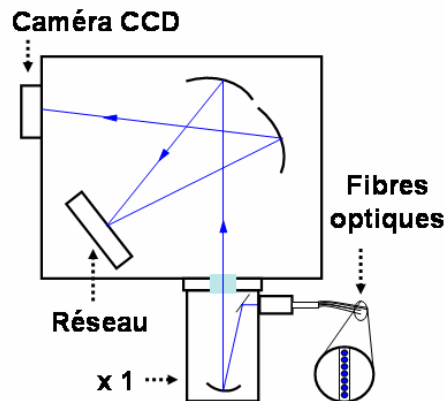


Figure 2.8 : Dispositif en réception avec pieuvre de fibres optiques, coupleur à miroir ($\times 1$), réseau et caméra CCD.

La caméra utilise l'effet photoélectrique : chaque pixel accumule une charge électrique qui dépend de l'énergie lumineuse reçue. Cette dernière correspond au flux lumineux arrivant sur le pixel multiplié par le temps d'intégration du détecteur. Ce temps est contrôlé par l'ouverture d'un obturateur placé sur le parcours du faisceau lumineux. Pour éviter que la charge d'un pixel n'affecte ses voisins, des électrodes créent un champ électrostatique confinant les charges au niveau du pixel correspondant. Une fois la durée d'intégration écoulée, les charges de chaque pixel sont lues ligne par ligne, ou colonne par colonne, et stockées dans un registre. Contrôlée par le logiciel d'exploitation, l'unité d'interface peut enregistrer un signal correspondant à un pixel ou à un groupe de pixels. Ensuite l'électronique traite, amplifie puis numérise le signal qui est transféré sous cette forme à l'ordinateur.

Acquisition, traitement et exploitation

La partie optique fournit une image sur la caméra CCD. La partie acquisition étudie cette image avec un protocole déterminé par le système d'acquisition. La caméra délivre un signal électrique qui est numérisé puis transmis à l'ordinateur. Le pilotage informatique se fait grâce au logiciel Spectramax (Jobin-Yvon) sous Windows via un câble IEEE488 entre le connecteur correspondant du spectromètre et la carte GPIB National Instrument montée sur le PC. Le logiciel enregistre un signal (en nombre de coups) proportionnel à l'énergie reçue par la caméra. Ce signal peut être visualisé sous deux formes. La première est une image de la CCD où le signal de chaque pixel est codé en couleurs. La seconde est un spectre où la longueur d'onde correspond à une colonne de la CCD. Les lignes de la CCD peuvent être regroupées en différentes zones, auquel cas le logiciel fournira un spectre par zone.

2.4. Etude de l'instrument

Les réglages de l'instrument sont présentés en [annexe D](#). Cette section se concentre sur les performances de l'instrument en termes de bruit et de répétabilité des mesures.

Stabilité de la lampe HL2000

Il faut que les échantillons de feuille et de référence reçoivent le même éclairage pour que l'on puisse comparer leur luminance. L'éclairage fourni par la lampe doit donc être constant au cours du temps. La lampe est mise en route 30 mn au moins avant le début de la mesure. L'alimentation, stabilisée et surdimensionnée, affiche la tension et l'intensité électrique fournies à la lampe. Le produit tension - intensité est trouvé stable sur la période testée de sept heures, les variations autour de la valeur moyenne étant inférieure à 2%.

Temps d'intégration minimum

Le logiciel Spectramax permet de fixer des temps d'intégration de 0,01 s ou moins. Or le constructeur conseille d'utiliser des temps supérieurs à 0,01 s. La comparaison du signal en nombre de coups par seconde pour divers temps d'intégration compris entre 0,01 s et 0,2 s suggère d'utiliser des temps supérieurs à 0,1 s afin d'avoir une incertitude inférieure à 1%.

Bruit instrumental

On se place dans les conditions de mesure (tous les réglages étant faits). On observe le signal de chacune des zones de la CCD alors que l'obturateur manuel couvre complètement la fente d'entrée du spectromètre. Pour des temps d'intégration de 0,05 s à 5 s, le signal est compris entre 1100 et 1300 coups. Il est dû à l'électronique de la caméra CCD. En activant l'option 'Dark offset' du logiciel Spectramax, le signal est compris entre ± 60 coups pour tous les temps d'intégration. Dans ce cas, le signal est la différence de deux acquisitions faites avec le même temps d'intégration, ce qui élimine presque entièrement le bruit instrumental et explique la présence de valeurs négatives. Dans la suite et sauf mention du contraire, l'option 'Dark Offset' sera toujours sélectionnée et nous supposons une incertitude sur le signal de ± 60 coups quel que soit le temps d'intégration.

Bruit environnemental

Le goniomètre est enfermé dans une enceinte noire l'isolant de l'extérieur. Lorsque la source lumineuse est éteinte, le bruit environnemental est inférieur à 40 coups par seconde ([figure 2.9](#)), ce qui ne permet pas de distinguer ce bruit de l'incertitude liée au bruit instrumental. Lorsque la source lumineuse éclaire l'échantillon de référence mais que ce dernier est observé en transmission (il ne devrait rien transmettre), le signal mesuré est inférieur à 300 coups par seconde, ce qui fournit une borne supérieure au bruit environnemental lorsque la source fonctionne.

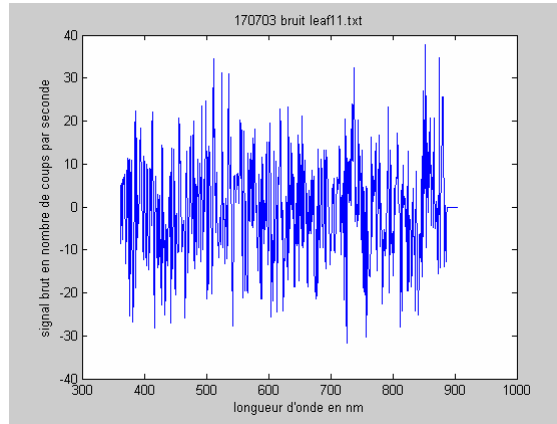


Figure 2.9 : Mesure brute corrigée du bruit instrumental mais contenant le bruit environnemental.

Réduction du bruit

Lors d'une mesure sur un échantillon donné, le signal fluctue légèrement avec le temps à cause du bruit instrumental et environnemental. Afin de réduire ces fluctuations, le signal enregistré par Spectramax est la moyenne de cinq acquisitions successives.

Répétabilité des mesures

Le terme de répétabilité est ici utilisé dans le sens défini par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO 1995). Lorsque l'on répète une mesure sans modifier les conditions expérimentales, les valeurs fournies par l'instrument devraient être identiques. Or cela n'est pas toujours le cas, car des paramètres mal contrôlés peuvent modifier la valeur mesurée. Parmi ces paramètres figurent les fluctuations de l'éclairage fourni par la lampe, du bruit environnemental et du rendement des détecteurs, mais aussi l'incertitude sur le positionnement de la mécanique du goniomètre. La répétabilité des mesures sans mouvement mécanique est étudiée dans un premier temps. L'échantillon de Spectralon est éclairé par la lampe halogène à 5° d'incidence, et les 7 détecteurs observent le signal réfléchi pour des angles zénithaux allant de 0° à 60°. On procède à 20 mesures successives fournissant 20 spectres de 1024 points pour chacun des détecteurs. On souhaite calculer la moyenne et l'écart-type de ces 20 mesures. Soit $S(\lambda, d)$ le signal fournit par une mesure pour la longueur d'onde λ et le détecteur d . Un ensemble de N mesures $\{i\}$ fournit l'ensemble des mesures $\{S_i\}$ où l'on omet (λ, d) pour la clarté de l'exposé. La moyenne \bar{S} des mesures, l'écart-type σ et le rapport des deux sont donnés par :

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_i S_i \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (S_i - \bar{S})^2} \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$\sigma/\bar{S} = f(\lambda, d) \quad \text{Eq. 2.3}$$

On calcule le rapport de l'écart-type à la moyenne qui est trouvé égal à 4 % pour l'ensemble des 7 détecteurs et des 1024 longueurs d'onde, soit 7168 points de mesure. Pour diminuer d'un facteur 10 ce rapport, il faut éliminer les 245 points de mesure donnant les signaux les plus faibles. Ces signaux correspondent aux longueurs d'onde où l'éclairement fourni par la lampe est le plus faible. On les élimine en ne retenant que les longueurs d'onde comprises entre 500 nm et 880 nm, et le rapport de l'écart-type à la moyenne est inférieur à 4 ‰.

Les mouvements mécaniques dégradent la répétabilité des mesures. Lors d'une campagne, le porte-échantillon est démonté et remonté plusieurs fois dans la journée pour accueillir tantôt la référence, tantôt une feuille, puis une autre. La répétabilité est maintenant étudiée à partir des mesures faites sur l'échantillon de référence dans le cadre d'une campagne en 2006. Durant quatre jours, le signal du Spectralon éclairé à 5° d'incidence a été enregistré matin et soir, pour 98 directions d'observation et des spectres de 1024 points, soit 100 352 points de mesure répétés 8 fois chacun. Les points de mesure en dehors de la bande 500 - 880 nm sont éliminés. La moyenne \bar{S} , l'écart-type σ et le rapport $\sigma/\bar{S} = f(\lambda, d)$ sont ensuite calculés comme précédemment. Le rapport σ/\bar{S} est parfois supérieur à 1 pour les directions d'observation rasantes, à cause du faible signal et de la mauvaise répétabilité du positionnement de la mécanique dans ces directions. On définit donc une borne supérieure à l'angle zénithal d'observation θ : au-delà de 60°, les mesures seront considérées incertaines à cause de défauts mécaniques. On définit ensuite le quadrant spéculaire comme suit : la réflexion spéculaire correspond à l'azimut $\varphi = 180^\circ$ et le quadrant spéculaire à l'ensemble des directions telles que $180^\circ - 45^\circ < \varphi < 180^\circ + 45^\circ$. En ne retenant que les points de mesure tels que $\theta < 60^\circ$ ou $180^\circ - 45^\circ < \varphi < 180^\circ + 45^\circ$, le rapport de l'écart-type à la moyenne est égal à 2 %.

2.5. Calibration spectrale et directionnelle

L'objet de la calibration spectrale est d'associer à chaque point des spectres fournis par le logiciel une valeur de longueur d'onde calibrée. La calibration directionnelle consiste à associer à chaque configuration de la partie mécanique des directions d'éclairement et d'observation calibrées dans le système sphérique usuel.

Calibration spectrale

Le spectromètre est calibré spectralement par le constructeur qui fournit les longueurs d'onde correspondant au centre de la CCD (590,4 nm) et à ses extrémités (361,4 nm et 905,4 nm). La CCD comprenant 512 pixels en largeur, l'échantillonnage spectral est de 512 points et chaque pixel correspond à une bande spectrale de 1 nm environ. Malheureusement, la calibration spectrale du constructeur ne peut pas être utilisée car les réglages ont entraîné la modification de la position de la CCD (décalage spectral de 10 nm environ). Une fois ces réglages effectués, les sept détecteurs fonctionnant simultanément sont supposés indépendants. Chacun doit être calibré spectralement dans les conditions expérimentales qui seront celles de la mesure des BRDF des feuilles. Les sept fibres actives en détection placées dans leur logement sur l'arc de réception visent l'échantillon de Spectralon fixé sur le porte-échantillon et éclairé par une lampe spectrale mercure (Hg) - argon (Ar) (en fonctionnement depuis plus de 30 mn pour stabilisation). Les raies d'émission sont présentées dans la [figure 2.10](#) et celles utilisées dans le [tableau 2.2](#). Pour exploiter des raies dont le signal est relativement faible, on utilise des filtres colorés qui absorbent l'énergie des raies les plus intenses et on augmente le temps d'intégration de la caméra CCD.

λ (nm)	435,84 (Hg)	546,07 (Hg)	578,01 (Hg)	750,39 (Ar)	811,53 (Ar)	826,45 (Ar)	841,64 (Ar)
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Tableau 2.2 : Longueurs d'onde utilisées pour la calibration spectrale.

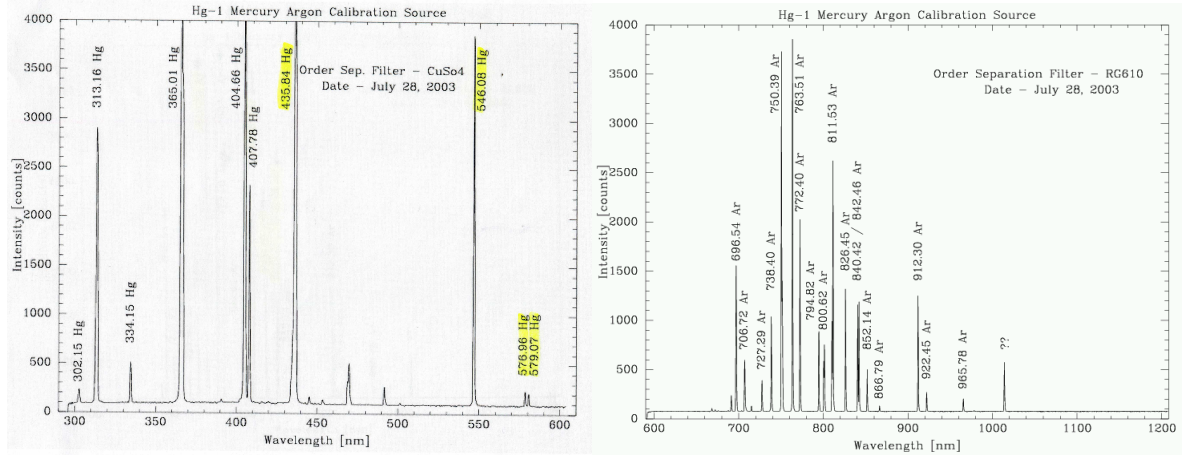


Figure 2.10 : Raies d'émission de la lampe au mercure.

Une mesure fournit sept spectres sur lesquels les opérations suivantes sont effectuées :

1. On modélise le spectre par une somme de gaussiennes. Les longueurs d'onde centrales donnent les longueurs d'onde mesurées pour la raie correspondante.
2. Connaissant les longueurs d'onde mesurées et les valeurs exactes, on détermine une relation de passage entre les deux sous la forme d'un polynôme de degré trois :

$$\lambda_{\text{exacte}} = a + b\lambda_{\text{mesurée}} + c\lambda_{\text{mesurée}}^2 + d\lambda_{\text{mesurée}}^3 \quad \text{Eq. 2.4}$$

3. On applique enfin cette relation à toutes les longueurs d'onde mesurées, ce qui fournit l'ensemble des longueurs d'onde exactes.

On obtient finalement les longueurs d'onde calibrées pour chaque détecteur, avec une précision dépendant du nombre de raies utilisées. Il est important que ces longueurs d'onde se répartissent sur tout le spectre mesuré. Le signal observé avec l'appareil après calibration est présenté sur la [figure 2.11](#). Les longueurs centrales des raies de la lampe sont retrouvées au nanomètre près.

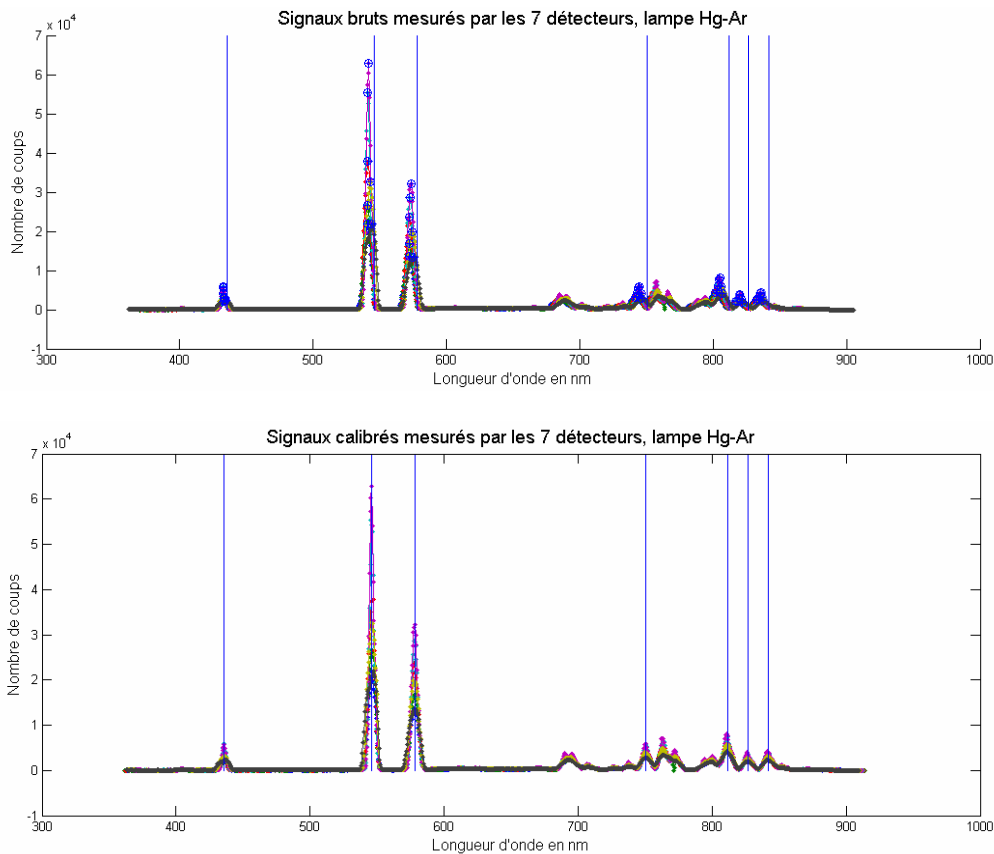


Figure 2.11 : Raies du mercure observées avec le montage complet du spectro-gonio-photomètre avant la calibration (en haut) et après (en bas). Les sept traits bleus correspondent aux sept longueurs d'onde données dans le [tableau 2.2](#).

Calibration directionnelle

La calibration directionnelle associe à chaque configuration mécanique les directions calibrées d'éclairement (θ_s, φ_s) et d'observation (θ_v, φ_v) correspondantes. Pour cela les différentes positions de la source et des détecteurs sont numérotées puis associées à des angles (α, β) repérant les directions dans le système angulaire du goniomètre. Enfin les angles sphériques usuels (θ, φ) sont calculés en fonction de (α, β) . Les détails de cette calibration sont donnés en [annexe D](#).

3. Du signal brut aux réflectances et transmittances

3.1. Etude théorique du signal mesuré

Signal mesuré en fonction de la BRDF de l'échantillon

Le but est de relier le signal mesuré à la BRDF de l'échantillon. Pour cela, on exprime la luminance de la surface en fonction de sa BRDF, puis le flux lumineux reçu par le capteur en fonction de celle de la surface, et enfin le signal détecté en fonction du flux pénétrant dans le capteur.

Considérons une surface A_e recevant un flux Φ_e , l'éclairement E est égal à Φ_e/A_e . La partie éclairée de cette surface renvoie la lumière avec une luminance $L = BRDF \times E$. On suppose que l'éclairement et la BRDF de la surface sont indépendants de la position (x, y) . La luminance est par conséquent indépendante de (x, y) . Par ailleurs, comme on néglige la diffusion de volume dans l'échantillon, la luminance est nulle en dehors de la zone éclairée.

Considérons maintenant un détecteur sensible à tous les rayons lumineux émis par les points de la surface observée A_o , dans l'angle solide Ω , autour de la direction (θ_v, φ_v) . Seuls les points éclairés de cette surface réfléchissent la lumière. L'intersection de la surface éclairée A_e et de celle observée A_o est notée A_{eo} :

$$A_{eo} = A_e \cap A_o \quad \text{Eq. 2.5}$$

Sa luminance est celle de la surface éclairée et le flux pénétrant dans le capteur vaut $\Phi_o = L A_{eo} \Omega \cos \theta_v$, on a donc en fonction de la BRDF de la surface :

$$\Phi_o = BRDF \frac{\Phi_e}{A_e} A_{eo} \Omega \cos \theta_v \quad \text{Eq. 2.6}$$

Le signal V mesuré est proportionnel au flux pénétrant dans le capteur, multiplié par le temps d'intégration T , d'où $V = K \Phi_o T$ et :

$$V = K T BRDF \frac{\Phi_e}{A_e} A_{eo} \Omega \cos \theta_v \quad \text{Eq. 2.7}$$

où K est un facteur de calibration dont la connaissance n'est pas nécessaire dans notre procédure. Notons que la réponse de la caméra étant supposée linéaire, K est indépendant de l'énergie lumineuse $\Phi_o T$.

Surface éclairée et surface observée

Seule la surface éclairée et observée A_{eo} contribue au signal mesuré par l'appareil. Il se peut que cette surface ne soit pas totalement éclairée et que cela dépende de la configuration de mesure $(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)$ entraînant une mauvaise estimation de la BRDF. Cette dépendance reste à clarifier. Supposons que les faisceaux en éclairage et en observation soient parallèles et de sections circulaires respectives d_e et d_o . Les surfaces éclairée et observée valent donc :

$$\begin{aligned} A_e &= d_e / \cos \theta_s \\ A_o &= d_o / \cos \theta_v \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.8}$$

et le signal mesuré s'écrit :

$$V(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = K T BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \frac{\Phi_e}{d_e} A_{eo} \Omega \cos \theta_v \cos \theta_s \quad \text{Eq. 2.9}$$

Si la surface éclairée est toujours observée alors $A_{eo} = A_e$ et l'Eq. 2.9 devient :

$$\begin{aligned} V(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) &= K T BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \frac{\Phi_e}{A_e} A_e \Omega \cos \theta_v \\ &= K T BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \Phi_e \Omega \cos \theta_v \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Si la surface observée est toujours éclairée alors $A_{eo} = A_o$ et l'Eq. 2.9 devient :

$$V(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = K T BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \frac{\Phi_e}{d_e} d_o \Omega \cos \theta_s \quad \text{Eq. 2.11}$$

Enfin, on écrira dans le cas général où A_{eo} est fonction de la configuration de mesure :

$$V(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = K T BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \frac{\Phi_e}{d_e} \Omega \cos \theta_s \cos \theta_v A_{eo}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \quad \text{Eq. 2.12}$$

Rapport des signaux de deux échantillons

Dans le cadre théorique décrit ci-dessus, la répétition de deux mesures où seul l'échantillon change fournit deux signaux où seule la BRDF de l'échantillon a changé. Par conséquent, pour un échantillon de feuille et un échantillon de référence, on a dans la configuration de mesure $(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)$:

$$\frac{V_{feuille}}{V_{ref}} = \frac{BRDF_{feuille}}{BRDF_{ref}} \quad \text{Eq. 2.13}$$

3.2. Calcul des réflectances et transmittances bidirectionnelles

Le rapport du signal mesuré sur une feuille à celui mesuré sur l'échantillon de référence est égal au rapport de leur BRDF. Ceci n'est vrai que si tous les autres paramètres de la mesure sont maintenus constants. En pratique, le temps d'intégration de la CCD diffère entre les deux échantillons car les feuilles absorbent plus d'énergie. On a donc pour tout $(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)$:

$$BRDF_{feuille} = \frac{V_{feuille} T_{ref}}{V_{ref} T_{feuille}} BRDF_{ref} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Dans le cas de la transmittance, le même raisonnement en remplaçant la BRDF par la BTDF donne :

$$BTDF_{feuille} = \frac{V_{feuille} T_{ref}}{V_{ref} T_{feuille}} BTDF_{ref} \quad \text{Eq. 2.15}$$

Cependant nous ne disposons pas d'un échantillon de référence en transmittance. Les mesures de BRDF sur la référence sont donc utilisées pour calculer la BTDF. Le détail est présenté ci-dessous.

Cas particulier de la transmittance

Considérons une feuille éclairée dans la direction (θ_s, φ_s) et observée en transmission dans la direction (θ_v, φ_v) . L'angle θ_v appartient alors à l'intervalle $[\pi/2; \pi]$ et le signal mesuré s'écrit en fonction de la BTDF de la feuille :

$$V_{feu}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = K T BTDF_{feu}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \frac{\Phi_e}{d_e} \Omega \cos \theta_s |\cos \theta_v| A_{eo}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \quad \text{Eq. 2.16}$$

La direction d'observation symétrique de (θ_v, φ_v) par rapport au plan de l'échantillon est $(\pi - \theta_v, \varphi_v)$ où $\pi - \theta_v$ appartient à $[0; \pi/2]$. C'est une direction d'observation en réflexion. Le signal mesuré sur l'échantillon de référence dans la direction $(\pi - \theta_v, \varphi_v)$ s'écrit :

$$V_{ref}(\pi - \theta_v) = K T BRDF_{ref}(\pi - \theta_v) \frac{\Phi_e}{d_e} \Omega \cos \theta_s \cos(\pi - \theta_v) A_{eo}(\pi - \theta_v) \quad \text{Eq. 2.17}$$

où les angles $(\theta_s, \varphi_s, \varphi_v)$, qui ne jouent aucun rôle, ont été omis. En divisant les deux signaux on obtient :

$$BTDF_{feu}(\theta_v) = \frac{T_{ref}}{T_{feu}} \frac{V_{feu}(\theta_v)}{V_{ref}(\pi - \theta_v)} \frac{A_{eo}(\pi - \theta_v)}{A_{eo}(\theta_v)} BRDF_{ref}(\pi - \theta_v) \quad \text{Eq. 2.18}$$

Dans le cas où la surface éclairée et observée est la même pour θ_v et $\pi - \theta_v$:

$$BTDF_{feu}(\theta_v) = \frac{T_{ref}}{T_{feu}} \frac{V_{feu}(\theta_v)}{V_{ref}(\pi - \theta_v)} BRDF_{ref}(\pi - \theta_v) \quad \text{Eq. 2.19}$$

Etude de la référence

Les calculs de BRDF et BTDF des feuilles nécessitent un échantillon de référence dont la BRDF est connue pour toutes les configurations $(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)$ souhaitées. Cette référence est un échantillon de Spectralon supposé être un diffuseur lambertien et parfait, c'est-à-dire réfléchissant toute la lumière incidente avec une luminance indépendante des directions d'éclairage et d'observation. Son DHRF est donc indépendant de la direction d'éclairage et l'on notera :

$$DHRF_{ref}(\theta_s, \varphi_s) = \rho_{ref} \quad \text{Eq. 2.20}$$

La BRDF de cet échantillon est isotrope pour de faibles angles d'éclairage, mais elle peut devenir anisotrope pour des angles plus élevés. Pour étudier cette anisotropie, il est nécessaire d'opérer les réglages instrumentaux afin que la surface observée soit beaucoup plus petite que la surface éclairée. Dans ce cas, la surface observée est entièrement éclairée pour une large gamme de directions d'observation et la BRDF de la référence en fonction du signal mesuré s'écrit, pour une direction incidente (θ_s, φ_s) donnée, :

$$BRDF_{ref}(\theta_v, \varphi_v) = \frac{V_{ref}(\theta_v, \varphi_v)}{K T d_o \Omega \cos \theta_s \Phi_e / d_e} \quad \text{Eq. 2.21}$$

En intégrant sur les directions d'observation pour obtenir le DHRF, on a :

$$\rho_{ref} = \frac{1}{K T d_o \Omega \cos \theta_s \Phi_e / d_e} \int V_{ref}(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. 2.22}$$

où l'on a sorti de l'intégrale tous les paramètres de la mesure qui ne dépendent pas de (θ_v, φ_v) . On déduit finalement la BRDF de la référence en fonction du signal mesuré :

$$BRDF_{ref}(\theta_v, \varphi_v) = \rho_{ref} \frac{V_{ref}(\theta_v, \varphi_v)}{\int V_{ref}(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. 2.23}$$

Cette formule n'est plus valable si la surface observée n'est plus entièrement éclairée. Or cela se produit tôt ou tard aux angles zénithaux d'observation élevés. Il y a donc là une incertitude inévitable.

Enfin notons que l'estimation de la BRDF de la référence nécessite l'intercalibration des sept détecteurs (voir [annexe D](#)) qui était superflue auparavant. En effet, le calcul des BRDF et des BTDF des feuilles fait toujours apparaître le rapport de deux signaux mesurés dans la même configuration (donc par le même capteur) et le facteur d'intercalibration s'élimine dans ce cas. Dans le cas de la référence, il est nécessaire de sommer les signaux mesurés par les différents capteurs. Cette somme n'est juste que si ces signaux sont comparables, donc intercalibrés.

3.3. Calcul des réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques

Rappelons l'expression du DHRF en fonction de la BRDF pour une direction incidente donnée :

$$DHRF = \int_{2\pi} BRDF(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. 2.24}$$

Expérimentalement la fonction $BRDF(\theta_v, \varphi_v)$ est échantillonnée en un nombre fini de points, le calcul exact du DHRF n'est donc pas possible. Cependant, notre appareil mesure le signal en réflexion dans une centaine de directions différentes couvrant tout l'hémisphère. Cet échantillonnage fin permet de capturer les principales variations directionnelles de la BRDF. Le DHRF sera donc estimé en sommant les valeurs de BRDF mesurées sur les directions. Le même raisonnement s'appliquera au DHTF calculé à partir des BTDF.

Intégrale directionnelle

Soit la fonction $f(\theta, \varphi)$ à intégrer directionnellement sur un domaine D :

$$I = \int_D f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad \text{Eq. 2.25}$$

où $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ est un angle solide infinitésimal. Découpons le domaine d'intégration D en sous-domaines D_i où $f(\theta, \varphi)$ prend la même valeur f_i . L'intégrale I s'écrit alors :

$$I = \sum_i \left[\int_{D_i} f_i d\Omega \right] = \sum_i \left[f_i \int_{D_i} d\Omega \right] = \sum_i [f_i \Delta\Omega_i] \quad \text{Eq. 2.26}$$

où :

$$\Delta\Omega_i = \int_{D_i} d\Omega \quad \text{Eq. 2.27}$$

Dans le système d'angles (α, β) du goniomètre, les directions de mesure forment un échantillonnage régulier de l'ensemble des directions possibles : α est mesuré tous les 10° entre -80° et 80° en réflexion, et β tous les 20° entre -60° et 60° . Cette grille régulière d'échantillonnage fait du système d'angle du goniomètre le système privilégié de travail. L'angle solide $d\Omega$ dans ce système s'écrit :

$$d\Omega = \frac{R d\beta \times R \cos \beta d\alpha}{R^2} = \cos \beta d\beta d\alpha \quad \text{Eq. 2.28}$$

où R est le rayon de la sphère considérée pour le calcul. Calculons maintenant l'angle solide fini $\Delta\Omega_i$ pour un intervalle $[\alpha_1; \alpha_2] \times [\beta_1; \beta_2]$:

$$\Delta\Omega_i = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\alpha d\beta = (\alpha_2 - \alpha_1) (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) \quad \text{Eq. 2.29}$$

Finalement, on a découpé le domaine D en sous-domaines $[\alpha_i; \alpha_{i+1}] \times [\beta_j; \beta_{j+1}]$ à l'intérieur desquels la fonction f prend la valeur constante f_{ij} , et on obtient pour l'intégrale I :

$$I = \sum_i \sum_j f_{ij} (\alpha_{i+1} - \alpha_i) (\sin \beta_{j+1} - \sin \beta_j) \quad \text{Eq. 2.30}$$

Rééchantillonnage

Il y a deux principales sources d'erreur dans l'estimation des DHRE et DHTE. La première est due au manque de points de mesure pour les directions d'observation rasante; la seconde est due au pas d'échantillonnage parfois trop grand par rapport aux variations rapides

des BRDF et BTDF (principalement variations de la BRDF autour du pic spéculaire). On fait donc un rééchantillonnage entre les points de mesure (interpolation linéaire) pour diminuer l'erreur de second type. Si les mesures aux grands angles d'observation ne sont pas prises en compte à cause des incertitudes, comme c'est souvent le cas, alors la quantité hémisphérique sera sous-estimée. Un modèle physique semble nécessaire pour l'extrapolation. Si l'on n'utilise pas de modèle, il faut estimer les valeurs inconnues par des interpolations ou extrapolations simples. La plus basique est celle du 'plus proche voisin' qui a été retenue lors de la campagne de Juillet 2005.

3.4. Protocole expérimental

Le protocole expérimental comporte trois phases : réglages de l'instrument, estimation de la BRDF de l'échantillon de référence, et mesures des BRDF et BTDF des feuilles. Les réglages ont été présentés précédemment. La mesure de la BRDF de la référence se déroule en quatre étapes :

1. Intercalibration des fibres optiques en détection (après calibration spectrale).
2. Réglage des faisceaux lumineux de manière à ce que la zone observée soit toujours éclairée.
3. Mesure du signal de la référence pour un éclairage donné.
4. Traitement des fichiers de mesure.

Les étapes 3 et 4 sont répétées pour tous les éclairages. Le protocole détaillé pour la dernière phase est le suivant :

1. Mise sous-tension de la source du spectromètre et de l'ordinateur.
2. Réglage des faisceaux lumineux de manière à maximiser la zone éclairée et observée.
3. Renseignement de la fiche descriptive de la mesure.
4. Choix de la direction incidente.
5. Positionnement de la référence dans le porte-échantillon.
6. Réglage du temps d'intégration de la CCD pour éviter toute saturation dans la direction du signal maximum.
7. Lancement du logiciel pilotant les acquisitions.
8. Mesure du signal de la référence pour toutes les directions d'observation souhaitées (l'utilisateur change les directions d'observation entre deux acquisitions).
9. Traitement des fichiers de mesure.

Les étapes 5, 6, 7, 8 et 9 sont répétées en remplaçant le Spectralon par la feuille. Dans ce cas, l'éclairage est coupé pendant le changement de configuration mécanique pour éviter le dessèchement de la feuille. Cette coupure intervient sur le chemin du faisceau lumineux entre la source et la feuille (la source n'est pas éteinte pour éviter les fluctuations du flux émis). Les échantillons de feuille sont conservés dans un herbier.

4. Etude des réflectances et transmittances bi-directionnelles des feuilles

4.1. Sélection des échantillons et présentation des mesures

Deux campagnes de mesures ont été organisées : durant l'été 2003 (mesures effectuées par Sophie Lachérade) et en juillet 2005 (mesures effectuées avec Didier Combes). Le [tableau 2.3](#) présente les échantillons correspondants. En 2003, les feuilles de laurier, hêtre et noisetier ont été sélectionnées pour représenter différents états de surface : le laurier à la cuticule lisse et épaisse apparaît brillant, le noisetier portant un fin duvet de poils apparaît mat, et le hêtre, plus rugueux que le laurier et brillant par endroit, a une apparence intermédiaire. Les feuilles de la campagne de 2005 sont photographiées sur la [figure 2.12](#). Elles ont été sélectionnées pour représenter les groupes monocotylédones (maïs et fétuque) et dicotylédones (laurier, soja, vigne, hêtre et noyer). La fétuque et le noyer sont étudiées dans le cadre d'une collaboration avec l'INRA Lusignan (Didier Combes), le maïs et le soja pour le compte du Forschungszentrum à Julich, Allemagne (Bernd Biskup). Le laurier est retenu pour son aspect brillant, le hêtre pour sa structure régulière (modélisée dans le [chapitre 4](#) pour la simulation des propriétés optiques par lancer de rayon) et la vigne car elle est typique des dicotylédones ligneuses. Pour les dicotylédones, la zone étudiée se situe entre les nervures secondaires généralement distante de 1 cm environ. En revanche, les monocotylédones ont un réseau dense de nervures parallèles qui ne peut pas être évité, et dont les effets seront étudiés.

Année	Espèce	D/M	Caractéristiques de surface
2003	<i>Prunus laurocerasus</i> L. (laurier cerise)	D	Très lisse
	<i>Corylus avellana</i> (noisetier)	D	Duveteuse
	<i>Fagus sylvatica</i> (hêtre)	D	Lisse
2005	<i>Fagus sylvatica</i> L. (hêtre)	D	Lisse, brillante et jeune
	<i>Festuca arundinacea</i> (fétuque)	M	Très rugueuse
	<i>Glycine max</i> (L.) Merr. (soja)	D	Rugueuse, jeune
	<i>Juglans regia</i> L. (noyer)	D	Lisse, brillante, âgée
	<i>Prunus laurocerasus</i> L. (laurier cerise)	D	Très lisse et brillante
	<i>Vitis vinifera</i> L. (vigne)	D	Rugueuse
	<i>Zea mays</i> L. (maïs)	M	Très rugueuse

Tableau 2.3 : Feuilles sélectionnées pour les mesures de réflectance et transmittance bidirectionnelles.
D : dicotylédone, M : monocotylédone.

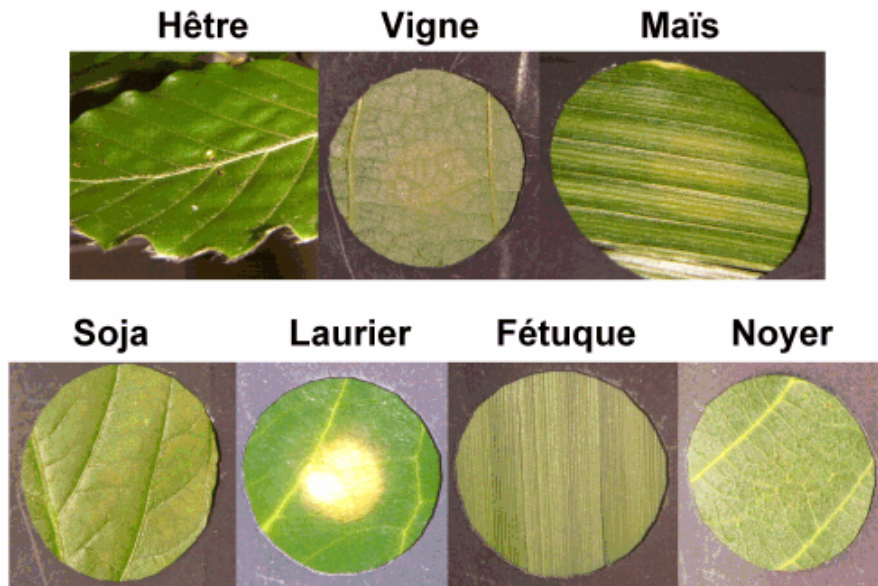


Figure 2.12 : Photos des feuilles dans le porte-échantillon lors de la campagne de 2005. Le hêtre a été photographié avant la mesure.

Afin de mettre en valeur les variations avec la direction d'observation, les réflectances et transmittances bi-directionnelles sont représentées sur des graphiques en coordonnées polaires où l'angle zénithal et l'angle azimutal d'observation (en degrés) correspondent respectivement au rayon et à l'angle des coordonnées polaires (voir [figure 2.13](#)). Les points de mesure sont marqués par des ronds noirs. Pour chaque graphe, la direction d'éclairement et la longueur d'onde sont constantes. La direction d'éclairement est indiquée par une étoile noire. Les valeurs de la réflectance et de la transmittance sont codées suivant une échelle de couleur.

4.2. Analyse des mesures de la campagne 2003

Le premier objectif de cette analyse est de distinguer les composantes diffuse et spéculaire dans les réflectances bi-directionnelles. [Vanderbilt et Grant \(1986\)](#) puis [Brakke \(1994\)](#) ont étudié pour cela la polarisation de la lumière réfléchi. Cependant, la comparaison des variations spectrales et directionnelles de la BRDF devrait suffire, étant donné que la composante diffuse se répartit dans toutes les directions et varie spectralement, alors que la composante spéculaire se concentre autour d'une direction définie et ne varie pas spectralement (cf [chapitre 1](#)). Le second objectif est d'étudier l'influence de la rugosité de surface de la feuille sur sa réflectance bi-directionnelle. De telles études ont été initiées par [Metzner \(1957\)](#) mais ont fait l'objet de peu de travaux de recherche depuis.

Composante spéculaire et composante diffuse

La cuticule épaisse et le fort contenu en chlorophylle de la feuille de laurier en font une candidate idéale pour l'observation d'un fort pic spéculaire sur un faible fond diffus. La [figure 2.13](#) présente le DHRF et la BRDF d'une feuille de laurier à 60° d'incidence. Le DHRF est tracé pour toutes les longueurs d'onde entre 500 nm et 900 nm. Il est maximum dans le proche infrarouge, vers 780 nm, où la feuille n'absorbe presque aucun rayonnement. Il est faible dans le visible à cause de l'absorption de la chlorophylle, avec un maximum dans le vert (vers 550 nm) et un minimum dans le rouge (vers 670 nm). La BRDF est évaluée pour ces trois longueurs d'onde : 550 nm, 670 nm et 780 nm. Ses composantes diffuse et spéculaire contribuent toutes deux au

DHRF. La composante spéculaire se distingue nettement par le pic qu'elle forme autour de la direction d'observation à 60° d'angle zénithal et 180° d'angle azimutal (direction 'miroir'). L'amplitude de ce pic est quasiment indépendante de la longueur d'onde, elle varie de moins de 10 % entre 670 nm et 780 nm. La composante diffuse se voit nettement à 780 nm où elle forme un fond indépendant de la direction d'observation. L'amplitude de ce fond varie de plus de 200 % entre 670 nm et 780 nm. Par conséquent, les variations spectrales du DHRF sont dues presque uniquement à la contribution de la composante diffuse, et la composante spéculaire peut être considérée comme indépendante de la longueur d'onde en première approximation. Ces observations sont à la base du modèle de BRDF présenté dans le [chapitre 3](#). Elles confirment celles de [Woolley \(1971\)](#), [Breece et Holmes \(1971\)](#), [Brakke et al. \(1989\)](#) et [Walter-shea et al. \(1989\)](#), qui ont mis en évidence la composante spéculaire et noté qu'elle était d'autant moins négligeable que l'absorption de la feuille était forte.

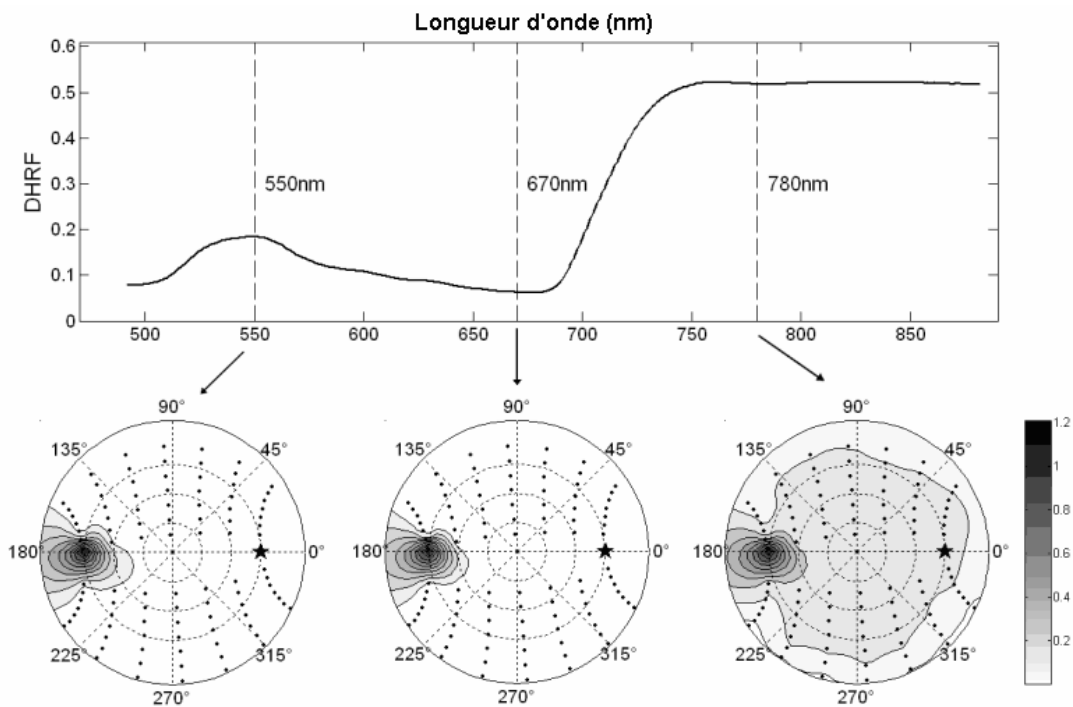


Figure 2.13 : Réflectance de la feuille de laurier en fonction de la longueur d'onde et de la direction d'observation pour une incidence de 65° . En haut : DHRF. En bas : BRDF (sr^{-1}) avec la même échelle pour les trois graphes.

Influence de la rugosité de surface

Les variations directionnelles de la BRDF sont supposées dépendre de la rugosité de surface des feuilles. La [figure 2.14](#) présente les BRDF des feuilles de laurier, hêtre et noisetier à 21° d'incidence et 680 nm. La réflexion diffuse est minimum à cette longueur d'onde, mettant en valeur la réflexion spéculaire. La feuille de laurier, dont la surface est lisse, montre un pic spéculaire intense et bien localisé autour de la direction spéculaire. En revanche, la surface duveteuse de la feuille de noisetier réfléchit la lumière vers l'avant dans un grand angle solide avec un maximum aux grands angles d'observation. La surface de la feuille de hêtre est un cas intermédiaire entre la faible rugosité du laurier et la forte rugosité du noisetier. Sa BRDF est maximum dans la direction spéculaire, mais le pic correspondant est plus large que celui du laurier. Par conséquent, les variations directionnelles de la BRDF sont interprétées comme un effet de la réflexion spéculaire, avec un pic s'élargissant quand la rugosité de surface augmente.

Cette interprétation a été faite par Metzner (1957) qui, pour l'illustrer, a comparé la BRDF d'une feuille de papier à celle d'un morceau de velours. Dans le cas des plantes, l'auteur a aussi étudié l'effet de la convexité des cellules de l'épiderme.

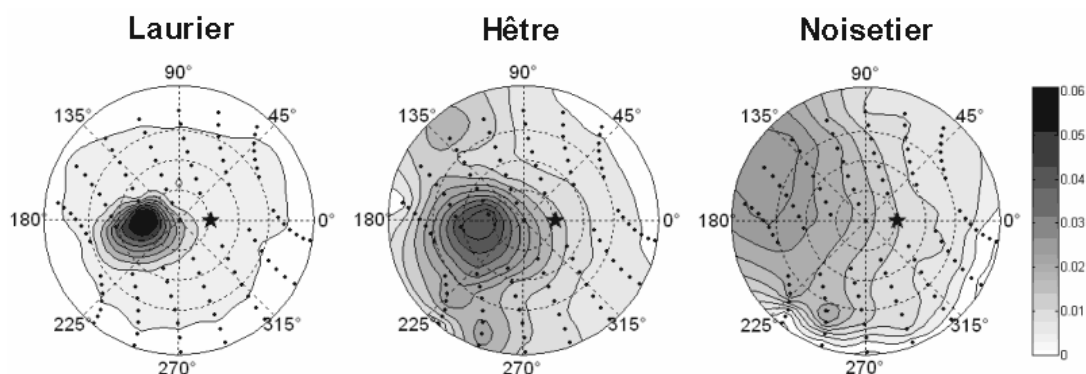


Figure 2.14 : BRDF (sr^{-1}) des feuilles de laurier, hêtre et noisetier à 21° d'incidence et 680 nm. L'échelle est la même pour les trois graphes.

4.3. Analyse des mesures de la campagne de 2005

La campagne de 2005 a permis d'approfondir les liens entre la rugosité de la surface foliaire et la BRDF, et fourni quelques BRDF originales liées à des artéfacts de mesure. Par ailleurs, l'effet de la différenciation du parenchyme chez les dicotylédones a été étudié, ainsi que les variations de la BTDF avec la direction d'éclairement.

Variations des BRDF avec la longueur d'onde et la rugosité

La figure 2.15 montre la BRDF des feuilles de laurier, hêtre, maïs et vigne, à 45° d'incidence et deux longueurs d'onde : 660 nm (forte absorption) et 800 nm (faible absorption et forte diffusion). On constate que la réflexion spéculaire se démarque de la réflexion diffuse quelle que soit la longueur d'onde. La direction du maximum de réflexion spéculaire, particulièrement visible à 660 nm, varie selon la feuille : pour une feuille lisse comme le laurier, ce maximum est à 45° d'observation environ ; pour une feuille moins lisse comme le hêtre, le maximum est observé à 70° . Le déplacement du maximum de réflexion spéculaire, ou *off-specular reflection*, a été observé sur des métaux ou des céramiques et expliqué par Torrance et Sparrow (1967). Notre modèle de BRDF, développé dans le chapitre 3 et largement inspiré du travail de ces auteurs, tient compte de cet effet. Lorsque la rugosité est forte, pour la feuille de vigne par exemple, le maximum est observé à 70° ou plus, et le pic spéculaire s'élargit. Si la rugosité est plus forte dans une direction, comme sur la feuille monocotylédone de maïs, alors le pic spéculaire s'étale plus suivant cette direction.

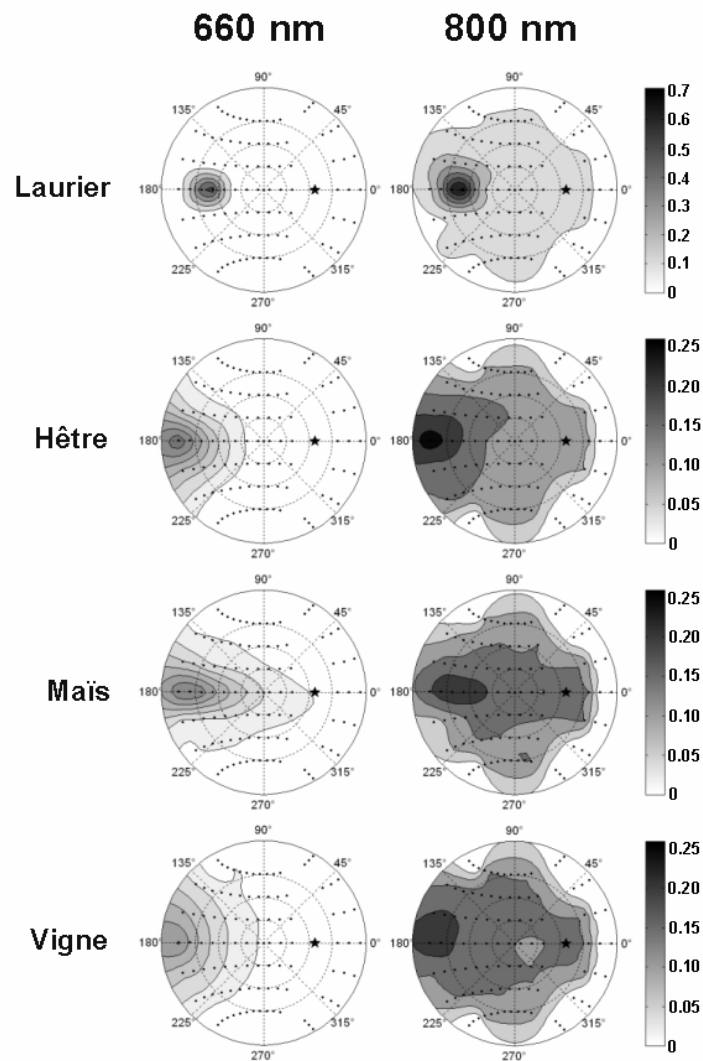


Figure 2.15 : BRDF (sr^{-1}) des feuilles de laurier, hêtre, maïs et vigne pour 45° d'incidence et deux longueurs d'onde (660 nm et 800 nm). L'échelle est environ trois fois plus grande pour le laurier qui présente un très fort pic spéculaire.

BRDF exotiques

Certaines mesures de BRDF font apparaître des formes inattendues, comme le montre la [figure 2.16](#) pour la fétuque et le noyer. Ces formes sont généralement des artéfacts liés à la géométrie de l'échantillon. Pour la feuille de fétuque, son rayon de courbure à l'échelle du millimètre empêche d'en caractériser une partie plane et la forme en cuvette crée deux maximums de réflexion. Pour la feuille de noyer, épaisse et rigide, la surface observée n'était pas parallèle au plan du porte-échantillon et il en résulte une mauvaise estimation des directions d'observation. Ces mesures "exotiques" ne seront pas analysées plus en avant et ne pourront pas être comparées aux modèles de BRDF.

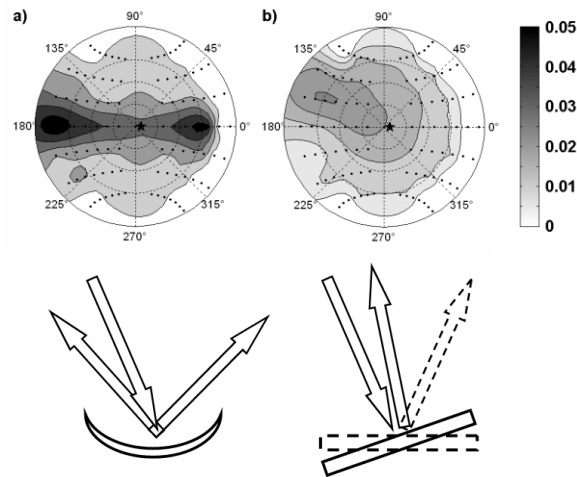


Figure 2.16 : BRDF (sr^{-1}) des feuilles de fétuque (à gauche) et de noyer (à droite) éclairées à 5° et 660 nm .

Différences entre faces supérieures et faces inférieures

La [figure 2.17](#) présente la BRDF des faces supérieure et inférieure de la feuille de hêtre à une longueur d'onde de forte absorption (680 nm), et à des incidences de 05° , 25° et 45° . Bien que la rugosité semble légèrement plus grande sur la face supérieure, les variations directionnelles de la BRDF sont semblables pour les deux faces. En revanche, l'intensité de la BRDF est plus forte d'environ $0,03 \text{ sr}^{-1}$ sur la face inférieure. Cette différence semble indépendante de la direction d'éclairage. Elle est probablement due à la structure dissymétrique du cœur de la feuille dicotylédone : la parenchyme palissadique, peu diffusant, se trouve du côté de la face supérieure, et le parenchyme spongieux, plus diffusant, se trouve du côté de la face inférieure. Par conséquent, la réflexion sur la face inférieure bénéficie de l'effet du parenchyme spongieux qui réfléchit beaucoup de rayonnement avant que la majeure partie de l'absorption n'ait eu lieu. Cet effet sur la réflectance directionnelle-hémisphérique a été observé par [Gausman \(1985\)](#) et [Yamada et Fujimura \(1991\)](#).

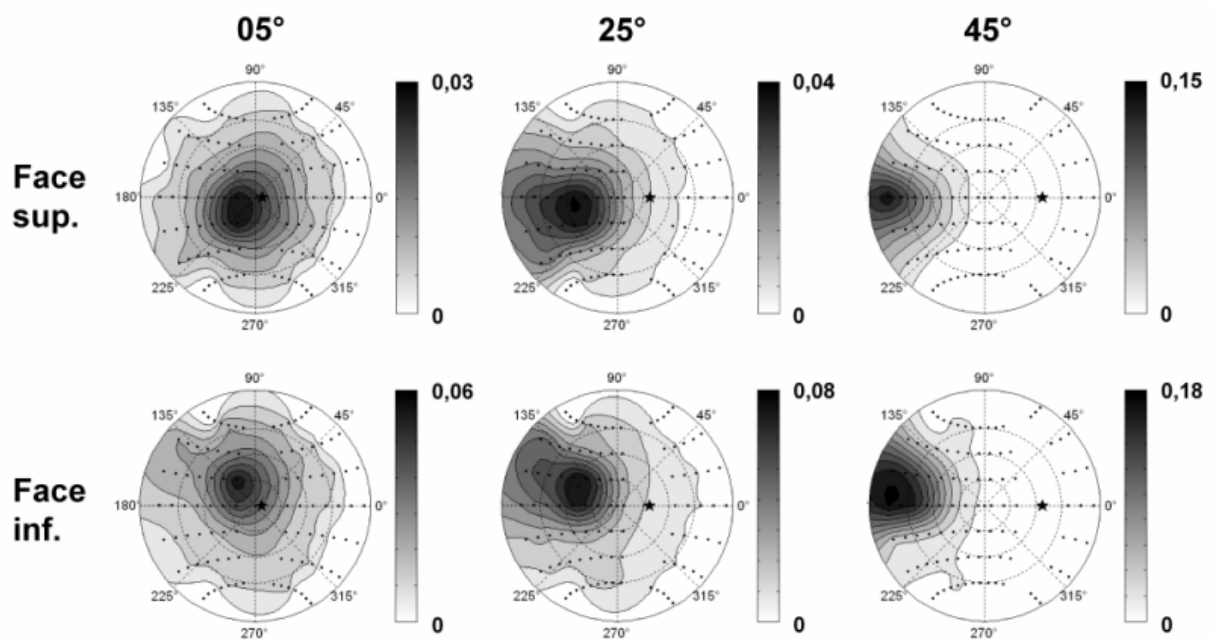


Figure 2.17 : BRDF (sr^{-1}) de la face supérieure et de la face inférieure d'une feuille de hêtre à 680 nm et trois angles d'incidence.

BRDF et BTDF

La [figure 2.18](#) présente les BRDF et BTDF de la feuille de hêtre pour une longueur d'onde de forte absorption (660 nm), et des angles d'incidence de 05°, 25°, 45° et 65°. Lorsque l'incidence augmente, le pic spéculaire se forme et la BRDF atteint des valeurs de plus en plus élevées. Parallèlement, la BTDF décroît mais sa forme change moins. Ce comportement, présent pour toutes les feuilles étudiées, confirme les observations de [Breece et Holmes \(1971\)](#). Par ailleurs, la BTDF n'est pas lambertienne aux longueurs d'onde de forte absorption : la transmission est maximum pour les faibles angles zénithaux (rayons perpendiculaires au plan de la feuille), en accord avec les mesures de [Breece et Holmes \(1971\)](#) et [Brakke \(1989\)](#). Les rayons lumineux perpendiculaires au plan de la feuille parcourent moins de chemin dans le milieu absorbant et sont mieux transmis. Aux longueurs d'onde de faible absorption, l'anisotropie de la BTDF disparaît presque complètement. Par conséquent, l'apparition de variations directionnelles dans la BTDF est toujours associée à de très faibles valeurs de la quantité d'énergie transmise.

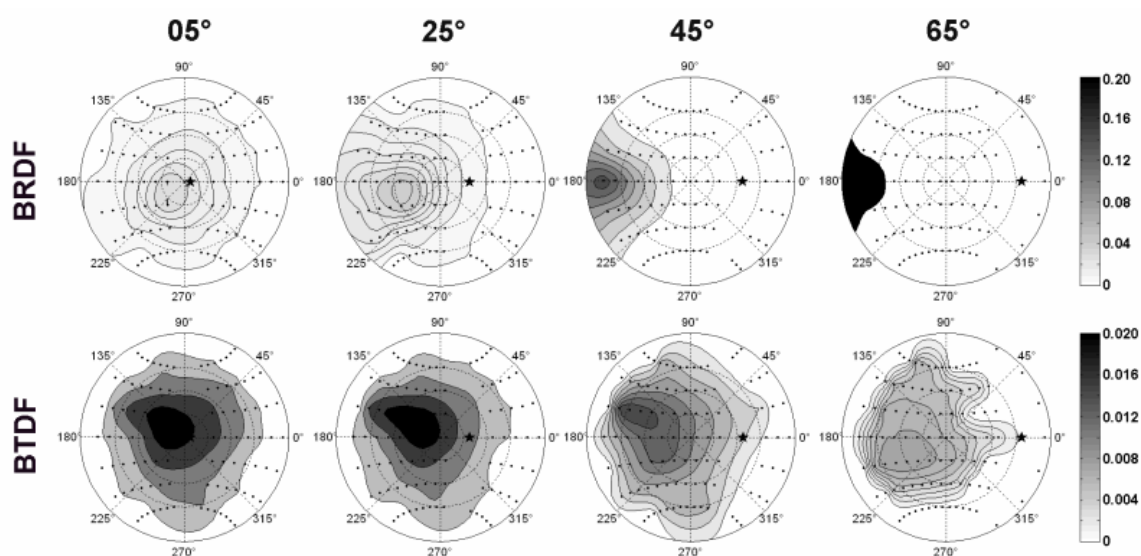


Figure 2.18 : BRDF et BTDF (sr^{-1}) d'une feuille de hêtre à 660 nm et quatre angles d'incidences. L'échelle est dix fois plus faible pour les BTDF.

5. Discussion

Le spectro-photo-goniomètre

L'avantage de l'appareil réside dans la mesure simultanée de spectres complets dans plusieurs directions d'observation. En contrepartie, le temps d'acquisition de la caméra CCD ne peut pas être adapté à chacun de ces signaux séparément. Par exemple, un détecteur dans la direction de la réflexion spéculaire recevra un fort flux lumineux dont le spectre sera proche de celui de la source. En même temps, un détecteur en dehors du plan principal, observant la réflexion diffuse, recevra un flux plus faible qui sera encore diminué par les bandes d'absorption de la feuille. Le temps d'acquisition pour les deux détecteurs sera fixé à partir du signal le plus fort afin d'éviter la saturation de la CCD. La dynamique étant limitée à 65000 coups, les faibles flux seront sous-exposés. Pour s'affranchir de ces limites, il faut créer une source fournissant plus d'énergie dans les domaines spectraux fortement absorbés par les feuilles, et la réflexion

spéculaire doit être étudiée avec un protocole particulier n'utilisant qu'un seul détecteur se déplaçant dans la zone adéquate.

Les incertitudes sur le positionnement de la mécanique détériorent la répétabilité des mesures. Le blocage de l'arc mobile se fait trop près de son axe de rotation et il faudrait l'en écarter. L'utilisation d'un moteur pas à pas permettrait de gagner en précision et confort d'utilisation. Par ailleurs, la position de l'échantillon est peu contrôlable. Le porte-échantillon pourrait être équipé de systèmes de rotation et translation avec un réglage fin. Concernant l'échantillonnage directionnel, deux des neuf détecteurs sur l'arc de réception ne sont pas utilisés car leur direction d'observation est trop rasante. La position des logements pourrait être modifiée afin de mieux couvrir la proximité du plan principal. Enfin, le logiciel d'exploitation du système étant instable, une nouvelle version serait souhaitable.

Le calcul de la BRDF des feuilles nécessite la connaissance de la BRDF du Spectralon, souvent supposée lambertienne. Or les mesures de [Obein *et al.* \(2005\)](#) montrent un effet spéculaire non négligeable qui a aussi été observé avec notre instrument. Par conséquent, il est souhaitable que les laboratoires de métrologie procèdent à de nouvelles mesures pour quantifier l'écart à l'idéalisation lambertienne.

Caractérisation des feuilles

Dans le but de caractériser une espèce de feuille par ses propriétés optiques, des mesures de la variabilité intra-espèce seraient nécessaires. Les mesures présentées pour la feuille de laurier ne sont pas représentatives de cette espèce mais de cette feuille uniquement, car la structure foliaire varie avec l'âge, la position sur la plante et les conditions environnementales. La variabilité intra-espèce n'a pas été étudiée dans le cadre de cette thèse car la priorité a été donnée à la variabilité inter-espèce, supposée plus importante pour le développement d'une modélisation physique de la réflectance. La portion de surface de feuille étudiée (environ 1 cm^2) est-elle représentative de la feuille dans son ensemble ? Oui, elle est représentative du limbe foliaire, mais, à l'échelle de plusieurs centimètres, les feuilles ne sont généralement pas planes et leurs ondulations doivent être prises en compte pour estimer une fonction de diffusion représentative de la feuille dans son ensemble. La mesure de la fonction de diffusion d'une feuille, entièrement éclairée et observée, n'a jamais été réalisée à notre connaissance.

6. Conclusion du chapitre

Le spectro-photo-goniomètre développé conjointement par des laboratoires des universités Paris-Sud et Paris 7, du CNRS et de l'INRA, a été utilisé pour mesurer les fonctions de distribution de réflectance et de transmittance bi-directionnelles des feuilles. L'originalité des mesures tient dans leur échantillonnage directionnel et spectral : des spectres de 512 points sont enregistrés dans 196 directions d'observation pour quatre directions d'éclairement. L'utilisation conjointe des variations spectrales et directionnelles permet d'identifier les composantes en réflexion : la réflexion de surface produit un pic spéculaire qui ne varie pas avec la longueur d'onde, alors que la réflexion de volume produit un fond diffus portant la signature spectrale de l'absorption des constituants foliaires (chlorophylle, eau, *etc.*). La largeur du pic spéculaire augmente avec la rugosité de surface de la feuille. Les faces inférieure et supérieure d'une dicotylédone peuvent avoir une même rugosité, mais la réflectance est plus forte pour la face inférieure à cause de sa proximité avec le parenchyme spongieux. Enfin, concernant la transmittance, les variations directionnelles sont faibles et les variations spectrales sont celles de la

composante diffuse en réflexion. Par conséquent, il est raisonnable de modéliser la réflexion diffuse et la transmission comme des fonction indépendantes de la direction d'observation (lambertiennes) mais variant avec la longueur d'onde. En revanche, la modélisation de la réflexion spéculaire doit tenir compte de son invariance spectrale et des effets de rugosité de surface.

Chapitre 3

Modélisation des réflectances bi-directionnelles et applications

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Réflexion de la lumière par les surfaces
 - 2.1. La notion de rugosité
 - 2.2. La surface rugueuse comme un ensemble de facettes
 - 2.3. Application aux feuilles
3. Le modèle de réflectance diffuse et spéculaire des feuilles
 - 3.1. Modélisation géométrique de la surface de la feuille
 - 3.2. Calcul de l'éclairement et de la luminance
 - 3.3. Fonction de distribution des orientations des facettes
 - 3.4. Atténuation d'origine géométrique
 - 3.5. Ecriture finale de la réflectance bi-directionnelle
 - 3.6. Relations géométriques
4. Comparaison avec d'autres modèles
 - 4.1. Torrance et Sparrow 1967
 - 4.2. Cook et Torrance 1981
5. Etude directe de la composante spéculaire
 - 5.1. Facteur de réflexion de Fresnel
 - 5.2. Réflectance bi-directionnelle
 - 5.3. Facteur de réflexion directionnel-hémisphérique
6. Inversion du modèle et applications
 - 6.1. La méthode d'inversion
 - 6.2. Variations directionnelles de la composante spéculaire
 - 6.3. Invariance spectrale de la composante spéculaire
 - 6.4. Angle solide spéculaire et contribution au facteur de réflexion directionnel-hémisphérique
 - 6.5. Couplage avec le modèle Prospect
7. Conclusion du chapitre

1. Introduction

Les modèles de réflexion spéculaire introduits dans les simulations du transfert radiatif au sein du couvert végétal sont présentés dans le [chapitre 1](#). Ils ne sont pas satisfaisants du point de vue de la physique car ils ne traitent pas rigoureusement la réflexion sur une surface rugueuse et introduisent des paramètres empiriques mal identifiés. Le modèle de réflectance bi-directionnelle des feuilles ici présenté suit l'approche physique de [Torrance et Sparrow \(1967\)](#). La surface foliaire est décrite statistiquement et l'atténuation géométrique est prise en compte de manière simple. Après son étude dans le sens direct, le modèle est utilisé en inversion sur les mesures de BRDF présentées dans le [chapitre 2](#), dans le but de valider les hypothèses faites et de caractériser la réflexion spéculaire de la lumière par les feuilles. Enfin, il est associé au modèle de propriétés optiques spectrales Prospect pour simuler les variations spectrales et directionnelles des propriétés optiques des feuilles.

2. Réflexion de la lumière par les surfaces

2.1. La notion de rugosité

Toutes les surfaces peuvent être considérées comme rugueuses à l'échelle moléculaire. Cependant les longueurs typiques de ces rugosités doivent être comparées à la longueur d'onde du rayonnement incident. La distance entre les atomes d'un solide (inférieure au nanomètre) est bien plus petite que les longueurs d'onde optiques (de l'ordre de la centaine ou du millier de nanomètres). La théorie de l'électromagnétisme des milieux continus traite donc les solides comme des milieux continus et décrit la lumière comme une onde caractérisée par son amplitude et sa phase. La phase varie de 0 à 2π à chaque fois que l'onde parcourt une distance égale à sa longueur d'onde λ . Pour une surface infiniment grande par rapport à la longueur d'onde, et si les variations de hauteur de la surface sont faibles et continues à l'échelle de la longueur d'onde, on peut négliger la phase de l'onde et traiter la lumière comme un ensemble de rayons lumineux. Le cadre théorique est alors l'optique géométrique. En revanche, si les variations de hauteur de la surface sont fortes et brusques à l'échelle de la longueur d'onde, alors il faut considérer la phase de l'onde et appliquer l'électromagnétisme des milieux continus. C'est dans ce cadre que [Beckmann et Spizzichino \(1987\)](#) ont étudié l'interaction des ondes radar (longueur d'onde de 1 cm à 100 cm) avec les surfaces terrestres ou planétaires.

2.2. La surface rugueuse comme un ensemble de facettes

Dans le cas de surfaces lisses à l'échelle de la longueur d'onde, mais rugueuses à plus grande échelle, les lois de l'optique géométrique peuvent être appliquées. La surface doit être pensée comme un ensemble de 'facettes', grandes devant la longueur d'onde, dont l'arrangement spatial provoque la rugosité à grande échelle. Un exemple est fourni par l'observation de la surface des océans depuis un avion ou un satellite. L'eau est lisse à l'échelle du micromètre mais le vent génère des vagues de différentes tailles. La rugosité ainsi créée modifie la luminance de l'océan et permet l'estimation de la force et de la direction du vent. Cette application, présentée pour la première fois par [Cox et Munk \(1954\)](#), est encore utilisée aujourd'hui ([Bréon, 1993](#) ; [Bréon et Henriot, 2006](#)). La modélisation d'une surface par un ensemble de facettes réfléchissant spéculairement la lumière peut s'appliquer à des échantillons de quelques centimètres carrés. [Torrance et Sparrow \(1967\)](#) ont développé un tel modèle pour étudier la surface de métaux ou de

céramiques. Leurs résultats expliquent l'apparition d'un pic spéculaire dont la largeur dépend de la rugosité de la surface et dont le maximum est décalé vers les grands angles d'observation. Leurs travaux ont récemment été utilisés par Meister *et al.* (2001) pour l'étude de matériaux urbains (asphalte, béton, *etc.*). La performance des modèles de réflexion spéculaire par une surface rugueuse dépend principalement de la description de la surface et des phénomènes d'atténuation géométrique tels que l'ombrage ou le masquage entre facettes. La description statistique des surfaces est présentée en détail par Beckmann et Spizzichino (1987) et l'atténuation géométrique pour des facettes regroupées deux à deux dans des cavités en forme de 'V' est étudiée par Torrance et Sparrow (1967). Les expressions obtenues par ces derniers ont été simplifiées par Cook et Torrance (1981) afin d'accélérer les calculs en synthèse d'image par ordinateur.

La réflectance d'une surface est généralement la somme d'une composante spéculaire et d'une composante diffuse. Cette dernière n'a pas de définition précise et regroupe tout ce qui ne peut pas être décrit par la composante spéculaire. La composante diffuse est souvent liée aux diffusions multiples créées dans le volume de l'échantillon étudié. La plus simple description de la composante diffuse est le modèle de Lambert (1760) pour lequel la surface dans son ensemble se comporte comme un réflecteur lambertien (voir annexe C, section 3). On peut affiner le modèle en considérant que la surface est constituée de multiples facettes lambertiennes. Dans ce cas, la description de la surface est la même que pour des facettes spéculaires mais l'atténuation géométrique sera différente. Un modèle complet de surface rugueuse aux facettes lambertiennes a été proposé par Oren et Nayar (1995). On peut enfin considérer que les deux types de réflexion, spéculaire et lambertienne, coexistent pour chaque facette : cette approche conduit à un modèle plus complet mais plus lourd à utiliser.

2.3. Application aux feuilles

La modélisation de la réflectance bi-directionnelle des feuilles n'a que peu profité des avancées faites pour d'autres champs d'application. Woolley (1971) pense déjà la surface foliaire comme un ensemble de facettes spéculaires mais ne développe pas de modèle correspondant. Moldau (1967) s'y est intéressé mais son travail (en russe) n'a pas été traduit à notre connaissance. Brakke *et al.* (1989) proposent une formule empirique pour décrire les mesures de réflectance dans le plan principal. Notons que des modèles empiriques plus performants ont été développés pour la synthèse d'image, tels ceux de Phong (1975) ou Ward (1992). Ces modèles s'appliquent aussi bien aux feuilles qu'aux surfaces artificielles. L'approche physique de Torrance et Sparrow (1967) se retrouve dans les travaux de Sanz (1994). Ce dernier a mesuré et modélisé la réflectance directionnelle de deux types de feuilles. Les résultats sont encourageants mais le modèle n'est pas abouti et ne parvient pas à simuler convenablement les mesures. Plusieurs modifications sont à apporter dans le calcul de la luminance, la description de la surface et les prises en compte de l'atténuation géométrique.

3. Le modèle de réflectance diffuse et spéculaire des feuilles

Les feuilles sont des objets diffusant et l'énergie réfléchi est répartie dans toutes les directions de l'hémisphère supérieur. On peut donc considérer que la réflectance des feuilles suit la loi de Lambert en première approximation, conduisant à une fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) indépendante de la direction d'observation (θ_v, ϕ_v) :

$$BRDF_{Lambert}(\theta_v, \varphi_v) = \frac{k_L}{\pi} \quad \text{Eq. 3.1}$$

où k_L est le coefficient de Lambert égal au facteur de réflexion directionnel-hémisphérique :

$$DHRF_{Lambert} = \iint \frac{k_L}{\pi} \cos \theta_v \sin \theta_v \, d\theta_v \, d\varphi_v = k_L \quad \text{Eq. 3.2}$$

Comme la BRDF des feuilles dépend de la longueur d'onde λ , le coefficient de Lambert doit épouser ses variations et le modèle le plus simple de BRDF diffuse des feuilles, $BRDF_{diff}$, s'écrit pour tout couple (θ_v, φ_v) :

$$BRDF_{diff}(\lambda) = \frac{k_L(\lambda)}{\pi} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Nos mesures montrent qu'à cette composante diffuse s'ajoute une composante spéculaire, $BRDF_{spec}$, due à la réflexion en surface. La BRDF totale s'écrit donc :

$$BRDF(\lambda, \theta_v, \varphi_v) = BRDF_{diff}(\lambda) + BRDF_{spec}(\theta_v, \varphi_v) \quad \text{Eq. 3.4}$$

La composante spéculaire ne devrait pas suivre les variations spectrales de la réflectance des feuilles car elle représente la lumière qui n'a pas pénétré à l'intérieur de la feuille et qui, par conséquent, n'est pas affectée par la signature spectrale des constituants foliaires. Nous avons développé un modèle de réflexion spéculaire basé sur l'idée que la surface de la feuille est constituée de multiples facettes dont certaines réfléchissent spéculairement la lumière (figure 3.1).



Figure 3.1 : Photographie des faces supérieures d'une feuille de vigne (dicotylédone, à gauche) et de maïs (monocotylédone, à droite). Chaque image représente environ 1 cm² de surface foliaire.

3.1. Modélisation géométrique de la surface de la feuille

A l'échelle du centimètre carré, la feuille est assimilée à une surface plane appelée plan moyen de normale \bar{N} (figure 3.2). A plus petite échelle, la surface est composée de multiples facettes planes aux orientations aléatoires. L'orientation d'une facette est repérée en trois

dimensions par la direction (α, ϕ) de sa normale \vec{H} , α appartenant à l'intervalle $[0; \pi/2]$ (angle zénithal) et ϕ à $[0; 2\pi]$ (angle azimutal). α représente l'inclinaison de la facette par rapport au plan moyen. Il est défini par :

$$\cos \alpha = \vec{H} \cdot \vec{N} \quad \text{Eq. 3.5}$$

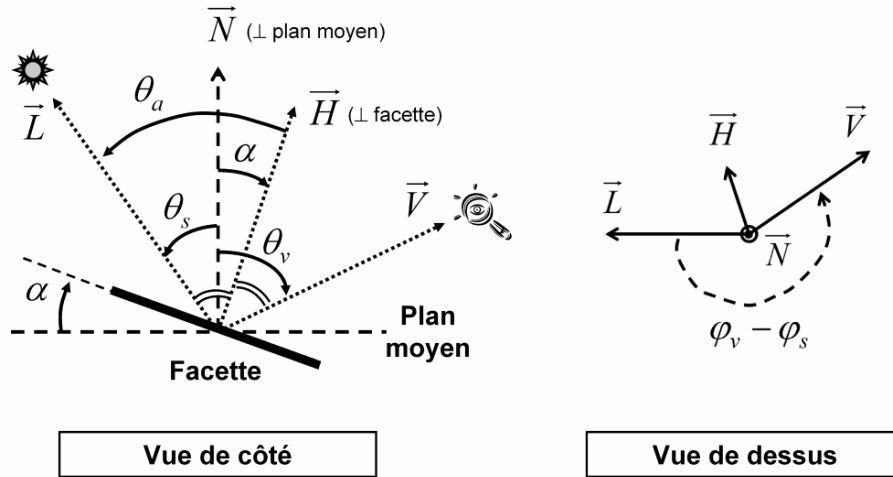


Figure 3.2 : Plan moyen et facette de la feuille avec repérage géométrique.

Pour décrire statistiquement l'orientation des facettes, on définit une fonction de distribution de probabilité $D(\alpha, \phi)$ (en sr^{-1}) telle que $D(\alpha, \phi) d\Omega_h$ est la probabilité pour une facette d'être orientée dans l'angle solide $d\Omega_h = \sin \alpha d\alpha d\phi$ autour de la direction (α, ϕ) . La probabilité de toutes les orientations étant égale à un, cette fonction doit vérifier :

$$\int_{2\pi} D(\alpha, \phi) d\Omega_h = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi = 1 \quad \text{Eq. 3.6}$$

On suppose que la probabilité de trouver une facette avec l'orientation (α, ϕ) ne dépend pas de l'angle azimutal ϕ mais uniquement de son inclinaison par rapport au plan moyen. En intégrant Eq. 3.6 sur ϕ , on a :

$$\int_0^{\pi/2} D(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{2\pi} \quad \text{Eq. 3.7}$$

La feuille étant rugueuse, la mesure de sa surface dépend de l'échelle considérée. Soit un ensemble de b facettes ayant la même surface A_f . Chacune projette la surface $A_f \cos \alpha$ sur le plan moyen de la feuille. Leur surface totale est donc $b A_f$ mais la surface correspondante sur le plan moyen est :

$$A = b A_f \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos \alpha D(\alpha) d\Omega_h \quad \text{Eq. 3.8}$$

Le calcul de cette intégrale dépend du choix de la fonction $D(\alpha)$.

3.2. Calcul de l'éclairement et de la luminance

Soit un faisceau incident provenant de la direction \vec{L} et transportant un flux lumineux U par unité de surface perpendiculaire à la direction \vec{L} . L'angle θ_s entre la normale au plan moyen de la feuille et la direction \vec{L} est tel que $\vec{N} \cdot \vec{L} = \cos \theta_s$. L'éclairement du plan moyen de la feuille vaut donc :

$$E = U \cos \theta_s \quad \text{Eq. 3.9}$$

Il n'existe qu'une seule orientation \vec{H} des facettes conduisant à la réflexion spéculaire de la direction \vec{L} vers une direction \vec{V} , elle vaut :

$$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{\|\vec{L} + \vec{V}\|} \quad \text{Eq. 3.10}$$

On définit l'angle θ_a comme étant l'angle d'incidence de la lumière sur les facettes d'orientation \vec{H} . La réflexion étant spéculaire, θ_a est aussi l'angle entre la normale à la facette et la direction d'observation \vec{V} :

$$\vec{H} \cdot \vec{L} = \vec{H} \cdot \vec{V} = \cos \theta_a \quad \text{Eq. 3.11}$$

Si l'on considère toutes les directions d'observation comprises dans un angle solide $d\Omega_v$, alors l'orientation des facettes contribuant à la réflexion spéculaire sera inscrite dans un angle solide $d\Omega_h$ autour de \vec{H} . Le lien géométrique entre ces deux angles solides est donné par [Rense \(1950\)](#):

$$d\Omega_h = \frac{d\Omega_v}{4 \cos \theta_a} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Sur un ensemble de b facettes, seules $b D(\alpha) d\Omega_h$ d'entre elles réfléchissent spéculairement la lumière dans les directions d'observations $d\Omega_v$. Ce sont les facettes 'spéculaires'.

L'éclairement reçu par les facettes spéculaires est :

$$E_f = U \cos \theta_a \quad \text{Eq. 3.13}$$

Connaissant leur surface A_f , on en déduit le flux lumineux incident sur chaque facette. La proportion de ce flux qui est réfléchi est donnée par le facteur de réflexion de Fresnel $F(n, \theta_a)$ avec un mélange équitable des polarisations linéaires perpendiculaires et parallèles au plan principal ([Cook et Torrance, 1981](#)) :

$$F(n, \theta_a) = \frac{1}{2} \left(\frac{g - \cos \theta_a}{g + \cos \theta_a} \right)^2 \left[1 + \frac{(\cos \theta_a (g + \cos \theta_a) - 1)^2}{(\cos \theta_a (g - \cos \theta_a) + 1)^2} \right] \quad \text{Eq. 3.14}$$

où $g^2 = n^2 + \cos^2 \theta_a - 1$ et n est l'indice de réfraction de la surface. Le flux lumineux Φ réfléchi par les facettes spéculaires vaut donc :

$$\Phi = \underbrace{b D(\alpha) d\Omega_h}_{\text{Nombre de facettes}} \underbrace{F(n, \theta_a)}_{\text{Fresnel}} \underbrace{A_f U \cos \theta_a}_{\text{Flux reçu par facette}} \quad \text{Eq. 3.15}$$

Il faut maintenant calculer non pas la luminance des facettes spéculaires mais celle du plan moyen de la feuille de surface A reliée à la surface et à la distribution des facettes par Eq. 3.8. Par définition, la luminance est le flux lumineux émis par unité de surface apparente et d'angle solide. La surface apparente du plan moyen est $A \cos \theta_v$, et l'angle solide d'observation est $d\Omega_v$, d'où la luminance du plan moyen :

$$L = \frac{\Phi}{A \cos \theta_v d\Omega_v} = \frac{b D(\alpha) F(n, \theta_a) A_f U}{4 A \cos \theta_v} \quad \text{Eq. 3.16}$$

Enfin la BRDF du plan moyen de la feuille est le rapport de sa luminance (Eq. 3.16) à son éclairement (Eq. 3.9) :

$$BRDF = \frac{L}{E} = \frac{D(\alpha) F(n, \theta_a)}{4 \cos \theta_v \cos \theta_s} \times \frac{b A_f}{A} \quad \text{Eq. 3.17}$$

L'expression Eq. 3.17 ne tient pas compte des effets géométriques d'ombre ou de masque entre facettes. Ces effets sont modélisés par un facteur d'atténuation géométrique $G(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ explicité dans la section 3.4 et la BRDF s'écrit de manière générale :

$$BRDF = \frac{D(\alpha) F(n, \theta_a) G(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)}{4 \cos \theta_v \cos \theta_s} \times \frac{b A_f}{A} \quad \text{Eq. 3.18}$$

Cette expression est le coeur du modèle. Elle est valable quelle que soit la distribution $D(\alpha)$ et le facteur $G(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$.

3.3. Fonction de distribution des orientations des facettes

S'inspirant des travaux de Beckmann et Spizzichino (1987), publié originalement en 1963, Cook et Torrance (1981) ont proposé l'expression suivante pour la fonction de distribution des orientations des facettes :

$$D(\alpha) = \frac{c(\sigma)}{\cos^4 \alpha} \exp \left[- \left(\frac{\tan \alpha}{\sigma} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 3.19}$$

où σ est le paramètre de rugosité de la surface. Nous avons ajouté un facteur $c(\sigma)$, absent du travail de [Cook et Torrance \(1981\)](#), pour tenir compte de la normalisation imposée par [Eq 3.7](#). Rappelons que la somme des probabilités des différentes orientations doit être égale à 1 quelle que soit la rugosité. L'expression de [Beckmann et Spizzichino \(1987\)](#), obtenue en deux dimensions pour une surface dont la distribution des hauteurs est gaussienne, est présentée en [annexe E](#) et comparée à [Eq. 3.19](#). La [figure 3.3](#) représente $D(\alpha)$ pour différentes valeurs de σ , avec $c(\sigma)=1$. Lorsque σ est inférieur à 0,7, la distribution est maximale pour une inclinaison nulle, et l'inclinaison moyenne augmente avec la rugosité. Lorsque σ est supérieur à 0,7, la distribution est maximale pour une valeur non nulle qui augmente avec la rugosité.

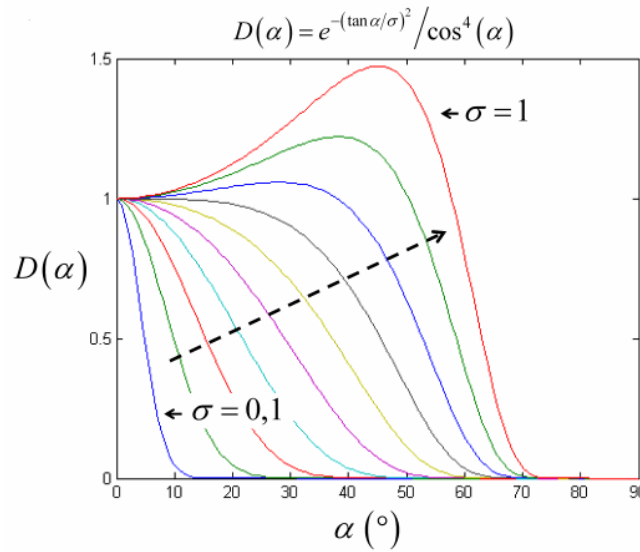


Figure 3.3 : Graphe de la distribution des orientations des facettes pour différentes valeurs du paramètre de rugosité ($\sigma = 0,1 ; 0,2 ; \dots ; 0,9 ; 1$).

La forme donnée à la distribution de l'orientation des facettes par [Eq. 3.19](#) permet de calculer le facteur $b A_f / A$ dans la BRDF ([Eq. 3.18](#)). Pour cela, insérons [Eq. 3.19](#) dans [Eq. 3.8](#) :

$$A = b A_f \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{c(\sigma)}{\cos^4 \alpha} \exp \left[- \left(\frac{\tan \alpha}{\sigma} \right)^2 \right] \cos \alpha \sin \alpha d\alpha d\phi \quad \text{Eq. 3.20}$$

et introduisons la pente des facettes ζ qui est liée à l'inclinaison par :

$$\zeta = \tan \alpha \quad \text{Eq. 3.21}$$

En faisant le changement de variable $d\zeta = d\alpha / \cos^2 \alpha$ et en intégrant [Eq. 3.20](#) sur ϕ , puis ζ , on a :

$$A = b A_f c(\sigma) 2\pi \int_0^{+\infty} \exp \left[- (\zeta / \sigma)^2 \right] \zeta d\zeta = b A_f c(\sigma) \pi \sigma^2 \quad \text{Eq. 3.22}$$

En remplaçant [Eq. 3.22](#) dans [Eq. 3.18](#), on obtient :

$$BRDF = \frac{F(n, \theta_a) G(\theta_s, \theta_v, \phi_v)}{4 \pi \sigma^2 \cos \theta_v \cos \theta_s} \times \frac{\exp[-(\tan \alpha / \sigma)^2]}{\cos^4 \alpha} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Ceci est l'expression de la BRDF spéculaire. On peut remarquer que la constante normalisatrice $c(\sigma)$ n'intervient pas dans l'expression si bien que son calcul est superflu. Les effets d'ombrage représentés par le terme G sont introduits dans la section suivante.

Notons que la distribution des orientations des facettes dépend uniquement de l'inclinaison α par rapport au plan moyen de la surface, alors que les facettes sont repérées en trois dimensions par (α, ϕ) . Par conséquent, la rugosité de la surface est la même quelle que soit la direction azimutale. Pour tenir compte de rugosités différentes dans deux directions perpendiculaires, [Ward \(1992\)](#) introduit une distribution $D_w(\alpha, \phi)$ à deux paramètres m et n :

$$D_w(\alpha, \phi) \approx \frac{1}{m n} \exp \left[-\tan^2 \alpha \left(\frac{\cos^2 \phi}{m^2} + \frac{\sin^2 \phi}{n^2} \right) \right] \quad \text{Eq. 3.24}$$

Si $m = n$, alors on retrouve une distribution gaussienne de la variable $\tan \alpha$ avec un paramètre de rugosité $\sigma = m = n$. La distribution à deux rugosités serait utile pour modéliser la surface des feuilles monocotylédones dont les nervures parallèles sont responsables d'une rugosité plus forte dans la direction perpendiculaire aux nervures.

3.4. Atténuation d'origine géométrique

Pour tenir compte des phénomènes d'ombrage, il faut introduire un facteur d'atténuation géométrique G dans l'expression de la BRDF :

$$\begin{cases} G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a) = \min[1; E_1; E_2] \\ E_1 = \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_v}{\cos \theta_a} \quad \text{et} \quad E_2 = \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_s}{\cos \theta_a} \end{cases} \quad \text{Eq. 3.25}$$

G est compris entre 0 et 1 et son influence est particulièrement importante aux grands angles d'incidence. Cette expression est issue des travaux de [Blinn \(1977\)](#) pour des cavités en forme de 'V' de même taille. [Cook et Torrance \(1981\)](#) l'ont préférée à l'expression de [Torrance et Sparrow \(1967\)](#) pour sa simplicité. La [figure 3.4](#) présente le facteur G en fonction de la direction d'observation pour quatre angles d'incidence. Aux incidences proches de la normale, ce facteur est égal à 1 pour les angles zénithaux d'observation inférieurs à 60° puis décroît jusqu'à 0 lorsque l'observation est rasante. Aux plus grandes incidences, la décroissance est plus faible dans les directions de diffusion vers l'avant et plus fortes dans les directions de diffusion vers l'arrière.

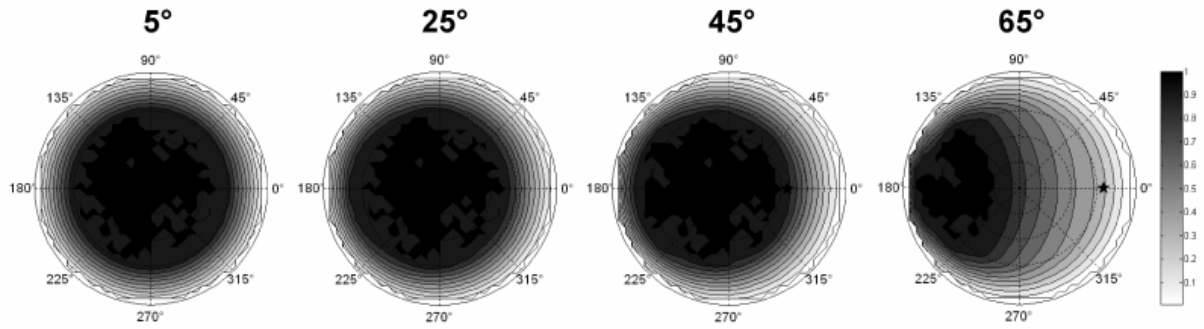


Figure 3.4 : Facteur d'atténuation géométrique G pour quatre angles d'incidence.

3.5. Ecriture finale de la réflectance bi-directionnelle

Le modèle de BRDF est la somme d'une composante diffuse donnée par Eq. 3.3 et d'une composante spéculaire donnée par Eq. 3.23. La BRDF totale s'écrit donc :

$$BRDF(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{k_L(\lambda)}{\pi} + \frac{F(n, \theta_a) G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a)}{4 \pi \sigma^2 \cos \theta_v \cos \theta_s} \times \frac{\exp\left[-(\tan \alpha / \sigma)^2\right]}{\cos^4 \alpha} \quad \text{Eq. 3.26}$$

Cette expression ne fait intervenir que trois paramètres : le coefficient de Lambert k_L , l'indice de réfraction n et le paramètre de rugosité σ . Avant d'étudier la composante spéculaire, les relations géométriques indispensables au calcul des angles α , ϕ et θ_a sont données.

3.6. Relations géométriques

Il faut écrire les angles θ_a , α et ϕ en fonction des coordonnées angulaires sphériques (θ_s, φ_s) et (θ_v, φ_v) repérant respectivement la direction d'éclairage et la direction d'observation. On se place dans un repère orthonormé $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$, le plan moyen de la feuille étant $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y)$. Les directions \vec{N} , \vec{L} , \vec{V} et \vec{H} s'écrivent :

$$\vec{N} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} ; \vec{L} = \begin{pmatrix} \sin \theta_s \cos \varphi_s \\ \sin \theta_s \sin \varphi_s \\ \cos \theta_s \end{pmatrix} ; \vec{V} = \begin{pmatrix} \sin \theta_v \cos \varphi_v \\ \sin \theta_v \sin \varphi_v \\ \cos \theta_v \end{pmatrix} ; \vec{H} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \cos \phi \\ \sin \alpha \sin \phi \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 3.27}$$

De l'expression $\vec{L} \cdot \vec{V} = \cos(2\theta_a)$, on déduit :

$$\cos(2\theta_a) = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v (\cos \varphi_s \cos \varphi_v + \sin \varphi_s \sin \varphi_v) \quad \text{Eq. 3.28}$$

De $\vec{H} = (\vec{L} + \vec{V}) / \|\vec{L} + \vec{V}\|$ et $\|\vec{L} + \vec{V}\| = 2 \cos \theta_a$, on déduit :

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\cos \theta_s + \cos \theta_v}{2 \cos \theta_a} \\ \tan \phi = \frac{\sin \theta_s \sin \varphi_s + \sin \theta_v \sin \varphi_v}{\sin \theta_s \cos \varphi_s + \sin \theta_v \cos \varphi_v} \end{cases} \quad \text{Eq. 3.29}$$

4. Comparaison avec d'autres modèles

Dans cette section, le modèle physique de réflexion spéculaire est comparé à d'autres expressions publiées dans la littérature. On prendra pour origine des angles azimutaux celui de la source et $\varphi_s = 0$ sera omis par la suite. La comparaison avec le modèle de [Cox et Munk \(1954\)](#), tel que présenté dans [Bréon \(1993\)](#), nécessite des calculs développés dans l'[annexe E](#) et montre que leur expression de la BRDF peut se déduire de la nôtre.

4.1. Torrance et Sparrow 1967 (TS67)

Ces auteurs modélisent la composante diffuse par un paramètre t_0 qui est équivalent à k_L/π ([Eq. 3.3](#)). Concernant la composante spéculaire, l'expression s'écrit avec nos notations :

$$BRDF_{TS67}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{F(n, \theta_a) G_{TS67}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v} A_f B_{TS67}(\alpha) \quad \text{Eq. 3.30}$$

où A_f est la surface d'une facette et $G_{TS67}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ est le facteur d'atténuation géométrique de [Torrance et Sparrow \(1967\)](#). $B_{TS67}(\alpha)$ est le nombre de facettes spéculaires par unité de surface de plan moyen :

$$B_{TS67}(\alpha) = u e^{-v^2 \alpha^2} \quad \text{Eq. 3.31}$$

avec (u, v) un couple de paramètres. Pour comparer ce modèle au nôtre, il faut calculer la probabilité $D_{TS67}(\alpha)$ qu'une facette soit spéculaire. En notant b le nombre de facettes correspondant à la surface A de plan moyen, on a :

$$B_{TS67}(\alpha) = \frac{b D_{TS67}(\alpha)}{A} \quad \text{Eq. 3.32}$$

et par conséquent :

$$BRDF_{TS67}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{F(n, \theta_a) G_{TS67}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) D_{TS67}(\alpha) b A_f}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v A} \quad \text{Eq. 3.33}$$

En comparant cette expression à la nôtre ([Eq. 3.18](#)), on constate qu'elles diffèrent seulement dans le choix de la distribution des facettes et de l'atténuation géométrique. Notre choix de distribution

des facettes permet de calculer le terme $b A_f/A$, ce qui n'est pas fait par **Torrance et Sparrow (1967)** qui font appel à des paramètres supplémentaires.

4.2. Cook et Torrance 81 (CT81)

Les auteurs modélisent la BRDF par l'expression suivante :

$$BRDF_{CT81}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = k_s \frac{G(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) F(n, \theta_a) \exp\left[-(\tan \alpha / \sigma)^2\right]}{\pi \cos \theta_s \cos \theta_v \sigma^2 \cos^4 \alpha} \quad \text{Eq. 3.34}$$

où k_s est un paramètre contrôlant l'intensité de la composante spéculaire et $G(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ est l'atténuation géométrique (Eq. 3.25). En comparant Eq. 3.34 et Eq. 3.26, on déduit $k_s = 1/4$. Les deux modèles sont donc semblables, mais le nôtre fournit la valeur exacte du paramètre k_s .

5. Etude directe de la composante spéculaire

Cette partie est consacrée à l'étude du modèle en sens direct en commençant par le facteur de réflexion de Fresnel qui correspond à une surface parfaitement plane. Les valeurs de BRDF simulées sont ensuite calculées pour plusieurs jeux de paramètres ainsi que le Directional Hemispherical Reflectance Factor (DHRF) correspondant, ce dernier représentant la proportion d'énergie réfléchi, toutes directions d'observation confondues.

5.1. Facteur de réflexion de Fresnel

La **figure 3.5** montre la variation du facteur de réflexion de Fresnel (appelé facteur de Fresnel par la suite) en fonction de l'angle d'incidence, pour deux cas de polarisations. Notre modèle est écrit pour une lumière incidente non polarisée mais on peut l'étendre simplement aux cas de polarisation linéaire parallèle ou perpendiculaire au plan principal (voir Eq. F.2 dans l'**annexe F**). Dans le cas non polarisé (Eq. 3.14), le facteur de Fresnel $F(n, \theta_a)$ est à peu près constant pour les incidences inférieures à 30° puis sa valeur augmente pour atteindre 1 à 90° d'incidence. Il augmente aussi avec la valeur de l'indice de réfraction : ainsi, pour $n = 1,53$ (ordre de grandeur pour une feuille) et $n = 5$ (cas extrême de certains métaux), il vaut respectivement 5 % et 45 % environ aux faibles incidences.

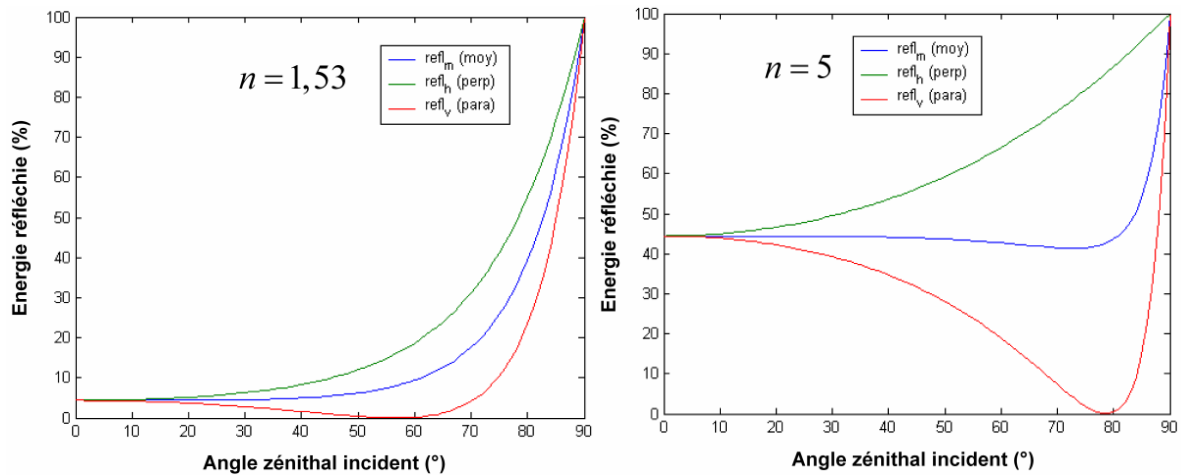


Figure 3.5 : Facteur de réflexion de Fresnel $F(n, \theta_a)$ (en % de l'énergie incidente) en fonction de l'angle d'incidence de la lumière (en $^\circ$) pour les polarisations perpendiculaire au plan principal (en vert), parallèle (en rouge) et moyenne des deux (en bleu).

La [figure 3.6](#) montre $F(n, \theta_a)$ pour les valeurs 1,4 et 1,6 de l'indice de réfraction. Aux faibles angles d'incidence, on constate que la lumière réfléchiée spéculairement par une surface plane de feuille peut représenter de 2 % à 6 % de l'énergie incidente et que $F(n, \theta_a)$ est multiplié par deux environ lorsque n passe de 1,4 à 1,6.

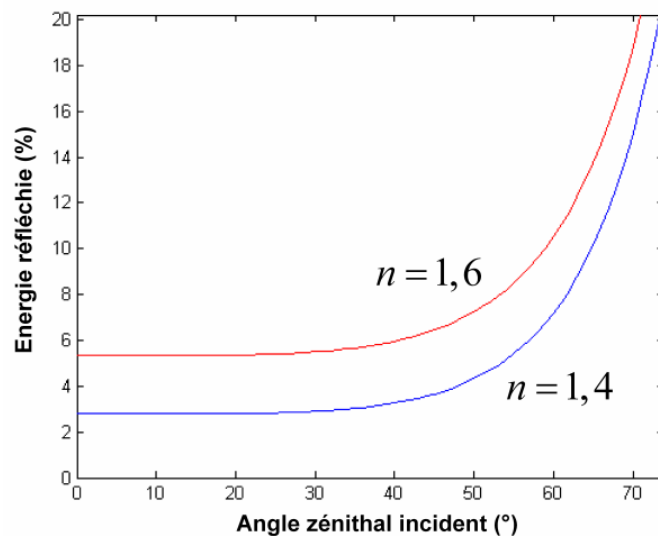


Figure 3.6 : Facteur de réflexion de Fresnel en fonction de l'angle d'incidence pour $n = 1,4$ (en rouge) et $n = 1,6$ (en bleu) en lumière non polarisée.

5.2. Réflectance bi-directionnelle

La composante spéculaire de la BRDF est étudiée avec un échantillonnage directionnel fin montré sur la [figure 3.7](#). L'influence de l'indice de réfraction se fait uniquement par le biais du facteur de Fresnel étudié précédemment.

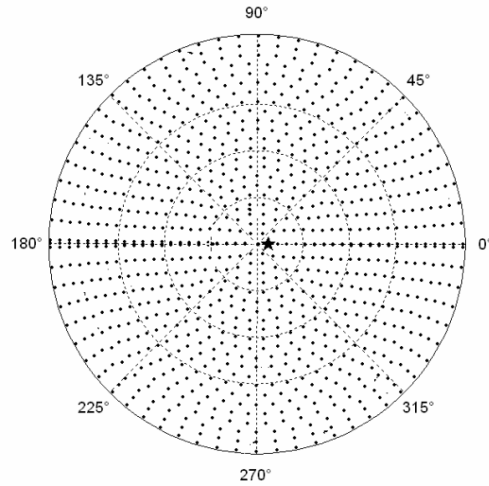


Figure 3.7 : Echantillonnage directionnel pour l'étude du modèle. La direction incidente est indiquée par une étoile, et les directions d'observation par des points.

La rugosité de surface affecte les variations directionnelles de la BRDF spéculaire, comme le montrent la [figure 3.8](#) pour σ valant 0,1, 0,3 et 0,5. La première valeur de rugosité correspond à un pic localisé et intense. La dernière correspond au contraire à une réflexion spéculaire qui s'étale dans quasiment toutes les directions du fait de la forte rugosité. Notons, quelle que soit la rugosité, que le pic spéculaire est toujours très fin pour les grands angles d'incidence.

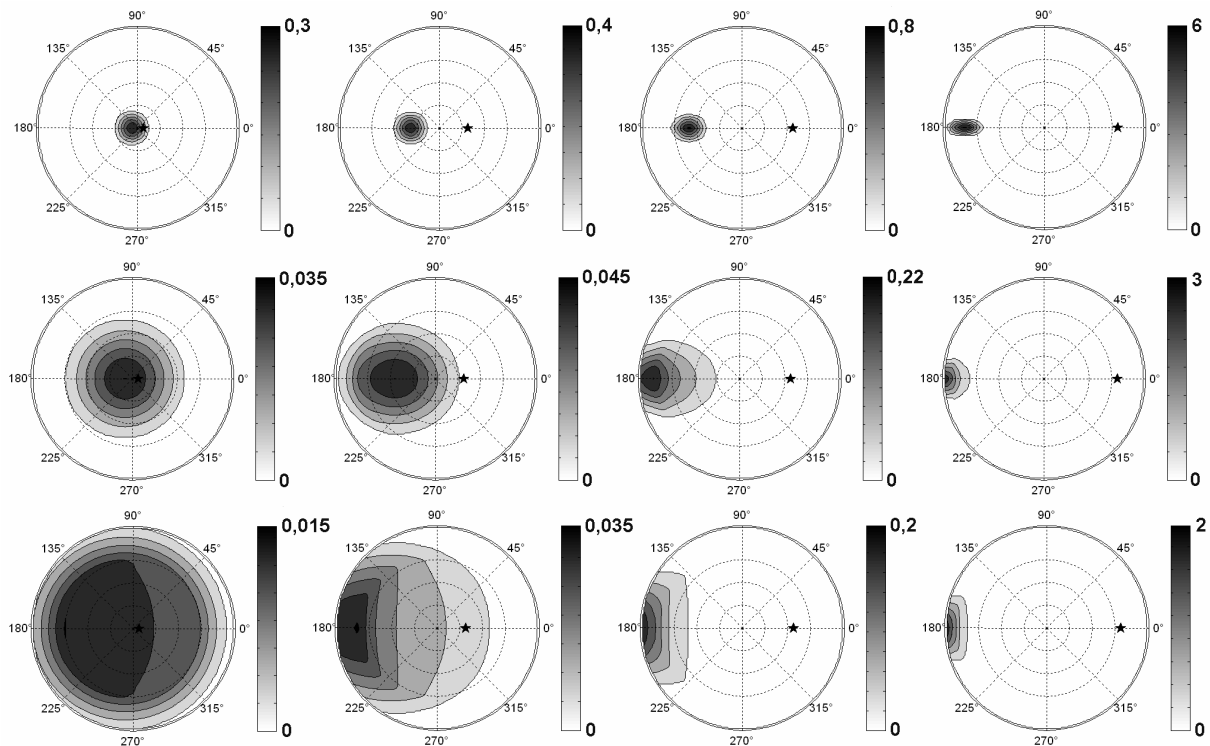


Figure 3.8 : BRDF spéculaire simulée pour $n=1,5$ et $\sigma=0,1$ (en haut), $\sigma=0,3$ (au milieu) et $\sigma=0,5$ (en bas).

5.3. Facteur de réflexion directionnel-hémisphérique

Le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique (DHRF) représente la proportion d'énergie réfléchi par la surface. Dans notre modèle, il dépend de l'indice de réfraction et de la rugosité de surface. Le DHRF augmente avec l'indice de réfraction par le biais du facteur de Fresnel. Posons $n=1,5$ et étudions l'influence de la rugosité de surface. Rappelons l'expression du DHRF :

$$DHRF(\theta_s) = \iint BRDF(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v \sin \theta_v d\theta_v d\varphi_v \quad \text{Eq. 3.35}$$

L'intégration est numérique, avec une tolérance relative de 10^{-6} sur le résultat. La [figure 3.9](#) représente le DHRF du modèle en fonction de l'angle d'incidence pour des rugosités de 0,1, 0,3 et 0,5. Le facteur de Fresnel est aussi tracé pour comparaison. Quelle que soit la rugosité, on constate que le DHRF du modèle est sensiblement égal au facteur de Fresnel pour les faibles angles d'incidence. Aux plus grandes incidences, le DHRF est d'autant plus faible que la rugosité est grande. Ceci est en désaccord avec le modèle de [Bréon \(1993\)](#) où l'albédo (correspondant à notre DHRF) augmente avec la rugosité, probablement en raison de l'absence d'atténuation géométrique. En effet, ce facteur atténue les fortes valeurs de réflectance observées aux grands angles d'observation et par conséquent fait décroître le DHRF.

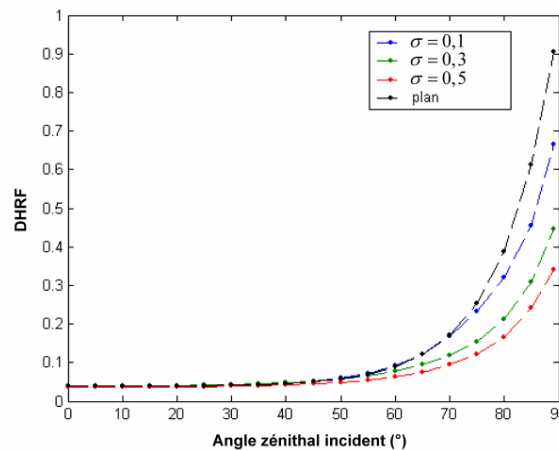


Figure 3.9 : DHRF de la composante spéculaire en fonction de l'angle d'incidence, pour trois valeurs du paramètre de rugosité σ (0,1 ; 0,3 et 0,5). Le facteur de réflexion de Fresnel pour une interface plane en lumière non polarisée est tracé en noir. L'indice de réfraction vaut $n=1,5$.

Le principal critère physique de validation du modèle est la conservation de l'énergie. Lorsque chaque facette éclairée réfléchit toute l'énergie qu'elle reçoit, le facteur de réflexion (DHRF) de l'ensemble des facettes doit être égal à 1. Pour vérifier cela, le facteur de Fresnel a été fixé à 1 (ce qui équivaut à $n \rightarrow \infty$) et le DHRF correspondant a été calculé. Le résultat est présenté sur la [figure 3.10](#) pour différentes valeurs du paramètre de rugosité. Aux faibles rugosités ($\sigma=0,1$), le DHRF est supérieur à 99 % pour θ_s inférieur à 60° puis il varie entre 60° et 90° avec un minimum à 94 %. Lorsque la rugosité augmente (0,3 puis 0,5), les variations du DHRF augmentent avec un minimum à 86 % pour une rugosité de 0,5 et un angle d'incidence de 45° . Ces variations sont dues aux effets géométriques d'ombrage entre facettes spéculaires. Une surface rugueuse crée des zones ombragées qui ne contribuent pas à réfléchir l'énergie incidente. Cet effet est pris en compte dans notre modèle par le facteur d'atténuation géométrique G dont la simplicité ne permet pas de corriger les effets d'ombrage pour toutes les rugosités. L'absence de facteur d'atténuation géométrique dans le modèle provoque une augmentation exponentielle du

DHRF aux grands angles d'incidence. Ceci est illustré sur la [figure 3.11](#) où le DHRF a été calculé en prenant les facteurs d'atténuation géométrique et de Fresnel égaux à 1. En revanche, pour les faibles angles incidents, le facteur d'atténuation géométrique ne corrige pas les phénomènes d'ombrage et accentue légèrement la décroissance du DHRF précédemment observée.

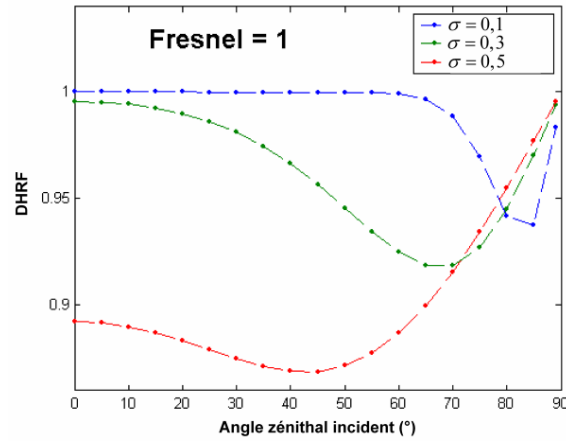


Figure 3.10 : DHRF de la composante spéculaire en fonction de l'angle incidence et pour trois valeurs du paramètre de rugosité σ (0,1 ; 0,3 et 0,5). Le facteur de réflexion de Fresnel est fixé à 1.

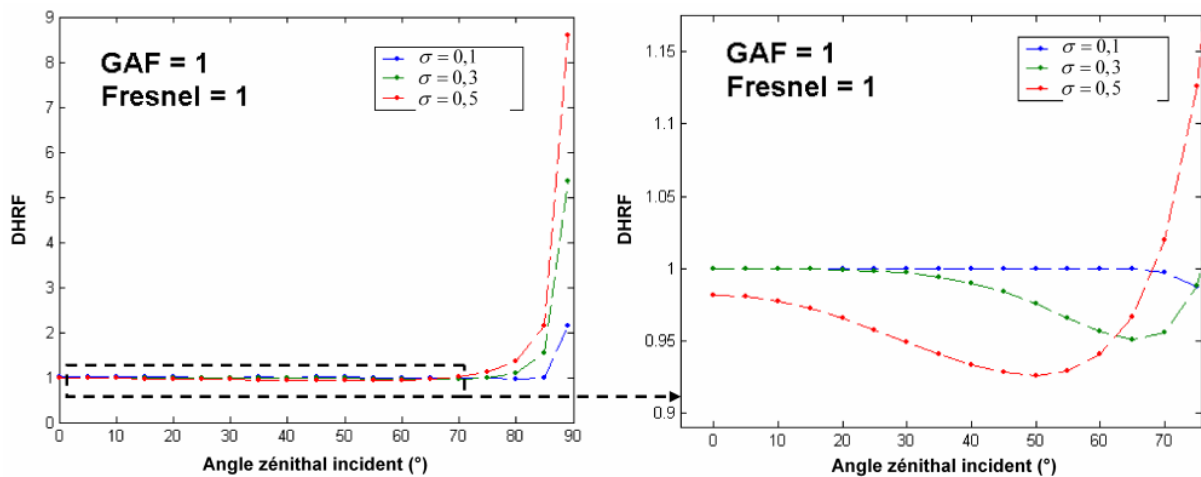


Figure 3.11 : DHRF de la composante spéculaire en fonction de l'angle incidence et pour trois valeurs du paramètre de rugosité σ (0,1 ; 0,3 et 0,5). Le facteur réflexion de Fresnel et le facteur d'atténuation géométrique sont fixés à 1.

6. Inversion du modèle et applications

6.1. La méthode d'inversion

L'objectif est de trouver les valeurs des paramètres du modèle qui représentent au mieux une mesure de BRDF. Pour cela, on minimise l'écart-type de la différence entre les valeurs mesurées 'mes' et modélisées 'mod' de la BRDF, ou *Root Mean Square Error* (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mes_i - mod_i)^2} \quad \text{Eq. 3.36}$$

La minimisation se termine lorsqu'il n'est plus possible de se déplacer dans l'espace des paramètres sans faire augmenter l'écart-type. Les valeurs initiales des paramètres sont présentées dans le [tableau 3.1](#). Ces valeurs sont utilisées quelles que soient la feuille et la longueur d'onde. La valeur initiale du paramètre de Lambert ($k_L = 0,3$) est un intermédiaire entre une faible ($\sim 0,1$) et une forte ($\sim 0,5$) réflectance diffuse, celle de l'indice de réfraction de la surface ($n = 1,47$) est représentative de la cire cuticulaire des feuilles ([Allen et al., 1969](#)), celle du coefficient de rugosité ($\sigma = 0,3$) est un intermédiaire entre une surface peu ($\sigma \sim 0,1$) ou fortement ($\sigma \sim 0,5$) rugueuse (voir [figure 3.8](#)). L'unicité de la solution n'étant pas garantie, les minimisations sont répétées avec un second jeu de valeurs correspondant à une faible réflectance diffuse ($k_L = 0,1$), un faible indice de réfraction ($n = 1,1$) et une faible rugosité ($\sigma \sim 0,1$). Les valeurs des paramètres sont bornées sur des critères de sens physique : la réflexion diffuse n'est jamais nulle et ne peut pas excéder 100 % de l'énergie incidente, l'indice de réfraction est supérieur à 1 et inférieur à 5 (bien que $n = 2$ dépasse les valeurs admises pour un indice de réfraction foliaire), la rugosité est supérieure à 0,01 (pic spéculaire tellement fin qu'il devient pratiquement invisible) et inférieure à 1 (0,5 correspondant à une surface déjà très rugueuse).

	k_L	n	σ
Borne inférieure	0,01	1,1	0,01
Borne supérieure	0,99	5	1
Valeur initiale	0,3	1,47	0,3

Tableau 3.1 : Jeu de paramètres pour l'inversion du modèle.

Les mesures utilisées pour les [sections 6.2, 6.3 et 6.4](#) sont issues de la campagne de 2003. Elles ont été faites pour quatre directions d'éclairement $\{8^\circ; 21^\circ; 41^\circ; 60^\circ\}$, 65 directions d'observation et 400 longueurs d'onde. Pour une feuille, chaque inversion utilise donc $4 \times 65 \times 400$ points de mesure. Les mesures pour des angles d'observation zénithaux supérieurs à 70° ont été écartées car elles correspondent à des signaux trop faibles.

6.2. Variations directionnelles de la composante spéculaire

Les variations directionnelles de la composante spéculaire dépendent de la rugosité de surface de la feuille. Afin de vérifier si notre modèle peut simuler de telles variations, il a été inversé sur des BRDF mesurées pour des échantillons de rugosité variable : laurier (faible rugosité), noisetier (forte rugosité) et hêtre (rugosité intermédiaire). La longueur d'onde de l'inversion est celle du maximum d'absorption pour chacune des feuilles afin de minimiser l'influence de la composante diffuse. Les résultats ([figure 3.12](#)) montrent que les variations

directionnelles de la BRDF sont bien modélisées. La dynamique de la BRDF, de 0 à 0,18 pour le laurier, 0,9 pour le hêtre et 0,06 pour le noisetier, est bien retrouvée dans tous les cas. La largeur du pic spéculaire est, elle aussi, bien retrouvée avec un pic fin pour le laurier, large pour le noisetier, et intermédiaire pour le hêtre.

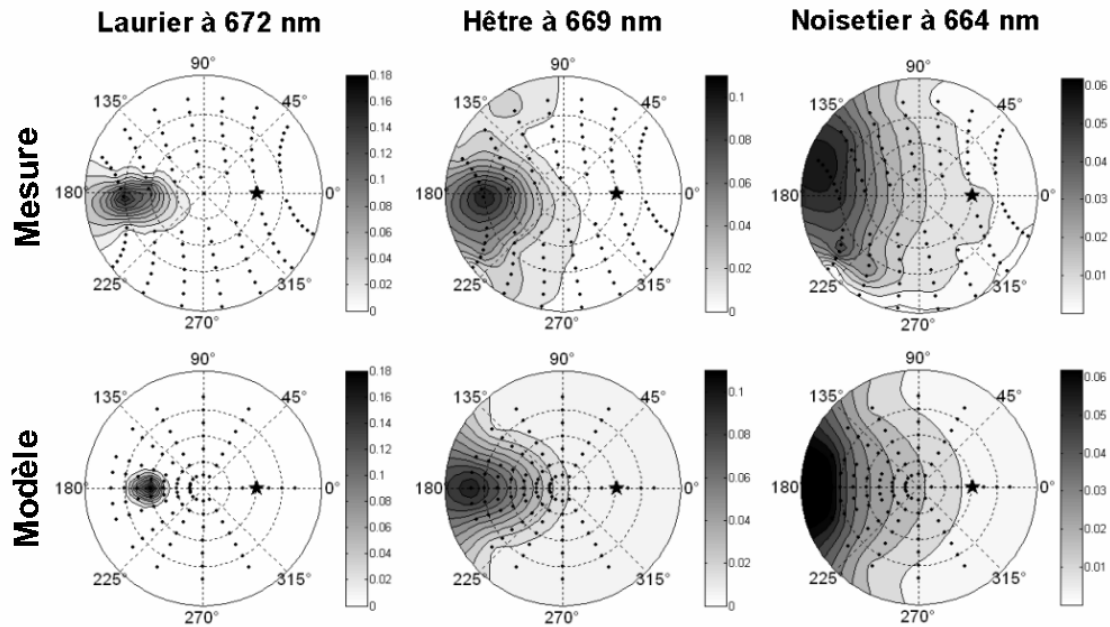


Figure 3.12 : BRDF (sr^{-1}) mesurée et modélisée aux longueurs d'onde des maximums d'absorption pour des feuilles de laurier, hêtre et noisetier. L'angle d'incidence est de 40° .

6.3. Invariance spectrale de la composante spéculaire

Afin d'étudier le comportement spectral de ses paramètres, le modèle est inversé pour chaque longueur d'onde. Le jeu de paramètres (tableau 3.1) et les mesures utilisés sont les mêmes que précédemment. Les résultats sont tracés sur la figure 3.13. On constate que le paramètre k_L contrôlant l'intensité de la composante diffuse suit les variations spectrales de la réflectance des feuilles. Il est faible dans le visible, avec un maximum dans le vert, puis il augmente brusquement dans le proche infrarouge et y présente un plateau. En revanche, les paramètres de la composante spéculaire varient relativement peu avec la longueur d'onde (moins de 10% en relatif). Pour la feuille de laurier (lisse), ils sont quasiment constants. Cela confirme la possibilité de modéliser une composante spéculaire indépendante de la longueur d'onde.

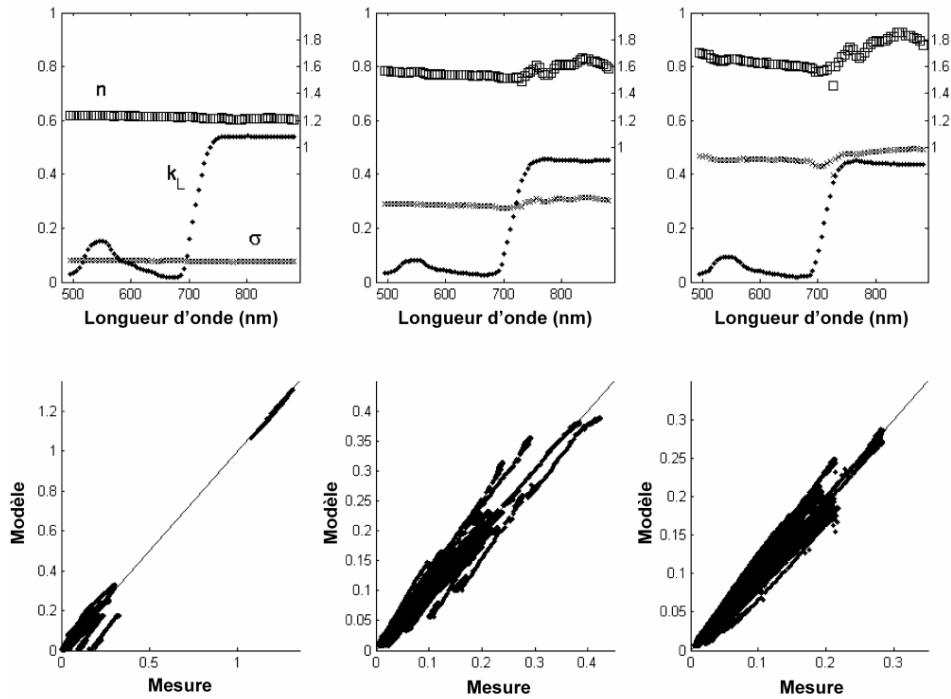


Figure 3.13 : Inversion du modèle pour chaque longueur d'onde sur des échantillons de laurier, hêtre et noisetier. En haut : valeur des paramètres avec l'échelle à droite pour l'indice de réfraction. En bas : Valeurs modélisées de la BRDF en fonction de celles observées.

A partir des valeurs des paramètres inversées ici, on peut calculer une moyenne spectrale de l'indice de réfraction et du paramètre de rugosité :

$$\bar{n} = \frac{\int n(\lambda) d\lambda}{\int d\lambda} \quad \text{et} \quad \bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(\lambda) d\lambda}{\int d\lambda} \quad \text{Eq. 3.37}$$

Les valeurs obtenues sont présentées dans le [tableau 3.2](#). Les valeurs du paramètre de rugosité s'accordent avec les observations faites sur la [figure 3.12](#). La faible valeur de l'indice de réfraction obtenue pour le laurier peut se justifier par l'échantillonnage des mesures qui ne comporte pas assez de points dans le plan principal, sous-estimant ainsi la BRDF. Pour le noisetier qui a un fort indice de réfraction, les poils présents sur sa surface contribuent à augmenter la proportion de lumière réfléchi sans signature spectrale des pigments foliaires, augmentant ainsi l'indice de réfraction qui peut être qualifié d'effectif.

	Indice de réfraction \bar{n}	Paramètre de rugosité $\bar{\sigma}$
Laurier	1,22	0,078
Hêtre	1,56	0,29
Noisetier	1,68	0,46

Tableau 3.2 : Paramètres de surface des feuilles estimés par inversion. Moyenne spectrale sur le domaine 482-882 nm.

6.4. Angle solide spéculaire et contribution au facteur de réflexion directionnel-hémisphérique

Pour caractériser la réflexion spéculaire d'une manière qui soit utile en écophysiologie, il faut mesurer l'ensemble des directions d'observation correspondant à la réflexion spéculaire (angle solide spéculaire), et estimer la contribution de la réflexion spéculaire au facteur de réflexion directionnel-hémisphérique. L'utilisation d'un modèle de réflexion permet de distinguer les composantes spéculaire et diffuse, puis de décrire la composante spéculaire avec une expression analytique dont les paramètres sont ajustés, et enfin de calculer les angles solides et facteur de réflexion souhaités.

Le modèle et la technique d'inversion utilisés sont les mêmes que précédemment. Les mesures sont issues de la campagne de 2005. Les échantillons sont des feuilles de hêtre et de laurier. Les BRDF ont été mesurées pour 381 longueurs d'onde entre 500 nm et 880 nm, quatre directions d'éclairement $\{5^\circ ; 25^\circ ; 45^\circ ; 65^\circ\}$ et 98 directions d'observations. Les directions d'observation rasantes ($\theta_v > 70^\circ$) qui ne sont pas dans le quadrant spéculaire ($135^\circ < \varphi_v < 225^\circ$) ont été exclues du jeu de données. Les paramètres $n(\lambda)$, $\sigma(\lambda)$ et $k_L(\lambda)$ sont estimés par inversion du modèle pour chaque longueur d'onde. Les moyennes spectrales \bar{n} et $\bar{\sigma}$ sont ensuite calculées ainsi que les composantes diffuse et spéculaire du facteur de réflexion directionnel-hémisphérique. En intégrant notre modèle de BRDF (Eq. 3.26) sur toutes les directions d'observation, on obtient le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique suivant :

$$DHRF(\lambda, \theta_s) = k_L(\lambda) + DHRF_{spec}(\theta_s) \quad \text{Eq. 3.38}$$

où $DHRF_{spec}(\theta_s)$ est la composante due à la réflexion spéculaire qui dépend des paramètres \bar{n} et $\bar{\sigma}$. La composante diffuse du DHRF est simplement égale à $k_L(\lambda)$ et la composante spéculaire est évaluée numériquement avec une erreur relative inférieure à 10^{-4} . La contribution spéculaire au DHRF, $C_{spec}(\lambda, \theta_s)$, se calcule à partir des quantités précédentes :

$$C_{spec}(\lambda, \theta_s) = \frac{DHRF_{spec}(\theta_s)}{DHRF(\lambda, \theta_s)} \quad \text{Eq. 3.39}$$

Nous définissons l'angle solide du spéculaire $\Omega(\theta_s)$ comme l'ensemble des directions autour de la direction spéculaire qui contribuent à 90% au moins de la réflexion spéculaire. Considérons un domaine d'intégration D autour de la direction spéculaire, on a :

$$\Omega(\theta_s) = \iint_{D(\theta_s)} \sin \theta_v d\theta_v d\varphi_v \quad \text{Eq. 3.40}$$

et

$$\iint_{D(\theta_s)} BRDF_{spec}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) \sin \theta_v d\theta_v d\varphi_v = \frac{90}{100} DHRF_{spec}(\theta_s) \quad \text{Eq. 3.41}$$

Parmi toutes les directions d'observation, le domaine D contient celles qui correspondent aux plus fortes valeurs de la composante spéculaire de la BRDF modélisée.

Les estimations des moyennes spectrales de l'indice de réfraction donnent 1,42 pour le hêtre et de 1,51 pour le laurier; celles de la rugosité donnent 0,32 pour le hêtre et 0,12 pour le laurier. La réflexion spéculaire est complètement paramétrisée par ces deux valeurs. La proportion de spéculaire dans le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique est tracée sur la [figure 3.14](#). On constate que la contribution du spéculaire est prépondérante dans le visible : entre 30 % et 90 % pour le hêtre, entre 40 % et 95 % pour le laurier. En revanche, dans le proche infrarouge, elle est de l'ordre de 10 % avec un maximum à 20 % pour une incidence de 65°. Plus de 90 % de la contribution du spéculaire se fait dans l'angle solide $\Omega(\theta_s)$ dont les valeurs sont présentées dans le [tableau 3.3](#). Cet angle solide diminue avec l'angle d'incidence et quantifie l'affinement du pic spéculaire. $\Omega(\theta_s)$ représente 37 % de l'hémisphère supérieur pour le hêtre éclairé à 5°, et 3 % seulement pour le laurier éclairé à 65°.

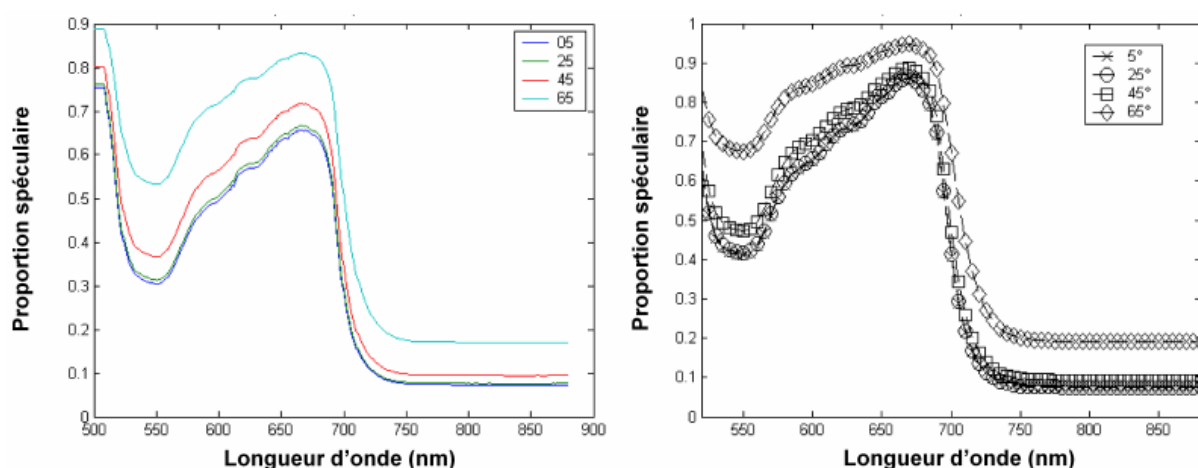


Figure 3.14 : Proportion de réflexion spéculaire dans le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique pour la feuille de hêtre (à gauche) et la feuille de laurier (à droite).

θ_s (°)		5	25	45	65
Ω_s (sr)	Hêtre	2.3539	2.2911	1.6078	0.7940
	Laurier	0.4082	0.3713	0.2959	0.1737

Tableau 3.3 : Estimation de l'angle solide du spéculaire $\Omega(\theta_s)$ pour le laurier et le hêtre.

6.5. Couplage avec le modèle Prospect

Pour simuler les variations directionnelles et spectrales de la réflectance, le modèle présenté requiert trois paramètres pour chaque longueur d'onde : le coefficient de Lambert $k_L(\lambda)$, l'indice de réfraction $n(\lambda)$ et la rugosité $\sigma(\lambda)$. Or les variations spectrales de $n(\lambda)$ et $\sigma(\lambda)$ sont négligeables devant celles de $k_L(\lambda)$, car les deux premiers paramètres décrivent l'interaction de la lumière avec la surface de la feuille alors que le troisième décrit l'interaction avec l'intérieur. $n(\lambda)$ et $\sigma(\lambda)$ sont donc peu différents de leurs moyennes spectrales \bar{n} et $\bar{\sigma}$, et $k_L(\lambda)$ peut s'écrire en fonction du contenu biochimique de la feuille. Le modèle Prospect ([Jacquemoud et Baret, 1990](#)) simule la réflectance spectrale $R_{prospect}(\lambda)$ des feuilles en fonction des contenus en chlorophylles a et b (C_{ab}), en eau (C_w), en matière sèche (C_m), et d'un indice de

structure (N). L'influence de l'eau étant négligeable entre 400 nm et 900 nm, C_w n'est pas utilisé et on a donc :

$$R_{prospect}(\lambda) = f(C_{ab}, C_m, N) \quad \text{Eq. 3.42}$$

Le modèle Prospect considère que le flux lumineux incident se répartit dans un cône perpendiculaire au plan moyen de la feuille (incidence normale). Le demi-angle au sommet du cône vaut 60° pour simuler l'interaction de la lumière avec une surface rugueuse. A l'intérieur de la feuille, les flux lumineux sont supposés diffus. La réflectance de la feuille est intégrée sur toutes les directions d'observation. $R_{prospect}(\lambda)$ est donc une approximation du facteur de réflexion directionnel-hémisphérique en incidence normale :

$$DHRF(\lambda, 0^\circ) \sim R_{prospect}(\lambda) \quad \text{Eq. 3.43}$$

En évaluant Eq. 3.38 pour $\theta_s = 0^\circ$, on obtient $k_L(\lambda)$ en fonction des DHRF à 0° :

$$k_L(\lambda) = DHRF(\lambda, 0^\circ) - DHRF_{spec}(0^\circ) \quad \text{Eq. 3.44}$$

En utilisant Eq. 3.43 et Eq. 3.44, on obtient l'expression de $k_L(\lambda)$ en fonction de $R_{prospect}(\lambda)$:

$$k_L(\lambda) = R_{prospect}(\lambda) - DHRF_{spec}(0^\circ) \quad \text{Eq. 3.45}$$

Finalement, le modèle de réflectance bi-directionnelle utilisant Prospect s'écrit à partir de Eq. 3.26 où $k_L(\lambda)$ est remplacé par son expression en fonction de $R_{prospect}(\lambda)$ (Eq. 3.45) :

$$BRDF(\lambda, \theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{R_{prospect}(C_{ab}, C_m, N) - DHRF_{spec}(0^\circ, \bar{n}, \bar{\sigma})}{\pi} + \frac{F(\bar{n}, \theta_a) G(\theta_s, \theta_v, \alpha, \theta_a)}{4 \pi \bar{\sigma}^2 \cos \theta_v \cos \theta_s} \times \frac{\exp[-(\tan \alpha / \bar{\sigma})^2]}{\cos^4 \alpha} \quad \text{Eq. 3.46}$$

Ce modèle simule les variations spectrales et directionnelles de la réflectance avec cinq paramètres d'entrée : l'indice de réfraction \bar{n} , la rugosité $\bar{\sigma}$, le contenu en chlorophylles a et b C_{ab} , le contenu en matière sèche C_m , et l'indice de structure de la feuille N .

Le modèle (Eq. 3.46) a été inversé sur les mesures de BRDF du laurier, du hêtre et du noisetier, acquises lors de la campagne de 2003. L'inversion est faite en deux temps : 1) les paramètres $k_L(\lambda)$, $n(\lambda)$ et $\sigma(\lambda)$ sont estimés comme précédemment (sections 6.1., 6.2. et 6.3.), ce qui permet le calcul de \bar{n} , $\bar{\sigma}$ et $DHRF_{spec}(0^\circ)$; 2) les paramètres C_{ab} , C_m et N sont estimés à partir de $k_L(\lambda)$ et $DHRF_{spec}(0^\circ)$ en utilisant Eq. 3.45. Cette deuxième étape est illustrée sur la figure 3.15 où les deux membres de Eq. 3.45 sont représentés après inversion.

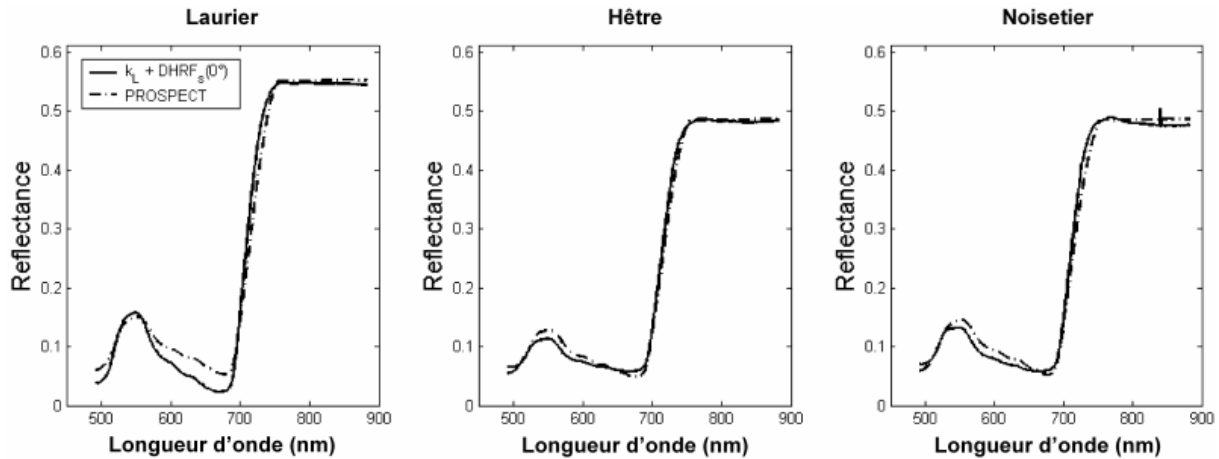


Figure 3.15 : Graphe de la quantité $DHRF(\lambda, 0^\circ) = k_L(\lambda) + DHRF_{spec}(0^\circ)$ (trait plein), et de son estimation par inversion du modèle Prospect (trait pointillé).

Le [tableau 3.4](#) compare les performances du modèle à cinq paramètres avec celles du modèle à 1200 paramètres (400 longueurs d'onde pour $k_L(\lambda)$, $n(\lambda)$ et $\sigma(\lambda)$). L'indicateur utilisé est l'écart-type des différences mesures-modèle (RMSE) ([Eq. 3.36](#)). Le RMSE a augmenté de 10 % avec la réduction du nombre de paramètres. Par conséquent, les performances du modèle utilisant Prospect peuvent être considérées quasiment aussi bonnes que celles du modèle précédent qui utilise trois paramètres pour chaque longueur d'onde.

	Modèle (Eq. 3.26)	Modèle (Eq. 3.46)
Laurier	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$
Hêtre	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
Noisetier	$0,90 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$

Tableau 3.4 : Ecart-type des différences mesures-modèle (RMSE) pour les BRDF modélisées avec les paramètres $[k_L(\lambda); n(\lambda); \sigma(\lambda)]$ ([Eq. 3.26](#)) et celles modélisées avec les paramètres $[\bar{n}, \bar{\sigma}, C_{ab}, C_m, N]$ ([Eq. 3.46](#)).

7. Conclusion du chapitre

Le modèle de BRDF des feuilles présenté dans ce chapitre simule la réflexion spéculaire et diffuse avec trois paramètres seulement. Initialement, ces paramètres sont définis pour chaque longueur d'onde. Nous montrons, par inversion du modèle, que les paramètres de la composante spéculaire peuvent être considérés comme indépendants de la longueur d'onde. Le paramètre de la composante diffuse, quant à lui, peut s'exprimer en fonction du contenu biochimique de la feuille, par le biais du modèle Prospect. Finalement, nous obtenons un modèle à cinq paramètres qui capture l'essentiel des variations spectrales et directionnelles des BRDF des feuilles. Ce modèle pourrait être utilisé par des codes de transfert radiatif adaptés pour simuler la réflectance bi-directionnelle et spectrale d'un couvert végétal. Par ailleurs, le modèle de BRDF permet d'estimer plusieurs variables d'intérêt, telles que l'indice de réfraction et la rugosité des surfaces foliaires, ou encore l'angle solide correspondant à la réflexion spéculaire et sa contribution au total de l'énergie réfléchi. En complément de cette modélisation analytique des propriétés optiques des feuilles, le chapitre suivant est consacré à leur modélisation numérique par lancer de rayon sur une maquette tridimensionnelle et réaliste d'une feuille dicotylédone.

Chapitre 4

Simulation des propriétés optiques des feuilles par lancer de rayon

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Le code de lancer de rayon Raytran
3. La maquette DICOLEAF
 - 3.1. Description
 - 3.2. Contenu en eau, chlorophylle et matière sèche
 - 3.3. Synthèse et visualisation
4. Les simulations de 1996
5. Les simulations de 2006
 - 5.1. L'échantillon de hêtre
 - 5.2. Propriétés physiques des constituants biochimiques
 - 5.3. Maquettes DICOLEAF
6. Analyse des simulations DICOLEAF 22
 - 6.1. Profils des flux lumineux
 - 6.2. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
 - 6.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles
7. Simulation des les tissus séparés
 - 7.1. Profils des flux lumineux
 - 7.2. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques
 - 7.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles
8. Conclusion du chapitre

1. Introduction

Le lancer de rayon est un outil de simulation des propriétés optiques de scènes réalistes d'une grande complexité, pour lesquelles les solutions analytiques n'existent pas. Parmi les applications du lancer de rayon, il faut distinguer la simulation des propriétés optiques de la synthèse d'image par ordinateur. Pour la première, les approximations sont toujours faites sur des critères physiques et les simulations fournissent des quantités physiques bien définies. Pour la seconde, toutes les approximations sont permises à partir du moment où le rendu est satisfaisant (jugement arbitraire), et les simulations ont pour unique but de fournir l'image d'une scène.

Les premières simulations en lancer de rayon des propriétés optiques des feuilles ont été faites par [Kumar et Silva \(1973\)](#) et [Allen *et al.* \(1973\)](#), poursuivies par [Bone *et al.* \(1985\)](#) et [Brakke et Smith \(1987\)](#). Ces travaux sont tous en deux dimensions et ne simulent qu'un faible nombre de rayons à cause de temps de calcul prohibitifs. Le progrès de l'informatique a permis de développer la méthode en trois dimensions. Grâce au code Raytran, [Govaerts *et al.* \(1996\)](#) ont simulé les propriétés optiques d'une maquette tridimensionnelle de feuille où chaque cellule est décrite par sa forme, sa taille et sa position à partir de données publiées dans la littérature. Les propriétés optiques des milieux la constituant (eau, chlorophylle et matière sèche) sont principalement issues de la calibration du modèle Prospect ([Jacquemoud et Baret, 1990](#)). L'analyse des réflectances et transmittances simulées montre qu'il est possible de retrouver les principales caractéristiques spectrales et directionnelles observées expérimentalement. [Ustin *et al.* \(2001\)](#) ont ensuite utilisé ces simulations pour étudier le processus photosynthétique au sein de la feuille.

Notre travail fait suite à celui de [Govaerts *et al.* \(1996\)](#) et apporte plusieurs améliorations : 1) La maquette virtuelle est construite à partir d'observations sur une feuille réelle ; 2) Les propriétés optiques des milieux la constituant (particulièrement l'absorption de la chlorophylle) sont mises à jour à partir des valeurs disponibles dans la littérature ; 3) Les simulations sont comparées à des mesures de réflectance et transmittance de la feuille effectuées avec le spectro-photo-goniomètre présenté dans le [chapitre 2](#).

Le modèle choisi est une feuille de hêtre (*Fagus sylvatica*) prélevée dans son environnement naturel puis analysée en laboratoire. Son contenu biochimique et sa structure tridimensionnelle ont été mesurés. Les paramètres géométriques de la maquette sont fixés conformément à ces mesures, et les paramètres optiques issus de valeurs publiées dans la littérature. Les simulations fournissent le facteur de réflexion (ou réflectance) et le facteur de transmission (ou transmittance) bi-directionnels et directionnels-hémisphériques de la maquette. Ces quantités sont comparées aux mesures optiques faites en laboratoire. Il est à noter qu'aucun paramètre n'a été ajusté pour faire coïncider mesures et simulations des propriétés optiques. Enfin, les simulations donnent accès aux profils des flux lumineux à l'intérieur de la maquette, quantités non mesurables en laboratoire sans perturber l'échantillon.

2. Le code de lancer de rayon Raytran

L'objectif est de simuler les flux lumineux réfléchi et transmis par un objet. Le lancer de rayon consiste à calculer les trajectoires d'un grand nombre de rayons lumineux dans une maquette de cet objet pour en déduire les flux recherchés. Le code Raytran ([Govaerts, 1996](#) ; [Govaerts et Verstraete, 1998](#)) est construit sur ce principe. L'étude statistique des rayons lumineux repose sur la méthode de 'Monte-Carlo' ([Ross et Marshak, 1991](#)). Ce code, utilisé pour

la simulation de la réflectance des couverts végétaux, a été comparé à d'autres codes de lancer de rayon dans le cadre du projet RAMI (*Radiative Transfer Model Intercomparison* ; Pinty *et al.* 2001, 2004).

Raytran est utilisé dans le mode HCM (*Homogeneous Continuous Media*) qui ne s'applique qu'à des objets délimités par des surfaces fermées. La réflexion et la réfraction sont simulées par les lois de Snell-Descartes, et l'absorption par la loi de Beer-Lambert. La diffusion simple par des particules isolées n'est pas prise en compte. Une interaction entre un rayon et un objet a lieu à chaque fois qu'un rayon rencontre une interface entre deux milieux. Une interaction est traitée en trois étapes : 1) calcul de la normale locale à l'interface ; 2) calcul des directions et intensités des rayons réfléchis et réfractés ; 3) s'il y a réfraction, alors calcul de la distance parcourue dans le milieu. Si cette distance est supérieure à l'épaisseur du milieu, alors retour à l'étape 1 avec l'interface suivante, sinon le rayon est absorbé.

Afin d'éviter les flux lumineux entrant ou sortant par les bords, la maquette est dupliquée horizontalement à l'infini. La simulation du trajet de tous les photons incidents dans une maquette dont les paramètres géométriques et optiques sont fixés s'appelle un *run*. En ordre de grandeur, 10^8 photons sont nécessaires pour un *run* qui dure deux jours sur un PC biprocesseur.

Raytran simule des réflectances et transmittances bi-directionnelles (BRF et BTF) et directionnelles-hémisphériques (DHRF et DHTF). Les fonctions de distribution de réflectance et de transmittance bi-directionnelles (BRDF et BTDF) sont respectivement égales au BRF et BTF que divise π (voir [annexe C, Eq. C.16 et C.17](#)). En lancer de rayon, on distingue le mode direct du mode inverse. En mode direct, les rayons partent de la source lumineuse et des détecteurs virtuels comptent les rayons émergents dans les directions d'observation souhaitées. Les lois de l'optique géométrique ne dépendant pas du sens de propagation sur la trajectoire, le mode inverse consiste à simuler les rayons partant du détecteur et interagissant avec l'objet étudié. Cela a pour avantage de ne simuler que les rayons qui peuvent être détectés. Raytran fonctionne en mode direct, ce qui fournit toutes les directions d'observation simultanément, plusieurs capteurs virtuels pouvant être disposés à des emplacements différents. Le faisceau incident peut être parallèle pour simuler une source à l'infini. De même, les détecteurs peuvent être situés à l'infini pour simuler un faisceau parallèle en détection. Enfin les détecteurs peuvent être placés à l'intérieur de la maquette, donnant accès aux flux lumineux internes.

3. La maquette DICOLEAF

La maquette DICOLEAF ([figure 4.1](#)) est une modélisation en trois dimensions du limbe d'une feuille de dicotylédone. Elle comprend quatre tissus qui sont : l'épiderme supérieur, le parenchyme palissadique, le parenchyme spongieux et l'épiderme inférieur. Chaque tissu est formé de cellules qui renferment parois, eau et chlorophylle.

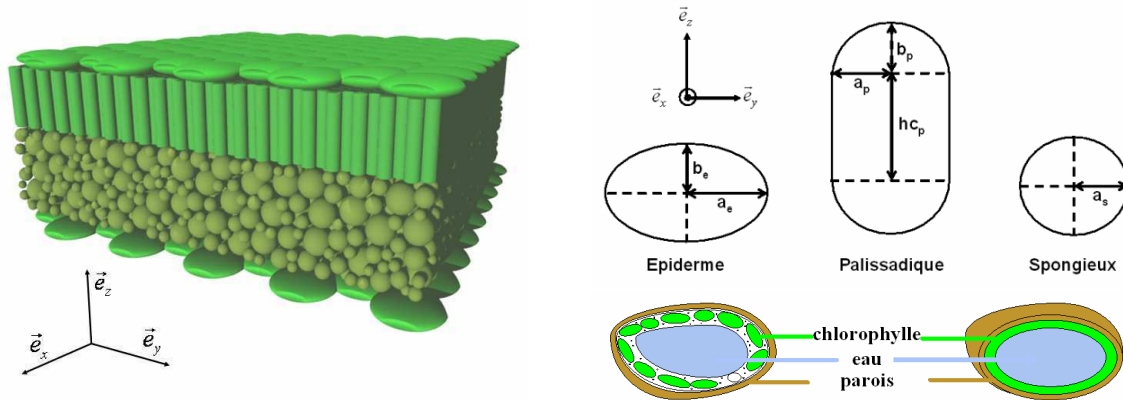


Figure 4.1 : Maquette DICOLEAF 22 (à gauche), coupe des cellules des différents tissus (en haut à droite) et constituants biochimiques d'une cellule (en bas à droite).

3.1. Description

Le [tableau 4.1](#) présente l'ensemble des paramètres de la maquette décrivant la structure des tissus et des cellules. Le seul paramètre qui ne sera pas modifié détermine la distance minimale entre deux cellules. Il est fixé à $0,01 \mu\text{m}$ et assure que deux cellules ne se recouvrent pas lors de la construction de la maquette. Soit un repère $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$ tel que \vec{e}_z est perpendiculaire au plan moyen de la feuille. Les plans contenant \vec{e}_z correspondent aux plans de coupes transversales et $(\vec{e}_x; \vec{e}_y)$ correspond à la famille de plans des coupes paradermales. Les plans $(\vec{e}_x; \vec{e}_z)$ et $(\vec{e}_y; \vec{e}_z)$ sont équivalents. Le premier tissu est l'épiderme supérieur (l'épiderme inférieur est identique). Il est constitué d'une seule couche de cellules imbriquées les unes dans les autres. Les cellules ont la forme d'ellipsoïdes de révolution d'axe \vec{e}_z . L'ellipsoïde dans le plan $(\vec{e}_x; \vec{e}_z)$ a un grand axe de longueur $2a_e$ et un petit axe de longueur $2b_e = 2a_e o_e$ où o_e est 'l'aplatissement' des cellules. Plus o_e est petit, plus la cellule est écrasée.

Le parenchyme palissadique est composé de cellules cylindriques à section circulaire, fermées en haut et en bas par des demi-ellipsoïdes. Le cylindre a un rayon a_p et une hauteur hc_p . Les demi-ellipsoïdes ont le même rayon a_p dans le plan $(\vec{e}_x; \vec{e}_y)$ et un rayon $b_p = a_p o_p$ dans la direction perpendiculaire. Le parenchyme spongieux est un ensemble de cellules sphériques réparties aléatoirement dans un volume alloué V . Ce volume est composé de cellules occupant le volume V_{cell} et d'air occupant le volume V_{air} . La proportion d'espaces d'air est $\xi_s = V_{air}/V$. La concentration en cellules est égale à $1 - \xi_s$. Des cellules sont ajoutées tant que cette concentration reste inférieure à une valeur donnée. Afin d'éviter le recouvrement entre cellules, leur rayon est diminué progressivement. Les cellules sont composées d'eau enfermée dans une enveloppe de chlorophylle, elle-même entourée par une enveloppe de parois. Les enveloppes de chlorophylle et de parois sont spécifiées par leur épaisseur e .

	Epidermes supérieur et inférieur	Parenchyme palissadique	Parenchyme spongieux
Epaisseur du tissu	h_e	h_p	h_s
Rayon d'une cellule	a_e	a_p	a_s
Aplatissement d'une cellule	o_e	o_p	
Distance minimale entre deux cellules	0,01 μm	0,01 μm	0,01 μm
Epaisseur chlorophylle	$e_{p,e}$	$e_{p,p}$	$e_{p,s}$
Epaisseur parois	$e_{c,e}$	$e_{c,p}$	$e_{c,s}$
Hauteur cylindre		hc_p	
Concentration			$1 - \xi_s$

Tableau 4.1 : Paramètres de la maquette DICOLEAF.

3.2. Contenu en eau, chlorophylle et matière sèche

La maquette alloue un volume à chacun des constituants que sont l'eau, les parois cellulaires, la chlorophylle et l'air. Le calcul précis de ce volume en fonction des paramètres de la maquette est nécessaire pour déduire la masse de chaque constituant par unité de surface de feuille. Cette dernière quantité doit être ajustée au contenu mesuré sur l'échantillon de hêtre. Les quantités intervenant dans le calcul sont présentées dans le [tableau 4.2](#).

	Epidermes supérieur et inférieur	Parenchyme palissadique	Parenchyme Spongieux	Total
Surface élémentaire	S_e	S_p		
Nombre de cellules par unité de surface élémentaire S_i	N_e	N_p		
Volume d'une cellule	V_e	V_p	V_s	
Volume de constituant j par cellule	$V_{j,e}$	$V_{j,p}$	$V_{j,s}$	
Volume de cellule par unité de surface de feuille (μm)	\bar{V}_e	\bar{V}_p	\bar{V}_s	
Volume de constituant j par unité de surface de feuille (μm)	$\bar{V}_{j,e}$	$\bar{V}_{j,p}$	$\bar{V}_{j,s}$	$\bar{V}_{j,tot}$
Masse volumique du constituant j				ρ_j
Masse de constituant j par unité de surface de feuille				$\bar{m}_j = \rho_j \bar{V}_{j,tot}$

Tableau 4.2 : Quantités calculées pour obtenir la masse par unité de surface de chaque constituant foliaire.

Epidermes

Nous souhaitons calculer le volume V_e d'une cellule de l'épiderme. Initialement, une cellule est représentée par un ellipsoïde de révolution de demi grand axe a_e et demi petit axe $b_e = a_e o_e$. L'ellipsoïde de révolution est donc l'ensemble des points (x, y, z) tels que :

$$\left(\frac{x}{a_e}\right)^2 + \left(\frac{y}{a_e}\right)^2 + \left(\frac{z}{a_e o_e}\right)^2 = 1 \quad \text{Eq. 4.1}$$

Son volume vaut $\pi a_e^3 o_e / 3$. Afin de réaliser un arrangement compact, les cellules sont imbriquées les unes dans les autres ce qui réduit leur volume par rapport à celui de l'ellipsoïde. Cet arrangement est schématisé sur la [figure 4.2](#). Chaque cellule est entourée de six voisines dont trois empiètent d'un volume V' sur son volume initial.

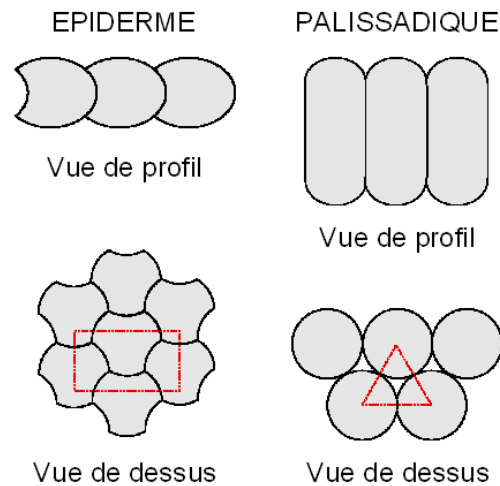


Figure 4.2 : Arrangement spatial des cellules de l'épiderme et du parenchyme palissadique

Afin de calculer le volume V' , représentons l'intersection de deux cellules de l'épiderme. Dans un plan perpendiculaire à celui de la figure, l'ellipsoïde de révolution se réduit à une ellipse de dimension variable. Il faut intégrer l'aire de cette ellipse entre deux bornes représentées sur la [figure 4.3](#). On déduit V' et V_e :

$$V' = 2 \times \int_{a_e \sqrt{3}/2}^{a_e} \pi a_e b_e \left(1 - y^2/a_e^2\right) dy = 2 \times \pi a_e^2 b_e \left(\frac{16 - 9\sqrt{3}}{24}\right) \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$V_e = \frac{4}{3} \pi a_e^3 o_e - 3V' = \frac{27\sqrt{3} - 32}{12} \pi a_e^3 o_e$$

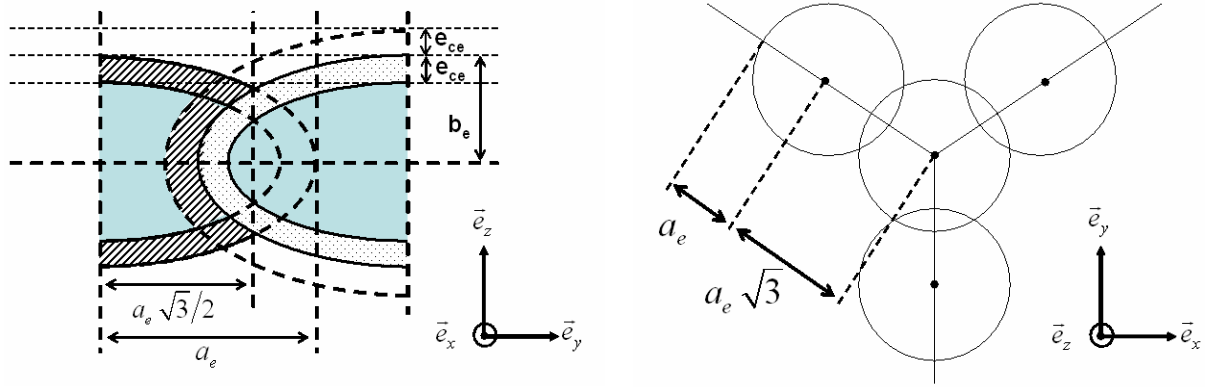


Figure 4.3 : Intersection de deux cellules de l'épiderme (à gauche) et épiderme vu de dessus (à droite)

L'épiderme est dépourvu de chlorophylle. V_e se partage donc entre paroi et eau. L'eau est initialement à l'intérieur de l'ellipsoïde de révolution de demi axes $a_e - e_{ce}$ et $b_e - e_{ce}$ mais il faut retrancher trois fois l'intersection avec une cellule voisine. Soit V'' le volume de cette intersection, il se calcule à partir de deux ellipsoïdes différents : un petit de demi axes $a_e - e_{ce}$ et $b_e - e_{ce}$ centré en $(0;0;0)$ et un grand de demi axes $a_e + e_{ce}$ et $b_e + e_{ce}$ centré en $(0; a_e \sqrt{3}; 0)$:

$$V'' = \int_{y_0}^{a-e} \pi(a-e)(b-e) \left(1 - \frac{y^2}{(a-e)^2}\right) dy + \int_{a\sqrt{3}-y_0}^{a+e} \pi(a+e)(b+e) \left(1 - \frac{y^2}{(a+e)^2}\right) dy \quad \text{Eq. 4.3}$$

où $y = y_0$ est le plan contenant l'intersection du petit ellipsoïde avec le grand. y_0 est racine d'une équation du second degré avec :

$$\begin{cases} y_0 = (-B - \sqrt{\Delta}) / 2A \\ \Delta = B^2 - 4AC \\ A = (a-e)^2(b+e)^2 - (a+e)^2(b-e)^2 \\ B = -2a\sqrt{3}(a-e)^2(b+e)^2 \\ C = 3a^2(a-e)^2(b+e)^2 + (a-e)^2(a+e)^2(b-e)^2 - (a-e)^2(a+e)^2(b+e)^2 \end{cases} \quad \text{Eq. 4.4}$$

On déduit donc les volumes d'eau $V_{w,e}$ et de parois $V_{c,e}$ dans une cellule :

$$\begin{aligned} V_{w,e} &= \frac{4}{3} \pi (a-e)^2 (b-e)^2 - 3V'' \\ V_{c,e} &= V_e - V_{w,e} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.5}$$

Calculons le volume de cellule d'un épiderme par unité de surface. Soit $N_e = 2$ cellules de volume V_e correspondant à une surface $S_e = 3^{3/2} a_e^2$. On a pour le volume de cellule par unité de surface :

$$\bar{V}_e = N_e V_e / S_e = \frac{27\sqrt{3}-32}{18\sqrt{3}} \pi a_e o_e \quad \text{Eq. 4.6}$$

De même, on calcule les volumes d'eau et de parois dans un épiderme par unité de surface de feuille :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{c,e} &= N_e V_{c,e} / S_e \\ \bar{V}_{w,e} &= N_e V_{w,e} / S_e \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Parenchyme palissadique

La cellule est un cylindre à section circulaire fermé par deux capuchons en demi ellipsoïde. A eux deux, les capuchons forment un ellipsoïde de révolution complet. Si a_p est le demi grand axe et $b_p = a_p o_p$ le demi petit axe, alors son volume vaut $\pi a_p^3 o_p 4/3$. Le volume du cylindre vaut $\pi h c_p a_p^2$. Le volume V_p d'une cellule du palissadique est donc égal à :

$$V_p = \pi a_p^2 \left(\frac{4}{3} a_p o_p + h c_p \right) \quad \text{Eq. 4.8}$$

Ce volume de cellule se répartit en parois $V_{c,p}$, chlorophylle $V_{p,p}$ et eau $V_{w,p}$. L'épaisseur de paroi est e_{cp} et celle de chlorophylle e_{pp} . On a :

$$\begin{aligned} V_{w,p} &= \pi (a_p - e_{c,p} - e_{p,p})^2 \left(\frac{4}{3} (a_p - e_{c,p} - e_{p,p}) o_p + h c_p \right) \\ V_{p,p} &= \pi (a_p - e_{c,p})^2 \left(\frac{4}{3} (a_p - e_{c,p}) o_p + h c_p \right) - V_{w,p} \\ V_{c,p} &= V_p - V_{p,p} - V_{w,p} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.9}$$

On a $N_p = 1/2$ cellule pour une surface $S_p = a_p^2 \sqrt{3}$. Le volume d'une cellule a été calculé précédemment, on déduit volume de cellule par unité de surface :

$$\bar{V}_p = N_p V_p / S_p = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{4}{3} a_p o_p + h c_p \right) \quad \text{Eq. 4.10}$$

et concernant les parois, la chlorophylle et l'eau :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{c,p} &= N_p V_{c,p} / S_p \\ \bar{V}_{p,p} &= N_p V_{p,p} / S_p \\ \bar{V}_{w,p} &= N_p V_{w,p} / S_p \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.11}$$

Parenchyme spongieux

Ce tissu est composé de cellules sphériques de taille variable. Soit a_s le rayon initial d'une cellule, son volume V_s vaut :

$$V_s = \frac{4}{3} \pi a_s^3 \quad \text{Eq. 4.12}$$

Si e_{cs} et e_{ps} sont les épaisseurs respectives de parois et de chlorophylle alors les volumes V_{cs} , V_{ps} et V_{ws} correspondant sont :

$$\begin{aligned} V_{c,s} &= V_s - \frac{4}{3} \pi (a_s - e_{c,s})^3 \\ V_{w,s} &= \frac{4}{3} \pi (a_s - e_{c,s} - e_{p,s})^3 \\ V_{p,s} &= \frac{4}{3} \pi (a_s - e_{c,s})^3 - V_{w,s} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.13}$$

Les proportions de parois, chlorophylle et eau dans une cellule sont donc respectivement les rapports de V_{cs} , V_{ps} et V_{ws} à V_s . Ces proportions sont respectées quelle que soit la taille de la cellule car toutes les cellules se déduisent de la cellule initiale par homothétie. La proportion de cellule dans le volume de tissu est $1 - \xi_s$. Pour un tissu de surface S et de hauteur h_s , le volume de cellule est donc $S h_s (1 - \xi_s)$. Le volume de cellule par unité de surface vaut donc :

$$\bar{V}_s = h_s (1 - \xi_s) \quad \text{Eq. 4.14}$$

et concernant les parois, la chlorophylle et l'eau :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{c,s} &= N_s V_{c,s} / S_s \\ \bar{V}_{p,s} &= N_s V_{p,s} / S_p \\ \bar{V}_{w,s} &= N_s V_{w,s} / S_s \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.15}$$

Total

Le volume par unité de surface de feuille $\bar{V}_{j,tot}$ d'un constituant j s'obtient en sommant pour chaque tissu les quantités précédemment calculée. Les épidermes sont au nombre de deux et sont dépourvus de chlorophylle :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{c,tot} &= 2\bar{V}_{c,e} + \bar{V}_{c,p} + \bar{V}_{c,s} \\ \bar{V}_{p,tot} &= \bar{V}_{p,p} + \bar{V}_{p,s} \\ \bar{V}_{w,tot} &= 2\bar{V}_{w,e} + \bar{V}_{w,p} + \bar{V}_{w,s} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.16}$$

La masse par unité de surface de feuille \bar{m}_j de constituant j s'obtient à partir du volume par unité de surface $\bar{V}_{j,tot}$ et de la masse volumique ρ_j :

$$\bar{m}_j = \rho_j \bar{V}_{j,tot} \quad \text{Eq. 4.17}$$

Les volumes d'eau, de matière sèche et de pigments dans un échantillon de feuille sont difficilement mesurables et on leur préfère les masses de constituant par unité de surface de feuille. Eq. 4.17 fait le lien entre ces deux quantités et permet de fixer les volumes dans la maquette à partir des mesures de masses par unité de surface.

3.3. Synthèse et visualisation

La maquette de feuille est produite par le code DICOLEAF, développé par Yves Govaerts (EUMETSAT), et visualisée avec le code Rayshade (<http://graphics.stanford.edu/~cek/rayshade/>). Les deux codes utilisent le même langage de programmation. La maquette est un ensemble de surfaces fermées délimitant un milieu intérieur constitué d'une paroi cellulaire, d'eau, et de chlorophylle. La forme des surfaces est obtenue par combinaison de formes élémentaires appelées primitives. Les éléments géométriques de base utilisés sont des sphères, des disques ou des cylindres. Ils peuvent être déformés, les sphères devenant des ellipsoïdes de révolution, ou bien associés entre eux par des opérations de *Constructive Solid Geometry* (CSG). Les trois opérateurs disponibles en CSG sont l'union, la différence et l'intersection de deux objets (figure 4.4). La figure 4.5 présente la chaîne d'opérations à effectuer pour obtenir le fichier définissant tous les objets d'une maquette et le fichier contenant l'image de cette maquette. La figure 4.1 présentée au début de ce chapitre est un exemple du résultat de l'utilisation conjointe de DICOLEAF et Rayshade.

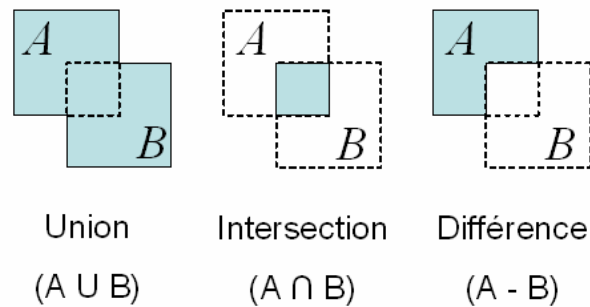


Figure 4.4 : Illustration des trois opérateurs de base utilisés en *Constructive Solid Geometry*.

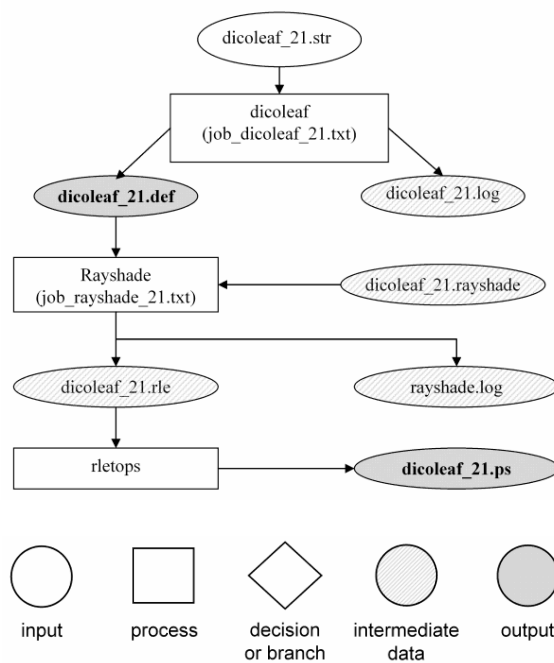


Figure 4.5 : Fabrication de la maquette DICOLEAF_21.def avec le code DICOLEAF et de son image DICOLEAF_21.ps avec le code Rayshade à partir du fichier d'entrée DICOLEAF_21.str. La convention pour le traitement des fichiers est figurée en bas de la figure.

4. Les simulations de 1996

Govaerts *et al.* (1996) publient les premières simulations de lancer de rayon dans une maquette tridimensionnelle de feuille (DICOLEAF 14). Les paramètres géométriques de la maquette sont fixés à partir de descriptions de l'anatomie foliaire trouvées dans la littérature. Ces paramètres déterminent le contenu biochimique de la maquette par le biais des calculs présentés dans la section 3. La description de la maquette de 1996, avec nos notations, est présentée dans le tableau 4.3. Pour vérifier le bon fonctionnement de nos programmes, le contenu biochimique a été recalculé et comparé à celui de 1996. Les résultats sont cohérents mais différents : le contenu en chlorophylle calculé vaut $60 \mu\text{g cm}^{-2}$ en 1996, et $114 \mu\text{g cm}^{-2}$ avec nos programmes. Cette différence s'explique simplement par les valeurs utilisées de la masse volumique de la chlorophylle : $0,024 \text{ g cm}^{-3}$ (1996) et $0,047 \text{ g cm}^{-3}$ (nos programmes, calcul présenté dans la section 5.2). Eq. 4.17 montre que, à volume constant, doubler la masse volumique de la chlorophylle revient à doubler son contenu dans la maquette.

	Epidermes supérieur et inférieur	Parenchyme palissadique	Parenchyme spongieux	Total
Paramètres				
Epaisseur	he = 17,5 µm	hp = 65 µm	hs = 50 µm	150 µm
Rayon	ae = 12,5 µm	ap = 7,5 µm	as = 12 µm	
Aplatissement	oe = 0,7 ou 0,2	op = 1		
Distance min. entre 2 cellules	0,01 µm	0,01 µm	0,01 µm	
Pigment	epe = 0 µm	epp = 1,53 µm	eps = 1,32 µm	
Parois	ece = 1µm	ecp = 1µm	ecs = 1µm	
Hauteur cylindre		hcp = 50 µm		
Concentration			1-ksis = 0,55	
Volume par unité de surface (µm)				
Eau	19	22,6	14,4	56
Parois	7,03	14,5	6,32	27,8
Chlorophylle	0	17,4	6,75	24,2
Air (déduit)	8,96	10,6	22,5	42
Feuille	35	65	50	150
Masse par unité de surface (g cm⁻²)				
Eau				5,6 10 ⁻³
Parois				4,17 10 ⁻³
Chlorophylle				1,14 10 ⁻⁴

Tableau 4.3 : Paramètres de DICOLEAF 1996. Les masses volumiques utilisées valent 1 g cm⁻³ pour l'eau, 1,5 g cm⁻³ pour les parois, et 0,047 g cm⁻³ pour la chlorophylle.

Les propriétés optiques de la maquette (fichier "optics_data_3" en 1996) sont les indices de réfraction et les coefficients linéiques d'absorption de l'eau, de la chlorophylle et des parois cellulaires. Les indices de réfraction de l'eau et de la chlorophylle sont supposés être les mêmes et égaux aux valeurs publiées par Palmer et Williams (1974). L'indice de réfraction des parois cellulaires est égal à celui de la feuille dans le modèle Prospect (fichier "dataspec" de la version v3_01, <http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/opticleaf>). Les indices de réfraction sont tracés sur la figure 4.6. Les coefficients linéiques d'absorption (µm⁻¹) sont calculés à partir de la calibration de prospect_v3_01. Cette calibration fournit le fichier "dataspec" avec les valeurs du coefficient spécifique d'absorption (cm² g⁻¹). Le passage entre l'absorption dans "dataspec" et l'absorption dans "optics_data_3" est présenté dans le tableau 4.4 et tracé sur la figure 4.7. Toutes ces propriétés optiques seront mises à jour pour nos simulations (section 5.2).

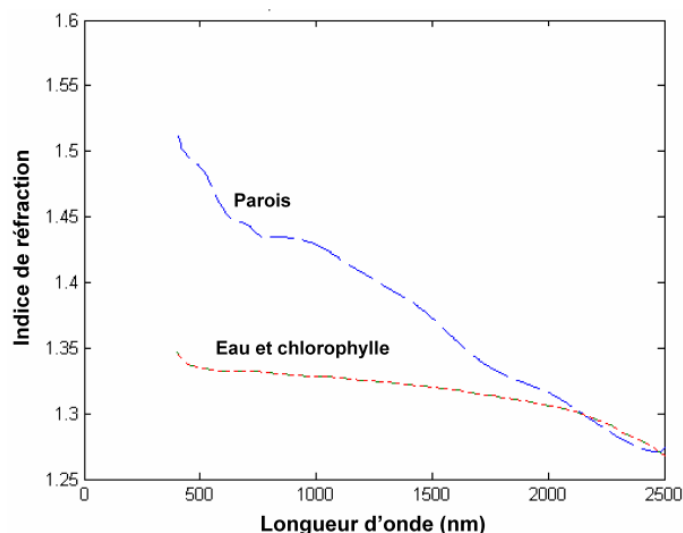


Figure 4.6 : Indices de réfraction des parois cellulaires (en bleu), de la chlorophylle (en vert) et de l'eau (en rouge) utilisés par Govaerts *et al.* (1996). Ceux de la chlorophylle et de l'eau sont confondus.

Eau	$\alpha_{od3} (\mu\text{m}^{-1}) \sim K_{dataspec} (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) / 9300$
Chlorophylle	$\alpha_{od3} (\mu\text{m}^{-1}) \sim K_{dataspec} (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) \times 7$
Parois	$\alpha_{od3} (\mu\text{m}^{-1}) \sim K_{dataspec} (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) / 4000$

Tableau 4.4 : Relations de passage entre les données de "dataspec" et de "optics_data_3" (od3).

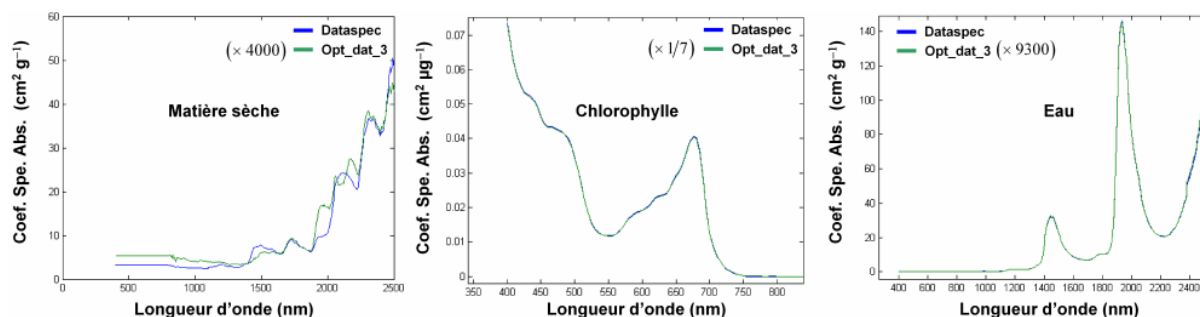


Figure 4.7 : Propriétés optiques pour la maquette DICOLEAF de 1996

Govaerts *et al.* (1996) simulent les réflectances et transmittances bi-directionnelles (BRF et BTF) et directionnelles-hémisphériques (DHRF et DHTF), ainsi que les profils de flux lumineux dans la maquette. Les simulations bi-directionnelles sont faites dans le plan principal (plan perpendiculaire à la feuille contenant la direction d'éclairage). Les angles zénithaux d'éclairage sont de 0° , 15° , 30° , 45° et 60° . L'influence de la rugosité de surface de la maquette est étudiée en changeant la convexité des cellules de l'épiderme (épidermes rugueux, lisse et intermédiaire). La principale limite de leur travail réside dans l'absence de variations spectrales dans le visible et dans l'impossibilité de comparer simulations et mesures. C'est pourquoi les simulations de 2006 mettent à jour la modélisation de l'absorption et se basent sur la description d'une feuille réelle de hêtre dont les propriétés optiques ont été mesurées en laboratoire.

5. Les simulations de 2006

5.1. L'échantillon de hêtre

L'échantillon est une feuille de hêtre *Fagus sylvatica* cueillie sur le site du laboratoire ESE à Orsay (figure 4.8) en juillet 2005. Ses BRDF et BTDF sont mesurées avec le goniomètre présenté dans le chapitre 2. Ses contenus en eau, matière sèche et chlorophylle ont été mesurés au laboratoire Ecologie, Evolution et Systématique (ESE, Orsay) grâce à l'aide de Zoran Cerovic et Naïma Ben-Ghozlen. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4.5. Des portions du limbe ont été conservées quelques mois puis des coupes transversales (épaisseur 8 μm) et paradermales (épaisseur 5 μm) ont été réalisées au Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN, Paris) grâce à l'aide de Thierry Deroin. Elles sont visualisées au microscope et photographiées sur la figure 4.9. A partir de la coupe transversale, l'épaisseur des tissus et la proportion d'air dans le mésophylle spongieux sont estimées (tableau 4.5). L'ensemble du protocole est présenté en annexe G et l'obtention des coupes est détaillée.



Figure 4.8 : Photo de la feuille de hêtre.

Mesures biochimiques		
Surface		1,539 cm^2
Masse	Eau	$9,5 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
	Matière sèche	$8,9 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
	Total	$18,4 \cdot 10^{-3} \text{ g}$
Contenu	Eau	$6,2 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$
	Matière sèche	$5,8 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$
	Chlorophylle	$42 \cdot 10^{-6} \text{ g cm}^{-2}$
	Total	$12 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-2}$
Mesures anatomiques		
Epaisseur	Cuticule	2 μm (négligée)
	Epiderme supérieur	10 μm
	Parenchyme palissadique	40 μm
	Parenchyme spongieux	60 μm
	Epiderme inférieur	10 μm
	Total	120 μm
Fraction d'air dans le parenchyme spongieux		43 %

Tableau 4.5 : Caractéristiques biochimiques et anatomiques de la feuille de hêtre.

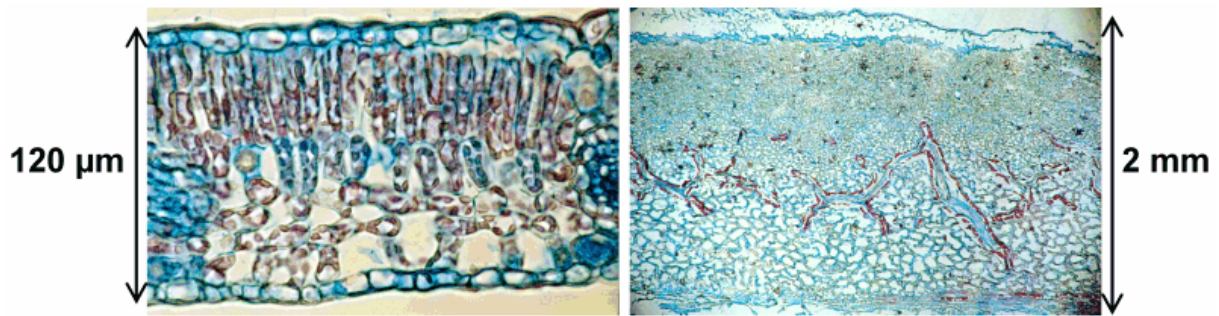


Figure 4.9 : Coupes du limbe de l'échantillon de hêtre (*Fagus sylvatica*). A gauche : Coupe transversale (8 μm d'épaisseur). A droite : coupe paradermale (5 μm d'épaisseur).

5.2. Propriétés physiques des constituants foliaires

Masses volumiques

Les masses volumiques ρ_j des constituants foliaires utilisées pour les simulations sont données dans le [tableau 4.6](#). Les parois cellulaires sont constituées principalement de cellulose et de lignine, de masses volumiques respectives 1,52 g cm^{-3} et 1,34 g cm^{-3} ([Stamm et Sanders, 1966](#)). En supposant un rapport cellulose/lignine de 3/1, [Govaerts et al. \(1996\)](#) estiment la masse volumique des parois à 1,47 g cm^{-3} , valeur arrondie à 1,5 g cm^{-3} à cause des incertitudes sur leur composition. La masse volumique de la chlorophylle dans un chloroplaste (0,047 g cm^{-3}) est tirée des données de [Fukshansky et al. \(1993\)](#) et [Richter et Fukshansky \(1994\)](#) présentées dans le [tableau 4.6](#). On a supposé que la chlorophylle remplissait à elle seule le volume du chloroplaste, et on a calculé la valeur moyenne pour les deux espèces.

	Eau	Parois	Chlorophylle
Masse volumique ρ (g cm^{-3})	1,0	1,5	0,047
Données pour la chlorophylle			
	<i>Catalpa</i>	<i>Magnolia</i>	Moyenne
Volume d'un chloroplaste (cm^3)	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$8,5 \cdot 10^{-11}$	
Masse de chlorophylle dans un chloroplaste (μg)	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	
Masse volumique correspondante ($\mu\text{g cm}^{-3}$)	$1,35 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^4$

Tableau 4.6 : Masse volumique des constituants foliaires.

Indices de réfraction

L'indice de réfraction doit être évalué pour les quatre milieux présents dans la maquette, c'est-à-dire l'air, l'eau, la matière sèche et la chlorophylle. Il dépend normalement de la longueur d'onde mais, à l'exception de l'eau, ces variations spectrales seront négligées. Parmi les valeurs publiées dans la littérature et présentées dans le [tableau 4.7](#), celles utilisées dans nos simulations sont marquées d'un astérisque et tracées sur la [figure 4.10](#). Il n'y a aucune ambiguïté pour l'air et l'eau. Concernant la chlorophylle, nous ne disposons que d'une seule valeur (utilisée par [Kumar et Silva, 1973](#)) qui sera par conséquent adoptée. Les mêmes auteurs proposent une valeur pour les parois cellulaires (1,52) qui diffère notablement de celle (1,42) proposée par [Gausman et al. \(1974\)](#). Notre choix s'oriente vers la valeur de 1,52 puisqu'une autre source donne 1,55 pour la cellulose, principal constituant de ces parois. Une conséquence sera la discontinuité de l'indice de

réfraction entre les parois cellulaires (1,52) et les pigments (1,42). Cette discontinuité provoque des phénomènes de réflexion et de réfraction contribuant à diffuser les flux lumineux dans la maquette. Ainsi le choix de valeurs différentes semble plus réaliste qu'une homogénéisation de l'indice de réfraction entre parois et pigments.

Matériau	Indice de réfraction	Référence
* Air	1,00	Lide (2003)
* Eau	1,33 (700 nm)	Segelstein (1981)
* Parois cellulaires	1,52	Kumar et Silva (1973)
* Chlorophylle	1,42	Charney et Brackett (1961), cités par Kumar et Silva (1973)
Cutine	1,5	Vanderbilt <i>et al.</i> (1991)
Cire (bayberry)	1,436	Weast (1989) cité par Vanderbilt <i>et al.</i> (1991)
Cire (carnauba)	1,467-1,72	idem ↑
Cire (jojoba)	1,465	idem ↑
Cire (carnauba)	1,47	Allen <i>et al.</i> (1969)
Cuticule	1,45	Seyfried <i>et al.</i> (1983) cités par Yamada et Fujimura (1991)
Protoplasme	1,36	Charney et Brackett (1961), dans Kumar et Silva (1973)
Cellulose	1,55	
Parois cellulaires, épidermes	1,425	Gausman <i>et al.</i> (1974)
Parois cellulaires hydratées	1,42	Woolley (1975)
Parois cellulaires asséchées	1,51	idem ↑
Poils	1,48	idem ↑
Feuille	1,48	Woolley (1971)
Feuille	1,43	Vanderbilt <i>et al.</i> (1985)

Tableau 4.7 : Valeurs de l'indice de réfraction dans le visible. Les lignes marquées d'un astérisque correspondent aux valeurs utilisées dans notre étude.

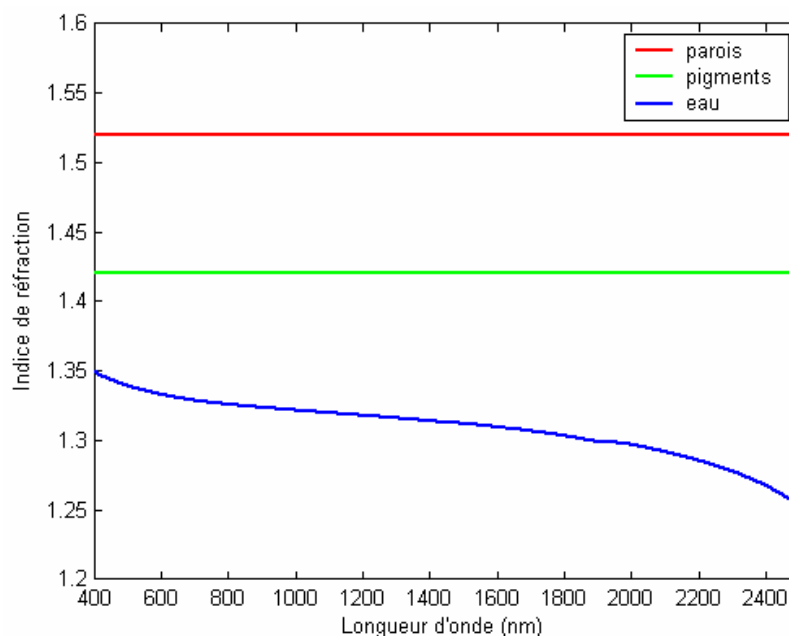


Figure 4.10 : Indices de réfraction utilisés dans les simulations

L'absorption dans Raytran

L'absorption est modélisée dans Raytran par la loi de Beer-Lambert. Pour un parcours de longueur l dans un milieu d'absorption linéique α , la transmission τ est le rapport du nombre de photons transmis, $\Phi(l)$, au nombre de photons incidents, $\Phi(0)$:

$$\tau = \exp(-\alpha l) = \Phi(l)/\Phi(0) \quad \text{Eq. 4.18}$$

La transmission τ peut être interprétée comme la probabilité de survie d'un photon sur ce parcours. Elle est comprise entre 0 et 1. Pour simuler l'absorption dans Raytran, on tire un nombre aléatoire u compris entre 0 et 1 pour chaque parcours de ce type. Si $u > \tau$ alors le photon est absorbé, sinon il continue jusqu'à la prochaine interaction.

Les maquettes de feuilles dans Raytran distinguent trois milieux absorbants : l'eau, les parois cellulaires et les chloroplastes. Pour chacun de ces milieux, il est nécessaire de fournir les valeurs correspondantes de α , notées α_i . Les valeurs utilisées sont tracées sur la [figure 4.11](#). Chaque milieu contient un constituant pur, par conséquent α_i (m^{-1}) se déduit du coefficient spécifique d'absorption K_i ($\text{m}^{-1} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) et de la masse volumique ρ_i (kg m^{-3}) :

$$\alpha_i = K_i \rho_i \quad \text{Eq. 4.19}$$

[Eq. 4.19](#) est utilisée pour la matière sèche et la chlorophylle. Pour l'eau, on utilise directement le coefficient linéique d'absorption mesuré par [Segelstein \(1981\)](#). Les ρ_i utilisés dans [Eq. 4.19](#) sont les mêmes que ceux utilisés pour le calcul des volumes dans la maquette à partir de la masse par unité de surface de feuille de chaque constituant.

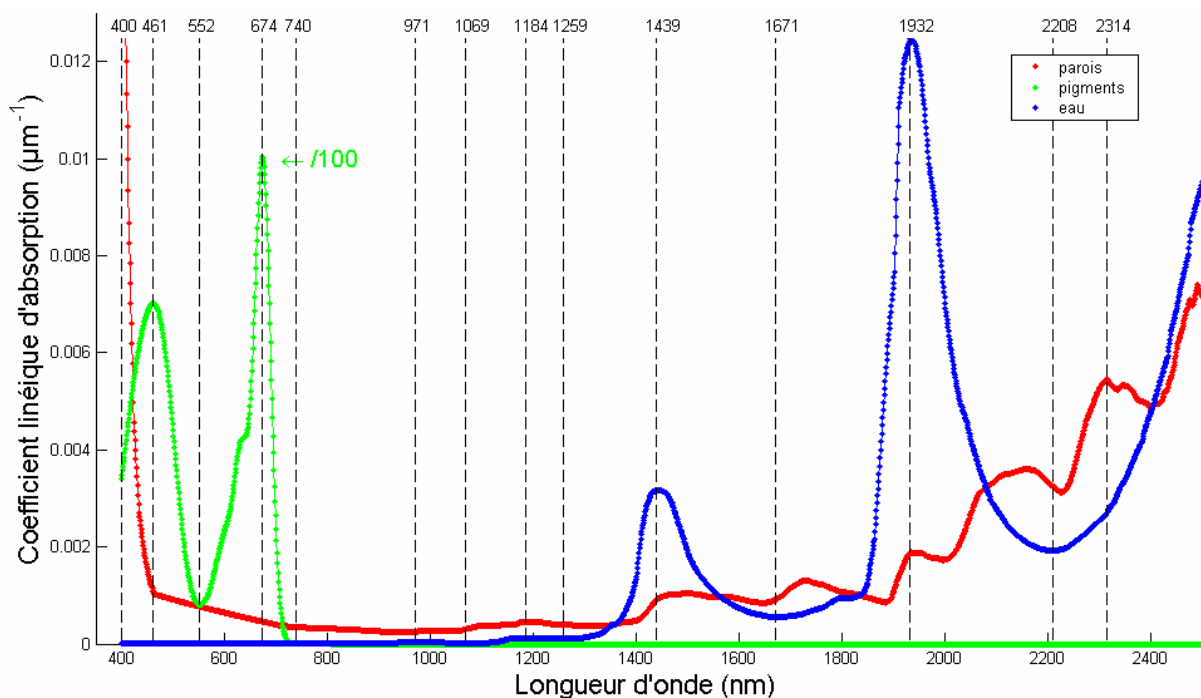


Figure 4.11 : Coefficients linéiques d'absorption pour la chlorophylle, l'eau et la matière sèche. Les valeurs pour la chlorophylle ont été divisées par 100.

Absorption de la chlorophylle et de la matière sèche

Le coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle est modélisé par une somme de gaussiennes :

$$K(\lambda) = \sum_i a_i \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 4.20}$$

Les longueurs d'onde centrales λ_i , largeurs σ_i et amplitudes a_i sont données dans le [tableau 4.8](#). Elles ont été ajustées empiriquement de manière à approcher les données de [Yamada et Fujimura \(1991\)](#). Ces dernières sont celles qui se rapprochent le plus des mesures biochimiques de [Comar et Zscheile \(1942\)](#), [Lichtenthaler \(1987\)](#) et [Porra et al. \(1989\)](#). De plus, elles présentent des variations spectrales plus fortes que les données issues de Prospect (utilisées en 1996), on espère donc améliorer la simulation des variations spectrales de la réflectance et de la transmittance dans le visible. Le graphe de $K(\lambda)$ est présenté sur la [figure 4.13](#). La modélisation de l'absorption, sa mesure biochimique et la comparaison des valeurs publiées pour la chlorophylle sont présentées en détail dans l'[annexe B](#). Le coefficient spécifique de la matière sèche est déduit de la calibration du modèle Prospect. Il est tracé en $\text{m}^{-1} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ sur la [figure 4.12](#).

λ_i (nm)	430	480	560	600	630	640	675
a_i ($\text{m}^{-1} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	10 000	10 000	1 000	4 000	2 000	6 000	20 000
σ_i	35	30	20	20	10	20	15

Tableau 4.8 : Valeurs des paramètres des gaussiennes utilisées pour modéliser le coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle.

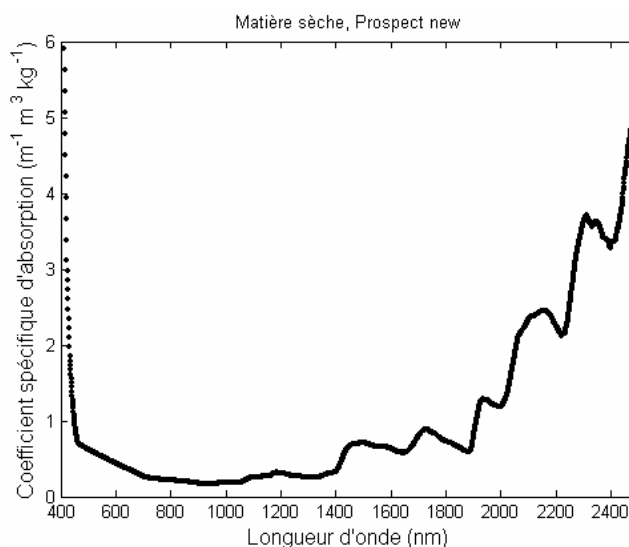


Figure 4.12 : Coefficient spécifique d'absorption de la matière sèche issu de la calibration du modèle Prospect.

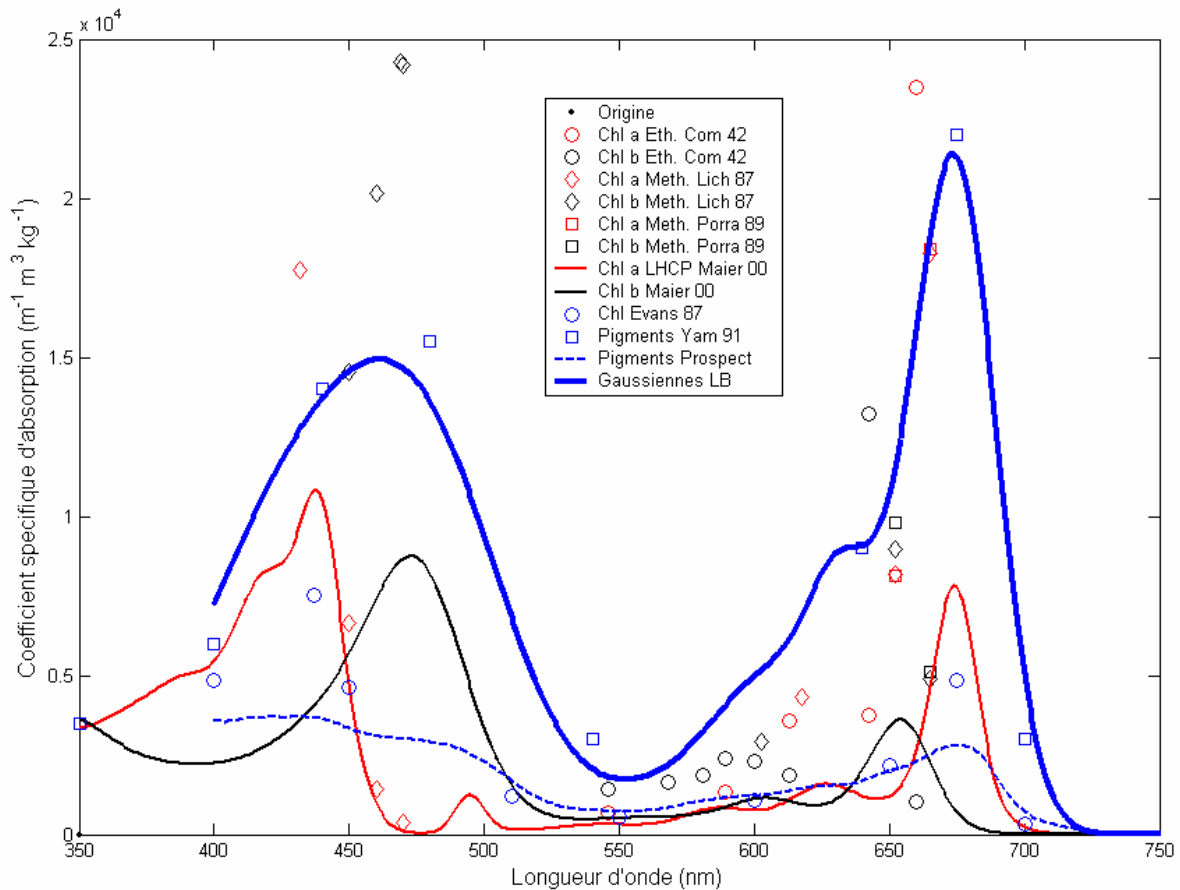


Figure 4.13 : Comparaison des différentes valeurs du coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle.

Absorption de l'eau

Jacquemoud (communication personnelle) présente une étude comparative des spectres d'absorption de l'eau (Curcio et Petty, 1951 ; Hale et Query, 1973 ; Palmer et Williams, 1974 ; Segelstein, 1981). Celui de Segelstein va de 10 à 10¹⁰ nm et s'accorde très bien avec le reste de la littérature. L'auteur mesure l'indice complexe de l'eau :

$$\tilde{n} = n + ik \quad \text{Eq. 4.21}$$

où k est l'indice d'absorption (attention aux notations puisque k désigne parfois le coefficient d'absorption linéique ou encore la norme du vecteur d'onde $2\pi/\lambda$). Le coefficient linéique d'absorption α s'en déduit par :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad \text{Eq. 4.22}$$

où $\lambda = c_0 T$ est la longueur d'onde dans le vide d'un rayonnement de période T . Les fichiers de mesure (<http://omlc.ogi.edu/index.html>) donnent directement la valeur de α (cm⁻¹) en fonction de la longueur d'onde dans le vide. La figure 4.14 présente les spectres de l'indice de réfraction, du coefficient linéique d'absorption et de l'indice d'absorption. Le coefficient linéique d'absorption est utilisé pour évaluer la transmission d'une couche d'eau de 100 μm d'épaisseur (tableau 4.9), ce qui donne l'ordre de grandeur de l'absorption foliaire due à l'eau.

Longueur d'onde (nm)	Coefficient linéique d'absorption (cm^{-1})	Transmission
480	$2,0 \cdot 10^{-4}$	1,0000
750	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,9998
1930	100	0,37

Tableau 4.9 : Transmission d'une couche d'eau de 100 μm d'épaisseur.

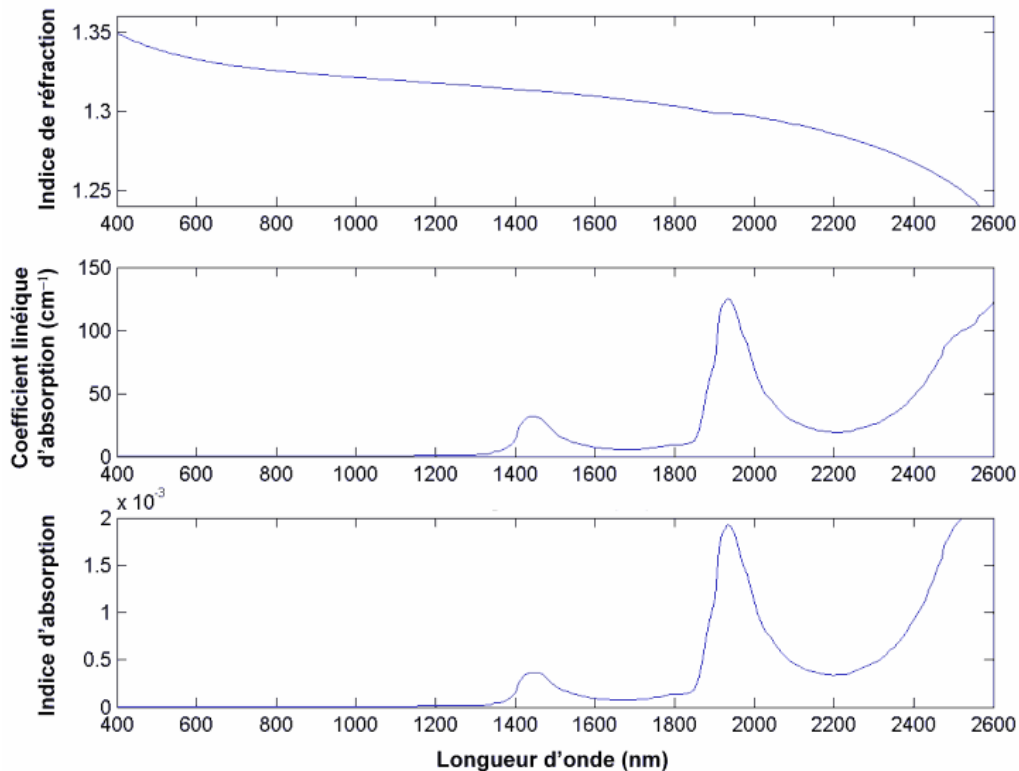


Figure 4.14 : Indice de réfraction n (haut), coefficient linéique d'absorption α (milieu) et indice d'absorption k (bas) de l'eau dans le visible et le proche infrarouge. Données : **Segelstein (1981)**.

4.3 Les maquettes DICOLEAF

Les simulations de 2006 sur la maquette de feuille de hêtre se sont déroulées en deux étapes. La première consiste à modifier la maquette de 1996 pour faire correspondre ses paramètres géométriques avec ceux de la feuille de hêtre, tout en conservant les propriétés optiques utilisées en 1996 (indices de réfraction et coefficients linéiques d'absorption présentés dans la [section 4](#)). La maquette correspondante est DICOLEAF 21. La deuxième étape consiste à affiner les paramètres géométriques de DICOLEAF 21 pour produire la maquette DICOLEAF 22 dont la réflectance et la transmittance sont simulées avec un nouveau jeu de propriétés optiques des constituants foliaires (présenté dans la [section 5.2](#)).

DICOLEAF 21

Cette maquette ([figure 4.15](#)) est très proche de celle utilisée par [Govaerts et al. \(1996\)](#). Ses paramètres sont présentés dans le [tableau 4.10](#). Les valeurs marquées d'un astérisque sont issues des simulations de 1996. Les paramètres géométriques modifiés sont évalués à partir des coupes

de la feuille de hêtre (figure 4.9). La feuille a une épaisseur totale de 120 μm au lieu de 150 μm précédemment. L'épaisseur des tissus et les dimensions des cellules correspondent aux observations anatomiques, ainsi que la proportion d'air dans le parenchyme spongieux. Cependant, les contenus biochimiques de la maquette diffèrent de ceux de la feuille de hêtre : il y a deux fois moins d'eau dans la maquette que dans la feuille, 20 % de moins de parois cellulaires et deux fois trop de chlorophylle. Ces différences de contenu, malgré la similitude des formes géométriques, montrent la difficulté de fabriquer une maquette réaliste. Elles seront largement réduites avec la maquette DICOLEAF 22.

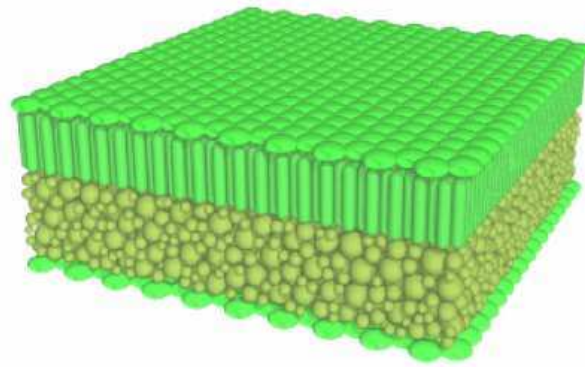


Figure 4.15 : Maquette DICOLEAF 21.

	Epidermes supérieur et inférieur	Parenchyme palissadique	Parenchyme spongieux	Total
Paramètres				
Épaisseur	he = 10 μm	hp = 40 μm	hs = 60 μm	120 μm
Rayon	ae = 10 μm	ap = 4 μm	as = 8 μm	
Aplatissement	oe = 0,5	op = 1 *		
Distance min. entre 2 cellules	0,01 μm^*	0,01 μm^*	0,01 μm^*	
Pigment	epe = 0 μm	epp = 1,53 μm^*	eps = 1,32 μm^*	
Parois	ece = 1 μm^*	ecp = 1 μm^*	ecs = 1 μm^*	
Hauteur cylindre		hcp = 32 μm		
Concentration			1-ksis = 0,57	
Volume par unité de surface (μm)				
Eau	9.25	4.16	12.2	25.6
Parois	5.63	15.5	11.3	32.4
Chlorophylle	0	14.2	10.7	24.9
Air (déduit)	5.12	6.14	25.8	37.1
Feuille	20	40	60	120
Masse par unité de surface (g cm^{-2})				
Eau				2,56 10^{-3} (6,2 10^{-3})
Parois				4,86 10^{-3} (5,8 10^{-3})
Chlorophylle				1,17 10^{-4} (4,2 10^{-5})

Tableau 4.10 : Paramètres de DICOLEAF 21. Les masses de constituant par unité de surface de feuille font apparaître les valeurs obtenues et les valeurs souhaitées (entre parenthèse).

Les masses volumiques (g cm^{-3}) utilisées sont 1 (eau), 1,5 (parois) et 0,047 (chlorophylle).

La figure 4.16 illustre les résultats des simulations avec la maquette DICOLEAF 21 et le jeu de propriétés optiques des constituants de 1996. La réflectance et la transmittance directionnelles-hémisphériques à 5° d'incidence suivent qualitativement les variations spectrales observées

expérimentalement : absorption forte dans le visible, faible dans le proche infrarouge, et bande d'absorption de l'eau vers 1450 nm. Cependant, il n'y a pas de dynamique dans le visible et le pic de réflectance observé expérimentalement vers 550 nm (causant la couleur verte des feuilles) est très faible dans les spectres simulés. Par conséquent, la modification du coefficient linéique d'absorption de la chlorophylle est nécessaire. La BRDF à 5° d'incidence et 730 nm montre des structures géométriques absentes dans les mesures. L'épiderme trop parfait de la maquette, avec des cellules convexes identiques se répétant à l'infini, génère un motif artificiel lié à sa rugosité. L'apparition de tels motifs est donc inévitable. Cependant, on peut réduire leur impact sur la BRDF en diminuant la convexité des cellules de l'épiderme. Ces observations ont conduit à développer la maquette DICOLEAF 22.

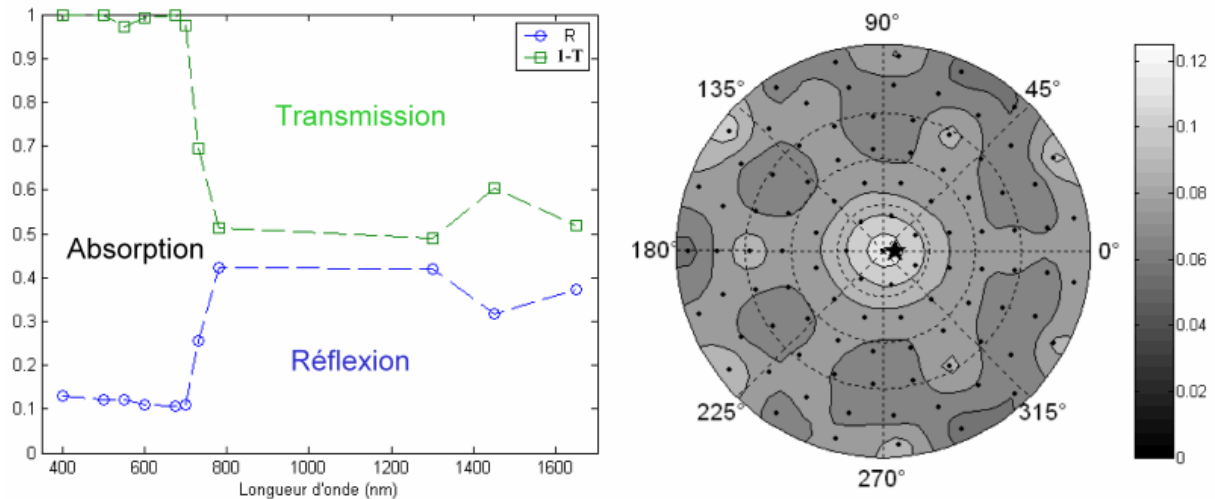


Figure 4.16 : Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques (à gauche), BRDF à 730 nm (à droite), simulées avec la maquette DICOLEAF 21 éclairée à 5° d'incidence

DICOLEAF 22

La maquette DICOLEAF 22 (figure 4.17) diffère des précédentes par ses paramètres géométriques (tableau 4.11) et optiques (section 5.2). Cette maquette approche à 1 % près les contenus en matière sèche et en chlorophylle de la feuille réelle. La chlorophylle se répartit en 2/3 pour le parenchyme palissadique et 1/3 pour le spongieux, comme observé par Fukshansky *et al.* (1993). En revanche, le contenu en eau est deux fois trop faible, car la maquette contient trop d'air, localisé principalement dans le mésophylle spongieux et à l'interface entre les tissus. Afin de diminuer les espaces d'air aux interfaces avec le parenchyme palissadique, les capuchons des cellules du parenchyme palissadique ont été aplatis ; afin de diminuer l'effet de la convexité de l'épiderme sur la BRDF, les cellules ont été moins rugueuses que celle de DICOLEAF 21 en divisant leur aplatissement par deux. Pour conserver une épaisseur de 10 μm de l'épiderme, il faut modifier le demi grand axe de la cellule (qui passe à 20 μm au lieu des 10 μm précédents). L'aplatissement des cellules de l'épiderme entraîne une augmentation de son contenu en eau, et l'on augmente aussi le contenu en matière sèche en épaississant les parois cellulaires. L'analyse des simulations optiques dans DICOLEAF 22 est présentée dans la section suivante.

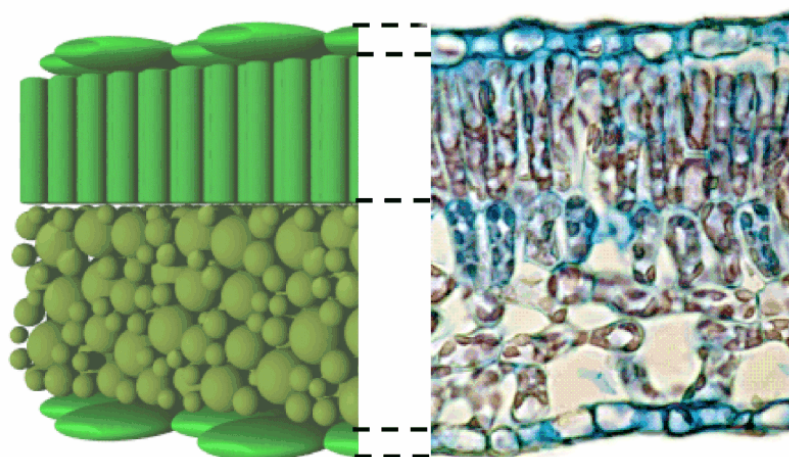


Figure 4.17 : Maquette DICOLEAF 22 vue de côté (à gauche) et coupe transversale de la feuille de hêtre (à droite). Les capuchons des cellules cylindriques du parenchyme palissadique sont aplatis pour rendre la maquette plus compacte.

	Epidermes supérieur et inférieur	Parenchyme palissadique	Parenchyme spongieux	Total
Paramètres				
Epaisseur	he = 10 μm	hp = 40 μm	hs = 60 μm	150 μm
Rayon	ae = 20 μm	ap = 4 μm	as = 8 μm	
Aplatissement	oe = 0,25	op = 0,25	X	
Distance min.entre 2 cellules	0,01 μm^*	0,01 μm^*	0,01 μm^*	
Pigment	epe = 0 μm	epp = 0,5 μm	eps = 0,37 μm	
Parois	ece = 1,72 μm	ecp = 1,2 μm	ecs = 1,2 μm	
Hauteur cylindre		hcp = 38 μm		
Concentration			1-ksis = 0,57	
Volume par unité de surface (μm)				
Eau	7,69	11,6	17,8	37,1
Parois	7,18	18,4	13,2	38,8
Chlorophylle	0	5,68	3,25	8,92
Air (déduit)	5,12	4,33	25,8	35,3
Feuille	20	40	60	120
Masse par unité de surface (g cm^{-2})				
Eau				3,7 10^{-3} (6,2 10^{-3})
Parois				5,8 10^{-3} (5,8 10^{-3})
Chlorophylle				4,2 10^{-5} (4,2 10^{-5})

Tableau 4.11 : Paramètres de DICOLEAF 22. Les masses de constituant par unité de surface de feuille font apparaître les valeurs obtenues et les valeurs souhaitées (entre parenthèse).

Les masses volumiques (g cm^{-3}) utilisées sont 1 (eau), 1,5 (parois) et 0,047 (chlorophylle).

6. Analyse des simulations de DICOLEAF 22

Les simulations les plus abouties sont celles opérées sur la maquette DICOLEAF 22 avec les propriétés optiques présentées dans la [section 5](#). Elles sont détaillées ci-dessous.

6.1. Profils des flux lumineux

Soit Φ_0 le flux lumineux incident sur la maquette comprise entre les profondeurs $z=0$ et $z=z_{\text{inf}}$ où $z_{\text{inf}} < 0$. La direction de propagation de ce flux est verticale (axe $O; \vec{e}_z$) et dirigée vers le bas. En $z=0$, ce flux rencontre la face supérieure de la maquette et donne naissance à un flux descendant $\Phi_{\downarrow}(z)$ et à un flux montant $\Phi_{\uparrow}(z)$. On définit les flux relatifs descendant $I(z)$ et montant $J(z)$ par :

$$\begin{cases} I(z) = \Phi_{\downarrow}(z)/\Phi_0 \\ J(z) = \Phi_{\uparrow}(z)/\Phi_0 \end{cases} \quad \text{Eq. 4.23}$$

$I(z)$ et $J(z)$ sont toujours positifs ou nuls. Par la suite, on considèrera toujours les flux relatifs plutôt que les flux absolus $\Phi_{\downarrow}(z)$ et $\Phi_{\uparrow}(z)$. La maquette étant éclairée du côté des $z > 0$, le flux descendant est toujours égal à un sur la surface supérieure et le flux montant est toujours nul sur la surface inférieure :

$$\begin{cases} I(0) = 1 \\ J(z_{\text{inf}}) = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 4.24}$$

La réflectance R et la transmittance T (ou facteurs de réflexion et de transmission) de la maquette se définissent aisément à partir des flux relatifs. La première est égale au flux montant à la surface supérieure de la maquette ($z=0$) et la seconde est égale au flux descendant à la surface inférieure de la maquette ($z=z_{\text{inf}}$) :

$$\begin{cases} R = J(0) \\ T = I(z_{\text{inf}}) \end{cases} \quad \text{Eq. 4.25}$$

On définit le flux net $F(z)$ comme le flux descendant moins le flux montant :

$$F(z) = I(z) - J(z) \quad \text{Eq. 4.26}$$

Le flux descendant est toujours supérieur au flux montant puisque tout photon se dirigeant vers le haut à un instant donné a dû descendre auparavant. Par conséquent, le flux net est toujours positif. Il est relié à la réflectance et à la transmittance par :

$$\begin{cases} F(0) = I(0) - J(0) = 1 - R \\ F(z_{\text{inf}}) = I(z_{\text{inf}}) - J(z_{\text{inf}}) = T \end{cases} \quad \text{Eq. 4.27}$$

Il est intéressant de noter que les flux montants $I(z)$ et descendants $J(z)$ peuvent être supérieurs à un. Pour l'expliquer, considérons un photon piégé entre deux miroirs parfaitement réfléchissants. Initialement le photon se propage vers le bas. Le flux descendant vaut 1, le flux

montant est nul et le flux net s'en déduisant vaut 1. Le photon va d'un miroir à l'autre indéfiniment. Si l'on compte le nombre de passage au centre du dispositif, le photon passera une infinité de fois dans chaque sens. Les flux relatifs dans chaque sens (nombre de passage sur nombre de photons) seront par conséquent infinis. En revanche le flux net sera toujours égal à 1 puisque le photon ne peut pas passer dans un sens sans être passé dans l'autre auparavant.

Analyse des flux

L'épaisseur de la maquette est de $120\ \mu\text{m}$. Les flux sont échantillonnés entre $z = 0\ \mu\text{m}$ et $z = -120\ \mu\text{m}$, tous les $6,3\ \mu\text{m}$, soit 20 points d'échantillonnage. Les résultats sont présentés sur la [figure 4.18](#) pour deux longueurs d'onde : $674\ \text{nm}$ (forte absorption par la chlorophylle) et $740\ \text{nm}$ (faible absorption), et deux angles d'incidence : 0° (incidence normale) et 65° (forte incidence). Notons que les points d'échantillonnage ne correspondent pas systématiquement aux interfaces entre les tissus. Par conséquent, l'interpolation linéaire entre ces points doit être regardée avec prudence. Par exemple, à $674\ \text{nm}$ et 0° d'incidence, le flux descendant (en vert sur la figure) augmente entre les deux premiers points échantillonnés dans l'épiderme supérieur. La limite entre épiderme supérieur et parenchyme palissadique est indiquée en trait pointillé. Le troisième point échantillonné se trouve dans le parenchyme palissadique et indique une forte diminution du flux descendant. La transition entre augmentation et diminution du flux se trouve à l'interface entre les tissus alors que l'interpolation linéaire suggère que cette transition se trouve dans l'épiderme supérieur. Cette limite de notre échantillonnage n'intervient qu'aux frontières avec les épidermes. La limite entre parenchymes palissadique et spongieux est, quant à elle, bien échantillonnée.

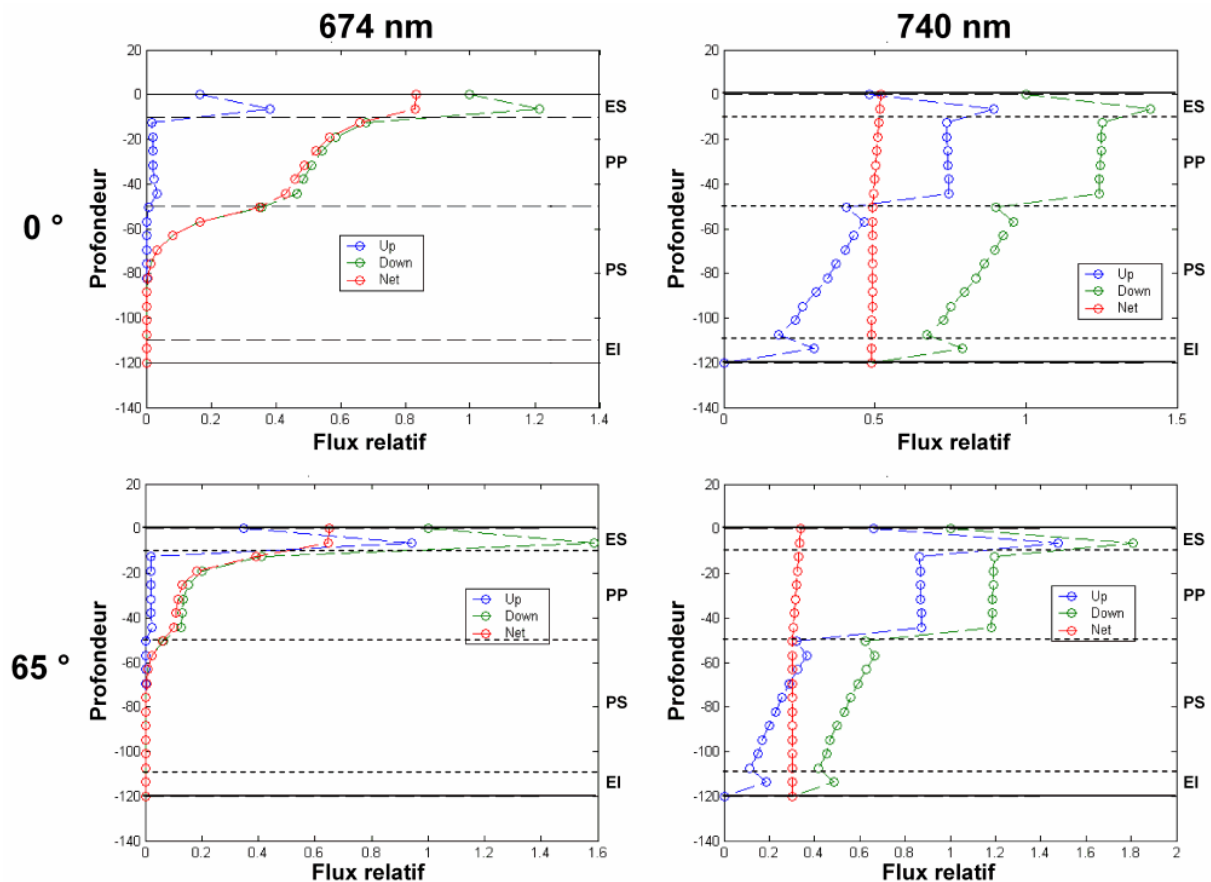


Figure 4.18 : Flux relatifs dans la maquette DICOLEAF 22 à $674\ \text{nm}$ et $740\ \text{nm}$ pour 0° et 65° d'incidence. Les limites des tissus sont indiquées en pointillés : épiderme supérieur (ES), parenchyme palissadique (PP), parenchyme spongieux (PS) et épiderme inférieur (EI).

Le flux net permet de quantifier directement la réflectance, la transmittance et l'absorptance de la maquette. La réflectance est le complémentaire à 1 du flux net à la limite supérieure de la maquette. Elle vaut 17 % environ à 674 nm et 48 % à 740 nm en incidence normale. La transmittance est le flux net à la limite inférieure de la maquette. Elle est quasiment nulle à 674 nm et vaut presque 50 % à 740 nm (toujours en incidence normale). L'absorptance à un niveau donné se traduit par la diminution du flux net. A 674 nm, le flux net est constant dans l'épiderme supérieur puis décroît fortement dans le parenchyme à cause de l'absorption par la chlorophylle. A 740 nm, le flux net est quasiment constant dans toute la maquette, traduisant l'absence d'absorption.

Etudions l'influence de la longueur d'onde en incidence normale. A 674 nm où l'absorption est forte, les flux diminuent très vite au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans la maquette. Le flux descendant, qui vaut 1 en haut de la maquette, commence par augmenter dans l'épiderme supérieur, atteignant une valeur maximale de l'ordre de 1,3. C'est le signe d'une diffusion l'emportant sur l'absorption. Dans le parenchyme palissadique, ce flux décroît de 1,3 à 0,35 à cause de la forte absorption par la chlorophylle. Il en est de même dans le parenchyme spongieux où le flux descendant devient *quasi* nul avant d'atteindre l'épiderme inférieur. Considérons maintenant le flux montant en partant du bas de la maquette. Ce flux est nul dans l'épiderme inférieur et dans le mésophylle spongieux. Il augmente très légèrement à l'interface entre le mésophylle spongieux et le mésophylle palissadique. Cela est dû aux propriétés plus diffusantes du spongieux par rapport au palissadique. Le flux montant reste faible dans tout le mésophylle spongieux et augmente brutalement de 0,02 à 0,4 environ lors du passage dans l'épiderme supérieur. On peut donc en conclure que la diffusion n'intervient que dans l'épiderme ou à sa limite avec le parenchyme palissadique.

A la longueur d'onde de faible absorption, presque toute l'énergie incidence est réfléchié ou transmise. La réflectance et la transmittance valent toutes deux 50% environ. Comme il n'y a pas d'absorption, la décroissance du flux descendant se fait au profit du flux montant, et vice-versa. Le flux descendant augmente de 1 à 1,5 en traversant l'épiderme supérieur. Cette diffusion est présente quelle que soit la longueur d'onde et disparaît dans le parenchyme palissadique où les flux restent stables (ni absorption, ni diffusion). Dans le parenchyme spongieux, le flux descendant décroît de 0,9 à 0,65 (au profit du flux montant). Dans l'épiderme inférieur, le flux descendant est en parti réfléchi par la surface inférieure de la feuille, ce qui explique sa décroissance. Enfin, notons que l'interface entre les deux parenchymes est très réfléchissante, ce qui explique le comportement des flux à cet endroit : chacun des deux flux diminue puis augmente dans sa direction de propagation. Concernant le flux montant étudié en partant du bas, il augmente de 0 à 0,3 dans l'épiderme inférieur. C'est donc qu'il y a une forte diffusion à ce niveau. Cette diffusion a lieu aussi dans le parenchyme spongieux où le flux montant continue à augmenter. Il se stabilise dans le parenchyme palissadique puis décroît dans l'épiderme supérieur.

6.2. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques

Les réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques (DHRF et DHTF) sont présentées sur la [figure 4.19](#) (simulations) et la [figure 4.20](#) (mesures). Les simulations reproduisent bien les spectres typiques aux faibles angles d'incidence. On observe, dans le visible, le pic de réflectance vers 550 nm causé par le minimum local d'absorption de la chlorophylle. Ce pic était absent des précédentes simulations (DICOLEAF 21, [figure 4.16](#)). Le minimum d'absorption dans le proche infrarouge (700 nm - 1300 nm) et les bandes d'absorption de l'eau à 1450 nm, 1650 nm et

1950 nm sont bien modélisés. On en conclut que les coefficients linéiques d'absorption présentés dans la [section 5.2](#) décrivent convenablement l'absorption.

Le DHRF croît alors que le DHTF décroît lorsque l'angle d'incidence augmente, comme observé expérimentalement. Cependant, aux grands angles d'incidence, la réflexion simulée est surestimée pour toutes les longueurs d'onde. Il y a deux causes à cela : 1) les espaces d'air non justifiés entre l'épiderme supérieur et le parenchyme palissadique ont tendance à diffuser la lumière avant que celle-ci ne pénètre dans le parenchyme ; il serait plus réaliste de remplir ces espaces par de l'eau, ce qui limiterait la diffusion et augmenterait le contenu en eau de la maquette par ailleurs trop faible. 2) La valeur relativement élevée de l'indice de réfraction des parois cellulaires (1,52) conduit à surestimer la réflexion spéculaire (cet effet croît avec l'angle d'incidence) ; une valeur plus appropriée (1,42) est fournie par l'inversion du modèle analytique de BRDF à partir des mesures de 2005 effectuées sur la feuille de hêtre ([chapitre 3](#)).

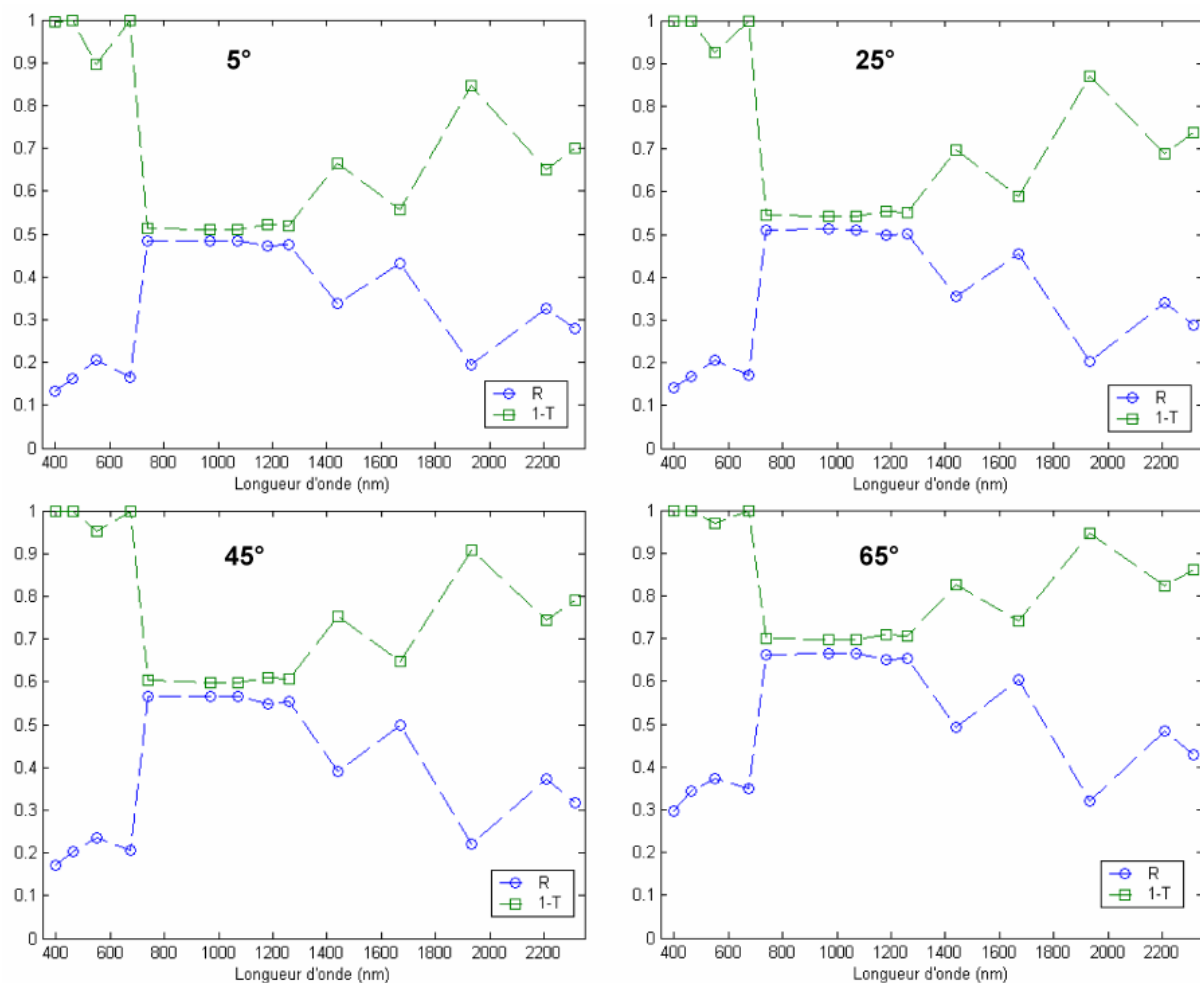


Figure 4.19 : DHRF et DHTF simulés pour la feuille de hêtre (maquette DICOLEAF 22), avec des incidences de 5°, 25°, 45° et 65°.

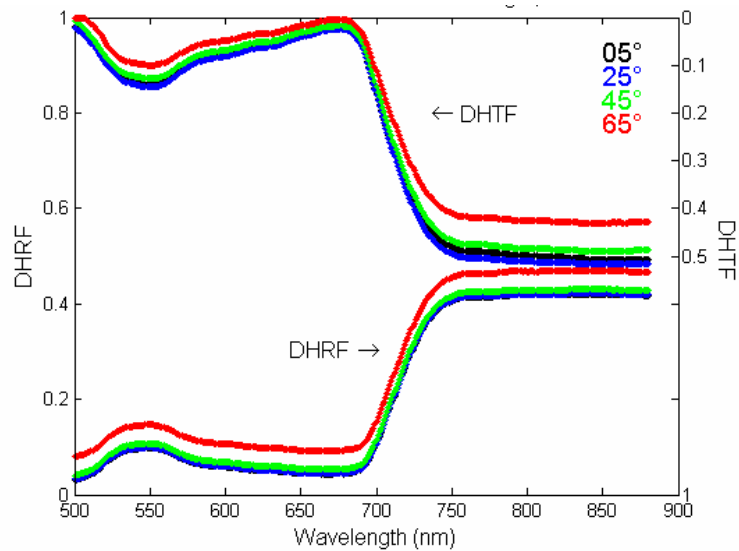


Figure 4.20 : DHRF et DHTF mesurés pour la feuille de hêtre, avec des incidences de 5°, 25°, 45° et 65°.

6.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles

Les figures 4.21 et 4.22 comparent les simulations (DICOLEAF 22) aux mesures en laboratoire. Les quantités représentées sont les fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles (BRDF et BTDF), pour des longueurs d'onde de forte absorption (674 nm) et faible absorption (740 nm), et des angles d'incidence de 5° et 45°. On constate tout d'abord que les effets géométriques observés en réflexion avec la maquette DICOLEAF 21 ont disparu (figure 4.16), ce qui est dû à l'épiderme moins rugueux de DICOLEAF 22. La répartition directionnelle de la lumière réfléchie est cohérente avec les observations. Comme pour le DHRF, les BRDF simulées sont toujours plus fortes que celles mesurées, à cause de l'indice de réfraction trop élevé et des espaces d'air trop nombreux dans la maquette. A 674 nm, où la réflexion spéculaire domine sur la réflexion diffuse, la différence relative mesure-modèle est maximale. A 740 nm, où la réflexion diffuse domine, cette différence diminue mais reste importante.

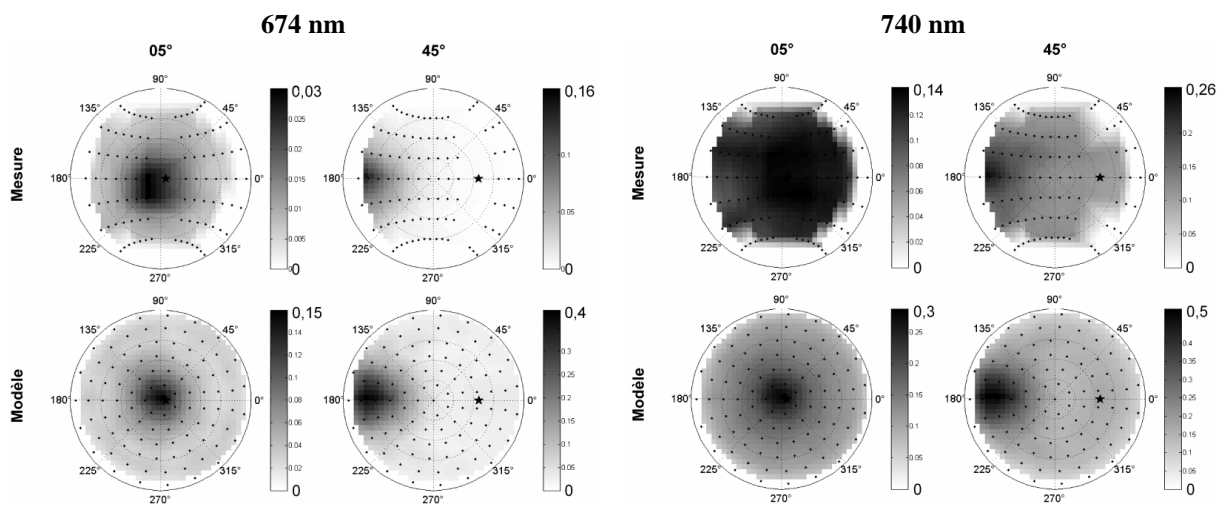


Figure 4.21 : BRDF mesurées et modélisées (maquette DICOLEAF 22) pour la feuille de hêtre, à 674 nm et 740 nm, pour 05° et 45° d'incidence.

Les BTDF simulées sont plus faibles que celles mesurées, ce qui est cohérent avec la surestimation de la réflexion dans DICOLEAF 22. Aux longueurs d'onde de forte absorption (674 nm), la BTDF simulée est presque nulle. Ses variations directionnelles ne sont pas lambertiennes mais caractérisées par un maximum dans la direction perpendiculaire au plan de la maquette, quel que soit l'angle d'incidence. Pour les faibles absorptions (740 nm), la BTDF est quasiment lambertienne, ce qui est cohérent avec les mesures.

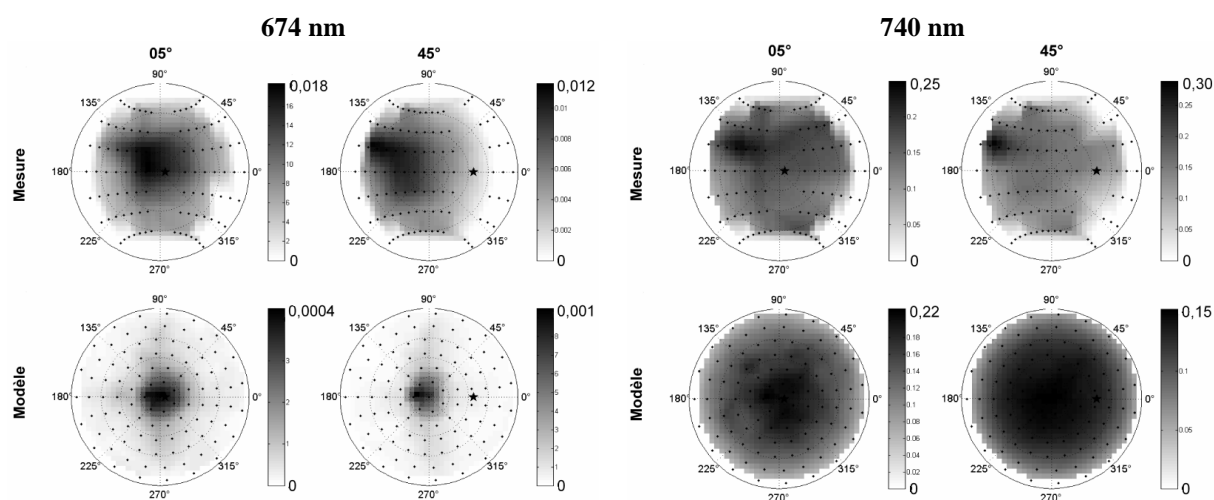


Figure 4.22 : BTDF mesurées et modélisées (maquette DICOLEAF 22) pour la feuille de hêtre, à 674 nm et 740 nm, pour 05° et 45° d'incidence.

7. Simulation dans les tissus séparés

A partir de la maquette DICOLEAF 22, des nouvelles maquettes ont été générées pour chacun des tissus suivants : épiderme, parenchyme palissadique et parenchyme spongieux (figure 4.23). Pour chacune d'elle, les DHRF, DHTF, BRDF, BTDF et les flux sont simulés avec Raytran. Afin de limiter le temps de calcul, les simulations sont faites pour deux longueurs d'onde seulement : 674 nm, où la chlorophylle absorbe fortement, et 740 nm, où la chlorophylle n'absorbe que très peu. Les conditions d'éclairage sont directionnelles (5° d'incidence) ou diffuses (lambertiennes). Le choix d'une incidence de 5°, plutôt qu'une incidence nulle, est contraint par la géométrie des espaces d'air dans la maquette du parenchyme palissadique : pour une incidence nulle, des rayons peuvent être transmis sans interaction avec la maquette (cf figure 4.24), ce qui serait peu réaliste.

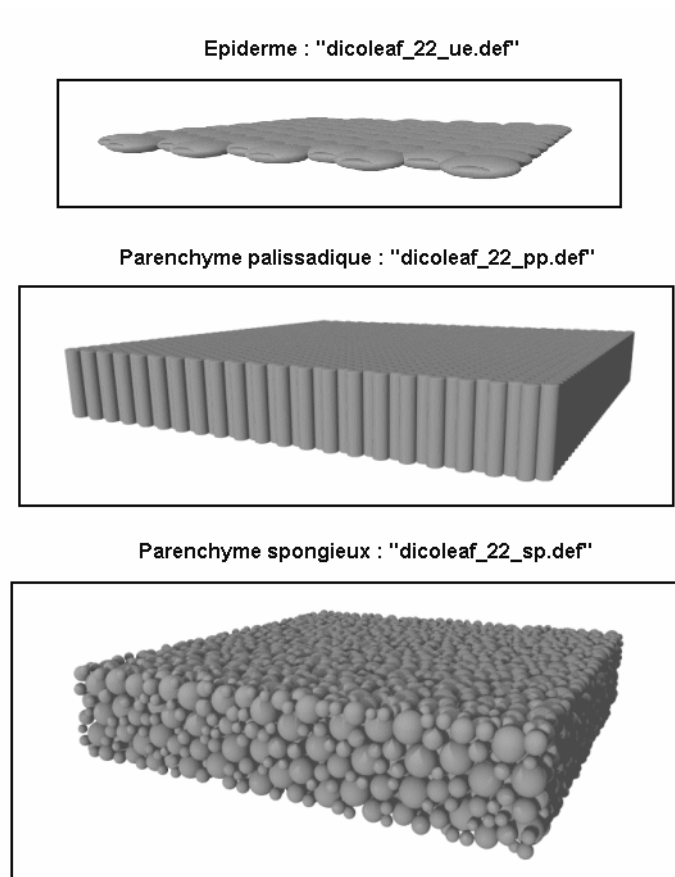


Figure 4.23 : Maquettes des tissus séparés.

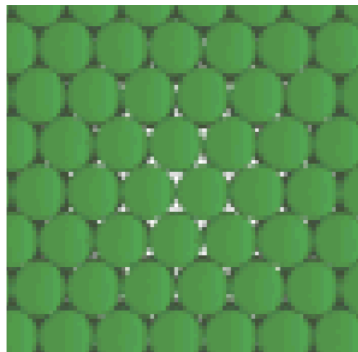


Figure 4.24 : Maquette du parenchyme palissadique observée du dessus.

7.1. Réflectance et transmittance directionnelles-hémisphériques

Les valeurs des réflectances et transmittances directionnelles-hémisphériques, ainsi que celles de l'absorptance qui s'en déduisent, sont présentées dans le [tableau 4.12](#). Considérons tout d'abord l'éclairement directionnel (05°) et la longueur d'onde de faible absorption (740 nm). Les tissus absorbent au plus 2% de l'énergie incidente et transmettent plus qu'ils ne réfléchissent. Les proportions de réflexion et de transmission sont de 13% et 87% pour l'épiderme, 13% et 86% pour le palissadique, et 34% et 66% pour le spongieux. La réflexion représente donc 1/6 pour l'épiderme et le palissadique contre 1/3 pour le spongieux.

Tissus	Eclaircement	Longueur d'onde (nm)	Réflectance (%)	Transmittance (%)	Absorptance (%)
Epiderme	05°	674	12,6	87,1	0,3
		740	12,7	87,1	0,2
	Diffus	674	21,8	77,8	0,4
		740	21,9	77,8	0,3
Spongieux	05°	674	2,0	0,0	98,0
		740	33,6	66,1	0,3
	Diffus	674	3,6	0,0	96,4
		740	42,9	56,8	0,3
Palissadique	05°	674	5,3	47,0	47,7
		740	13,2	85,6	1,2
	Diffus	674	7,7	15,6	76,7
		740	24,1	73,7	2,2

Tableau 4.12 : Réflectance, Transmittance et Absorptance simulées par Raytran, pour les maquettes de l'épiderme, du parenchyme palissadique et du parenchyme spongieux.

Pour la longueur d'onde de forte absorption (674 nm, due à la chlorophylle), et toujours en éclairage directionnel à 5°, les propriétés de l'épiderme restent inchangées puisqu'il ne contient pas de chlorophylle. Concernant le parenchyme, l'absorption vaut 48% pour le palissadique et 98% pour le spongieux. Le spongieux absorbe donc beaucoup plus que le palissadique alors qu'il contient deux fois moins de chlorophylle (3,25 μm contre 5,68 μm). La structure du spongieux est donc beaucoup mieux adaptée à l'absorption. Concernant l'énergie non absorbée, seule 10% est réfléchi par le palissadique, contre la quasi totalité pour le spongieux.

Dans le cas de l'éclairage diffus, et pour une faible absorption (740 nm), l'épiderme et le palissadique réfléchissent deux fois plus en diffus qu'en éclairage directionnel. Pour le spongieux, la réflexion augmente moins : elle passe de 34% à 43%. A 674 nm, l'absorption augmente fortement dans le palissadique (de 48% à 77%) et la part de la réflexion y passe de 10% à 50% de l'énergie non absorbée. Inversement, pour le parenchyme spongieux, l'absorption diminue un peu au profit de la réflexion.

En conclusion, aucun tissu n'absorbe plus de quelques % à 740 nm, on peut donc voir les effets de diffusion seuls. A 674 nm, quel que soit l'éclairage, le spongieux absorbe plus que le palissadique alors qu'il contient moins de chlorophylle. On en déduit que la structure du spongieux est plus favorable à l'absorption, probablement à cause de la plus forte diffusion.

7.2. Profils des flux lumineux

L'objectif de cette section est de comprendre le comportement des flux dans chaque tissu, et par conséquent de connaître leur rôle dans la diffusion. La [figure 4.25](#) présente les flux pour un éclairage directionnel et les longueurs d'onde 674 nm et 740 nm. Commençons par quantifier la réflexion de surface en observant le comportement des flux à la longueur d'onde de forte absorption (674 nm), afin de minimiser la contribution volumique à la réflexion (cela n'est pas possible pour l'épiderme qui ne contient pas de chlorophylle). Dans le cas des parenchymes palissadiques et spongieux, la lumière pénétrant dans les tissus est très vite absorbée. Le flux montant en $z=0$ est donc principalement dû à la réflexion de surface. Il vaut 5% pour le palissadique et 2% pour le spongieux, ce qui fournit une borne supérieure à la proportion d'énergie réfléchi spéculairement. Pour comparaison, le flux réfléchi à 740 nm vaut 13% pour le

palissadique et 34% pour le spongieux, ce qui indique que la contribution volumique domine largement la contribution spéculaire à cette longueur d'onde.

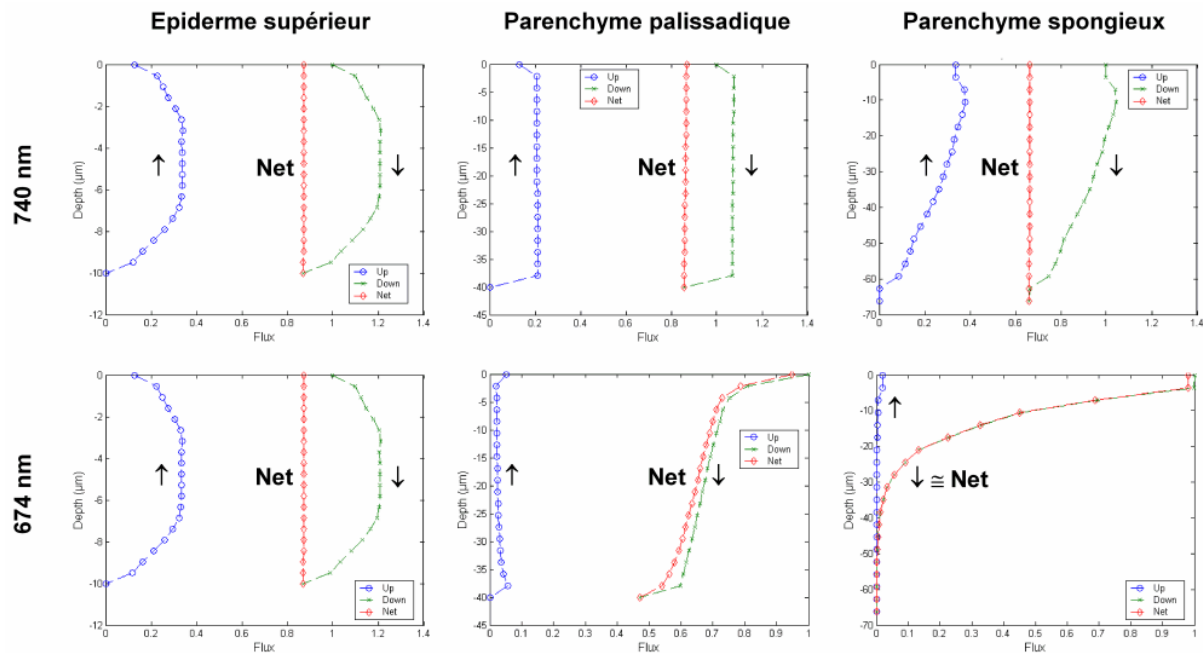


Figure 4.25 : Simulation des flux à 05° d'incidence

Intéressons nous maintenant aux flux en éclairage directionnel (05°) et faible absorption (740 nm). Le flux net (flux descendant moins flux montant) est indépendant de la profondeur, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'absorption à 740 nm. Ensuite, le comportement des flux descendant (I) et montant (J) dépend fortement du tissu considéré. Le cas le plus simple est celui du parenchyme palissadique : les flux montant et descendant y sont constants, ils ne varient qu'aux bords de la maquette. L'absence de variations signifie l'absence d'événements tels que réflexion d'un photon. Les variations au bord signifient que les extrémités des cellules (en forme de capuchon) réfléchissent les photons, ce qui est cohérent avec la variation d'indice entre les capuchons et l'air ambiant, mais aussi avec la forme des capuchons qui peut s'avérer efficace pour la réflexion. Le cas de l'épiderme supérieur est semblable : les flux sont constants au milieu du tissu, bien qu'il y ait plus de réflexion sur les bords. Le cas du parenchyme spongieux est différent : à 674 nm et 5°, le flux net diminue très vite, d'où une absorption très efficace. La transmission est quasi nulle (0,05%). A 740 nm, les flux descendant et montant varient dans tout le tissu. Le flux descendant vaut 1 en haut. En descendant dans la maquette, il commence par augmenter légèrement, puis décroît régulièrement, de 105% à 66% environ. En partant du bas et en remontant dans la maquette, le flux montant suit la variation inverse : il part de 0% puis augmente jusqu'à 40% avant de perdre quelques % dans les derniers micromètres. Ces fortes variations des flux indiquent que le tissu est très diffusant quelle que soit la profondeur, ce qui est dû à la présence de sphères de taille variable partout dans le tissu. Enfin, dans le cas d'un éclairage diffus présenté sur la [figure 4.26](#), le comportement des flux reste le même, à ceci près que la diffusion est plus importante à 740 nm car les rayons plus inclinés ont plus de chemin à parcourir, et que l'absorption est plus importante à 674 nm, pour la même raison.

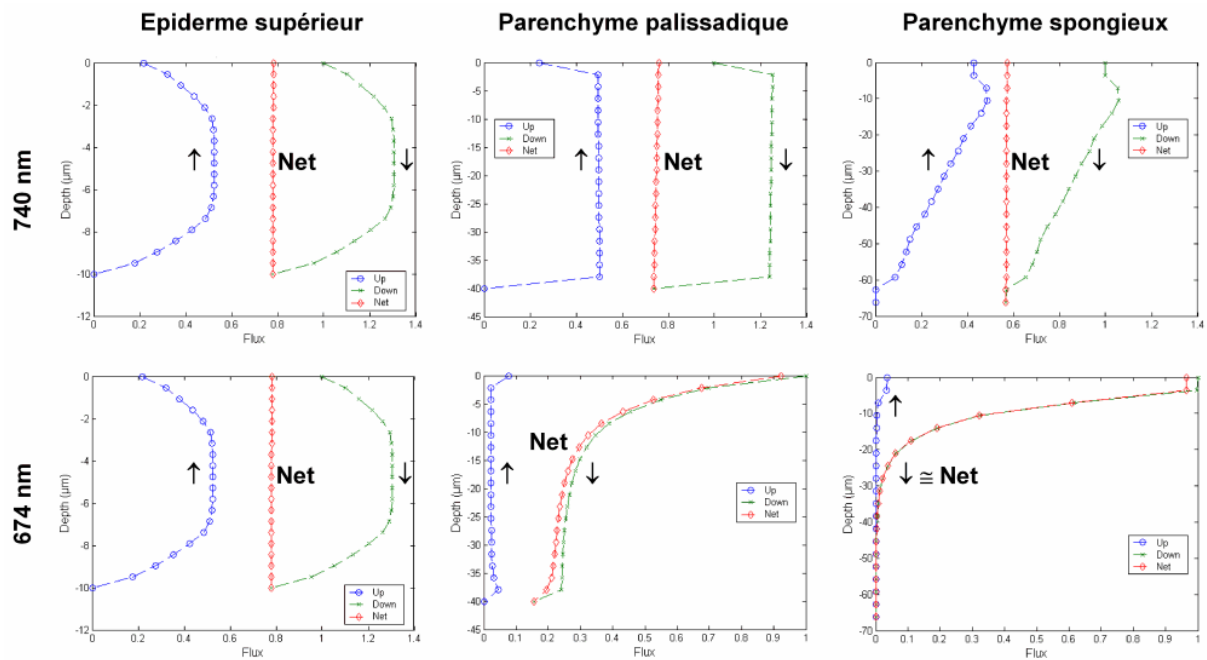


Figure 4.26 : Simulation des flux en éclairage diffus.

7.3. Fonctions de distribution de réflectance et transmittance bi-directionnelles

Les BRDF et BTDF sont calculées à partir des BRF et BTF en sortie de Raytran. La [figure 4.27](#) et la [figure 4.28](#) présentent respectivement les sorties à 674 nm et 740 nm, pour une incidence de 5° . Dans le cas de l'épiderme supérieur, la BRDF et la BTDF ne dépendent pas de la longueur d'onde. Elles possèdent toutes les deux un pic centré en 0° d'observation (zénithal), 60 fois plus fort en transmission qu'en réflexion, et un fond diffus faible mais non négligeable. A 740 nm, la BRDF et la BTDF du parenchyme palissadique ressemblent à celles de l'épiderme supérieur : il y a un pic en réflexion et en transmission, ce dernier étant beaucoup plus fort. Il y a toujours un fond diffus non négligeable. A 674 nm, la forme des BRDF et BTDF change peu par rapport à 740 nm. Cependant, les amplitudes des pics diminuent et les fonds diffus disparaissent à cause de l'absorption. Le parenchyme spongieux se comporte différemment : à 740 nm, la BRDF et la BTDF sont relativement lambertiennes, la BRDF l'étant plus que la BTDF. L'absorption y est presque nulle et le rayonnement est diffusé dans toutes les directions. A 674 nm, la BRDF devient faible et la BTDF quasiment nulle. Le peu d'énergie non absorbée est réfléchi d'une manière lambertienne et transmise autour de la direction de transmission directe.

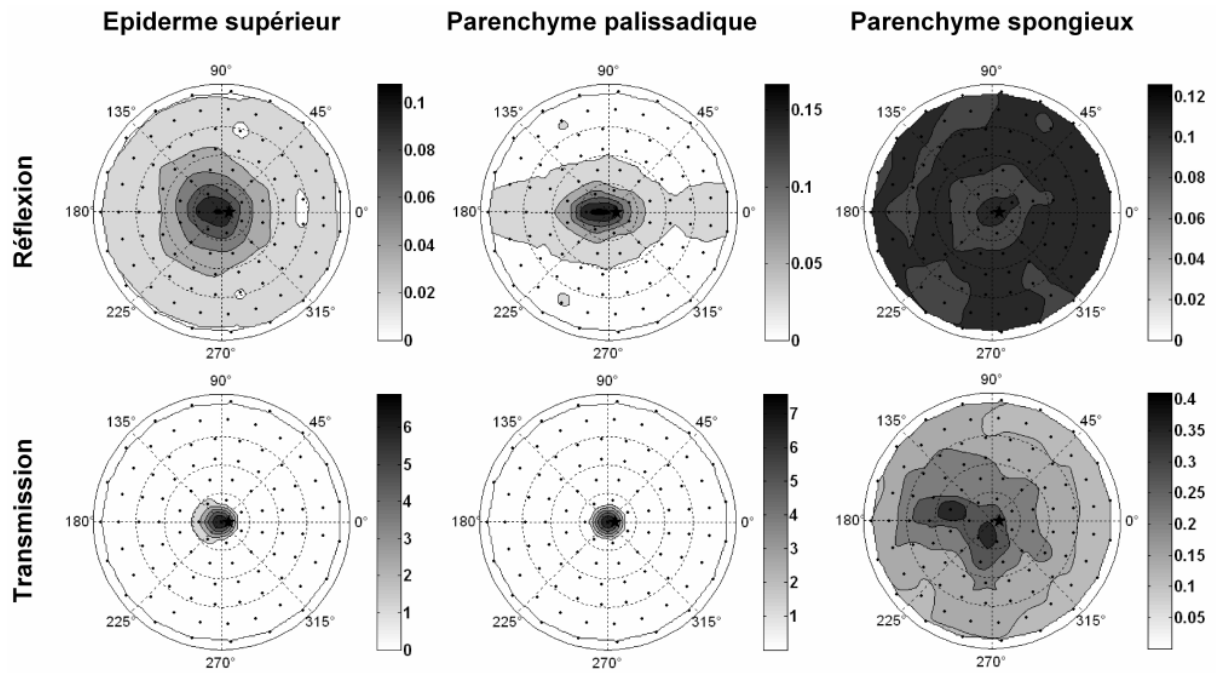


Figure 4.27 : Simulation des BRDF (réflexion) et BTDF (transmission), en sr-1, à 740 nm, pour une incidence de 5°.

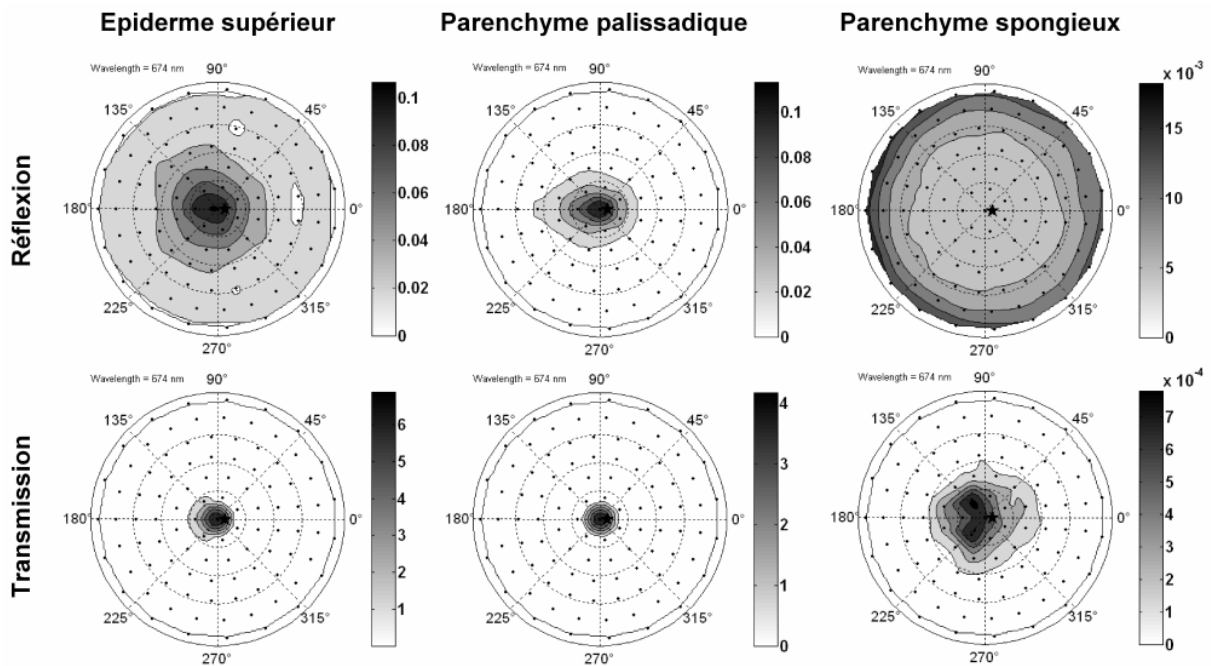


Figure 4.28 : Simulation des BRDF (réflexion) et BTDF (transmission), en sr-1, à 674 nm, pour une incidence de 5°.

La [figure 4.29](#) et la [figure 4.30](#) présentent les BRDF et les BTDF en éclairage diffus. Elles sont toutes plus lambertiennes qu'en éclairage directionnel. Pour les trois tissus, et quelle que soit la longueur d'onde, la BRDF augmente sur les bords alors que la BTDF y diminue. Le cas de la transmission du parenchyme palissadique et du parenchyme spongieux à 674 nm est intéressant : l'énergie est transmise principalement autour de la direction perpendiculaire au plan de la maquette. Cela est lié à l'absorption plus efficace des rayons inclinés. Cette anisotropie aux

longueurs d'onde de forte absorption est peu significative car les valeurs de la BTDF y sont très faibles.

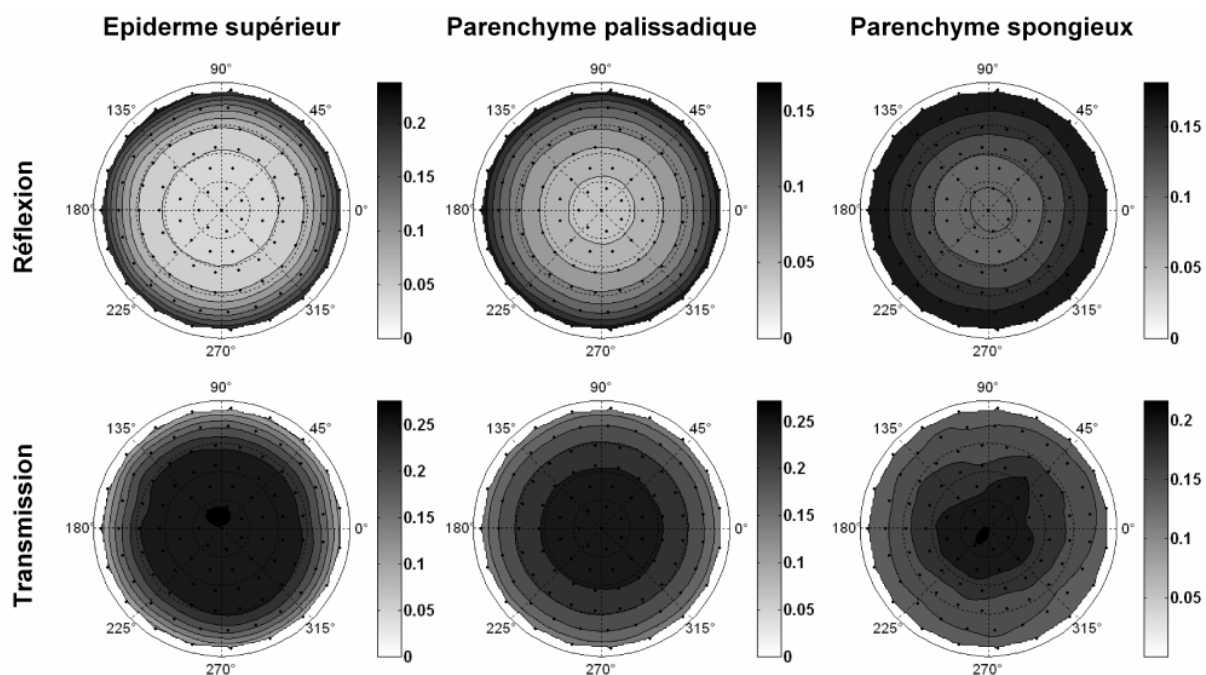


Figure 4.29 : Simulation des BRDF (réflexion) et BTDF (transmission), en sr-1, à 740 nm, pour un éclairage diffus.

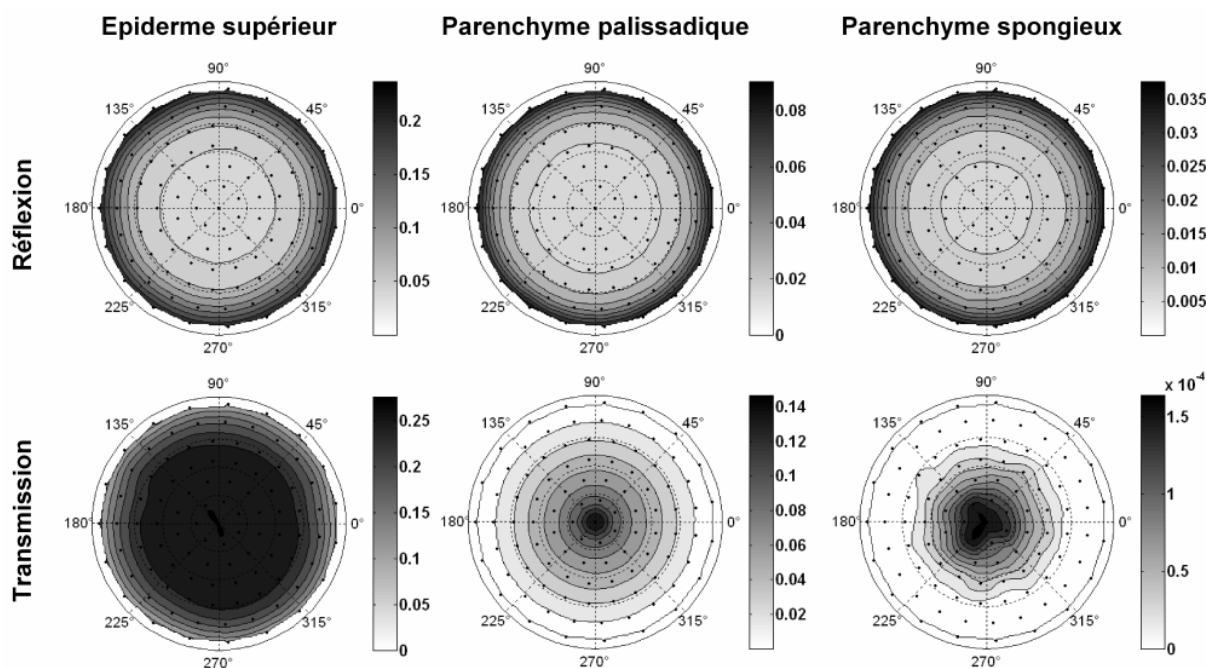


Figure 4.30 : Simulation des BRDF (réflexion) et BTDF (transmission), en sr-1, à 674 nm, pour un éclairage diffus.

8. Conclusion du chapitre

Ce chapitre présente les simulations du transfert radiatif dans une maquette réaliste de feuille dicotylédone. La plupart des paramètres géométriques et optiques de la maquette sont issus de mesures en laboratoire, et non estimés pour ajuster les propriétés simulées à celles mesurées. Les résultats sont encourageants car l'absorption des constituants foliaires, qui dépend à la fois des contenus biochimiques, des coefficients linéiques d'absorption et du climat lumineux à l'intérieur de la maquette, est bien simulée. La différence entre les mesures et les simulations concerne principalement la répartition de l'énergie non absorbée entre réflexion et transmission, et s'explique par la présence, dans la maquette, d'espaces d'air qui seraient défavorables à l'absorption de la lumière par une feuille réelle. En y intégrant des maquettes des tissus séparés, il est raisonnable de penser que les évolutions futures de ces simulations fourniront le meilleur outil d'étude du transfert radiatif dans les feuilles.

Conclusion Générale

L'étude des propriétés optiques des feuilles s'est longtemps limitée aux réflectances et aux transmittances spectrales qui portent la signature de l'absorption des constituants foliaires. La mesure de ces quantités utilise des dispositifs instrumentaux qui recueillent la lumière réfléchie ou transmise dans toutes les directions, en perdant l'information sur la distribution directionnelles des flux lumineux. Or cette distribution est un indicateur précieux des modes d'interaction de la lumière avec la surface ou l'intérieur de la feuille. Le travail présenté dans cette thèse contribue à mieux connaître les interactions feuille-lumière, en présentant de nouveaux outils de mesure et de modélisation des réflectances et transmittances spectrales et directionnelles des feuilles.

Le spectro-photo-goniomètre présenté dans le [chapitre 2](#), développé conjointement par des laboratoires des universités Paris-Sud et Paris 7, du CNRS et de l'INRA, a été utilisé pour mesurer les fonctions de distribution de réflectance et de transmittance bi-directionnelles des feuilles. L'originalité des mesures tient dans leur échantillonnage directionnel et spectral : des spectres de 512 points sont enregistrés dans 196 directions d'observation pour chaque direction d'éclairement. La réflectance directionnelle de toutes les feuilles étudiées a la forme d'un pic vers l'avant se détachant d'un fond relativement uniforme. L'étude bibliographique suggère que le pic et le fond sont dus à la lumière réfléchie par la surface et par l'intérieur de la feuille, respectivement. Leurs variations spectrales confirment cette hypothèse : la réflexion de surface produit un pic spéculaire qui ne varie pas avec la longueur d'onde alors que la réflexion de volume produit un fond diffus portant la signature spectrale de l'absorption des constituants foliaires (chlorophylle, eau, *etc.*). C'est donc l'utilisation conjointe des variations spectrales et directionnelles qui permet l'identification des composantes en réflexion. En ce qui concerne la lumière transmise, les variations directionnelles sont faibles et les variations spectrales sont celles de la composante diffuse en réflexion. Par conséquent, il est raisonnable de modéliser la réflexion diffuse et la transmission comme des fonction indépendantes de la direction d'observation (lambertiennes) mais variant avec la longueur d'onde. En revanche, il est nécessaire d'établir un modèle pour la composante spéculaire de la réflectance.

Le modèle de réflexion spéculaire présenté dans le [chapitre 3](#) est basé sur l'approche de [Torrance et Sparrow \(1967\)](#). Il modélise la surface foliaire par un ensemble de facettes dont la distribution des orientations est décrite statistiquement, et qui réfléchissent la lumière suivant les lois de l'optique géométrique. A cette réflexion de surface s'ajoute la réflexion de volume qui dépend de l'absorption des constituants foliaires. Les paramètres du modèle sont l'indice de réfraction et la rugosité de la surface pour la composante spéculaire, un paramètre fonction de la longueur d'onde pour la composante diffuse. En ajustant ces paramètres aux mesures pour chaque longueur d'onde, nous avons vérifié l'invariance spectrale des paramètres de surface, et la corrélation du paramètre de volume avec l'absorption des constituants foliaires, ce qui valide la pertinence de l'approche. Nous avons ensuite montré que le paramètre de rugosité est suffisant pour décrire les différentes largeurs de pic spéculaire observées sur des feuilles lisses comme le laurier, ou rugueuses comme le noisetier.

L'inversion du modèle a permis d'estimer l'indice de réfraction et la rugosité des surface foliaires. La qualité de cette estimation dépend de l'échantillonnage du plan principal en réflexion. Avec un échantillonnage faible, l'indice de réfraction estimé varie entre 1,2 et 1,7, ce qui correspond à une trop large gamme de variation, vu les valeurs publiées dans la littérature. En revanche, un échantillonnage plus précis conduit à des valeurs comprises entre 1,4 et 1,5, en accord avec les valeurs publiées. Concernant la rugosité de surface, il n'y a à ce jour aucune mesure permettant

une telle comparaison. L'indice de réfraction et le paramètre de rugosité sont ensuite utilisés pour évaluer la contribution de la composante spéculaire à l'ensemble de la lumière réfléchi, et pour quantifier l'ensemble des directions dans lesquelles la réflexion spéculaire prend place (angle solide spéculaire). La composante spéculaire domine largement la composante diffuse dans le domaine du visible, et inversement dans le domaine du proche infrarouge. Il est donc absolument nécessaire de prendre en compte la composante spéculaire dans les modélisations des propriétés optiques des feuilles dans le visible.

L'angle solide du pic spéculaire dépend de la rugosité de la surface foliaire et de l'angle d'incidence de la lumière. Il augmente avec la rugosité, et, pour une rugosité donnée, il diminue avec l'angle d'incidence. La diffusion de la lumière dans le couvert végétal est par conséquent fortement dépendante de la rugosité des surfaces foliaires. Notons cependant que la transmittance foliaire est, quant à elle, toujours majoritairement diffuse. Dans le visible, où la transmission et la réflexion diffuse sont faibles, l'angle solide du spéculaire pourrait être un paramètre important du transfert radiatif dans le couvert. Cette importance est moindre dans le proche infrarouge où transmission et réflexion diffuse sont toujours fortes.

Enfin, le modèle de réflexion spéculaire a été couplé au modèle Prospect, qui simule les propriétés optiques spectrales des feuilles, pour fournir un modèle de réflectance et transmittance spectral et directionnel dont les paramètres sont : l'indice de réfraction et la rugosité de la surface foliaire d'une part, l'indice de structure et les contenus en chlorophylle, eau, et matière sèche de l'intérieur de la feuille d'autre part. Ce 'Prospect directionnel' capture l'essentiel des variations spectro-directionnelles avec six paramètres seulement. Nous avons montré qu'il est presque aussi performant (en terme d'écart type des différences mesure-modèle) qu'un modèle dont les paramètres sont évalués pour chaque longueur d'onde.

Le **chapitre 4** présente les simulations par lancer de rayon des propriétés optiques d'une maquette réaliste d'une feuille de hêtre dont les contenus biochimiques et les caractéristiques anatomiques ont été mesurées en laboratoire. Pour cette maquette tridimensionnelle, l'épiderme supérieur, le parenchyme palissadique, le parenchyme lacuneux et l'épiderme inférieur sont décrits cellule par cellule. Ces dernières sont composées d'une enveloppe de matière sèche contenant une épaisseur de chlorophylle et un volume central rempli d'eau. La maquette reproduit l'épaisseur des tissus et les contenus en chlorophylle et matière sèche qui ont été mesurés. En revanche, la maquette, qui n'est pas assez compacte, contient trop d'espaces d'air et pas assez d'eau. La chlorophylle, la matière sèche et l'eau sont caractérisées par les valeurs publiées dans la littérature de leur indice de réfraction et de leur coefficient linéique d'absorption.

Le lancer de rayon dans la maquette simule bien les effets de l'absorption de la chlorophylle dans le visible. Comme le coefficient linéique d'absorption de la chlorophylle est proche des mesures *in vitro* publiées dans la littérature, ce travail montre qu'il est possible d'estimer l'absorption *in vivo* à partir de l'absorption *in vitro*, à condition de simuler de manière réaliste le transfert radiatif dans la feuille. Les spectres simulés de réflectance et transmittance foliaire sont semblables aux mesures effectuées à un faible angle d'incidence. Lorsque ce dernier augmente, les réflectances mesurées et simulées augmentent. Cependant, les simulations s'écartent de la réalité en surestimant l'énergie réfléchi. L'étude des profils de flux lumineux dans la maquette montre que cela est principalement dû aux espaces intercellulaires trop nombreux qui tendent à diffuser la lumière vers le haut avant que cette dernière n'atteigne les couches absorbantes. Enfin, les variations directionnelles de la réflectance sont correctement simulées à condition de limiter la rugosité de l'épiderme. Ce dernier est décrit par des cellules en forme d'ellipsoïdes de révolution dont la convexité augmente avec la rugosité. Cette convexité, lorsqu'elle est trop forte, produit des effets géométriques non réalistes. Cela prouve que l'approche statistique pour la description de la

surface dans le modèle analytique est la plus justifiée. La maquette pourrait être améliorée en introduisant des variations aléatoires des formes géométriques constituant sa surface.

Perspectives

Pour améliorer la précision des mesures de réflectance et de transmittance bi-directionnelles des feuilles, il serait utile de mettre au point une nouvelle méthode utilisant un échantillon de référence dont les propriétés optiques, calibrées par un laboratoire de métrologie, sont proches de celles des feuilles. Dans notre expérience, les flux lumineux réfléchis et transmis par les feuilles sont comparés aux flux lumineux réfléchis par un diffuseur parfait lambertien (Spectralon de la marque Labsphere, par exemple). Or les feuilles sont des objets diffusants de 100 μm d'épaisseur environ, dont la réflectance et la transmittance sont à peu près égales, alors que le Spectralon est un échantillon diffusant de 1 cm d'épaisseur environ, dont la réflectance est proche de 100% (sa transmittance est donc nulle). Il existe des échantillons de référence de 100 μm d'épaisseur environ (Zenith de la marque SphereOptics, par exemple), dont la réflectance et la transmittance sont à peu près égales à 50% chacune. Ces échantillons pourraient être utilisés à la place du diffuseur parfait. Cela permettrait d'opérer la mesure des flux réfléchis et transmis dans les mêmes conditions expérimentales pour la feuille et la référence, en ne changeant que l'échantillon. Cette méthode n'a pu être testée lors de cette thèse car, à ce jour, la marque SphereOptics ne dispose pas de calibration métrologique des propriétés directionnelles des échantillons de Zenith.

La BRDF est une simplification du concept de fonction de distribution de la diffusion bi-directionnelle de surface en réflexion, ou *Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function* (BSSRDF) (Nicodemus *et al.*, 1977). L'intérêt de ce concept est de caractériser l'émission de lumière par une surface, en un point qui ne correspond pas forcément au point éclairé. Par exemple, en éclairant une petite surface de feuille (figure CCL.1), on peut observer que des parties non éclairées émettent de la lumière, car cette dernière pénètre dans la feuille par un endroit, est diffusée dans tout l'intérieur, et ressort par un autre endroit. La BSSRDF est donc intimement liée aux propriétés diffusantes de l'objet étudié. Sa mesure fournirait une information de grande valeur pour l'étude des propriétés optiques des feuilles. Par ailleurs, la modélisation de la BSSRDF a déjà été utilisée pour simuler l'apparence de matériaux diffusants tels que le marbre (Jensen *et al.* 2001).

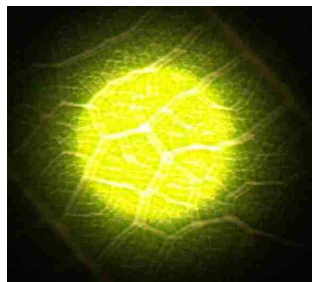


Figure CCL.1 : Photographie d'une feuille traversée par un faisceau lumineux. Le disque lumineux vert clair fait environ 1 cm de diamètre. Il est entouré d'un halo plus foncé faisant la transition avec les parties sombres de la surface. Les dimensions de ce halo dépendent du coefficient de diffusion de la feuille.

Le modèle analytique de réflectance bi-directionnelle des feuilles pourrait être introduit dans les codes simulant la réflectance du couvert végétal, afin de poursuivre les études entamées par Chelle (2006). Le transfert radiatif dans un objet quelconque dépend des coefficients d'absorption et de diffusion des milieux le composant. Le principal organe végétal du couvert

étant la feuille, le coefficient de diffusion dans le couvert dépend des réflectances et transmittances bi-directionnelles des feuilles. Pour simplifier les équations du transfert radiatif, les feuilles ont longtemps été modélisées par des diffuseurs lambertiens. Cependant, le travail effectué dans cette thèse montre que la considération de composantes diffuses et spéculaires dans la réflectance des feuilles est une condition nécessaire à l'amélioration des simulations dans le domaine spectral visible. Les codes de transfert radiatif étant très gourmands en temps de calcul, il serait utile de développer des approximations au modèle exact de réflectance bi-directionnelle. Ces approximations seraient aussi utiles pour la synthèse d'image par ordinateur.

Enfin, la fluorescence des feuilles est un indicateur instantané de l'état de leur processus photosynthétique. A l'échelle moléculaire, cette émission de lumière est théoriquement isotrope. Cependant, la structure foliaire modifie les caractéristiques directionnelles des flux émergents. Le spectro-photo-goniomètre pourrait être utilisé, dans le cadre du programme FLEX (FLuorescence EXplorer) de l'Agence Spatiale Européenne, pour mesurer l'émission de fluorescence par les feuilles.

Annexe A : Classification des angiospermes

Cette annexe est une introduction à la classification des plantes. Le travail de thèse se limite aux plantes vasculaires à fleurs (angiospermes) qu'il convient de situer parmi le règne *Plantae* des êtres vivants (figure A.1). Les angiospermes représentent la plupart des arbres peuplant nos forêts, et la plupart des plantes cultivées dans nos champs et jardins. Parmi les angiospermes, la distinction entre monocotylédones et dicotylédones est particulièrement importante en terme d'anatomie foliaire et de propriétés optiques.

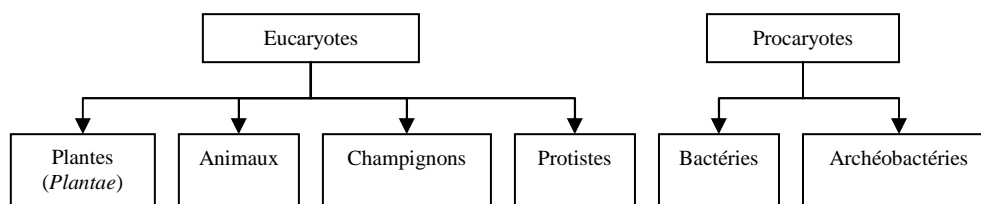


Figure A.1 : Les règnes du vivant. La cellule est l'élément de base des êtres vivants. Elle peut être procaryote (sans noyau) ou eucaryote (avec noyau). Les plantes forment un des règnes du monde vivant chez les eucaryotes.

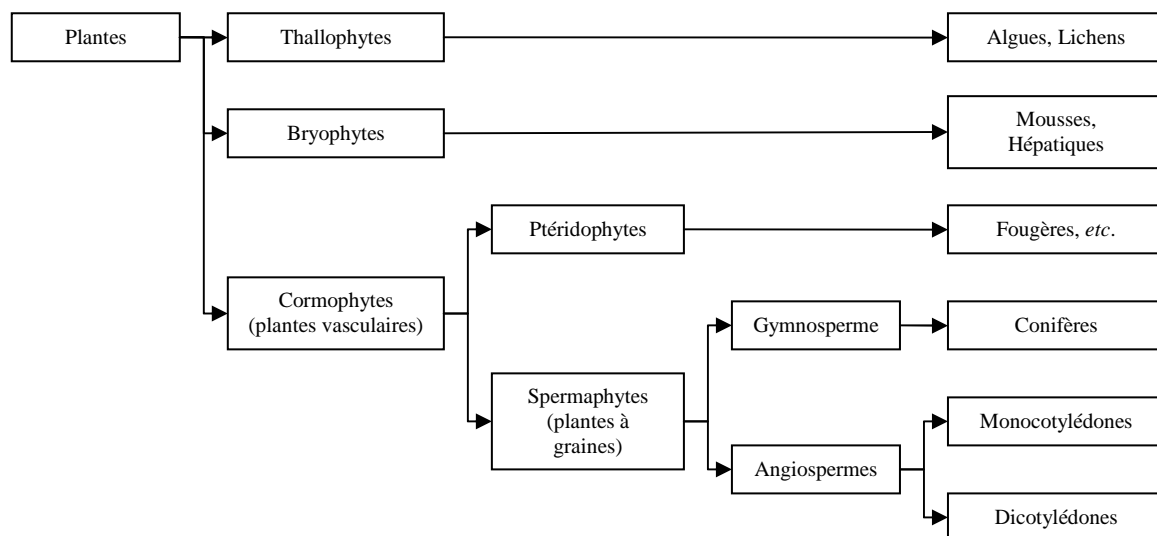


Figure A.2 : Classification des plantes. Les principales espèces cultivées sont issues du groupe des spermaphytes qui sont les plantes vasculaires à graines (présence de fruits entre autre).

La taxinomie décrit les organismes et les regroupe en entités appelées taxons, parmi lesquels le plus commun est l'espèce. La classification moderne du vivant est phylogénétique, c'est-à-dire fondée sur l'apparentement évolutif des espèces (Lecointre et Le Guyader, 2001). Cependant des classifications plus anciennes, basées sur les traits anatomiques par exemple, sont encore largement utilisées. Ces dernières sont illustrées avec le maïs (*Zea mays*). Les principaux taxons sont présentés dans le tableau A.1. Pour une classification plus complète, il existe le moteur de recherche de l'United States Department of Agriculture (<http://plants.usda.gov/>). Les résultats de ce moteur pour *Zea mays* sont donnés dans la figure A.3.

Français	Règne	Embranchement	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce
Anglais	Kingdom	Division	Class	Order	Family	Genus	Species
Exemple	Plantae	Magnoliophyta	Liliopsida	Cyperales	Poaceae	Zea	Zea mays

Tableau A.1 : Principaux taxons (ligne du haut) avec traduction anglaise (ligne du milieu) et exemple pour le maïs (ligne du bas).

```

> Kingdom: Plantae -- Plants
> Subkingdom: Tracheobionta -- Vascular plants
> Superdivision: Spermatophyta -- Seed plants
> Division: Magnoliophyta -- Flowering plants
> Class: Liliopsida -- Monocotyledons
> Subclass: Commelinidae
> Order: Cyperales
> Family: Poaceae -- Grass family
> Genus: Zea L. -- corn P
> Species: Zea mays L. -- corn P

http://plants.usda.gov/

```

Figure A.3 : Classification de l'espèce *Zea mays* obtenue avec le moteur de recherche de l'United States Department of Agriculture (USDA).

La **figure A.2** présente un arbre simplifié partant du groupe "plantes" pour arriver à ceux des "conifères", "monocotylédones" et "dicotylédones". Les thallophytes (algues et lichens, **figure A.4**) vivent en milieux humides et possèdent un appareil végétatif en forme de lame (thalle). Les bryophytes (mousses et hépatiques, **figure A.5**) possèdent un appareil végétatif différencié en tiges et feuilles. Les cormophytes (**figure A.6**) sont les plantes vasculaires avec un appareil végétatif différencié en racines, tiges, feuilles et vaisseaux conducteurs de sève. Les cormophytes comprennent les ptéridophytes (fougères) et les spermaphytes (plantes à graines).

Parmi les spermaphytes, on distingue les angiospermes (signifiant en grec "graine dans un récipient") et les gymnospermes (du grec *gymnospermos*, "graine nue"). Les premières représentent plus de 200 000 espèces et les secondes seulement 700. Les gymnospermes sont des plantes ligneuses, arbres et arbustes (pins, sapins, épicéas, séquoias, genévriers, cyprès, mélèzes, cèdres, *etc.*) dont les feuilles sont en forme d'aiguilles (**figure A.6**). Les angiospermes sont les plantes à fleurs, végétaux portant des fruits provenant des ovaires protégeant la graine. On distingue deux catégories d'angiospermes : les monocotylédones (environ 35 000 espèces) et les dicotylédones (environ 165 000 espèces) (**figure A.7**). Les monocotylédones incluent les graminées (blé, maïs, bambou, *etc.*), alors que les dicotylédones incluent les légumineuses (pomme de terre, ortie, artichaut, *etc.*) mais aussi de très nombreuses espèces arborées (chêne, hêtre, noisetier, *etc.*).



Figure A.4 : Deux exemples de thallophytes. Algue *Caulerpa prolifera* (à gauche, photo B. Navez) et lichens (à droite, photo Greatpatton).



Figure A.5 : Deux exemples de bryophytes. Mousse *Eurhynchium praelongum* (à gauche, photo K. Stueber, fort grossissement) et hépatique *Marchantia* (à droite, photo J.F. Gaffard, fort grossissement).



Figure A.6 : Deux exemples de cormophytes. Fougère *Dicksonia antarctica* (à gauche, photo Wikipédia). Gymnosperme *Picea pungens* avec cône et aiguilles (à droite, photo Wikipédia).



Figure A.7 : Deux angiospermes: monocotylédone *Zea mays*, maïs (à gauche, photo Texas A&M University), et dicotylédone *Fagus sylvatica*, hêtre (à droite).

Annexe B : Absorption du rayonnement

1. Grandeurs physiques

Le [tableau B.1](#) présente les grandeurs physiques utilisées avec nom français, nom anglais, symbole, définition et unités. Les noms et symboles utilisés dans le CRC Handbook of Chemistry and Physics ([Lide, 2003](#)) sont respectés autant que possible. La réflectance, la transmittance et l'absorptance sont aussi appelées facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption.

Nom	Name	Symbole	Définition	Unité SI
Temps	Time	t		s
Longueur	Length	l		m
Energie radiative	Radiant energy	Q		J
Nombre d'Avogadro	Avogadro constant	N_a	$N_a = 6.022 \cdot 10^{23}$	Mol ⁻¹
Vitesse de la lumière dans le vide	Speed of light in vacuum	c_0	$c_0 = 2.998 \cdot 10^8$	m s ⁻¹
Puissance radiative	Radiant power	Φ	$\Phi = dQ/dt$	W=J s ⁻¹
Réflectance	Reflectance	ρ	$\rho = \Phi_{refl} / \Phi_0$	
Transmittance	Transmittance	τ	$\tau = \Phi_{trans} / \Phi_0$	
Absorptance	Absorptance	α	$\alpha = \Phi_{abs} / \Phi_0$	
Absorbance (base a)	Absorbance (base a)	A_a	$A_a = -\log_a(1 - \alpha)$	
Coeff. d'abs. linéique	Linear abs. coeff.	α'_a (1) (2)	$\alpha'_a = A_a / l$	m ⁻¹
Coeff. d'abs. molaire	Molar abs. coeff.	ϵ_a (2)	$\epsilon_a = A_a / l c$	m ⁻¹ m ³ Mol ⁻¹
Coeff. d'abs. spécifique	Specific abs. coeff.	K_a (2)	$K_a = A_a / l c M$	m ⁻¹ m ³ kg ⁻¹
Section efficace d'abs.	Abs. cross section	σ_a	$\sigma_a = A_a / l c N_a$	m ⁻¹ m ³
Nombre d'entités	Number of entities	N		
Quantité de matière	Amount of substance	n	$n = N / N_a$	
Volume	Volume	V		m ³
Concentration	Concentration	c	$c = n / V$	Mol m ⁻³
Masse molaire	Molar mass	M		kg mol ⁻¹
Indice de réfr. complexe	Complex refr. index	\tilde{n}	$\tilde{n} = n + i k$	
Indice de réfraction	Refractive index	n		
Indice d'absorption	Absorption index	k		
Période (O.E.M)		T		s

Tableau B.1 : Grandeurs physiques utilisées. "Abs." signifie absorption. (1) Le coefficient d'absorption linéique est généralement noté α . Il devient α' dans la table pour le distinguer de l'absorptance. (2) Trois types de coefficients d'absorption sont définis : 'linéique', 'molaire' et 'spécifique'. Chacun de ces types se décline en 'décimal' ou 'népérien' suivant le logarithme utilisé.

2. Modélisation de l'absorption dans un milieu non diffusant

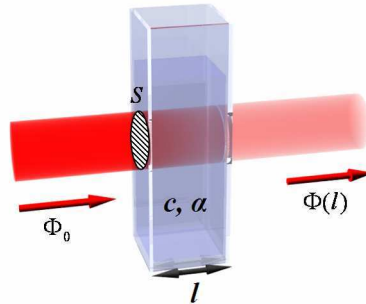


Figure B.1 : Faisceau lumineux cylindrique interceptant un milieu absorbant.

Loi de Beer-Lambert

La loi de Beer-Lambert établit l'évolution d'un flux lumineux $\Phi(x)$ dans un milieu absorbant (figure B.1). Considérons un milieu homogène, absorbant et non diffusant. Soit une portion cylindrique de section S et de longueur l et de volume $V_{tot} = S l$. Ce volume contient une masse m de substance absorbante. Pour un parcours de longueur infinitésimale dx , la quantité de flux absorbée $d\Phi$ est supposée proportionnelle au flux lumineux Φ , au coefficient linéique d'absorption α et à la longueur dx :

$$d\Phi = -\alpha \Phi dx \quad \text{Eq. B.1}$$

Le coefficient linéique d'absorption α caractérise le milieu et la substance absorbante qu'il contient. Puisque le milieu est homogène, α est constant. En intégrant cette équation entre 0 et l , on établit que :

$$\Phi(l) = \Phi_0 e^{-\alpha l} \quad \text{Eq. B.2}$$

où l'on a posé $\Phi(x=0) \equiv \Phi_0$. Notons que $e^{-\alpha l} = a^{-\alpha l / \ln a}$ et que l'on peut choisir une autre base que le nombre e pour l'exponentielle. Les biochimistes utilisent parfois la base 10.

Le coefficient α dépend de la concentration massique de la substance absorbante dans le milieu. C'est une quantité extensive. On définit une quantité intensive K , propre à la substance absorbante dans le milieu considéré :

$$K = \frac{\alpha}{m/V_{tot}} \quad \text{Eq. B.3}$$

K est le coefficient spécifique d'absorption de la substance ($\text{m}^{-1} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$). C'est le coefficient d'absorption linéique du milieu par unité de concentration massique de la substance dans le milieu.

Supposons que la substance absorbante soit en entités dénombrables à l'échelle microscopique. Soit N le nombre d'entité et $n = N/N_a$ le nombre de moles (N_a est le nombre d'Avogadro). On définit ε , le coefficient d'absorption linéique par unité de concentration molaire dans le milieu, par :

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{n/V_{tot}} \quad \text{Eq. B.4}$$

On définit aussi la section efficace d'absorption σ d'une entité :

$$\sigma = \frac{\alpha}{N/V_{tot}} \quad \text{Eq. B.5}$$

ε et σ s'expriment simplement en fonction de K :

$$\varepsilon = K \times M \quad \text{Eq. B.6}$$

$$\sigma = K \frac{M}{N_a} \quad \text{Eq. B.7}$$

où M est la masse molaire de la substance. Si l'on sait estimer la section géométrique s des entités absorbantes, alors on introduit le facteur d'efficacité Q tel que :

$$\sigma = Q s \quad \text{Eq. B.8}$$

Cas d'une substance pure et d'un mélange

Soit V le volume occupé par la substance absorbante. Dans la limite où le volume V_{tot} est fait de cette seule substance, on a $V = V_{tot}$ et Eq. B.3 s'écrit :

$$K = \frac{\alpha}{m/V} = \frac{\alpha}{\rho} \quad \text{Eq. B.9}$$

où ρ est la masse volumique de la substance. Si plusieurs substances $\{i\}$ coexistent dans le volume V_{tot} , chacune avec la masse m_i , alors les coefficients d'absorption linéique α_i sont additifs (Comar et Zcheile, 1942) et Eq. B.3 s'écrit :

$$\alpha = \sum_i \alpha_i = \sum_i K_i \frac{m_i}{V_{tot}} \quad \text{Eq. B.10}$$

Lien avec l'électromagnétisme

Considérons une onde plane de période T se propageant vers les z croissants. L'amplitude complexe du champ électrique E peut s'écrire :

$$E(z;t) = A \exp\left(i 2\pi \left(\frac{\tilde{n} z}{cT} - \frac{t}{T}\right)\right) \quad \text{Eq. B.11}$$

où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide, A l'amplitude réelle du champ et :

$$\tilde{n} = n + i k \quad \text{Eq. B.12}$$

où $i^2 = -1$. On a en développant l'indice complexe \tilde{n} :

$$E(z;t) = A \exp\left(i 2\pi \left(\frac{n z}{cT} - \frac{t}{T}\right)\right) \exp\left(\frac{-2\pi k z}{cT}\right) \quad \text{Eq. B.13}$$

L'intensité I de l'onde étant proportionnelle au carré du champ, on a :

$$I(z;t) \propto E E^* \propto A^2 \exp\left(\frac{-4\pi k z}{cT}\right) \quad \text{Eq. B.14}$$

L'exponentielle modélise la décroissance de l'onde. En identifiant avec la loi de Beer-Lambert, on déduit :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{cT} \quad \text{Eq. B.15}$$

Notons qu'il existe aussi une relation entre l'indice de réfraction n et l'indice d'absorption k appelée relation de Kramers-Kronig.

3. Mesure de l'absorption dans un milieu non diffusant

Pour quantifier une substance telle que la chlorophylle, on la met en solution dans un solvant (méthanol, éthanol, acétonne, *etc.*) après l'avoir extraite de la plante. Cette solution est versée dans une cuvette pour analyse spectroscopique (figure B.1). On souhaite déterminer son coefficient linéique d'absorption α' . Ce dernier est généralement noté α mais il devient ici α' pour éviter les confusions avec l'absorptance α . Les biochimistes mesurent l'absorbance A_a en base a définie par :

$$A_a = -\log_a(1 - \alpha) = -\log_a\left(1 - \frac{\Phi_{abs}}{\Phi_0}\right) = \log_a\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \Phi_{abs}}\right) \quad \text{Eq. B.16}$$

où α est l'absorptance, rapport du flux absorbé Φ_{abs} au flux incident Φ_0 . Généralement a est la base 10 et l'absorbance A_{10} est définie par :

$$A_{10} = \log_{10} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \Phi_{abs}} \right) \quad \text{Eq. B.17}$$

Les deux absorbances A_e et A_{10} se déduisent l'une de l'autre par :

$$\begin{aligned} A_e &= -\log_e (1 - \alpha) = -\log_e (10^{-A_{10}}) = A_{10} \log_e 10 = A_{10} \times 2,306 \\ A_{10} &= A_e \log_{10} e = A_e \times 0,4343 \end{aligned} \quad \text{Eq. B.18}$$

On rappelle les valeurs numériques suivantes :

$$\begin{aligned} \log_{10}(10) &= 1 \\ \log_e(e) &= 1 \\ e &= 2,7183 \\ \log_e(10) &= 1/\log_{10}(e) = 2,3026 \\ \log_{10}(e) &= 0,4343 \end{aligned} \quad \text{Eq. B.19}$$

Connaissant l'absorbance en base e ou 10 et l'épaisseur l de solution, on déduit le coefficient d'absorption linéique α' par :

$$\alpha' = \frac{A_e}{l} = \frac{A_{10} \times 2,3026}{l} \quad \text{Eq. B.20}$$

Ce coefficient linéique d'absorption est caractéristique de la solution étudiée. Il se peut que α' dans Eq B.20 ne prenne pas une valeur indépendante de l . Dans ce cas, les hypothèses du modèle de Beer-Lambert ne sont pas vérifiées et un modèle plus précis est nécessaire. Notons enfin que lorsque les expérimentateurs utilisent systématiquement des solutions dont l'épaisseur l vaut un centimètre, la relation numérique suivante est vérifiée :

$$\alpha' = A_e \text{ cm}^{-1} \quad \text{Eq. B.21}$$

Dans le cas général où l'atténuation d'un faisceau lumineux dans une direction peut être due à plusieurs phénomènes comme l'absorption, la réflexion ou la diffusion, on calcule une quantité x semblable à l'absorbance définie par :

$$x = -\log(\tau) \quad \text{Eq. B.22}$$

où τ est la transmission, rapport du flux transmis au flux incident. A partir de x , on calcule alors des coefficients d'atténuation ou extinction qui diffèrent des coefficients d'absorption bien que de nombreux auteurs confondent les deux. Dans le cas particulier où la diffusion est négligeable alors l'atténuation ou extinction est entièrement due à l'absorption, ce qui se traduit par :

$$\tau = 1 - \alpha \quad \text{Eq. B.23}$$

où α est l'absorbance, rapport du flux absorbé au flux incident. Dans ce cas, la quantité x est bien égale à l'absorbance A :

$$x = -\log(\tau) = -\log(1 - \alpha) = A \quad \text{Eq. B.24}$$

Un exemple est fourni dans [Braun et Smirnov \(1993\)](#) : la valeur minimale de l'absorbance d'une solution est de 0,04 alors qu'elle devrait être nulle. Cela est dû à la réflexion spéculaire du faisceau lumineux sur les parois du récipient contenant la solution. Cette réflexion, de l'ordre de 5% de l'énergie incidente, contribue à l'atténuation du faisceau transmis et pourrait être interprétée comme de l'absorption.

4. Mesure du coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle

Cette partie est consacrée à l'étude du coefficient spécifique d'absorption K de la chlorophylle en USI : $\text{m}^{-1} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Cette chlorophylle est extraite de la feuille et mise en solution. Le solvant modifie le spectre d'absorption de la chlorophylle. Le méthanol est souvent utilisé pour minimiser cette modification. Parmi les travaux de référence sur l'absorption de la chlorophylle en solution, citons [Arnon \(1949\)](#) et [Comar et Zscheile \(1942\) \(CZ 42\)](#). Ces derniers mesurent la puissance lumineuse Φ_0 transmise par une solution sans chlorophylle et la puissance lumineuse Φ transmise par la même solution avec chlorophylle. L'épaisseur de la solution est l , sa concentration en chlorophylle est c (mol dm^{-3}) et la masse molaire de la chlorophylle est M (g mol^{-1}). Ils calculent le coefficient spécifique d'absorption en base 10 :

$$K_{10} = \frac{1}{M c l} \log_{10} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi} \right) \quad \text{Eq. B.25}$$

Il est donné en $\text{dm}^3 \text{g}^{-1} \text{cm}^{-1}$ dans leur publication. Calculons K à partir de K_{10} :

$$K = K_e = \frac{A_e}{l c M} = \frac{A_{10} \log_e 10}{l c M} = K_{10} \log_e 10 \quad \text{Eq. B.26}$$

Soit x la valeur numérique donnée par [CZ 42](#). Les unités étant le $\text{dm}^3 \text{g}^{-1} \text{cm}^{-1}$, il faut multiplier par 100 pour avoir des $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-1}$ puis par $\log_e 10$ pour avoir K :

$$K = x \times 100 \times \log_e 10 \quad \text{Eq. B.27}$$

La [figure B.2](#) montre les valeurs de K_{10} mesurées par [CZ 42](#). Le [tableau A.2](#) donne les valeurs de K_{10} en $\text{dm}^3 \text{g}^{-1} \text{cm}^{-1}$ publiés par [CZ 1942](#) ainsi que les valeurs mises à jour par [Lichtenthaler \(1987\)](#) et [Porra et al. \(1989\)](#). Les solvants sont l'éther pour [CZ 42](#) et le méthanol pur pour les autres. Ces deux derniers auteurs donnent aussi les valeurs dans d'autres solvants. Notons que les valeurs de [Porra et al. \(1989\)](#) sont obtenues en faisant le zéro de leur spectro-photomètre à 750 nm, longueur d'onde où l'absorption de chlorophylle est considérée comme quasi-nulle.

Longueur d'onde (nm)	K_{10} (dm ³ .g ⁻¹ .cm ⁻¹)	
	Chlorophylle <i>a</i>	Chlorophylle <i>b</i>
665.2	79.24 (1) ; 79.95 (2)	21.28 (1) ; 22.26 (2)
660.0	102 (3)	4.50 (3)
652.4	35.52 (1)	38.87 (1)
652.0	35.42 (2)	42.48 (2)
642.5	16.3 (3)	57.5 (3)
617.6	18.68 (1)	X
613.0	15.6 (3)	8.05 (3)
602.6	X	12.74 (1)
600.0	9.95 (3)	9.95 (3)
589.0	5.90 (3)	10.3 (3)
581.0	8.05 (3)	8.05 (3)
568.0	7.11 (3)	7.11 (3)
546.0	3.03 (3)	6.24 (3)
470	1.63 (1)	104.96 (1)
469.2	X	105.36 (1)
460	6.11 (1)	87.48 (1)
450	28.80 (1)	63.07 (1)
431.8	77.05 (1)	X

Tableau B.2 : Valeurs mesurées du coefficient spécifique d'absorption en base 10 de la chlorophylle (K_{10} en dm³.g⁻¹.cm⁻¹). (1): **Lichtenthaler, 1987** ; (2) : **Porra *et al.*, 1989** ; (3): **Comar et Zscheile, 1942**.

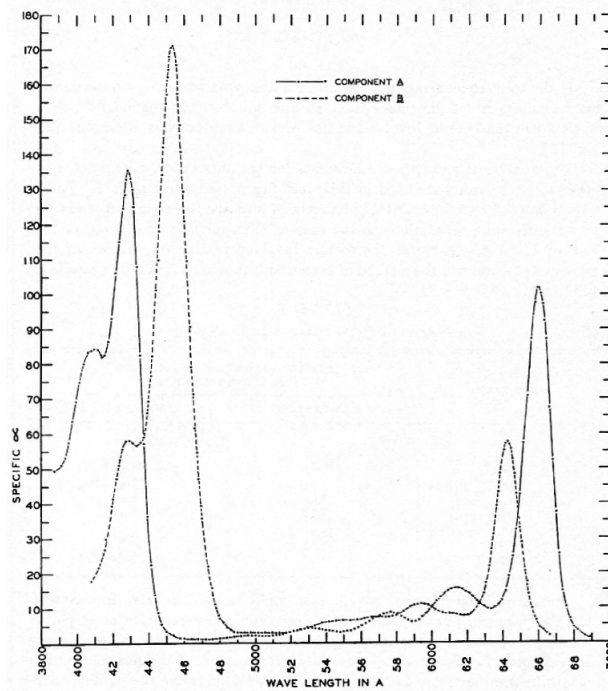


Fig. 1. Absorption spectra of chlorophylls *a* and *b* in ether solution.

Figure B.2 : Spectre mesuré du coefficient spécifique d'absorption en base 10 des chlorophylles *a* et *b*. Reproduit à partir de **Comar et Zscheile (1942)**.

5. Comparaison des valeurs publiées pour le coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle

Notre objectif est de comparer les valeurs publiées du coefficient spécifique d'absorption K de la chlorophylle. Les mesures biochimiques de [Comar et Zscheile \(1942\)](#), [Lichtenthaler \(1987\)](#) et [Porra et al. \(1989\)](#) ont été présentées précédemment.

Prospect, Jacquemoud et Baret (1990)

Par apprentissage sur une base de données faites de spectres de réflectance et de transmittance ainsi que de contenus en chlorophylle mesurés, le modèle Prospect utilise le spectre de K permettant les meilleures estimations du contenu en chlorophylle. K est donné en $\text{cm}^2 \mu\text{g}^{-1}$, et $1 \text{cm}^2 \mu\text{g}^{-1} = 10^5 \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-1}$. Soit x les valeurs de Prospect et K les valeurs à considérer en USI, on a :

$$K = x \times 10^5 \quad \text{Eq. B.28}$$

Yamada et Fujimura (1991)

Ces auteurs définissent un coefficient d'absorption ν qui correspond au coefficient linéique d'absorption et qui dépend d'une quantité déterminée par inversion qui n'est autre que le coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle (plus d'autres pigments éventuellement). Soit x les valeurs fournies par Yamada, elles sont en $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, d'où K en USI :

$$K = x \times 10^5 \quad \text{Eq. B.29}$$

Les valeurs de K publiées par les auteurs sont présentées dans le [tableau A.3](#).

Longueur d'onde (nm)	Valeurs de K ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)
350	0.035
400	0.06
440	0.14
480	0.155
540	0.03
640	0.09
675	0.22
700	0.03
760	0

Tableau B.3 : Valeurs de K publiées par [Yamada et Fujimura \(1991\)](#).

Maier (2000)

[Maier \(2000\)](#) a modélisé le coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle a dans le photosystème CP1 et dans le Light Harvesting Complex (LHCP). Il semble que les données soient meilleures pour le LHCP, ce seront donc les seules considérées dans la suite. L'auteur a aussi modélisé la chlorophylle b et le β -carotène. Chaque spectre est décomposé en une somme de gaussienne. Les données sont le centre et la largeur de la gaussienne en nombre d'onde (cm^{-1})

puis l'amplitude en $\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$. On veut le coefficient spécifique d'absorption K en $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-1}$, la conversion est la suivante : $1 \text{cm}^2 \text{mg}^{-1} = (10^{-2} \text{m})^2 (10^{-6} \text{kg})^{-1} = 10^2 \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$. Par ailleurs, rappelons qu'à un nombre d'onde central ν et une largeur $\Delta\nu$ sont associées la longueur d'onde centrale λ et la largeur $\Delta\lambda$ définies par :

$$\lambda = \frac{1}{\nu}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\nu}{\nu^2 - (\Delta\nu/2)^2}$$

Eq. B.30

Maier a construit sa modélisation sur des mesures d'absorption en unités arbitraires. Il a ensuite ajusté le niveau de manière à retrouver la valeur moyenne du coefficient d'absorption molaire de la chlorophylle. Pour cela, il a utilisé le travail de Evans datant de 1986 revu dans [Evans et Anderson \(1987\)](#). On y trouve que le coefficient d'absorption molaire $\varepsilon(\lambda)$ de la chlorophylle a la valeur moyenne suivante :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\int_{400}^{720} \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{720} d\lambda} = 2230 \pm 40 \text{ m}^2 \text{mol}^{-1}$$

Eq. B.31

Cette valeur moyenne est indépendante de du complexe dans lequel la chlorophylle se trouve ainsi que du rapport chlorophylle [a]/[b]. Il semble que les données soient meilleures pour la chlorophylle a dans le LHCP que dans le CP1. On ne conserve donc que les valeurs pour la chlorophylle a dans le LHCP.

Evans et Anderson (1987)

Ils publient des spectres d'absorption de la chlorophylle dans les photosystèmes CP1, CP1a, CPa, LHC1 et LHC3. Un spectre, moyenne des cinq présentés, est relevé et ajusté en amplitude afin de retrouver la valeur de $2230 \text{ m}^2 \text{mol}^{-1}$ en moyenne spectrale.

OMLC

La base de données de spectres d'absorption du logiciel 'PhotochemCAD' ([Du et al. 1998](#)) fournit les valeurs du coefficient d'absorption molaire ε_{10} de la chlorophylle a dans le méthanol (<http://omlc.ogi.edu/spectra/PhotochemCAD>). Ce coefficient est défini par :

$$\varepsilon_{10} = \frac{A_{10}}{lc}$$

Eq. B.32

Pour calculer K on utilise la relation suivante :

$$K = \frac{\varepsilon}{M} = \frac{\varepsilon_{10} \log_e 10}{M} \quad \text{Eq. B.33}$$

L'unité indiquée est "cm⁻¹/M", que l'on suppose signifier cm⁻¹/ (Mol litre⁻¹). Soit x les valeurs de ε_{10} , pour les convertir en USI (m⁻¹ m³ Mol⁻¹), on pose :

$$\varepsilon_{10} = x \times 10^{-1} \quad \text{Eq. B.34}$$

En USI, la masse molaire de la chlorophylle vaut 0.8935 kg mol⁻¹, d'où la valeur de K en USI :

$$K = \frac{\varepsilon_{10} \log_e 10}{M} = \frac{x \times 10^{-1} \times \log_e 10}{0.8935} \quad \text{Eq. B.35}$$

Le coefficient spécifique d'absorption de la source OMLC est le plus fort de toutes les sources présentées ici. Ces fortes valeurs empêchent de faire une comparaison claire de toutes les sources sur un même graphe. Cette source est donc écartée du jeu de données.

Grappe des différentes valeurs de K

La [figure B.3](#) rassemble les valeurs présentées ci-dessus. Les valeurs de Prospect sont plus faibles que celles des autres sources. Cela est probablement dû à l'hypothèse du modèle selon laquelle la luminance est lambertienne dans la feuille. Celles de [Yamada et Fujimura \(1991\)](#) montrent un meilleur accord avec les mesures biochimiques.

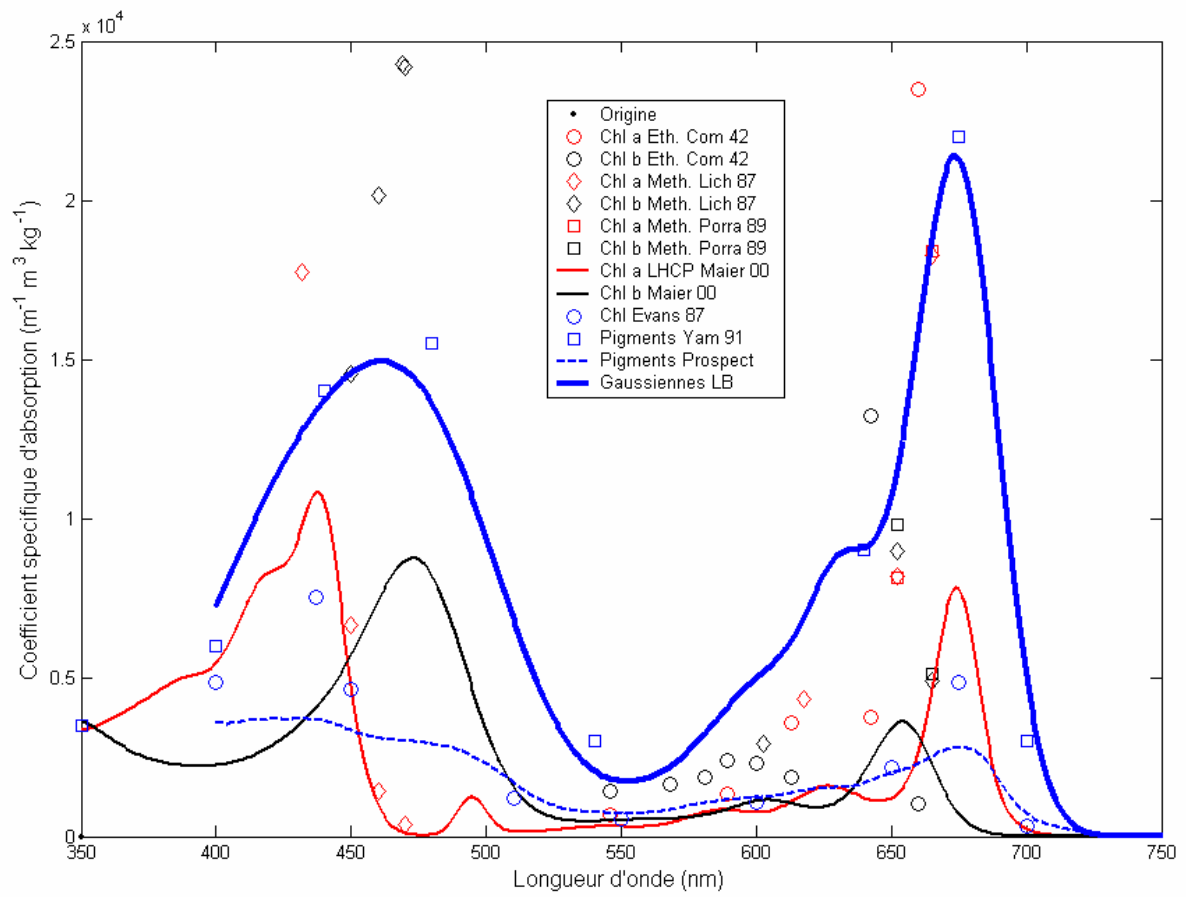


Figure B.3 : Valeurs publiées du coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle.

Annexe C : Photométrie

La photométrie caractérise les rayonnements optiques (ultraviolet, visible et infrarouge). Le [tableau C.1](#) présente les principales grandeurs physiques ainsi que leurs symboles et unités dans le système international. Les noms en français et anglais sont inspirés respectivement de [Mezonnette et Lépine \(2003\)](#) et [Nicodemus *et al.* \(1977\)](#). Pour le repérage des directions dans l'espace, le système conventionnel des coordonnées sphériques est adopté : un angle zénithal θ et un angle azimutal φ . Lorsque ces angles repèrent la direction de la lumière incidente, ils sont dits 'solar angle' (indice 's') et s'ils repèrent la direction de la lumière émergente 'viewing angle' (indice 'v'). Les indices 'i', 'r', 't' et 'a' correspondent respectivement à 'incident', 'réfléchi', 'transmis' et 'absorbé'.

Nom	Name	Symbole	Definition	Unité
Surface	Surface	A		m^2
Angle zénithal	Zenith angle	θ		rad
Angle azimutal	Azimuth angle	φ		rad
Angle solide	Solid angle	Ω	$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$	sr
Flux lumineux	Light flux	Φ		W
Intensité	Intensity	I	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	W sr^{-1}
Eclairement	Irradiance	E	$E = \frac{d\Phi_i}{dA}$	W m^{-2}
Luminance	Radiance	L	$L = \frac{d\Phi}{dA \cos \theta d\Omega}$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$
Réflectance ou facteur de réflexion	Reflectance	R	$R = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$	
Transmittance ou facteur de transmission	Transmittance	T	$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$	
Absorptance ou facteur d'absorption	Absorptance	A	$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$	
Luminance du diffuseur parfait	Radiance of perfect diffuser	L_{dp}	$L_{dp} = \frac{E}{\pi}$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$
Facteur de luminance en réflexion	Reflectance factor	FL_r	$FL_r = \frac{L_r}{L_{dp}}$	
Facteur de luminance en transmission	Transmittance factor	FL_t	$FL_t = \frac{L_t}{L_{dp}}$	
Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle	Bidirectional Reflectance Distribution Function	BRDF	$BRDF = \frac{L_r}{E}$	sr^{-1}
Fonction de Distribution de Transmittance Bidirectionnelle	Bidirectional Transmittance Distribution Function	BTDF	$BTDF = \frac{L_t}{E}$	sr^{-1}

Tableau C.1 : Grandeurs physiques avec symboles, définitions et unités. (1) : l'angle solide est noté ω dans l'article fondateur de [Nicodemus *et al.* \(1977\)](#).

1. Flux lumineux, luminance et indicatrice

Considérons un repère d'espace orthonormé $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ et les systèmes usuels de coordonnées cartésien (x, y, z) et sphérique (r, θ, φ) . Soit une source lumineuse de surface A émettant dans le demi-espace $z > 0$. Le flux lumineux Φ est l'énergie émise par la source par unité de temps. On se place suffisamment loin de la source pour l'assimiler à un point matériel. Considérons un angle solide infinitésimal $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ autour de la direction (θ, φ) contenant le flux $d\Phi(\theta, \varphi)$. On a :

$$\Phi = \sum_{\text{directions}} d\Phi = \int_{\text{directions}} \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{d\Omega} d\Omega = \int_{\text{directions}} I(\theta, \varphi) d\Omega \quad \text{Eq. C.1}$$

où $I(\theta, \varphi)$ est l'intensité de la source (W sr^{-1}) :

$$I(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{d\Omega} \quad \text{Eq. C.2}$$

Considérons maintenant une partie de la source, surface infinitésimale $dA = dx dy$, localisée en (x, y) et un angle solide $d\Omega$ autour de la direction (θ, φ) . Le flux correspondant est $d\Phi(\theta, \varphi, x, y)$ et on a :

$$\Phi = \iint_{\substack{\text{directions} \\ \text{surfaces}}} \frac{d\Phi(\theta, \varphi, x, y)}{dA d\Omega} dA d\Omega \quad \text{Eq. C.3}$$

Soit γ l'angle entre la normale à dA et la direction (θ, φ) . Si la source est plane alors $\gamma = \theta$. La surface apparente de dA dans la direction (θ, φ) est sa projection sur un plan perpendiculaire à (θ, φ) qui vaut $dA \cos\theta$. Introduisons la surface apparente dans [Eq. C.3](#) :

$$\Phi = \iint_{\substack{\text{directions} \\ \text{surfaces}}} \frac{d\Phi(\theta, \varphi, x, y)}{\cos\theta dA d\Omega} \cos\theta dA d\Omega = \iint_{\substack{\text{directions} \\ \text{surfaces}}} L(\theta, \varphi, x, y) \cos\theta dA d\Omega \quad \text{Eq. C.4}$$

où $L(\theta, \varphi, x, y)$ est la luminance ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$) :

$$L(\theta, \varphi, x, y) = \frac{d\Phi(\theta, \varphi, x, y)}{\cos\theta dA d\Omega} \quad \text{Eq. C.5}$$

L'indicatrice de luminance est le tracé de la luminance $L(\theta, \varphi)$ en fonction de la direction d'observation. Elle est utilisée pour étudier les champs lumineux anisotropes.

2. Fonction de distribution de réflectance et de transmittance bi-directionnelles

Définissons la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle, ou *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF), d'un échantillon plan. Considérons une surface infinitésimale dA éclairée dans l'angle solide $d\Omega_s$ autour de la direction (θ_s, φ_s) et observée dans l'angle solide $d\Omega_v$ autour de la direction (θ_v, φ_v) . Le flux incident et le flux réfléchi sont respectivement $d\Phi_i$ et $d\Phi_r$ (figure A.1).

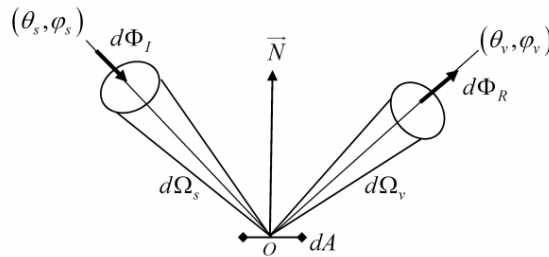


Figure A.1 : Schéma illustrant la définition de la Bidirectional Reflectance Distribution Function.

On appelle éclairement E l'énergie reçue par unité de surface de l'échantillon (W m^{-2}) :

$$E = \frac{d\Phi_i}{dA} \quad \text{Eq. C.6}$$

La luminance due à la réflexion sur l'échantillon est L_r et se calcule en fonction de $d\Phi_r$ grâce à l'équation Eq. C.5. La BRDF est définie par :

$$BRDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{L_r}{E} \quad \text{Eq. C.7}$$

Le concept de BRDF est étendu au cas de la transmission en définissant la *Bidirectional Transmittance Distribution Function* (BTDF). En notant L_t la luminance de l'échantillon en transmission, on a :

$$BTDF(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{L_t}{E} \quad \text{Eq. C.8}$$

3. Diffuseur lambertien et diffuseur parfait

Un diffuseur lambertien est un échantillon dont la luminance est indépendante de la direction d'observation pour un éclairement donné. D'après les définitions respectives de la luminance L et de l'intensité I , on a pour un échantillon plan :

$$L(\theta, \varphi, x, y) = \frac{I(\theta, \varphi)}{dA \cos \theta} \quad \text{Eq. C.9}$$

d'où l'on déduit la loi de Lambert puisque $L = cte$:

$$I(\theta, \varphi) = cte dA \cos \theta \quad \text{Eq. C.10}$$

L'intensité émise par un diffuseur lambertien décroît comme le cosinus de l'angle d'observation.

Si, en plus d'être lambertien, un objet réfléchit la totalité de l'énergie incidente alors c'est un diffuseur parfait. Pour un tel diffuseur de surface dA , le flux reçu et par conséquent le flux réfléchi valent $E \times dA$. En utilisant Eq. C.4 dans laquelle le flux Φ est remplacé par sa valeur $E \times dA$, la luminance L_{dp} du diffuseur parfait peut être sortie de l'intégrale sur les directions et calculée :

$$L_{dp} = \frac{E}{\pi} \quad \text{Eq. C.11}$$

Sa BRDF se déduit de Eq. C.7 et vaut $1/\pi$.

Pour illustrer le concept de surface lambertienne, considérons un espace rempli d'un rayonnement isotrope : en tout point l'énergie se propageant dans une direction (θ, φ) est indépendante de (θ, φ) . Soit dans cet espace une surface dA transparente, plane et carrée. L'énergie traversant cette surface est maximale pour la direction perpendiculaire à la surface ($\theta=0$), diminue lorsqu'on s'écarte de la perpendiculaire, puis devient nulle pour la direction parallèle à la surface ($\theta=\pi/2$) (voir figure A.2). En revanche, la luminance de cette surface reste constante car la surface apparente $dA \cos \theta$ décroît autant que l'énergie lorsque θ augmente. C'est donc un émetteur lambertien.

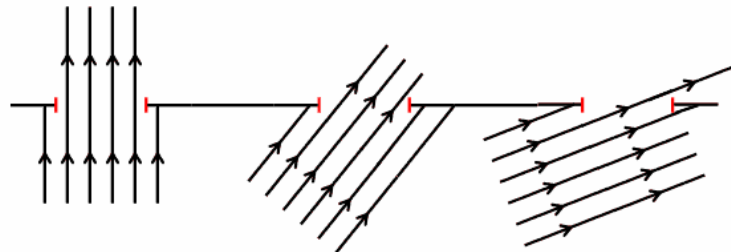


Figure A.2 : Illustration du concept de surface lambertienne.

4. Facteur de luminance

Le facteur de luminance, ou *Reflectance Factor* dans Nicodemus *et al.* (1977), est une quantité obtenue en comparant la luminance de l'échantillon à caractériser à la luminance d'un diffuseur parfait dans les mêmes conditions expérimentales. Soit un échantillon plan réfléchissant et transmettant la lumière avec des luminances respectives L_r et L_t . Son facteur de luminance en réflexion FL_r est défini par :

$$FL_r = \frac{L_r}{L_{dp}} \quad \text{Eq. C.12}$$

et son facteur de luminance en transmission par :

$$FL_t = \frac{L_t}{L_{dp}} \quad \text{Eq. C.13}$$

Dans le cas où les conditions expérimentales s'approchent de celles définies pour la BRDF (voir [Nicodemus et al., 1977](#) pour une discussion complète sur ce sujet), le facteur de luminance s'exprime simplement en fonction de la BRDF. En utilisant [Eq. C.11](#) et [Eq. C.7](#), on a :

$$FL_r = \pi BRDF \quad \text{Eq. C.14}$$

et

$$FL_t = \pi BTDF \quad \text{Eq. C.15}$$

Dans la littérature anglo-saxonne, les facteurs bi-directionnels de luminance en réflexion et en transmission sont appelés respectivement *Bidirectional Reflectance Factor* (BRF) et *Bidirectional Transmittance Factor* (BTF). On a donc :

$$BRF = \pi BRDF \quad \text{Eq. C.16}$$

et

$$BTF = \pi BTDF \quad \text{Eq. C.17}$$

5. Facteurs de réflexion et de transmission directionnels-hémisphériques

Introduisons les facteurs de réflexion et de transmission directionnels-hémisphériques, ou *Directional Hemispherical Reflectance Factor* (DHRF) et *Directional Hemispherical Transmittance Factor* (DHTF). On les calcule en intégrant les quantités bi-directionnelles sur les directions d'observations. Considérons une surface plane dA recevant l'éclairement E dans l'angle solide $d\Omega_s$ autour de la direction (θ_s, φ_s) , réfléchissant la luminance $L_r(\theta_v, \varphi_v)$ et transmettant la luminance $L_t(\theta_v, \varphi_v)$. Le flux reçu est $\Phi_i = E \times dA$ et les flux hémisphériques réfléchis Φ_r et transmis Φ_t se calculent avec l'équation [Eq. C.4](#). On a :

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \frac{\int L_r(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v dA d\Omega_v}{E dA} = \int \frac{L_r(\theta_v, \varphi_v)}{E} \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. C.18}$$

d'où :

$$DHRF = \int BRDF(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. C.19}$$

ou encore :

$$DHRF = \int \frac{BRF(\theta_v, \varphi_v)}{\pi} \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. C.20}$$

De même, on établit le lien entre DHTF et BTF :

$$DHTF = \int \frac{BTF(\theta_v, \varphi_v)}{\pi} \cos \theta_v d\Omega_v \quad \text{Eq. C.21}$$

Un des intérêts du BRF apparaît lorsque l'on réécrit Eq. C.20 sous la forme :

$$DHRF = \frac{\int BRF(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v d\Omega_v}{\int \cos \theta_v d\Omega_v} \quad \text{Eq. C.22}$$

Le DHRF apparaît alors comme une moyenne pondérée du BRF. Cela signifie que pour un échantillon dont le BRF est indépendant de la direction d'observation, on a tout simplement $DHRF = BRF$.

6. Conclusion sur la nomenclature

Meyzonnette et Lépine (2003) définissent de nombreuses quantités pour quantifier les propriétés optiques apparentes des objets, parmi lesquelles il faut retenir : 1) le facteur de réflexion, lorsque le flux réfléchi est comparé au flux incident ; et 2) le facteur de luminance, lorsque le flux réfléchi sur l'objet étudié est comparé au flux réfléchi par un diffuseur parfait. Les traductions anglo-saxonnes de ces quantités, d'après les définitions de Nicodemus *et al.* (1977), sont : 1) *Reflectance* pour facteur de réflexion et 2) *Reflectance Factor* pour facteur de luminance. Notons que le mot 'réflectance' est utilisé dans la communauté française de télédétection comme synonyme du facteur de réflexion (à cause de la similitude avec l'anglais).

Suivant la géométrie des faisceaux incidents et émergents, le facteur de réflexion et le facteur de luminance sont qualifiés de bi-directionnels, bi-coniques, *etc.*. Bien que ces quantités ne soient pas égales en général, le facteur de réflexion directionnel-hémisphérique, ou *Directional Hemispherical Reflectance* (DHR), et le facteur de luminance directionnel-hémisphérique, ou *Directional Hemispherical Reflectance Factor* (DHRF), sont égaux (Nicodemus *et al.*, 1977) :

$$DHRF = DHR \quad \text{Eq. C.23}$$

Tous les types de facteurs de réflexion ou de luminance se déduisent de la fonction de distribution de réflectance bi-directionnelle, ou *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Cette quantité est donc le concept central pour l'étude des propriétés optiques des surfaces. Notons que la BRDF est une simplification du concept de fonction de distribution de la diffusion bi-directionnelle de surface en réflexion, ou *Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function* (BSSRDF). Le lien entre BRDF et BSSRDF est établi par Nicodemus *et al.* (1977) dans le cas d'un éclairage uniforme et d'une surface homogène et non diffusante.

Annexe D : Le spectro-gonio-photomètre

Plan de l'annexe

1. Détail des éléments du spectro-gonio-photomètre
 - 1.1. La lampe HL 2000
 - 1.2. Le spectromètre
 - 1.3. La caméra CCD
 - 1.4. La pieuvre de fibres en détection
 - 1.5. Les obturateurs
2. Réglages
 - 2.1. Couplage optique en entrée du spectromètre
 - 2.2. Les modes 'CCD image' et 'spectre' de Spectramax
 - 2.3. Position et orientation de la CCD
 - 2.4. Image de la pieuvre par le coupleur à miroir
 - 2.5. Définition des zones de la CCD
3. Géométrie des faisceaux lumineux
 - 3.1. Emission
 - 3.2. Détection
 - 3.3. Avantages et inconvénients des configurations parallèle ou conjuguée
 - 3.4. Angles solides de la source et des détecteurs
4. Intercalibration des détecteurs
5. Repérage des directions d'éclairement et d'observation sur le goniomètre
 - 5.1. La mécanique parfaite
 - 5.2. Numérotation des positions des éléments mécaniques
 - 5.3. Calibration des positions angulaires des éléments mécanique
 - 5.4. Calcul des positions angulaires par rapport à l'échantillon

1. Détail des éléments du spectro-gonio-photomètre

Les éléments nécessaires aux expériences avec l'appareil sont :

- Lampe halogène HL 2000 avec alimentation stabilisée et fibre de cœur 0.6 mm.
- Porte-fibre éclairement avec lentille convergent et bague de blocage.
- Porte-échantillon avec un support pour les feuilles et un support pour le Spectralon.
- Echantillon de Spectralon.
- 7 ensembles porte-fibre réception avec lentille convergente et bague de blocage.
- Pieuvre de fibres optiques pour la réception.
- Coupleur à miroir (×1).
- Spectromètre avec réseau 100 traits / mm.
- Caméra CCD avec alimentation.
- Carte GPIB National Instrument utilisant l'interface IEEE-488.
- Ordinateur PC sous Windows avec logiciel Spectramax.

En plus des éléments précédents, d'autres sont utiles pour les réglages et les calibrations :

- Lampe Schott KL 1500.
- Laser Hélium-Néon (632,8 nm).

- Lampe spectrale au mercure.
- Matériel courant de laboratoire d'optique.

Le spectromètre ainsi que les éléments nécessaires aux réglages et aux calibrations sont montés sur une table optique.

1.1. La lampe HL 2000

Les caractéristiques constructeur de la lampe sont présentées dans le [tableau D.1](#). La durée de vie de l'ampoule étant de 1500 heures, une ampoule de rechange HL 2000 B est disponible. La fibre optique venant se visser en sortie de la lampe porte la référence FC-UV600-2-FR0550. Elle a un coeur de 600 μm et une longueur de 2 m. Le constructeur donne une température du bulbe de 2960°K, l'émission d'un corps noir à cette température est donnée sur la [figure D.1](#). L'alimentation stabilisée est une ELC DC power Supply AL924A.

Constructeur	Ocean Optics Europe
Produit	Tungsten Halogen light source HL-2000, fan cooled
N° de série	20 02 79
Wavelength range	360-1100 nm
Stability	$\pm 0.5\%$
Time to stabilize	Ca. 5 min.
Output to bulb	5 VDC / 1.4 A
Bulb life time	1500 Hrs
Bulb output (in 800 μm fiber)	17 mW
Bulb color temperature	2960 °K
Power requirements	12 VDC / 1.4 A
Dimensions (mm)	140 \times 58 \times 59

Tableau D.1 : spécifications de la lampe halogène HL 2000.

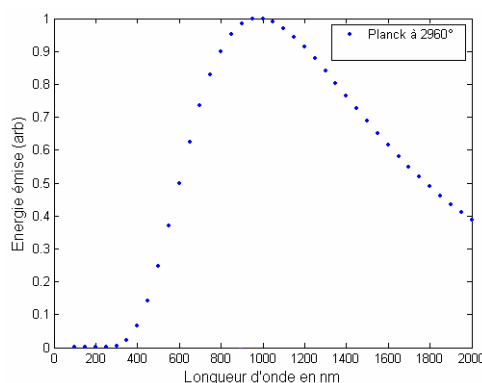


Figure D.1 : Spectre du corps noir à 2960°.

1.2. Le spectromètre

Les caractéristiques constructeur du spectromètre (schématisé sur la [figure D.2](#)) sont données dans le [tableau D.2](#). Il n'y a pas de partie mobile ce qui diminue les risques de dérèglement. La configuration de l'optique est 'cross Czerny-Turner' utilisant une correction asphérique. L'astigmatisme est négligeable. Le système 'rapide' $f/3.9$ permet une très bonne image spectrale sur une surface de 30 mm de large et 12 mm de haut dans le plan spectrographique. Pour des performances optimales, la température extérieure doit être maintenue constante à $\pm 2^\circ\text{C}$. Pour calculer la largeur de bande, on procède comme suit : soit L1 la largeur de l'image de la fente d'entrée sur la fente de sortie et L2 la largeur d'un pixel de la CCD. La largeur de bande est le produit de la dispersion en nm par mm par le maximum de L1 et L2.

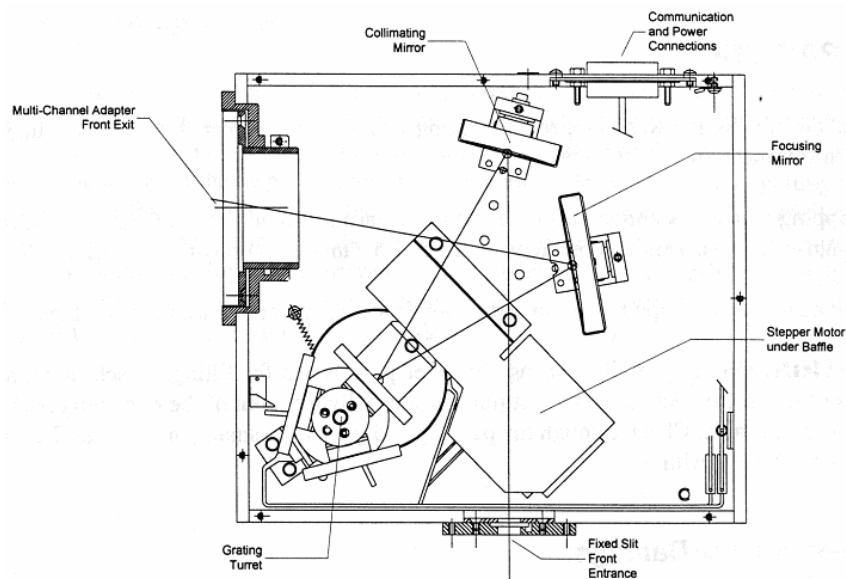


Figure D.2 : Schéma du spectromètre. Reproduit à partir du manuel Jobin-Yvon.

TRIAX 180/190

Focal Length:	0.19 meters
Entrance Aperture Ratio:	$f/3.9$
Grating Size:	50 mm x 50 mm
Image Magnification at the Exit:	1.00
Scanning range with 1200 g/mm grating:	0-1400 nm
Multichannel coverage with 1200 g/mm grating:	106 nm over 30 mm array width
Focal Plane:	30 mm wide x 12 mm high
Spectral Dispersion with 1200 g/mm grating:	3.53 nm/mm
Spectral Resolution as a scanning monochromator with 1200 g/mm grating:	0.3 nm
Wavelength Positioning Accuracy:	+/- 0.3 nm
Wavelength Repeatability:	+/- 0.06 nm
Wavelength Drive Step Size for 1200 g/mm grating:	0.06 nm
Overall Length:	10.5 inches
Overall Width:	9.25 inches
Overall Height:	7.35 inches
Weight (Approx.):*	11.5 kg

Tableau D.2 : Spécifications du spectromètre. Reproduit à partir du manuel Jobin-Yvon.

1.3. La caméra CCD

Ses spécifications sont données dans le [tableau D.3](#). Le système de détection consiste en une tête de détecteur, une unité d'interface et un logiciel (Spectramax). La dynamique de la CCD va de 0 à 65535 coups (16 bits).

SPECIFICATIONS:

ADC Precision:	16-bit	
Dark Current:	LN ₂ Cooled Head:	< 1 to 3 e ⁻ /pixel/hour (chip dependent)
	H ₂ O Cooled Head:	< 50 electrons/pixel/hour
	Air Cooled Head:	< 250 electrons/pixel/hour
	Mini Air Cooled Head:	< 2.5 electrons/pixel/second
Dynamic Range:	65535 counts max.	
Electrons/Count:	Variable, from 1 to 16 e ⁻ /count	
Exposure Time:	>10 milliseconds to hours	
Typical Operating Temperature:	LN ₂ Cooled Head:	-140° C typical, (1024 x 256 pixels, larger -70 to -140° C range chips slightly higher)
	H ₂ O Cooled Head:	-60°C (water 12° C)
	Air Cooled Head:	-55°C (air 22° C)
	Mini Air Cooled Head:	Not specified
Quantum Efficiency:	Standard chips:	Up to 50% at 750 nm.
	Backthinned chips:	Up to 85% at 550 nm.
Spectral Response:	Standard chips:	400 to 1050 nm.
With UV coating:	200 to 1050 nm	
Readout Noise:	LN ₂ Cooled Head:	4 to 10 electrons RMS per pixel or binned datapoint, depending on chip selected
	H ₂ O Cooled Head:	10 to 18 electrons RMS per pixel or binned datapoint, depending on chip selected
	Air Cooled Head:	10 to 20 electrons RMS per pixel or binned datapoint
	Mini Air Cooled Head:	10 to 20 electrons RMS per pixel or binned datapoint
Specifications are subject to change without notice.		

Tableau D.3 : Spécifications de la caméra CCD. Reproduit à partir du manuel Jobin-Yvon.

1.4. La pieuvre de fibres en détection

La pieuvre ([figure D.4](#)) est constituée de neuf fibres optiques actives qui conduisent la lumière détectée du point d'observation au spectromètre. Les fibres se séparent à une extrémité pour venir chacune dans son logement. A l'autre extrémité, les fibres se rejoignent dans un cylindre métallique de 1 cm de diamètre environ. Dans ce cylindre, les fibres actives sont séparées les unes des autres par trois fibres mortes. Fibres actives et fibres mortes se superposent verticalement. Les fibres actives ont un cœur de 100 μm, une longueur de 2 m et une ouverture numérique (ON) de 0,22. L'inclinaison maximale des rayons lumineux conduit par les fibres est donc de 13° environ par rapport à l'axe optique. On observe expérimentalement à l'oeil nu que la majorité du flux lumineux sort de la fibre avec une inclinaison inférieure à 11°. Pour une inclinaison de 16° plus aucun flux n'est observé.

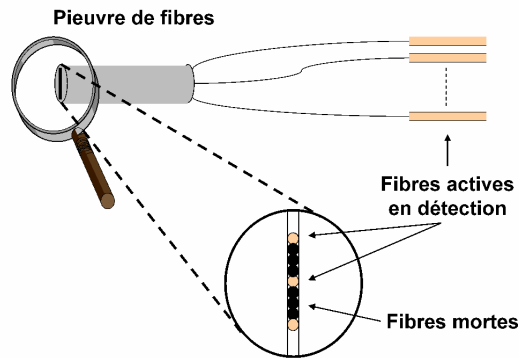


Figure D.4 : Pieuvre de fibres.

1.5. Les obturateurs

Le spectromètre est équipé de deux obturateurs sur sa fente d'entrée. Le premier est manuel, contrôlé par l'expérimentateur, le second est contrôlé par le logiciel Spectramax pour fixer le temps d'intégration. L'obturateur manuel permet de réaliser trois configurations de fente d'entrée : masquée, en partie masquée, non masquée (voir figure D.5). Il n'a pas l'avantage d'un obturateur en V permettant toutes les hauteurs possibles de fente.

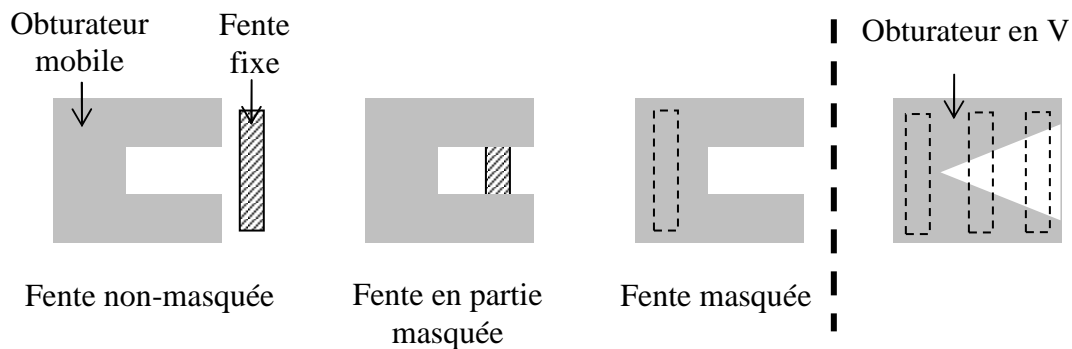


Figure D.5 : Les différentes positions de l'obturateur manuel de la fente d'entrée du spectromètre (à gauche). L'obturateur de notre appareil est de forme rectangulaire, se distinguant des obturateurs en forme de 'V' (à droite).

2. Réglages

2.1. Couplage optique en entrée du spectromètre

Le spectromètre est composé de (dans le sens de parcours de la lumière) : une fente d'entrée, un miroir de collimation, un réseau, un second miroir, un port de sortie. Il faut s'assurer que le faisceau lumineux pénétrant dans le spectromètre va éclairer le miroir de collimation de façon homogène. Pour cela, on éclaire la fente d'entrée, ouvre le spectromètre et place du carton blanc devant le miroir de collimation. Si la totalité du miroir n'est pas éclairée alors on peut augmenter l'inclinaison des rayons en entrée (diminuer le nombre d'ouverture en utilisant une focale plus petite par exemple). Si on éclaire plus que la surface du miroir alors il faut diminuer l'inclinaison (augmenter le nombre d'ouverture en diaphragmant le faisceau en entrée par

exemple). On doit observer une illumination homogène sur toute la partie active du miroir. Si une structure apparaît alors la focalisation n'est pas bonne. Le concept de nombre d'ouverture (NO) est illustré sur la [figure D.6](#). Supposons deux diaphragmes de rayon a et b avec $a < b$, et une lentille convergente de focale OF' . Le NO est défini comme le rapport de la focale de la lentille au diamètre du faisceau diaphragmé. Plus la focale est grande par rapport au diaphragme, plus le NO est grand, et plus l'optique est dite 'rapide'.

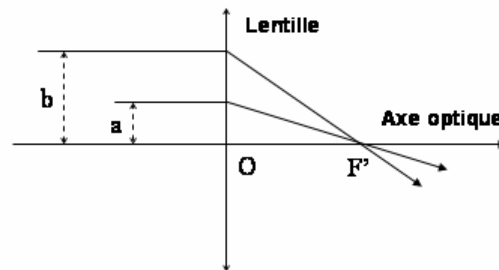


Figure D.6 : Illustration du concept de Nombre d'ouverture (NO).

2.2. Les modes 'CCD image' et 'spectre' de Spectramax

A chaque acquisition, le logiciel spectramax interroge la CCD et reçoit le nombre de coups mesuré par chacun d'entre eux. Dans le mode 'CCD image', le logiciel représente toutes les valeurs, les deux dimensions de l'écran correspondant aux deux dimensions de la CCD et le nombre de coups étant codé en couleur. Dans le mode 'spectre', le logiciel somme les nombres de coups sur toute une colonne de pixels. Chaque colonne est alors associée à une longueur d'onde pour fournir à l'écran un spectre : nombre de coups mesurés en fonction de la longueur d'onde.

2.3. Position et orientation de la CCD

Ce réglage joue sur la résolution spectrale de l'appareil. Pour une source monochromatique, le spectre observé doit avoir la forme d'un pic aussi fin que possible. La source utilisée est un laser hélium-néon émettant à 632,8 nm. Le faisceau laser est atténué et diffusé pour éclairer toute la fente d'entrée du spectromètre. On visualise un spectre pour une zone correspondant à l'ensemble des pixels de la CCD et on ajuste le temps d'acquisition pour avoir un signal à la moitié du maximum autorisé par la CCD. La forme du pic observé varie suivant la position et l'orientation de la CCD. Une translation permet de placer le plan de la CCD dans le plan focal du système optique. Une rotation autour de cet axe optique permet l'alignement des colonnes (verticales) de pixels avec la fente d'entrée (verticale) du spectromètre. On répète itérativement les étapes translation et rotation avec des amplitudes de plus en plus faibles jusqu'à ce que le réglage soit satisfaisant. Le spectre typique obtenu est présenté sur la [figure D.7](#). La largeur à mi-hauteur de 2,5 nm détermine notre résolution spectrale. La longueur d'onde centrale (625,6 nm au lieu de 632,8 nm) devra être corrigée lors de la calibration spectrale faite en fin de réglages.

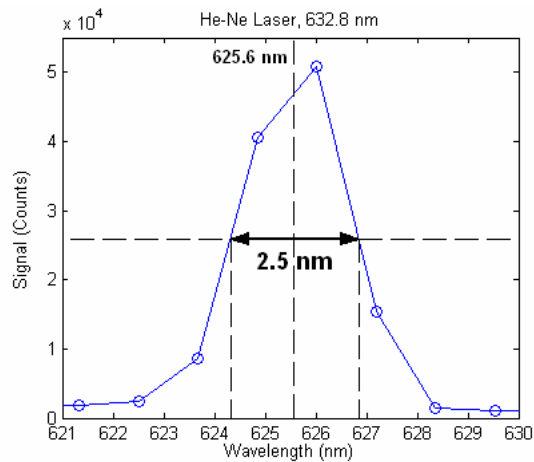


Figure D.7 : Raie du laser He-Ne à 632,8 nm observée avec le spectromètre et la CCD

2.4. Image de la pieuvre par le coupleur à miroir

On veut faire l'image des sept fibres actives de la pieuvre sur la fente d'entrée du spectromètre et maximiser le flux détecté par la CCD. Le coupleur à miroir, aussi appelé $\times 1$, est composé d'un miroir plan et d'un miroir sphérique. Le miroir plan n'intervient pas dans la focale du montage qui est donc égale à celle du miroir sphérique. Si l'objet est à une distance du miroir sphérique double de la focale, alors le coupleur à miroir en fait une image de grandissement -1 (même taille mais renversée). L'angle d'ouverture du faisceau lumineux n'est pas modifié par le montage. L'objet est la sortie de la pieuvre de fibres de $100\ \mu\text{m}$ de largeur et quelques millimètres de hauteur. L'image doit se former sur la fente d'entrée du spectromètre qui a une hauteur de $8\ \text{mm}$ et une largeur de $50\ \mu\text{m}$. Le réglage se fait en orientant convenablement l'axe optique du miroir sphérique (contrôlé par un dispositif trépoint plan). Parallèlement, on joue sur la translation et la rotation de la pieuvre (Figure D.8) qui sont repérées par une bague métallique. Une vis vient bloquer le tout lorsque le réglage est bon.

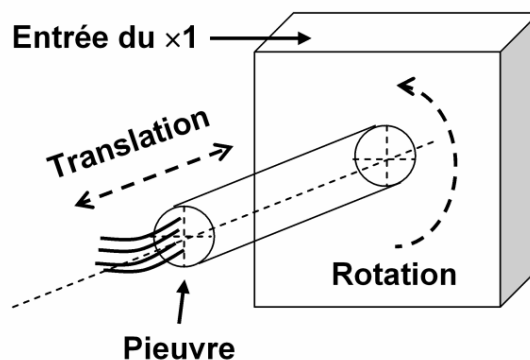


Figure D.8 : Réglage de la pieuvre.

Après avoir réglé la pieuvre, le coupleur et la CCD, on réalise une image sur la CCD. On doit obtenir une image nette de la lumière dispersée par le réseau provenant de chaque fibre et les images des fibres doivent être parallèles à l'axe horizontal de la CCD (figure D.9).

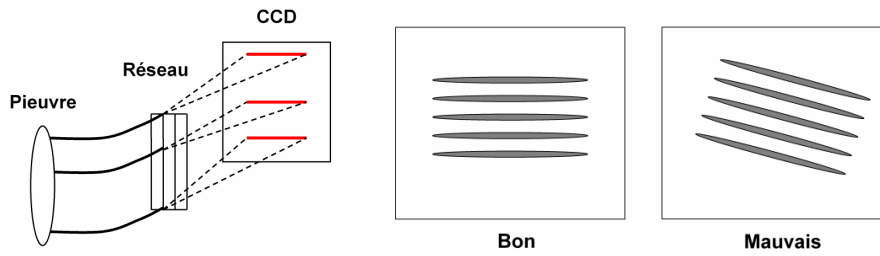


Figure D.9 : Formation d'une image sur la CCD (à gauche) et réglage de la rotation de la CCD (à droite).

2.5. Définition des zones de la CCD

On utilise une source de lumière blanche (lampe Schott KL 1500 electronic) observée par les sept fibres actives en détection. On visualise l'image correspondante sur la CCD (figure D.10). Afin d'obtenir un spectre pour chaque image de fibre, il faut spécifier, avec le logiciel Spectramax, les sept zones de la CCD à distinguer. Cela se fait dans la fenêtre 'Area List' qui demande à l'utilisateur de fixer pour chaque zone les bornes (X,Y).

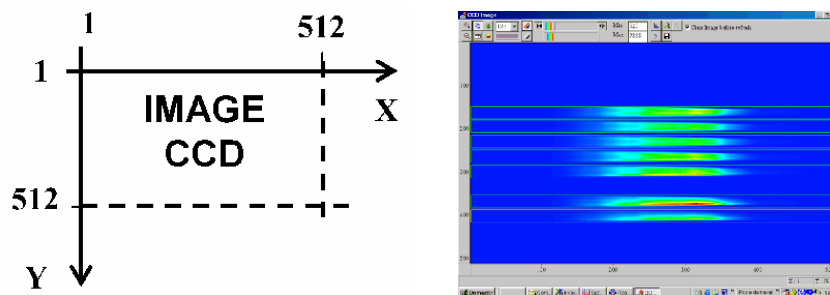


Figure D.10 : Repérage des pixels sur la CCD (à gauche) et images des sept fibres sur la CCD vue par le logiciel Spectramax (à droite).

AREAS LIST : Définition des zones de la CCD

Le logiciel Spectramax comporte une erreur, précisée dans cette section, sur l'affichage des zones de la CCD. On crée une source lumineuse de grande taille, multispectrale, observée de près par les 7 fibres optiques. Lorsque l'on sélectionne l'affichage 'CCD image' dans le mode 'Real Time Display', on voit apparaître à l'écran une fenêtre représentant les 512*512 pixels de la CCD, avec l'image des 7 fibres optiques. Cette fenêtre laisse supposer le repérage des pixels (X,Y) présentés sur la figure D.10. La fenêtre 'Area List' demande pour chaque zone les valeurs de (X_{start} , width, Y_{start} , height) où X_{start} est le premier X que l'on fixe toujours à 1, 'width' est la largeur de la zone que l'on fixe toujours à 512, Y_{start} est le premier Y de la zone (à repérer), et 'height' est la hauteur de la zone que l'on fixe à 30 d'après l'image de la figure D.10. Le bug de Spectramax intervient lors du repérage du premier Y de la zone : Y_{start} . Pour bien renseigner ce champ, il faut définir $Y' = 512 - Y$. Cette variable de position vaut donc 1 en bas de l'image et 512 en haut. Il faut donner à Y_{start} la valeur de Y' en bas de la zone considérée. Par exemple, sur la figure D.10, la zone tout en bas de l'image est bornée par les lignes $Y=386$ et $Y=416$. Ceci correspond aux valeurs Y' de 96 et 116. La valeur de Y_{start} à indiquer est la plus basse, c'est-à-dire 96. Là réside le bug de Spectramax. Finalement, on définit dans la fenêtre 'Area List' les sept zones avec les valeurs spécifiées dans le tableau D.4. Ces définitions sont enregistrées dans le

fichier « C:\spectramax\lauOK.arl » où l'extension arl signifie 'AReas List'. Les zones 1 et 7 sont donc respectivement en bas et en haut de l'image de la [figure D.10](#).

N° zone	X start	Width	Y start	Height
1	1	512	96	30
2	1	512	130	30
3	1	512	200	30
4	1	512	234	30
5	1	512	269	30
6	1	512	303	30
7	1	512	338	30

Tableau D.4 : liste des zones de la CCD.

Enfin, lors d'une acquisition, Spectramax fournit des spectres qu'il appelle 'trac' et numérote de 1 à 7 pour 7 zones. Il faut faire le lien entre les numéros de 'trac', de zone sur la CCD, de fibre optique, de porte-fibre 'PFR' et de logement dans l'arc de réception 'logAR'. Les liens sont présentés dans le [tableau D.5](#). A la fin de ces réglages, la pieuvre, le coupleur à miroir, la caméra CCD et le logiciel sont réglés de manière à recueillir et identifier un signal optimal pour chaque fibre avec l'association résumée dans la et la [figure D.11](#).

LogAR N°	-3	-2	-1	0	1	2	3
PFR N°	1	2	3	4	5	6	7
Fibre N°	2	3	5	6	7	8	9
Zone N°	1	2	3	4	5	6	7
Trac N°	7	6	5	4	3	2	1

Tableau D.5 : Association de tous les éléments intervenant en détection pour l'identification du signal enregistré par Spectramax.

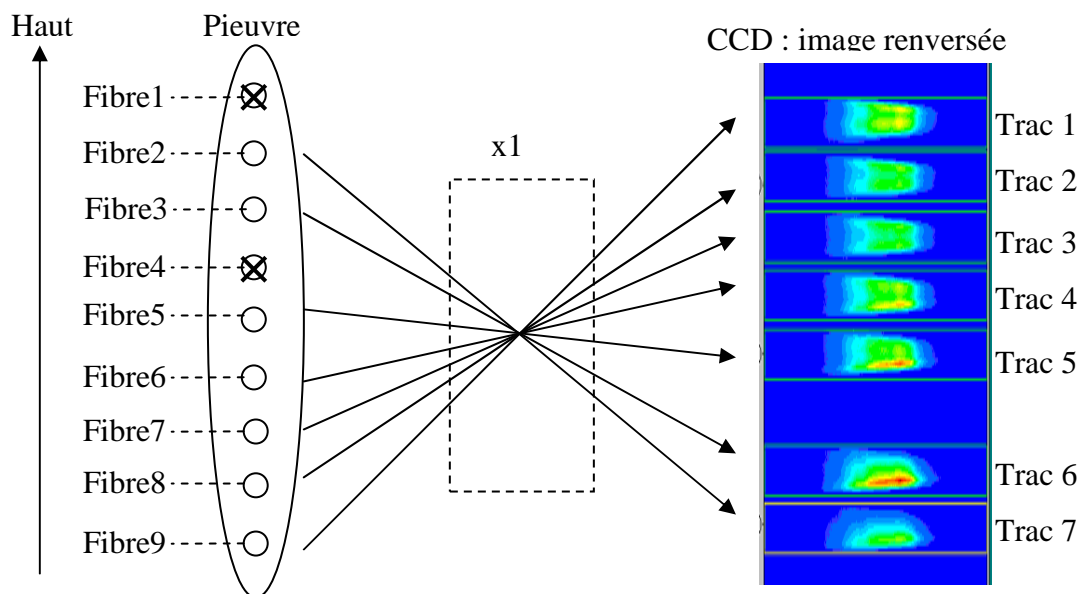


Figure D.11 : Association des fibres optiques de réception et des 'trac' de Spectramax.

3. Géométrie des faisceaux lumineux

La géométrie des faisceaux lumineux détermine la taille de l'objet étudié. Elle dépend du montage optique en émission et en réception. Dans les deux cas, une lentille convergente (diamètre 10 mm et focale 15 mm) se loge dans un porte-fibre. Elle est fixée d'un côté par une butée creusée dans le porte-fibre et de l'autre par une bague de blocage. Une fibre optique peut être translaturée suivant l'axe optique de la lentille. En changeant la distance fibre-lentille, on change la géométrie des faisceaux lumineux.

3.1. Emission

La fibre optique transmet la lumière de la source vers la lentille convergente pour éclairer l'échantillon. Pour la lentille, l'objet est la sortie de la fibre. Suivant la distance fibre-lentille, l'image peut se former à l'infini (faisceau parallèle) ou bien sur l'échantillon (conjugaison). Pour obtenir un faisceau parallèle (figure D.12), la distance fibre-lentille doit être égale à la focale de la lentille, soit 15 mm. Calculons le diamètre du faisceau parallèle émis. Le coeur de la fibre faisant 600 µm de diamètre, il sera assimilé à un objet ponctuel. La lumière sortant de la fibre se répartit dans un cône de demi-angle au sommet α . L'ouverture numérique (ON) de la fibre est par définition $\sin\alpha$. L'ouverture numérique de la fibre vaut 0,22 et α vaut environ 0,22 rad, soit 13°. On en déduit 7 mm pour le diamètre du faisceau parallèle. Le diamètre de la lentille étant de 10 mm, il n'est pas un facteur limitant. La bague de blocage, quant à elle, laisse une ouverture de 8 mm, ce qui est juste suffisant.

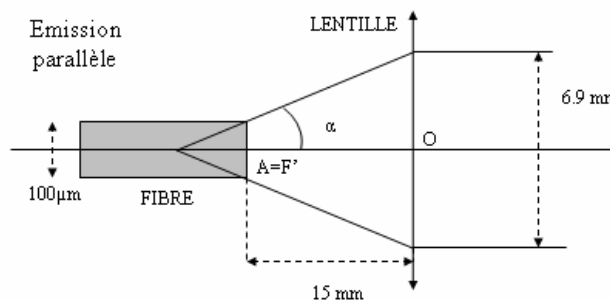


Figure D.12 : Schéma du montage en émission d'un faisceau parallèle

Pour avoir conjugaison (figure D.13) entre l'image A' (sur l'échantillon) et l'objet A (sortie de la fibre), il faut modifier la distance lentille-fibre. La relation de conjugaison en optique géométrique donne la valeur de cette distance :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{OF'} \quad \text{Eq. D.1}$$

où O est le centre de la lentille et OF' sa focale. On a $OA' = 246$ mm (O est à 6 mm de la sortie du porte-fibre et ce dernier est à 240 mm du centre du goniomètre) et $OF' = 15$ mm d'où l'on déduit $OA = 16$ mm. L'objet AB est le coeur de la fibre d'émission qui fait 0,6 mm de diamètre. La taille de l'image $A'B'$ se formant sur l'échantillon est donnée par :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA} \quad \text{Eq. D.2}$$

On trouve $A'B' = 9,2$ mm. En pratique, on observe au nadir une tache lumineuse dont le diamètre est compris entre 9 mm et 10 mm, avec un halo de 15 mm environ.

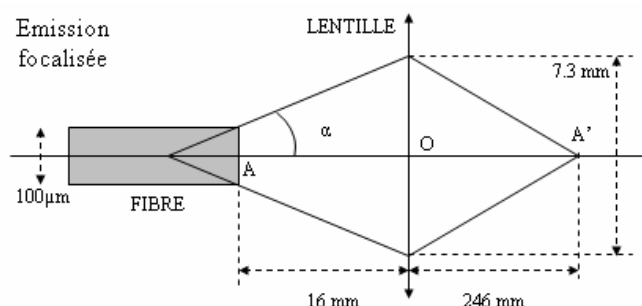


Figure D.13 : Schéma du montage pour l'émission d'un faisceau focalisé sur l'échantillon.

3.2. Détection

Le montage en détection est pratiquement le même qu'en émission. Dans la configuration parallèle, les résultats pour l'émission sont valables en détection et le diamètre des faisceaux parallèles fait 7 mm. Cela se vérifie expérimentalement en éclairant l'optique de réception en sens inverse : au niveau du spectromètre, on éclaire la pieuvre des fibres optiques de détection et on observe alors des faisceaux parallèles éclairant l'échantillon. Leur diamètre est estimé à 5 mm (à l'oeil nu). La différence avec le calcul précédent peut s'expliquer par l'inclinaison des rayons en entrée et en sortie de la fibre.

Dans la configuration focalisée, la distance entre le détecteur et l'échantillon est différente de celle entre la source et l'échantillon. On a maintenant avec les notations de la figure D.13 : $OA = 106$ mm, d'où $OA' = 17,5$ mm. Le diamètre du faisceau en O est de 7,9 mm. La fibre en détection a un coeur de $100 \mu\text{m}$. C'est donc la taille de l'image $A'B'$ qui correspond à un objet observé AB sur l'échantillon. On déduit la taille de AB comme précédemment : $AB = 0,6$ mm. En éclairant l'optique de détection en sens inverse, on observe bien 7 taches lumineuses. Pour un faisceau perpendiculaire au plan de l'échantillon, le diamètre de la tache est compris entre 1 et 2 mm. Il n'est pas possible de distinguer nettement un disque plus lumineux et un halo l'entourant.

3.3. Avantages et inconvénients des configurations parallèle ou conjuguée

La figure D.14 présente les deux configurations. Le schéma est issu de Nicodemus *et al.*, (1977) qui font une étude poussée du problème ici résumé pour l'optique de détection. Dans la configuration parallèle, tous les points de l'échantillon sont observés sous le même angle solide mais des rayons provenant d'une zone autre que celle à étudier peuvent pénétrer dans l'optique. dans la configuration conjuguée, tous les rayons pénétrant dans l'optique sont issus de l'échantillon, mais les différents points sont observés sous des angles solides différents.

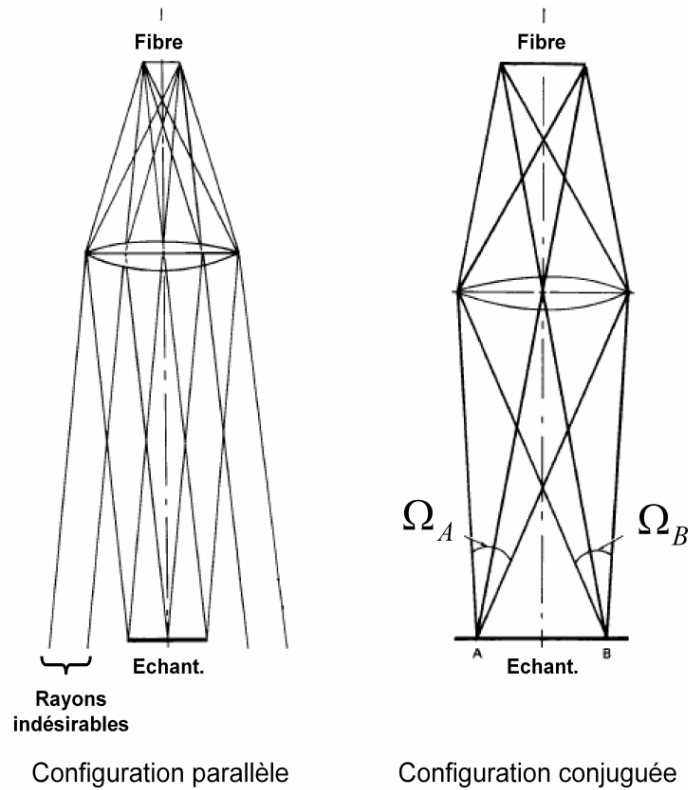


Figure D.14 : Configuration parallèle et conjuguée en détection (d'après Nicodemus *et al.*, 1977).

3.4. Angles solides de la source et des détecteurs

Considérons un point M sur l'échantillon et calculons l'angle solide sous lequel il voit un disque de diamètre d à une distance L (figure D.15). La sphère de rayon L et le disque de diamètre d ont pour surface $4\pi L^2$ et $\pi(d/2)^2$ respectivement. L'angle solide sous lequel on voit le disque depuis le point M est :

$$\Omega = \frac{\pi(d/2)^2}{4\pi L^2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \quad \text{Eq. D.3}$$

La source et le détecteur étant respectivement à une distance de 246 mm et 106 mm du centre de l'échantillon et le diamètre de leurs diaphragmes valant 8 mm, on trouve pour les angles solides $8 \cdot 10^{-4}$ sr (source) et $4,5 \cdot 10^{-3}$ sr (détecteur). Ces valeurs représentant moins de 1/1000 des directions de l'hémisphère, plusieurs milliers de mesures en réflexion seraient donc nécessaires pour la couvrir complètement.

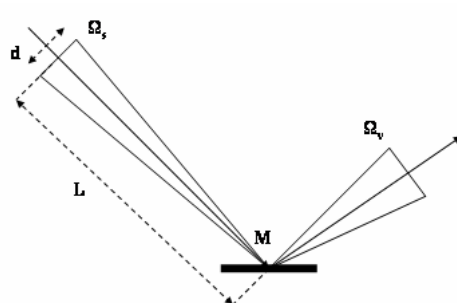


Figure D.15 : Schéma pour le calcul des angles solides.

4. Intercalibration des détecteurs

Cette intercalibration est nécessaire afin de pouvoir comparer les signaux des sept différents détecteurs. On entend par détecteur l'ensemble lentille, fibre, porte-fibre puis tout le circuit jusqu'au logiciel. Tout d'abord il faut que chaque détecteur soit calibré spectralement. On effectue ensuite une mesure où une lampe émettant un spectre continu éclaire le Spectralon. On suppose que la lampe est stable dans le temps. Chacun des sept détecteurs est placé à tour de rôle dans le même logement de l'arc de réception. On enregistre donc sept spectres qui devraient être identiques si les détecteurs l'étaient. Calculons la moyenne sur les détecteurs des spectres enregistrés $f_i(\lambda)$:

$$f_{moy}(\lambda) = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 f_i(\lambda) \quad \text{Eq. D.4}$$

Le facteur d'intercalibration est le rapport de chaque spectre à la moyenne :

$$I_i(\lambda) = \frac{f_i(\lambda)}{f_{moy}(\lambda)} \quad \text{Eq. D.5}$$

Idéalement ce rapport est complètement indépendant de la longueur d'onde. En pratique c'est la moyenne spectrale de $I_i(\lambda)$ qui donne le facteur d'intercalibration.

5. Repérage des directions d'éclairement et d'observation sur le goniomètre

Les trois principaux éléments mécaniques sont l'arc d'émission, l'arc de réception et le porte-échantillon. Ils fixent la configuration de mesure. Au final, les directions d'éclairement et d'observation de l'échantillon devront être précisées sous la forme d'angles du système sphérique usuel. Pour cela, la méthode consiste à numérotter les positions des parties mobiles, calibrer chaque position et établir la relation de passage avec les angles sphériques.

5.1. La mécanique parfaite

Le concept de mécanique parfaite est utile pour raisonner sur l'appareil en négligeant les incertitudes liées aux défauts mécaniques. L'axe principal de l'appareil est vertical. C'est l'axe de rotation de l'arc d'émission (AE) et du porte-échantillon (PE). L'AE et l'arc de réception (AR) sont percés de trous cylindriques accueillant la source ou les détecteurs. Les axes de ces trous doivent concourir en un point qui est le centre du goniomètre. Le centre du goniomètre doit être sur son axe principal. Le centre de l'échantillon étudié doit correspondre avec le centre du goniomètre. Pour le vérifier, il faut éclairer l'optique de détection en sens inverse et visualiser l'intersection des faisceaux lumineux avec le plan de l'échantillon.

5.2. Numérotation des positions des éléments mécaniques

Les éléments mécaniques peuvent tous être fixés dans diverses positions assurant la reproductibilité d'une configuration de mesure. Il faut tout d'abord numéroter ces positions.

Numérotation des positions du PE. Le PE peut tourner autour de l'axe principal du goniomètre. Une vis solidaire de l'AE permet de bloquer le PE et ainsi solidariser ces deux éléments. Le PE dispose de 18 logements pour cette vis, assurant une position de blocage reproductible. Ces 18 logements sont numérotés de 0 à 17 sur le PE. Ils se répartissent environ tous les 20° entre 0° et 360° . En position 0, le plan du PE est presque perpendiculaire à celui de l'AE. La variable associée à cette position est pos_{PE} . Elle est entière, comprise entre 0 et 17, et présentée ci-dessous.

Numérotation des positions de l'AE. L'AE peut tourner autour de l'axe du goniomètre, entraînant avec lui le PE. Une vis solidaire de l'AE bloque cette rotation en s'enfonçant dans le socle du goniomètre solidaire de l'AR. Pour la reproductibilité de ce positionnement, le socle est percé de 36 trous sur 360° soit un trou tous les 10° . Ces trous sont numérotés de 0 à 35. La variable associée est pos_{AE} (figure D.16). Il y a 36 positions mais la présence de l'arc de réception en interdit trois : la position 0 est les deux arcs seraient confondus, ainsi que les positions adjacentes 35 et 1. Il reste donc 33 positions possibles de mesure.

Numérotation des logements dans les arcs d'émission et réception. On exploite 7 logements pour chacun des deux arcs : un logement central et trois couples de part et d'autre. Ces logements sont numérotés $\{-3 ; -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 ; 3\}$ (figure D.16). Les variables sont log_{AE} et log_{AR} .

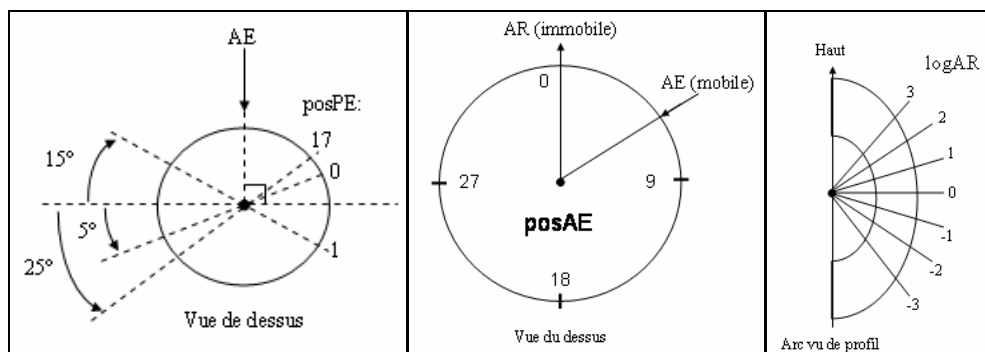


Figure D.16 : Numérotation des positions de la partie mécanique.

5.3. Calibration des positions angulaires des éléments mécanique

Une fois numérotées, les positions doivent être repérées par des angles calibrés.

Calibration de la position de l'AE. On se place au centre O du goniomètre. Soit a_{AE} l'angle entre la direction de l'AR et celle de l'AE (figure D.17). Cet angle est nul lorsque les deux arcs sont confondus. Vu de dessus, il est compté positivement dans le sens des aiguilles d'une montre. Il appartient à $[0 ; 360^\circ[$. La calibration est faite lors de la construction du goniomètre et donne en degrés : $a_{AE} = 10^\circ * pos_{AE}$. Les valeurs de a_{AE} sont reportées sur le socle du goniomètre dans l'intervalle $[-170^\circ ; 180^\circ]$ en retranchant 360° aux valeurs supérieures à 180° .

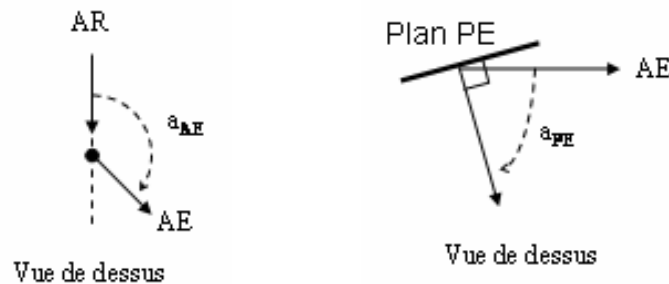


Figure D.17 : Repérage de la position de l'arc d'émission (AE).

Calibration de la position du PE. Soit a_{PE} l'angle entre le vecteur issu du centre du PE dirigé vers le centre de l'AE et le vecteur normal au plan du PE, dirigé vers le demi-espace de l'AE. a_{PE} appartient à $[0^\circ ; 360^\circ[$. Vu du dessus, a_{PE} est compté positif dans le sens des aiguilles d'une montre (figure D.17). En position 0, le plan du PE devrait être perpendiculaire à celui de l'AE. Il subsiste cependant un défaut d'angle d_{PE} . Ce dernier est compté positif comme a_{PE} . Lorsque l'on est derrière le porte échantillon et que l'on regarde vers l'arc d'émission, le socle du goniomètre étant en dessous, la normale au plan du porte échantillon pointe à gauche du plan de l'arc d'émission. d_{PE} est donc négatif. La calibration à partir de mesures 2003-2004 donne $d_{PE} = -5^\circ$. Pour connaître les angles entre le plan de l'AE et celui du porte échantillon, on met un miroir comme échantillon. La calibration donne avec a_{PE} et d_{PE} en degrés : $a_{PE} = 20^\circ * pos_{PE} + d_{PE}$ avec $d_{PE} = -5^\circ$ et $a_{PE} = a_{PE} + 360^\circ$ si $a_{PE} < 0$. Rappelons qu'en position 0 on a $a_{PE} < 0$.

Calibration des logements sur les arcs. Soit b_l l'angle entre le vecteur issu du centre du PE allant vers le logement central et le vecteur issu du centre du PE allant vers le logement considéré. b_l est compté positif pour les logements vers le haut et négatif pour ceux vers le bas. Les indices 'AE' et 'AR' indiquent si l'on considère l'arc d'émission ou celui de réception. Dans tous les cas, la calibration est faite lors de la construction du goniomètre et donne en degrés : $b_l = 20^\circ * log$.

5.4. Calcul des positions angulaires par rapport à l'échantillon

Il faut définir un repère lié à l'échantillon puisque c'est par rapport à lui que l'on veut connaître les angles (figure D.18). Soient O un point confondu avec le centre de l'échantillon,

$(0; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$ un repère orthonormé direct lié à l'échantillon. \vec{e}_x est dirigé du centre de l'échantillon vers le haut du goniomètre. \vec{e}_z est la normale à l'échantillon, dirigée vers le demi-espace du rayonnement incident. \vec{e}_y se déduit du fait que le trièdre soit direct. \overline{OM} un vecteur unitaire d'éclairage ou d'observation, de O vers la source ou le détecteur. H point projection de M dans sur le plan $(0; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$.

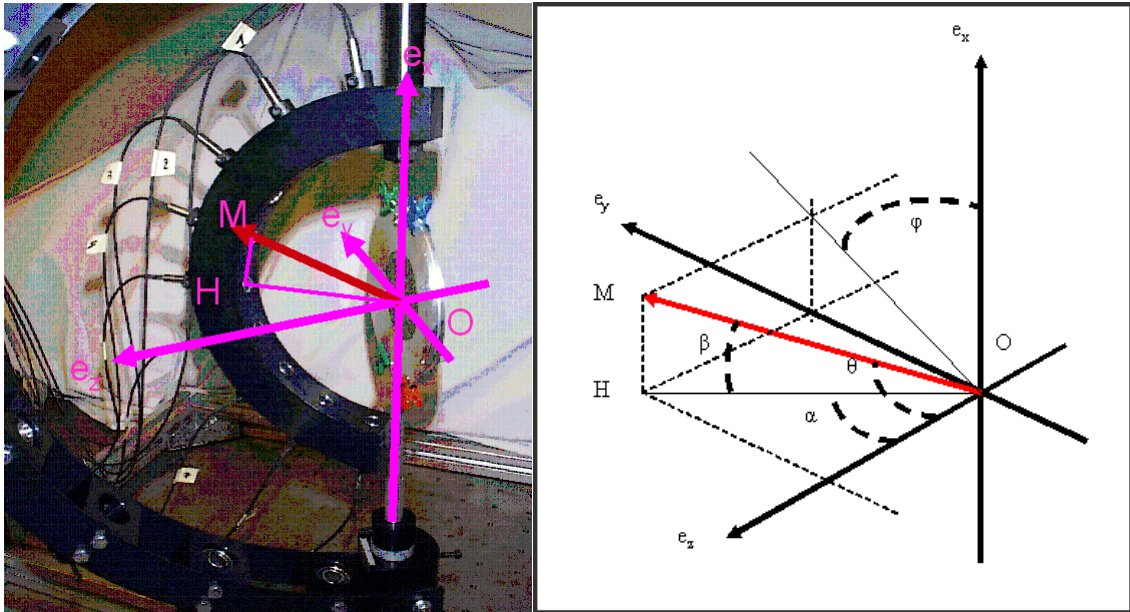


Figure D.18 : Photo (à gauche) et schéma (à droite) du goniomètre.

Il faut maintenant définir et expliciter les angles repérant la position des arcs et des logements par rapport à l'échantillon. Les angles prendront un indice 's' pour 'solar' pour la direction d'éclairage et 'v' pour 'view' pour la direction d'observation.

Définition du couple (α, β) : α est l'angle entre les vecteurs \vec{e}_z et \overline{OH} . α appartient à $[0; 2\pi]$. Il est nul lorsque ces deux vecteurs sont confondus. Vu de dessus, il est compté positivement dans le sens des aiguilles d'une montre. β est l'angle entre les vecteurs \overline{OH} et \overline{OM} . Il est compris dans $[-\pi/2; \pi/2]$. Il est positif lorsque \overline{OM} pointe vers le haut. Sur la figure D.18, α vaut $(\pi/180) * 30^\circ$ et β vaut $(\pi/180) * 20^\circ$.

Ecriture des couples (α_s, β_s) et (α_v, β_v) (en radians) : il faut écrire ces angles en fonction de ceux introduits pour le repérage des éléments mécaniques. On a (en radians) :

$$\begin{cases} \alpha_s = (360^\circ - a_{PE})(\pi/180) \\ \beta_s = b_{IAE} (\pi/180) \\ \alpha_v = (360^\circ - S_a)(\pi/180) \\ \beta_v = b_{IAR} (\pi/180) \end{cases} \quad \text{Eq. D.6}$$

avec en degrés : $S_a = a_{AE} + a_{PE}$ et $S_a = S_a - 360^\circ$ si $S_a \geq 360^\circ$. Il faut maintenant calculer les positions d'éclairement et d'observation dans un système usuel comme les coordonnées sphériques.

Définition des angles sphériques (θ, φ) : ils doivent couvrir tout l'espace. θ est l'angle entre le vecteur normal à l'échantillon \vec{e}_z et \vec{OM} . Il appartient à $[0; \pi]$. Il est inférieur à $\pi/2$ dans le demi-espace de l'AE. φ est l'angle des vecteurs \vec{e}_x et \vec{OJ} . Le point J est la projection de M sur le plan de l'échantillon $(0; \vec{e}_x; \vec{e}_y)$. φ appartient à $[0; 2\pi[$ et vaut 0 ou π dans le plan $(0; \vec{e}_x; \vec{e}_z)$, 0 si $x > 0$ et π si $x < 0$.

Conversion des angles (α, β) aux (θ, φ) : il faut exprimer les angles (θ, φ) en fonction de (α, β) . Pour cela on exprime les coordonnées cartésiennes du vecteur \vec{OM} (unitaire) dans le repère $(0; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$ en fonction de (α, β) :

$$\begin{cases} x = \sin \beta \\ y = \cos \beta \sin \alpha \\ z = \cos \beta \cos \alpha \end{cases} \quad \text{Eq. D.7}$$

Ensuite on exprime (x, y, z) en fonction de (θ, φ) :

$$\begin{cases} x = \sin \theta \cos \varphi \\ y = \sin \theta \sin \varphi \\ z = \cos \theta \end{cases} \quad \text{Eq. D.8}$$

pour obtenir enfin les angles (θ, φ) :

$$\begin{cases} \theta = \arccos(z) \\ \varphi = \arctan(y/x) \end{cases} \quad \text{Eq. D.9}$$

si x est différent de 0. La fonction 'arccos' réalise une bijection de $[-1; 1]$ dans $[\pi; 0]$. La première équation est donc valable pour tout z . Par contre 'arctan' réalise une bijection de $]-\infty; +\infty[$ dans $[-\pi/2; \pi/2]$ alors que φ doit appartenir à $[0; 2\pi[$. On est donc amené à distinguer quatre cas différents : 1) si $x > 0$ alors $\varphi = \arctan(y/x)$; si $\varphi < 0$ alors $\varphi = \varphi + 2\pi$; 2) si $x < 0$ alors $\varphi = \pi + \arctan(y/x)$; 3) si $x = 0$ et $y > 0$ alors $\varphi = \pi/2$; 4) si $x = 0$ et $y < 0$ alors $\varphi = 3\pi/2$. Un exemple pour des valeurs remarquables est donné dans le [tableau D.6](#).

α	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
β	0	0	0	0
θ	0	$\pi/2$	π	$\pi/2$
φ	0	$\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$

Tableau D.6 : correspondance entre les angles (α, β) du goniomètre et les angles sphériques usuels (θ, φ) .

Annexe E : Réflexion spéculaire sur une surface rugueuse

1. Description statistique d'une surface à deux dimensions

Nous souhaitons calculer la distribution des inclinaisons d'une surface décrite statistiquement par la distribution de ses hauteurs et sa fonction de corrélation. Beckmann et Spizzichino (1987) traitent le problème dans un espace à deux dimensions et pour une distribution gaussienne des hauteurs, ce qui est reproduit ici.

Soit dans un espace à deux dimensions une surface décrite par sa hauteur $Z = f(x)$. La hauteur moyenne est nulle et la distribution de $P(Z)$ est une gaussienne normalisée à 1 :

$$P(Z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left(-Z^2/2\sigma_z^2\right) \quad \text{Eq. E.1}$$

La surface est aussi caractérisée par son coefficient d'autocorrélation $C(\tau)$, ou fonction de corrélation normalisée :

$$C(\tau) = \exp\left(-\tau^2/T^2\right) \quad \text{Eq. E.2}$$

où $\tau = Z_2 - Z_1$ et T est un paramètre. La fonction $C(\tau)$ est associée à la fonction de corrélation $B(\tau)$ telle que :

$$B(\tau) = \sigma^2 \exp\left(-\tau^2/T^2\right) \quad \text{Eq. E.3}$$

Les pentes ζ sont définies par $\zeta = dZ/dx$ et leur inclinaison α par $\tan \alpha = \zeta$. D'après la théorie des processus stochastiques, la distribution de la dérivée d'un processus gaussien est encore une gaussienne. Dans notre cas, la distribution $w(\zeta)$ des pentes sera donc une gaussienne dont la moyenne et la variance se déduisent de $B(\tau)$ (voir Beckmann et Spizzichino, 1987) :

$$w(\zeta) = \frac{T}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{T^2 \zeta^2}{4\sigma^2}\right) \quad \text{Eq. E.4}$$

Ce qui s'écrit en posant $m = \sigma\sqrt{2}/T$:

$$w(\zeta) = \frac{1}{m\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{m}\right)^2\right) \quad \text{Eq. E.5}$$

La distribution $w(\zeta)$ est normalisée à 1. Pour obtenir la distribution des inclinaisons $D(\alpha)$, il ne reste plus qu'à opérer le changement de variable :

$$w(\zeta)d\zeta = D(\alpha)d\alpha \quad \text{Eq. E.6}$$

Comme $d\alpha/\cos^2 \alpha = d\zeta$, on a :

$$D(\alpha) = \frac{1}{m\sqrt{2\pi} \cos^2 \alpha} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\tan \alpha}{m}\right)^2\right) \quad \text{Eq. E.7}$$

Cette distribution des inclinaisons des orientations de la surface a inspiré de nombreux auteurs comme [Cook et Torrance \(1981\)](#). Elle est proche de l'[Eq. 3.19](#) utilisée pour la modélisation des BRDF des feuilles. Le paramètre m de l'[Eq. E.7](#) correspond au paramètre σ de l'[Eq. 3.19](#). La différence entre les deux expressions réside dans l'exposant "2" ou "4" du terme $\cos \alpha$, et dans la constante normalisatrice $m\sqrt{2\pi}$ ([Eq. E.7](#)) ou $c(\sigma)$ ([Eq. 3.19](#)).

2. Lien entre le modèle de BRDF et celui Bréon (1993)

Le modèle présenté dans [Bréon \(1993\)](#) s'inspire de [Cox et Munk \(1954\)](#). C'est un modèle pour la réflexion spéculaire à la surface de l'océan validé par les nombreuses applications dont il a fait l'objet ([Bréon et Henriot, 2006](#)). L'espace considéré n'est plus à deux mais à trois dimensions.

2.1. Repérage des facettes en fonction de leur pente ou de l'orientation de leur normale

L'objectif est de donner la relation de passage entre la pente d'une facette et l'orientation de sa normale. La surface est décrite par sa hauteur Z en fonction de la position sur le plan moyen $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y)$:

$$Z = f(x, y) \quad \text{Eq. E.8}$$

On appelle 'facette' en (x, y) la surface infinitésimale tangente à $Z = f(x, y)$. Les pentes de la facette suivant \vec{e}_x et \vec{e}_y sont :

$$\begin{aligned} Z_x &= \partial f / \partial x \\ Z_y &= \partial f / \partial y \end{aligned} \quad \text{Eq. E.9}$$

elles appartiennent à $[-\infty; +\infty]$. La pente de la facette est définie par :

$$\zeta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2} \quad \text{Eq. E.10}$$

elle appartient à $[0; +\infty]$. Soit \vec{H} la normale à la facette repérée par un angle zénithal α appartenant à $[0; \pi/2]$ et un angle azimutal ϕ appartenant à $[0; 2\pi]$. Dans le repère $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$, le vecteur \vec{H} s'écrit :

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \alpha \\ \sin \phi \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Eq. E.11}$$

Le couple (α, ϕ) peut se déduire des pentes (Z_x, Z_y) . Pour cela rappelons que les vecteurs \vec{A} et \vec{B} tangents à la surface respectivement dans les directions \vec{e}_x et \vec{e}_y peuvent s'écrire :

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ Z_x \end{pmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ Z_y \end{pmatrix} \quad \text{Eq. E.12}$$

La normale \vec{H} devant être unitaire et perpendiculaire aux vecteurs \vec{A} et \vec{B} , on déduit son expression :

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} -Z_x / \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2 + 1} \\ -Z_y / \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2 + 1} \\ 1 / \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2 + 1} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. E.13}$$

En comparant les deux expressions de \vec{H} on déduit :

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \zeta \\ \tan \phi &= Z_y / Z_x \end{aligned} \quad \text{Eq. E.14}$$

La fonction tangente étant une bijection de $[-\pi/2; \pi/2]$ sur $[-\infty; +\infty]$, il faut distinguer différents cas des valeurs de (Z_x, Z_y) pour obtenir ϕ dans $[0; 2\pi]$.

2.2. Description statistique de la surface

La proportion de plan moyen ayant une pente (Z_x, Z_y) dans l'intervalle $(Z_x \pm dZ_x/2; Z_y \pm dZ_y/2)$ vaut $P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y$. Cette même proportion peut s'écrire en fonction de (α, ϕ) et vaut :

$$P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi)) d\alpha d\phi = J(\alpha, \phi) P(Z_x; Z_y) dZ_x dZ_y \quad \text{Eq. E.15}$$

où $J(\alpha, \phi)$ est le jacobien de la transformation :

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctan\left(\sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}\right) \\ \phi &= \arctan\left(Z_y/Z_x\right)\end{aligned}\quad \text{Eq. E.16}$$

égal à :

$$J(\alpha, \phi) = \left| \frac{\partial \alpha}{\partial Z_x} \frac{\partial \phi}{\partial Z_y} - \frac{\partial \alpha}{\partial Z_y} \frac{\partial \phi}{\partial Z_x} \right| = \frac{\cos^3 \alpha}{\sin \alpha} \quad \text{Eq. E.17}$$

On a finalement :

$$P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi)) \frac{\sin \alpha d\alpha d\phi}{\cos^3 \alpha} = P(Z_x; Z_y) dZ_x dZ_y \quad \text{Eq. E.18}$$

Bréon donne plusieurs expressions possibles pour $P(Z_x, Z_y)$. La première ne tient compte que d'une rugosité σ :

$$P(Z_x; Z_y) \approx \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{\sigma^2}\right) \quad \text{Eq. E.19}$$

où $\zeta = \sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}$. La seconde tient compte de la rugosité suivant deux directions u et v . C'est une série de Gram-Charlier dont les premiers facteurs sont :

$$P(Z_u; Z_v) \approx \frac{1}{2\pi \sigma_u \sigma_v} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z_u^2}{\sigma_u^2} + \frac{Z_v^2}{\sigma_v^2}\right)\right) \times (\dots) \quad \text{Eq. E.20}$$

2.3. Calcul de la BRDF

Soit A la surface de plan moyen et $A(Z_x, Z_y)$ la surface de plan moyen correspondant à une pente (Z_x, Z_y) , on a d'après la définition de $P(Z_x, Z_y)$:

$$\frac{A(Z_x, Z_y)}{A} = P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y \quad \text{Eq. E.21}$$

La surface de plan moyen $A(Z_x, Z_y)$ vaut donc $A P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y$. Elle correspond à une surface réelle (non projetée sur le plan moyen) $B(Z_x, Z_y)$ telle que :

$$B(Z_x, Z_y) = \frac{A P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y}{\cos \alpha} \quad \text{Eq. E.22}$$

Soit U le flux lumineux incident par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation. L'éclairement E du plan moyen de la feuille vaut :

$$E = U \cos \theta_s \quad \text{Eq. E.23}$$

et l'éclairement d'une portion de surface faisant un angle θ_a avec l'incident est $E \cos \theta_a / \cos \theta_s$. Le flux Φ_i reçu par les facettes (Z_x, Z_y) dont la surface réelle vaut $B(Z_x, Z_y)$ est :

$$\Phi_i = \frac{E \cos \theta_a B(Z_x, Z_y)}{\cos \theta_s} \quad \text{Eq. E.24}$$

On introduit le facteur de Fresnel $F(\theta_a)$ et le flux réfléchi par les facettes est :

$$\Phi_r = \frac{F(\theta_a) E \cos \theta_a A P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y}{\cos \alpha \cos \theta_s} \quad \text{Eq. E.25}$$

En réécrivant en fonction de (α, ϕ) :

$$\Phi_r = \frac{F(\theta_a) E \cos \theta_a A P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi)) d\Omega_h}{\cos^4 \alpha \cos \theta_s} \quad \text{Eq. E.26}$$

où l'on a noté $d\Omega_h = \sin \alpha d\alpha d\phi$. Introduisons maintenant l'angle solide d'observation $d\Omega_v$ relié à $d\Omega_h$ par $d\Omega_h = d\Omega_v / 4 \cos \theta_a$:

$$\Phi_r = \frac{F(\theta_a) E A P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi)) d\Omega_v}{4 \cos^4 \alpha \cos \theta_s} \quad \text{Eq. E.27}$$

La luminance du plan moyen due à ce flux est :

$$L = \frac{\Phi_r}{A \cos \theta_v d\Omega_v} = \frac{F(\theta_a) E P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi))}{4 \cos^4 \alpha \cos \theta_s \cos \theta_v} \quad \text{Eq. E.28}$$

et la BRDF s'en déduit :

$$BRDF = \frac{L}{E} = \frac{F(\theta_a) P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi))}{4 \cos^4 \alpha \cos \theta_s \cos \theta_v} \quad \text{Eq. E.29}$$

Notons que le Bidirectional Reflectance Factor (BRF) du plan moyen est simplement :

$$BRF = \pi BRDF \quad \text{Eq. E.30}$$

Ce sont les expressions de [Bréon \(1993\)](#).

2.4. Lien avec notre modèle

Nous allons calculer la même quantité suivant l'approche de Bréon puis suivant la nôtre. Cette quantité est la proportion de la surface de plan moyen qui correspond à une pente (Z_x, Z_y) . Chez Bréon elle s'écrit :

$$\frac{A(Z_x, Z_y)}{A} = P(Z_x, Z_y) dZ_x dZ_y \quad \text{Eq. E.31}$$

ou encore en fonction (α, ϕ) :

$$\frac{A(Z_x, Z_y)}{A} = P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi)) \frac{\sin \alpha d\alpha d\phi}{\cos^3 \alpha} \quad \text{Eq. E.32}$$

Pour l'écrire avec notre approche il faut calculer $A(Z_x, Z_y)$. Nous modélisons la surface par un ensemble de b facettes parmi lesquelles la quantité $b(\alpha, \phi)$ est orientée dans (α, ϕ) . On a :

$$\frac{b(\alpha, \phi)}{b} = D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi \quad \text{Eq. E.33}$$

d'où $b(\alpha, \phi) = b D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi$. Chaque facette ayant la surface A_f , leur surface réelle est $A_f b D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi$. Leur surface projetée sur le plan moyen, $A(Z_x, Z_y)$, vaut donc $\cos \alpha A_f b D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi$ et finalement la quantité recherchée vaut :

$$\frac{A(Z_x, Z_y)}{A} = \frac{\cos \alpha A_f b D(\alpha, \phi) \sin \alpha d\alpha d\phi}{A} \quad \text{Eq. E.34}$$

En comparant les deux expressions de $A(Z_x, Z_y)/A$ on obtient :

$$\frac{P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi))}{\cos^4 \alpha} = \frac{b A_f D(\alpha, \phi)}{A} \quad \text{Eq. E.35}$$

Sans le facteur d'atténuation géométrique, notre modèle s'écrit :

$$BRDF = \frac{F(\theta_a) D(\alpha, \phi) b A_f}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v A} \quad \text{Eq. E.36}$$

En remplaçant on obtient :

$$BRDF = \frac{F(\theta_a) P(Z_x(\alpha, \phi); Z_y(\alpha, \phi))}{4 \cos^4 \alpha \cos \theta_s \cos \theta_v} \quad \text{Eq. E.37}$$

Ce qui est bien l'expression de [Bréon \(1993\)](#).

Annexe F : Electromagnétisme et optique

1. Rappels sur la réflexion et la réfraction à un interface diélectrique

Considérons l'interface plan entre deux diélectriques d'indices de réfraction n_1 et n_2 . L'onde incidente se propage avec un angle i_1 du milieu 1 vers le milieu 2 et on définit l'indice relatif $n = n_2/n_1$. Si $n > 1$, alors le rayon réfracté existe toujours avec un angle i_2 tel que :

$$\sin i_1 = n \sin i_2 \quad \text{Eq. F.1}$$

Les facteurs de Fresnel en réflexion (r) et en transmission (t) donnent la proportion d'énergie lumineuse réfléchi et transmise à l'interface. Ces facteurs diffèrent suivant les cas de polarisation perpendiculaire (\perp) ou parallèle (\parallel) au plan d'incidence :

$$\begin{cases} r_{\perp}(i_1, n) = \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2 \\ t_{\perp}(i_1, n) = \left(\frac{b}{a}\right)\left(\frac{2a}{a+b}\right)^2 \end{cases} \quad \text{Eq. F.2}$$

$$\begin{cases} r_{\parallel}(i_1, n) = \left(\frac{na-b/n}{na+b/n}\right)^2 \\ t_{\parallel}(i_1, n) = \left(\frac{b}{a}\right)\left(\frac{2a}{na+b/n}\right)^2 \end{cases}$$

où l'on a introduit les quantités $a = \cos i_1$ et $b = n \cos i_2$. On appelle polarisation naturelle le mélange équitable des deux états de polarisation linéaire (perpendiculaire ou parallèle). Dans ce cas les facteurs de réflexion et de transmission valent :

$$\begin{aligned} r &= (r_{\perp} + r_{\parallel})/2 \\ t &= (t_{\perp} + t_{\parallel})/2 \end{aligned} \quad \text{Eq. F.3}$$

Quelle que soit la polarisation, on vérifie que :

$$r(i_1, n) + t(i_1, n) = 1 \quad \text{Eq. F.4}$$

Notons que le facteur de réflexion pour la polarisation parallèle au plan d'incidence s'annule pour une valeur particulière de i_1 appelée angle de Brewster et notée i_B telle que $\tan i_B = n$.

Si $n < 1$ alors le rayon réfracté existe pour des incidences $i_1 < i_{1,\max}$ avec $i_{1,\max} = \arcsin(n)$ (voir [tableau F.1](#)). Si $i_1 < i_{1,\max}$ alors les formules établies dans le cas $n > 1$ restent valables. Par contre, si $i_1 \geq i_{1,\max}$ alors il y a réflexion totale et quelle que soit la polarisation $r(i_1, n) = 1$ et $t(i_1, n) = 0$.

	$n > 1$		$n < 1$		
i_1	0°	90°	0°	$i_{1,\max} = \arcsin(n)$	90°
i_2	0°	$i_{2,\max} = \arcsin(1/n)$	0°	90°	réflexion totale

Tableau F.1 : Angles réfractés à l'interface en fonction de l'angle d'incidence.

On peut calculer les facteurs de réflexion et de transmission lors de la traversée d'une interface diélectrique de valeur $1/n$ connaissant ceux pour un interface de valeur n . Considérons comme précédemment deux rayons obéissant à la loi $\sin i_1 = n \sin i_2$, on a alors :

$$t(i_2, 1/n) = t(i_1, n) \quad \text{Eq. F.5}$$

d'où l'on déduit $r(i_2, 1/n) = r(i_1, n)$ puisque $r + t = 1$.

2. Interface diélectrique pour des cas particuliers de rayonnement

2.1. Rayonnement isotrope en trois dimensions

Cette partie est consacrée au calcul des facteurs de réflexion r et de transmission t à une interface en trois dimensions lorsque la luminance incidente est isotrope. Seul le calcul de t est nécessaire car $r = 1 - t$. On distingue les cas $n > 1$ (le rayon transmis existe toujours) et $n < 1$ (réflexion totale au-dessus d'un angle limite). Le second se déduit du premier.

Soit une surface S recevant le flux Φ provenant de toutes les directions de l'hémisphère supérieure. La contribution des directions comprises dans l'angle solide $d\Omega_s$ autour de (θ_s, φ_s) est $d\Phi(\theta_s, \varphi_s)$. D'après la définition de la luminance L qui ne dépend pas de (θ_s, φ_s) ici :

$$d\Phi(\theta_s, \varphi_s) = L S \cos \theta_s d\Omega_s \quad \text{Eq. F.6}$$

Sur cette portion du flux incident seule la quantité $d\Phi(\theta_s, \varphi_s) \times t(\theta_s, n)$ sera transmise. La transmission de l'interface est égale au flux transmis divisé par le flux incident, d'où :

$$t_{iso}(n) = \frac{\int t(\theta_s, n) d\Phi(\theta_s, \varphi_s)}{\int d\Phi(\theta_s, \varphi_s)} = \frac{\int t(\theta_s, n) \cos \theta_s d\Omega_s}{\int \cos \theta_s d\Omega_s} \quad \text{Eq. F.7}$$

où $d\Omega_s = \sin \theta_s d\varphi_s d\theta_s$ et l'intégrale porte sur θ de 0 à $\pi/2$ et φ de 0 à 2π .

Dans le cas où $n > 1$, le rayon réfléchi existe toujours. On pose $x = \sin^2 \theta_s$ qui réalise une bijection de $[0; \pi/2]$ dans $[0; 1]$ et l'on réécrit les facteurs de transmission (Eq. F.2) sous la forme :

$$\begin{aligned} t_{\perp}(x, n) &= \frac{4\sqrt{1-x}\sqrt{n^2-x}}{(\sqrt{1-x} + \sqrt{n^2-x})^2} \\ t_{\parallel}(x, n) &= \frac{4n^2\sqrt{1-x}\sqrt{n^2-x}}{(n^2\sqrt{1-x} + \sqrt{n^2-x})^2} \end{aligned} \quad \text{Eq. F.8}$$

Quelle que soit la polarisation considérée, on a :

$$t_{iso}(n) = \frac{2\pi \int t(x, n) dx/2}{2\pi \int dx/2} = \int_0^1 t(x, n) dx \quad \text{Eq. F.9}$$

Le calcul a été effectué par Stern (1964) en faisant une décomposition en fractions rationnelles puis en intégrant. Le résultat est :

$$\begin{aligned} t_{iso, \perp}(n) &= \frac{4(2n+1)}{3(n+1)^2} \\ t_{iso, \parallel}(n) &= \frac{4n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)^2(n^2-1)} - \frac{2n^2(n^2+1)}{(n^2-1)^2} \ln n + \frac{2n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln \frac{n(n+1)}{n-1} \end{aligned} \quad \text{Eq. F.10}$$

(pour $n > 1$)

On déduit $t_{iso}(n)$ en polarisation naturelle grâce à Eq. F.3.

Dans le cas où $n < 1$, Stern (1964) procède de la manière suivante. L'angle limite d'incidence i_{\max} au-delà duquel la transmission est nulle est tel que $\sin i_{\max} = n$ d'où $x_{\max} = \sin^2 i_{\max} = n^2$. L'intégrale à calculer est donc :

$$t_{iso}(n) = \int_0^{n^2} t(x, n) dx \quad \text{Eq. F.11}$$

où $n < 1$. En faisant le changement de variable $y = x/n^2$ et en remarquant que $t(n^2 y, n) = t(y, 1/n)$ d'après Eq. F.5, on a finalement :

$$\begin{aligned} t_{iso}(n) &= n^2 t_{iso}(1/n) \\ \text{si } n &< 1 \end{aligned} \quad \text{Eq. F.12}$$

Le facteur de transmission dans le cas où $n < 1$ peut donc se déduire de sa valeur dans le cas $n > 1$. Il est plus faible d'un facteur n^2 .

2.2. Cas d'un cône lumineux

Le calcul précédent est généralisé pour un rayonnement non nul entre les angles θ_1 et θ_2 seulement. Entre ces angles, la luminance est indépendante de la direction. Soit $t(\theta_1, \theta_2, n)$ la valeur recherchée :

$$t(\theta_1, \theta_2, n) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} t(\theta, n) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi} \quad \text{Eq. F.13}$$

Allen (1973) donne la solution. Le dénominateur vaut $\pi(\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1)$ (et non $2\pi(\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1)$ comme dans son article) et le numérateur vaut $F(\theta_2) - F(\theta_1)$ où :

$$F_{\perp}(\theta) = \frac{-2\pi}{3(n^2 - 1)} \left[(2n \cos \theta \cos \theta')^3 + (2 \sin \theta)^2 (2 \sin^4 \theta - 3(n^2 + 1) \sin^2 \theta + 6n^2) \right] \quad \text{Eq. F.14}$$

$$F_{\parallel}(\theta) = A + B$$

avec $\sin \theta = n \sin \theta'$ et :

$$A = \frac{2\pi n^2 (n^2 - 1)}{(n^2 + 1)^3} \left[U + \frac{1}{U} (n^4 + 6n^2 + 1) + 2(n^2 - 1) \log U \right]$$

$$B = \frac{2\pi n^2}{(n^2 - 1)^2} \left[\frac{U}{u} - (n^2 + 1)^2 \frac{u}{U} - 2(n^2 + 1) \log \left(\frac{U}{u} \right) \right] \quad \text{Eq. F.15}$$

$$U = (n^2 + 1)u - (n^2 - 1)$$

$$u = 1 + 2 \cos \theta \frac{(\cos \theta + n \cos \theta')}{n^2 - 1}$$

Ces formules sont utilisées dans le modèle Prospect (**Jacquemoud et Baret, 1990**) avec $\theta_1 = 0^\circ$ et $\theta_2 = 60^\circ$.

3. Couche diélectrique faiblement absorbante

Considérons une couche de matière d'indice de réfraction n_2 au sein d'un milieu d'indice n_1 . Elle est équivalente à une couche d'indice $n = n_2/n_1$ au sein d'un milieu d'indice 1. L'objectif est de calculer la réflectance R et la transmittance T de la couche. Soient r_{ij} et t_{ij} les coefficients de réflexion et de transmission des interfaces du milieu i vers le milieu j . Soit τ la proportion d'énergie transmise lors de la traversée du milieu 2. On ne précise pas la géométrie des faisceaux lumineux qui modifie l'expression de r_{12} , t_{12} , r_{21} , t_{21} et τ mais pas le résultat général. En suivant le devenir de l'énergie lumineuse sur la [Figure F.1](#), on dérive les expressions suivantes pour R et T :

$$\begin{aligned}
 R &= r_{12} + t_{12} \tau r_{21} \tau t_{21} \left(1 + (r_{21} \tau r_{21} \tau) + (\dots)^2 + \dots + (\dots)^n \right) \\
 &= r_{12} + \frac{t_{12} t_{21} r_{21} \tau^2}{1 - r_{21}^2 \tau^2} \\
 T &= t_{12} \tau t_{21} \left(1 + (r_{21} \tau r_{21} \tau) + (\dots)^2 + \dots + (\dots)^n \right) \\
 &= \frac{t_{12} t_{21} \tau}{1 - r_{21}^2 \tau^2}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. F.16}$$

où l'on a utilisé les propriétés de la somme d'une suite géométrique de raison positive plus petite que 1. L'absorption A se déduit par la relation $R + T + A = 1$. Notons que l'on retrouve la réflectance et la transmittance d'une couche non absorbante en posant dans les formules précédentes $\tau = 0$.

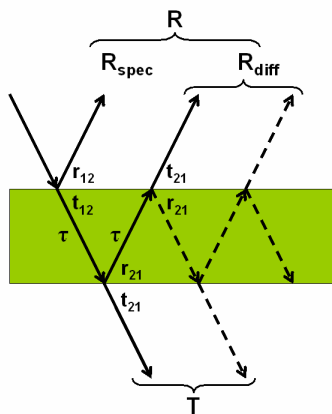


Figure F.1 : Réflectance et transmittance d'une couche.

4. Ensemble de N couches

On considère un ensemble de N couches identiques, chacune étant caractérisée par sa réflectance R et sa transmittance T . On veut calculer la réflectance R_N et la transmittance T_N des N couches. [Stokes \(1862\)](#) donne la solution :

$$\frac{R_N}{b^N - b^{-N}} = \frac{T_N}{a - a^{-1}} = \frac{1}{ab^N - a^{-1} b^{-N}}
 \tag{Eq. F.17}$$

avec :

$$a = \frac{1}{2R}(1 + R^2 - T^2 + \Delta)$$

$$b = \frac{1}{2T}(1 - R^2 + T^2 + \Delta)$$
Eq. F.18

$$\Delta = [(1 + R + T)(1 + R - T)(1 - R + T)(1 - R - T)]^{1/2}$$

Ces formules sont utilisées dans le modèle Prospect où Δ est réécrit sous la forme :

$$\Delta = [(T^2 - R^2 - 1)^2 - 4R^2]^{1/2}$$
Eq. F.19

5. Absorption dans une couche en rayonnement isotrope

Considérons une couche de matière absorbante (**Figure F.2**) avec deux interfaces transparentes. L'absorption est spécifiée par le coefficient linéique d'absorption α et la loi de Beer-Lambert décrit la diminution du flux lumineux Φ :

$$d\Phi = -\alpha\Phi(x)dx$$
Eq. F.20

d'où l'on déduit le flux en fonction de la position $\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x}$ (le coefficient d'absorption étant supposé constant). Soit D l'épaisseur de la couche et θ l'angle des rayons avec la normale à la couche. La transmission τ de la couche pour un rayon θ vaut :

$$\tau(\theta, \alpha D) = \frac{\Phi(D)}{\Phi(0)} = \exp\left(-\frac{\alpha D}{\cos \theta}\right)$$
Eq. F.21

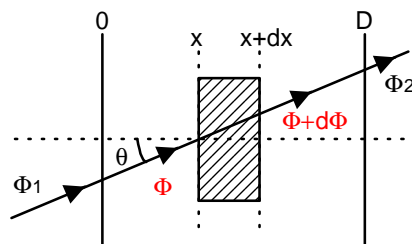


Figure F.2 : absorption dans un milieu

Calculons la transmission $\tau_{iso}(\alpha D)$ de la couche pour un rayonnement incident isotrope. Le même raisonnement que pour l'interface diélectrique amène à calculer :

$$\tau_{iso}(\alpha D) = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \tau(\theta, \alpha D) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad \text{Eq. F.22}$$

La calcul du dénominateur est direct et l'on a après intégration sur φ :

$$\tau_{iso}(\alpha D) = 2 \int_0^{\pi/2} e^{-\alpha D / \cos \theta} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad \text{Eq. F.23}$$

En opérant le changement de variable $x = \alpha D / \cos \theta$ puis en faisant deux intégrations par partie on obtient :

$$\tau_{iso}(\alpha D) = (1 - \alpha D) e^{-\alpha D} + (\alpha D)^2 \int_{\alpha D}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad \text{Eq. F.24}$$

où l'intégrale est un cas particulier de la fonction gamma incomplète $\Gamma(a, x)$ définie par :

$$\Gamma(a, x) = \int_x^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt \quad \text{Eq. F.25}$$

Cette fonction est calculable numériquement et tabulée ([Abramowitz et Stegun, 1965](#)).

Annexe G : Protocole pour la campagne de mesure Juillet 2005

Cette annexe présente le protocole utilisé en juillet 2005 pour les mesures optiques, anatomiques et biochimiques sur les feuilles. Les mesures anatomiques sont ensuite détaillées.

1. Protocole complet de mesures optiques, anatomiques et biochimiques

- Cueillette : sur le lieu de culture (identifié) on prélève une feuille (espèce identifiée) choisie pour son bel aspect. On note si c'est une feuille d'ombre ou de lumière, on la photographie avec l'appareil numérique. On l'emballage avec du sopalin humide et on met le tout dans un sachet hermétique que l'on numérote.
- Mesures optiques : au laboratoire, on choisit une feuille et on repère sur le limbe un disque de 1 cm de diamètre dépourvu de nervure, le plus plat possible. On place la feuille dans le porte échantillon de manière à éclairer ce disque. On procède aux mesures optiques.
- Mesures biochimiques (Chlorophylle) : au laboratoire, on prélève la partie du limbe où ont été faites les mesures optiques. Le prélèvement se fait avec un emporte pièce qui permet de découper proprement un disque de 14 mm de diamètre. Sur ce disque on effectue deux mesures SPAD, une avec celui de l'INRA, l'autre avec celui de l'ESE. Ensuite ce disque est mis dans un tube plastique au réfrigérateur pour conservation à -20°C. Ultérieurement aura lieu un dosage chlorophylle précis (destructif). La mesure de la teneur en chlorophylle est faite par Zoran Cerovic et Naïma Ben-Ghozlen de l'ESE à Orsay. Après extraction de la chlorophylle celle-ci est dosée par spectrométrie (mesure de l'absorbance et utilisation des coefficients de Lichtenthaler 1987 ou Porra et al. 1989).
- Mesures biochimiques (eau) : à côté du disque précédemment découpé, on reprend un disque identique en forme que l'on pèse à la balance de précision (10⁻⁴ g près) pour obtenir le poids frais (eau+matière sèche). On place ensuite ce disque à l'étuve, l'eau s'évapore. On attend plus de 24h et on mesure le poids sec. On déduit la masse d'eau.
- Conservation de la structure anatomique : sur les parties restantes de la feuille, on découpe des lanières, épaisseur de la feuille, largeur 1 ou 2 mm et longueur quelconque. Ces lanières sont mises dans la solution pour conservation biologique. Des coupes sont ensuite faites avec Thierry Deroin du MNHN (voir annexe).
- Enfin les morceaux de feuille restant sont mis à sécher dans un gros cahier.

2. Coupes de l'anatomie foliaire

Cette section présente les mesures de l'anatomie foliaire faites à la suite de la campagne de Juillet 2005 qui avait pour but de mesurer simultanément les propriétés optiques, biochimiques et anatomiques de plusieurs feuilles. L'objectif est d'obtenir des coupes transversales et paradermales du limbe foliaire. Les coupes transversales et paradermales sont respectivement perpendiculaires et parallèles au plan de la feuille (figure G.1). Le travail a été effectué grâce à

l'aide de Thierry Deroin du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN). Notons, parmi les ouvrages de référence sur l'anatomie des végétaux, celui de [Bowes \(1996\)](#) qui présente des centaines de coupes des divers organes végétaux. Quant au calcul de la proportion d'espaces d'air dans un tissu à partir de coupes transversales, une méthodologie intéressante se trouve dans [Parkhurst \(1982\)](#).

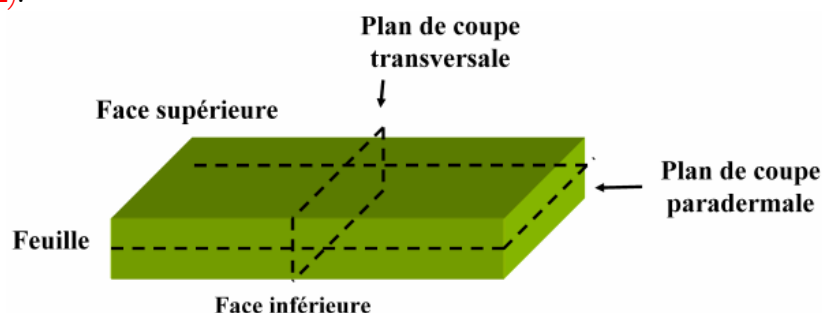


Figure G.1 : plan des coupes transversales et paradermales du limbe foliaire.

Les étapes importantes pour la réalisation des coupes sont :

1. **Prélèvement** et conservation de lanières du limbe foliaire.
2. Déshydratation des lanières et **inclusion** de paraffine.
3. Découpe des lanières, coloration des **coupes** et finalisation des lames.
4. Observation au microscope et **photographie** des coupes.

Le protocole précis est présenté dans la section suivante. Les feuilles sélectionnées pour subir ces traitements lors de la campagne de juillet 2005 sont présentées dans le [tableau G.1](#). Les échantillons conservés pourront servir à mesurer l'épaisseur du limbe.

Jour	Feuille	Prélèvement	Inclusion	Coupe	Photos
Lundi	Hêtre <i>Fagus sylvatica</i>	O	O	O	O
Mardi	Vigne <i>Vitis vinifera</i>	O	O	N	N
Mardi	Maïs <i>Zea mays</i>	O	O	N	N
Mercredi	Soja	N	N	N	N
Mercredi	Laurier <i>Prunus laurocerasus</i>	O	O	O	O
Jeudi	Fétuque	N	N	N	N
Jeudi	Noyer	N	N	N	N

Tableau G.1 : Echantillons de feuille et traitements (Oui/Non) pour observation anatomique.

2.1. Protocole pour la réalisation des coupes

Prélèvement et conservation de lanières du limbe foliaire

Sur les feuilles qui ont été utilisées pour les mesures optiques, on découpe des lanières de quelques millimètres de largeur et de un ou deux centimètres de longueur. Ces lanières sont ensuite conservées dans un tube à essai rempli de la solution suivante (pourcentages en volume) :

- 5% d'acide acétique pur « Prolabo, Acide acétique 100%, R.P NORMAPUR[™] AR, pour analyses, C₂H₄O₂, M=60.05 g/mol ».
- 5% de formaldéhyde (ou formol) « PROLABO, RECTAPUR, Formaldéhyde, en solution aqueuse à 37% p/v, stabilisé avec 10% de méthanol, CH₂O, M=30.03g/mol ».

- 90% d'éthanol à 70% « PROLABO, R.P. NORMAPUR AR, Ethanol absolu, C₂H₆O, M=46.07 g/mol ».

Pour faire 50 ml de solution, il faut donc 2,5 ml d'acide acétique pur, 2,5 ml de formol et 45 ml d'éthanol à 70%. Il faut diluer l'éthanol qui est à 100% à l'origine : 31,5 ml d'éthanol à 100% et 13,5ml d'eau distillée. Une fois dans cette solution, les échantillons peuvent être conservés plusieurs mois.

Cas particulier du maïs

La feuille de maïs peut contenir de la silice et endommager le couteau du microtome. On utilise du bifluorure d'ammonium pour retirer la silice avant de procéder à la déshydratation.

Déshydratation au butanol

Les lanières vont être placées successivement dans sept bains de plus en plus dosés en butanol. Pour 100 ml de solution, les volumes respectifs d'eau, d'éthanol 95° et de butanol sont indiqués dans le **tableau G.2**. Chaque lanière doit rester 2 ou 3 heures dans chaque bain, et un peu plus pour les derniers bains (6h dans le bain N°7).

Bain N°	Eau (%)	Ethanol 95° (%)	Butanol (%)
1	50	40	10
2	30	50	20
3	15	50	35
4	0	45	55
5, 6 et 7	0	0	100

Tableau G.2 : Proportion en volume des composés chimiques dans les sept bains de déshydratation.

Inclusion de la paraffine

Après déshydratation, les lanières sont transférées dans la paraffine filtrée en fusion. Elles prennent trois bains successifs de 4h chacun. Ensuite on coule de la paraffine autour de chaque lanière et on laisse refroidir les blocs ainsi formés (cube de ~1 cm de côté). Pour cela, on utilise un bec Bunsen qui chauffe une platine de Malassez (en S), un bécher de paraffine filtrée, des moules ou des barres de Leuckart, et une pince plate. La platine de Malassez est chauffée à une de ses extrémités, l'autre étant approximativement à température ambiante. Elle offre donc un dégradé de température en fonction de la position, et on maintient la paraffine en fusion en trouvant la bonne position. On se sert d'un support métallique et des barres de Leuckart pour former un moule dans lequel on coule la paraffine autour de la lanière. On laisse refroidir en marquant les blocs (morceau de bristol taillé par exemple, cf. **figure G.2**).



Figure G.2 : Marquage des blocs contenant les lanières des feuilles *Fagus* et de *Vitis*.

Découpage au microtome

On prépare le matériel suivant : plaque chauffante, lames, liquide d'étalement des rubans, papier noir, pinceau, diamant pour graver le verre, pinces fines, microscope de contrôle. Le liquide d'étalement des rubans est la colle de Haupt (gélatine 5 g et eau 500 ml, on laisse gonfler la gélatine dans l'eau froide pendant 1 jour, puis on fait bouillir le tout en ajoutant 75 ml de glycérine; après refroidissement, on ajoute 10 g de phénol). Sur les lames de verres on grave avec le diamant de quoi identifier les coupes qui y seront fixées.

On installe le couteau, en faisant bien attention à l'état du tranchant. Avant de découper on prépare les blocs : ils sont solides et doivent être taillés en forme de pyramide en faisant apparaître la lanière au sommet (figure G.3). Le bec Bunsen chauffe la base de la pyramide qui se liquéfie un peu et alors on colle la base contre le portoir du microtome. Le portoir vient ensuite se fixer dans la mâchoire et l'on doit régler son orientation par rapport au couteau. Pour cela, il y a trois réglages : au-dessus, sur le côté, en face. On veille à ce que le tranchant soit parallèle à la face du bloc à entamer.

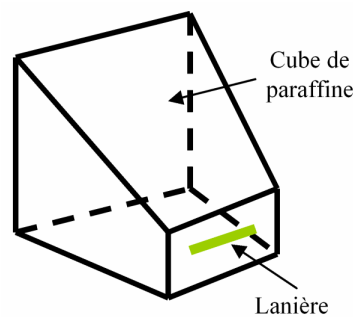


Figure G.3 : Bloc de paraffine taillé en pyramide.

On règle le microtome suivant l'épaisseur de coupe désirée. On actionne le mouvement de montée-descente du tranchant coordonné à l'avancée du bloc par une manivelle qu'il faut tourner régulièrement. Ceci produit une série de coupes, ou ruban, que l'on récupère avec un pinceau (pour les manipuler délicatement) ou bien avec une pince. On découpe le ruban en segments qui sont étalés sur la lame préalablement gravée et recouverte d'une couche de colle de Haupt (versée au flacon compte-gouttes), puis on essore. Les lames restent sur la plaque chauffante puis sont transférées sur un tiroir de l'étuve. On note sur une fiche les diverses opérations concernant le bloc (changements d'orientation, d'épaisseur, zones remarquables, etc.).

Les sections restent à l'étuve pendant un jour au moins. Ensuite on procède à la coloration. On commence par le déparaffinage (on peut s'aider de la plaque chauffante au début) : 2 bains de toluène, 2 bains d'éthanol 95°, 2 bains d'eau (attention à bien essorer entre les différents bains). Toutes les lames sont déposées dos à dos dans un panier, on passe à l'eau, puis dans un bac de coloration au bleu astra 0,5% pendant 5 mn, lavage à l'eau, bac de coloration Fuchsine de Ziehl pendant 5 mn (diluée à 10% au moment de l'emploi, lavage à l'eau (plusieurs bains)). Si la différenciation est bonne alors on sèche sur la plaque. Sinon, on passe rapidement dans l'éthanol 50°. Les lames sont déshydratées dans trois bains d'acétone puis stockées dans le toluène. On procède enfin au montage entre lamelles (Eukitt), au séchage à l'étuve pendant trois jours, au nettoyage et à l'étiquetage.

2.3. Photographie des coupes

Les lanières de hêtre, laurier, vigne et maïs ont été fixées dans la paraffine. Elles se conservent des années sous cette forme. Seules les lanières de laurier et hêtre ont été coupées. Les coupes sont présentées dans le [tableau G.3](#). Ces coupes sont ensuite observées au microscope et photographiées.

N° série	Feuille	N° coupe	Type	Epaisseur (µm)
184	Fagus	1	T	8
		2	T	16
		3	T	12
		4 - 13	P	5
185	Prunus	1-3	T	12
		4	T	16
		5	T	8
		6	T	5
		7 - 9	P	5

Tableau G.3 : Coupes réalisées. T : transversale; P : paradermale.

Le 29/11/05, on utilise un microscope avec un appareil photo argentique intégré. On procède tout d'abord au réglage de Keller : le diaphragme est fermé au maximum au niveau de la source. On fait la mise au point sur les bords du diaphragme. On ouvre le diaphragme pour agrandir le champ jusqu'à voir tous ce que l'on souhaite au niveau de l'échantillon. On introduit le film photographique et on règle le microscope en position 'photo'. On doit voir apparaître des diagonales, avec des contours nets. Chaque photographie fournit une "pose". Le développement fournit des diapositives qui sont ensuite numérisées. Les coupes sont éclairées par dessous. Pour avoir une échelle de mesure des longueurs, la mire de calibration est photographiée dans les mêmes conditions que les coupes. Ces conditions sont les suivantes : l'oculaire est 10, les objectifs sont {40; 16; 6,3; 2,5}, et la bague au dessus du revolver indique 1,25 (grandissement supplémentaire de 1,25). Les poses correspondant à la mire de calibration observée avec les objectifs {40; 16; 6,3; 2,5} sont respectivement {P010; P032; P018; P026}. La mire de calibration est graduée de 0 mm à 2,0 mm. Les plus petites graduations sont distantes de 10 µm. La pose P010 montre 21 graduations, ce qui correspond à une longueur de $20 \times 10 \text{ µm} = 200 \text{ µm}$. Les photos réalisées le 29/11/05 correspondent aux poses P000 à P029. Un extrait est présenté sur la [figure G.4](#).

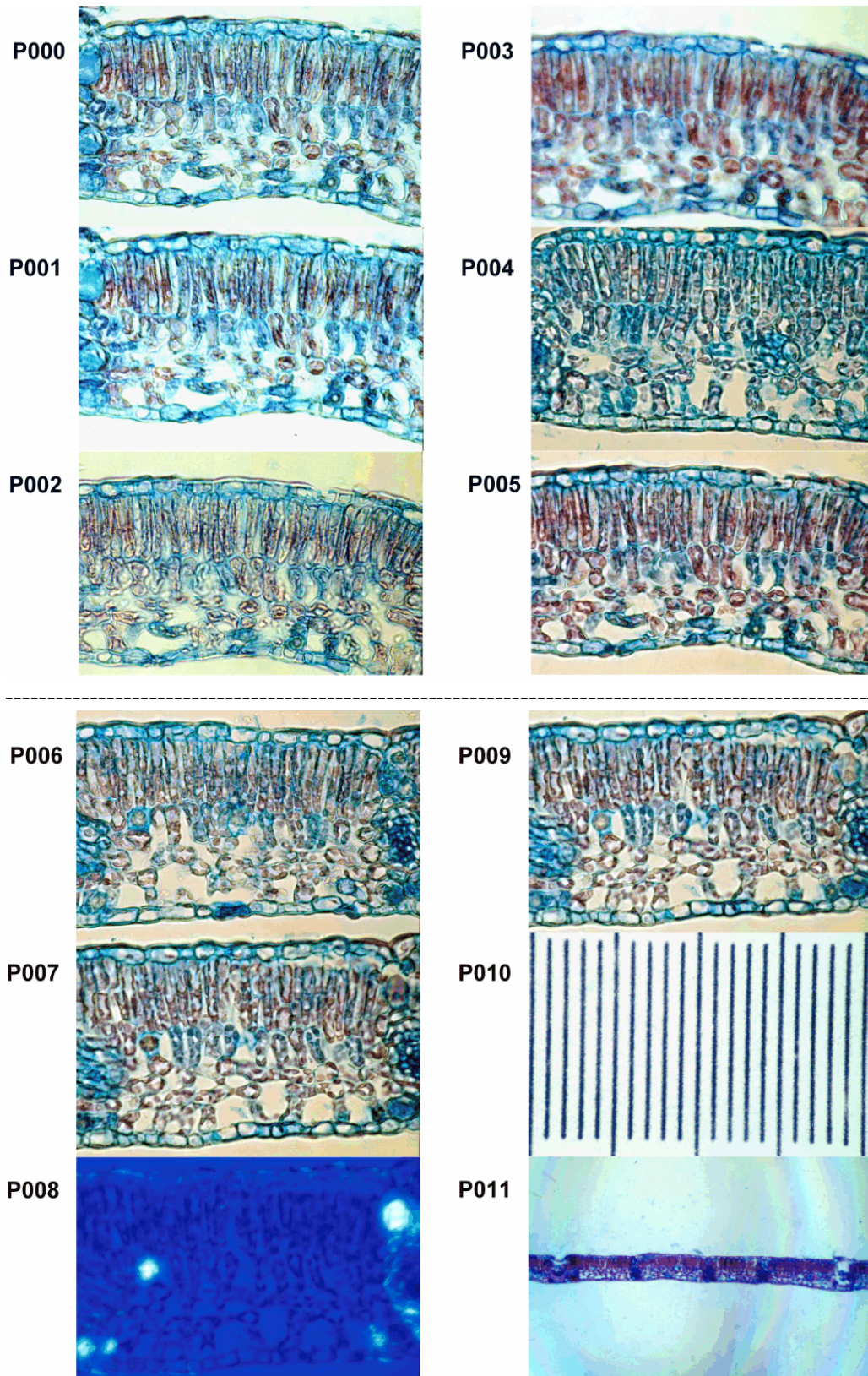


Figure G.4 : Extrait des photographies réalisées le 29/11/05 sur des coupes transversales de hêtre.

Les 01/12/05 et 02/12/05, on utilise un autre microscope qui permet de faire des photographies numériques. Par défaut l'objectif est 40, la résolution 200 ASA, le temps de pose 0,25 s et on utilise un polariseur et un analyseur au maximum d'intensité. On commence par régler le microscope :

1. On met un objet (la mire de calibration, par exemple) que l'on éclaire.
2. On retire l'analyseur (le polariseur reste en place; sa rotation change légèrement la couleur de l'image).
3. On fait la mise au point sur l'objet.
4. On ferme au maximum le diaphragme de la source, de manière à obtenir un point lumineux dont le contour correspond aux bords du diaphragme. On bouge la source de manière à voir net ce point lumineux (l'objet étant toujours en place). On ouvre le diaphragme de manière à éclairer toute la zone de l'objet que l'on souhaite étudier.

On règle ensuite la partie photographique. Il faut s'assurer que lorsque l'image est nette pour l'appareil photo numérique, elle est aussi nette dans l'oculaire :

1. On fait la mise au point avec le microscope, de manière à voir net dans le viseur de l'appareil photo. On prend une photo pour voir si elle est nette à l'écran.
2. On règle l'oculaire de manière à voir net l'objet qui apparaît net sur la photo.

On choisit le format d'enregistrement de la photo : ".RAW" ou ".JPG". On choisit le 2nd qui est un format standard, et pour lequel la qualité des photos semble aussi bonne que pour le format "RAW". Enfin, il faudra régler la vitesse d'obturation à chaque photo. La taille des images obtenues est de 3008*2000 pixels². Les photos étant souvent peu contrastées, on traite l'image de manière à rehausser le contraste.

2.4. Conclusion sur les coupes

Les coupes des feuilles de hêtre et laurier ont été réalisées. Celles de la feuille de hêtre ont été abondamment photographiées. Ce matériel peut être utilisé pour décrire quantitativement l'anatomie de ces feuilles. Sur les coupes du hêtre, on observe deux cas extrêmes : une fine assise palissadique, et quatre assises. En moyenne, on a une couche de palissadique, une couche de spongieux, et entre les deux une couche intermédiaire. La pose P025 montre que le volume d'air pourrait dominer sur le volume de cellules dans le spongieux. Les coupes paradermales telles que P025 semblent plus appropriées que les coupes transversales pour estimer cette proportion d'air.

Annexe H : Publications

Articles publiés dans des revues de rang A

Bousquet, L., Lavergne, T., Deroin, T., Widlowski, J.-L. et Jacquemoud, S. (2007). "Ray-tracing in a dicotyledon leaf". *En préparation*.

Combes, D., Bousquet, L., Jacquemoud, S., Sinoquet, H., Varlet-Grancher, C. et Moya, I. (2007). "A new spectrophotogoniometer to measure leaf spectral and directional optical properties". *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2006.12.007.

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

Communications dans des congrès internationaux

Ma, K., Baret, F., Barroy, P. et Bousquet, L. (2007). "A leaf optical properties model accounting for differences between the two faces". *The 10th ISPM/SRS*, March 12-14, 2007, Davos, CH.

Bousquet, L., Lavergne, T., Deroin, T., Widlowski, J. L., Moya, I. et Jacquemoud, S. (2006). "Multispectral and multiangular measurement and modeling of leaf reflectance and transmittance". *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Servicio de Publicaciones. Universitat de Valencia, 25-29 Sept. 2006, Valencia, Spain.

Bousquet, L., Jacquemoud, S. et Moya, I. (2005). "Leaf BRDF and BTDF measurements and model". *The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 17-19 Oct 2005, Beijing, China. Vol. XXXVI: p. 459-461.

Jacquemoud, S. et Bousquet, L. (2005). "Modélisation des propriétés optiques des feuilles : état de l'art, perspectives et applications en télédétection". *12eme Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, 10-12 mai 2005, Saguenay, Québec, Canada.

Bousquet, L., Gay, M., Legresy, B., Vasile, G. et Trouve, E. (2004). "Velocities field of mountain glacier obtained by synthetic aperture radar interferometry. Comparison of insar and surveyed velocities". *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04*, IEEE International, 20-24 Sept. 2004. Vol. 2: p. 1132- 1135.

Autres communications

Bousquet, L., Jacquemoud, S. et Moya, I. (2005). "Mesure et modélisation des propriétés optiques des feuilles". *11eme congrès des étudiants-chercheurs du Muséum National d'Histoire Naturelle*, 2-4 novembre 2005, Paris, France.

Références bibliographiques

- Abdou, W. A., Helmlinger, M. C., Conel, J. E., Bruegge, C. J., Pilorz, S. H., Martonchik, J. V. et Gaitley, B. J. (2001). "Ground measurements of surface BRDF and HDRF using PARABOLA III". *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol. 106: p. 11967 -11976.
- Abramowitz, M. et Stegun, I. A. (1965). "Handbook of Mathematical Functions". New York, Dover Publications.
- Achard, F. K. (1778). "Mémoire sur les couleurs des végétaux. Première partie". *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin*, Vol. 1: p. 62-69.
- Alberts, B. (1989). "Biologie moléculaire de la cellule". Médecine-Sciences, Flammarion.
- Allen, W. A., Gausman, H. W., Richardson, A. J. et Thomas, J. R. (1969). "Interaction of isotropic light with a compact plant leaf". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 59: p. 1376-1379.
- Allen, W. A. (1973). "Transmission of isotropic light across a dielectric surface in two and three dimensions". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 63: p. 664-666.
- Allen, W. A., Gausman, H. W. et Richardson, A. J. (1973). "Willstatter-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing". *Applied Optics*, Vol. 12: p. 2448-2453.
- Andlauer, J. (1999). "Calibration d'un appareil de mesure des propriétés optiques bidirectionnelles de feuilles végétales". Rapport de stage, CNRS - LURE, Orsay. 93 p.
- Arnon, D. I. (1949). "Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*." *Plant Physiology*, Vol. 24: p. 1-15.
- Asmail, C. (1991). "Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF): a systematized bibliography". *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 96: p. 215-223.
- Atjay, G. L., Ketner, P. et Duvigneaud, P. (1979). "Terrestrial primary production and phytomass". In B. Bolin, E. T. Degens, S. Kempe and P. Ketner (Ed.), *The Global Carbon Cycle*. John Wiley and Sons. pp. 129 -181.
- Atrashevsky, Y. I., Sikorsky, A. V., Sikorsky, V. V., Stel'makh, G. F. et Shuplyak, V. I. (1998). "Spectral polarization characteristics of optical radiation reflected from leaves subjected to unfavorable ecological factors". *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 65: p. 110-116.
- Ballaré, C. L., Sanchez, R. A., Scopel, A. L., Casal, J. J. et Ghera, C. M. (1987). "Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight". *Plant, cell and environment*, Vol. 10: p. 551 - 557.
- Baranoski, G. V. G. et Rokne, J. G. (2004). "Light interaction with plants. A Computer Graphics Perspective". Chichester, Horwood Publishing. 140 p.

- Beckmann, P. et Spizzichino, A. (1987). "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces". Norwood, USA, Artech House. 503 p. Publication originale: "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", London, England : Pergamon Press ; New York : Macmillan ; 1963.
- Belyaev, B. I., Belyaev, Y. V., Chumakov, A. V., Nekrasov, V. P. et Shuplyak, V. I. (2000). "Spectral and spectral-polarization characteristics of potato leaves". *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 67: p. 723-730.
- Belyaev, Y. V., Katkovskii, L. V., Kurikina, T. M. et Shuplyak, V. I. (2001). "Spectral-polarization contrasts in the problems of remote sensing". *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 68: p. 343-349.
- Berthier, S. (2003). "Iridescences, les couleurs physiques des insectes". Paris, Springer. 227 p.
- Biliouris, D., vom Berge, K., Fleck, S., Nackaerts, K., Dutre, P., Muys, B., Willems, Y. et Coppin, P. (2003). "GLabSpeG: a compact laboratory spectro-goniometer system enabling rapid and complete assessments of forest elements". *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2003)*, IEEE, 21-25 July 2003, Toulouse (France). Vol. 7: p. 4422 - 4424.
- Billings, W. D. et Morris, R. J. (1951). "Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups". *American Journal of Botany*, Vol. 38: p. 327-331.
- Blinn, J. F. (1977). "Models of light reflection for computer synthesized pictures". *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, ACM, July 20-22, San Jose, California.
- Bone, R. A., Lee, D. W. et Norman, J. M. (1985). "Epidermal cells functioning as lenses in leaves of tropical rain forest shade plants". *Applied Optics*, Vol. 24: p. 1408-1414.
- Born, M. et Wolf, E. (1980). "Principles of Optics". Oxford, England, Pergamon Press. 808 p.
- Bowes, B. G. (1996). "A colour atlas of plant structure". London, Manson Publishing. 192 p.
- Boyer, M., Miller, J., Belanger, M., Hare, E. et Wu, J. (1988). "Senescence and spectral reflectance in leaves in Northern Pin Oak (*Quercus palustris* Muenchh.)". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 25: p. 71-87.
- Brakke, T. W. et Smith, J. A. (1987). "A ray tracing model for leaf bidirectional scattering studies". *7th International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'87)*, IEEE, Ann Arbor (MI): p. 643-648.
- Brakke, T. W., Smith, J. A. et Harnden, J. M. (1989). "Bidirectional scattering of light from tree leaves". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 29: p. 175-183.
- Brakke, T. W. (1992). "Goniometric measurements of light scattered in the principal plane from leaves". *12th International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'92)*, IEEE, 26-29 May 1992, Houston (TX): p. 508-510.
- Brakke, T. W., Wergin, W. P., Erbe, E. F. et Harnden, J. M. (1993). "Seasonal variation in the structure and red reflectance of leaves from yellow poplar, red oak and red maple". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 43: p. 115-130.

Brakke, T. W. (1994). "Specular and diffuse components of radiation scattered by leaves". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 71: p. 283-295.

Brandt, A. B. et Tageyeva, S. V. (1967). "Optical parameters of plant organisms". Moskva, Nauka Publishers (in Russian).

Braun, C. L. et Smirnov, S. N. (1993). "Why is water blue ?" *Journal of Chemical Education*, Vol. 70: p. 612-614.

Breece III, H. T. et Holmes, R. A. (1971). "Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo". *Applied Optics*, Vol. 10: p. 119-127.

Bréon, F. M. (1993). "An analytical model for the cloud-free atmosphere/ocean system reflectance". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 43: p. 179-192.

Bréon, F. M. et Henriot, N. (2006). "Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, C06005, doi:10.1029/2005JC003343.

Briottet, X., Hosgood, B., Meister, G., Sandmeier, S. et Serrot, G. (2004). "Laboratory measurement of bi-directional reflectance". In M. von Schönemark, B. Geiger and H. P. Röser (Ed.), *Reflection properties of vegetation and soil - with a BRDF database*. Berlin: Wissenschaft und technik Verlag. pp. 173-194.

Brissaud, O., Schmitt, B., Bonnefoy, N., Doute, S., Rabou, P., Grundy, W. et Fily, M. (2004). "Spectrogonio radiometer for the study of the bidirectional reflectance and polarization functions of planetary surfaces. 1. Design and tests". *Applied Optics*, Vol. 43: p. 1926-1937.

Bruegge, C. J., Schaepman, M., Strub, G., Beisl, U., Demircan, A., Geiger, B., Painter, T. H., Paden, B. E. et Dozier, J. (2004). "Field measurement of bi-directional reflectance". In M. von Schönemark, B. Geiger and H. P. Röser (Ed.), *Reflection properties of vegetation and soil - with a BRDF database*. Berlin: Wissenschaft und technik Verlag. pp. 195-224.

Charney, E. et Brackett, F. S. (1961). "The spectral dependence of scattering from a spherical alga and its implication for the state of organization of the light-accepting pigments". *Archives of Biochemistry and Biophysics*, Vol. 92: p. 1-12.

Chelle, M. (2006). "Could plant leaves be treated as Lambertian surfaces in dense crop canopies to estimate light absorption?" *Ecological Modelling*, Vol. 198: p. 219-228.

Comar, C. L. et Zscheile, F. P. (1942). "Analysis of plant extracts for chlorophylls a and b by a photoelectric spectrophotometric method". *Plant Physiology*, Vol. 17: p. 198-209.

Combes, D. (2002). "Comparaison de modèles de transferts radiatifs pour simuler la distribution du rayonnement actif sur la morphogénèse (MAR) au sein d'un peuplement végétal à l'échelle locale". Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Physique de l'Atmosphère, Clermont Ferrand (France). 175 p.

Cook, R. L. et Torrance, K. E. (1981). "A reflectance model for computer graphics". *Computer Graphics*, Vol. 15: p. 307-316.

Cox, C. et Munk, W. (1954). "Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter". *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 44: p. 838 - 850.

Curcio, J. A. et Petty, C. C. (1951). "The near infrared absorption spectrum of liquid water". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 41: p. 302-304.

Curran, P. J. (1989). "Remote sensing of foliar chemistry". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 30: p. 271-278.

Degallaix, J. (2000). "Mesure de la réflectance et de la transmittance des feuilles", LURE, Orsay, France.

Demircan, A., Schuster, R., Radke, M., Schonermack, M. et Roser, H. P. (2000). "Use of a wide angle CCD line camera for BRDF measurements". *Infrared Physics and Technology*, Vol. 41: p. 11-19.

Dereniak, E. L., Brod, L. G. et Hubbs, J. E. (1982). "Bidirectional transmittance distribution function measurements on ZnSe". *Applied Optics*, Vol. 21: p. 4421-4425.

Du, H., Fuh, R. A., Li, J., Corkan, A. et Lindsey, J. S. (1998). "PhotochemCAD: A computer-aided design and research tool in photochemistry". *Photochemistry and Photobiology*, Vol. 68: p. 141-142.

Eglinton, G. et Hamilton, R. (1967). "Leaf epicuticular waxes". *Science*, Vol. 156: p. 1322-1335.

Esau, K. (1965). "Plant anatomy". New York, Wiley.

Evans, J. R. et Anderson, J. M. (1987). "Absolute absorption and relative fluorescence excitation spectra of five major chlorophyll-protein complexes from spinach thylakoid membranes". *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol. 892: p. 75-82.

Fourty, T., Baret, F., Jacquemoud, S., Schmuck, G. et Verdebout, J. (1996). "Optical properties of dry plant leaves with explicite description of their biochemical composition: direct and inverse problems". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56: p. 104-117.

Fukshansky, L., Martinez von Remisowsky, A., McClendon, J., Ritterbusch, A., Richter, T. et Mohr, H. (1993). "Absorption spectra of leaves corrected for scattering and distributional error: a radiative transfer and absorption statistics treatment". *Photochemistry and Photobiology*, Vol. 57: p. 538-555.

Galston, A. W. (1994). "Life processes of plants". New York, Scientific American Library. 246 p.

Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C. et Weidner, V. R. (1965). "Spectral properties of plants". *Appl. Opt.*, Vol. 4: p. 11-20.

Gausman, H. W., Allen, W. A. et Escobar, D. E. (1974). "Refractive index of plant cell walls". *Applied Optics*, Vol. 13: p. 109-111.

Gausman, H. W. (1985). "Plant leaf optical properties in visible and near infrared light". Graduate Studies, N° 29, Texas Tech University.

Govaerts, Y. (1996). "A model of light scattering in three-dimensional plant canopies: a Monte Carlo ray tracing approach". PhD Thesis, Université Catholique de Louvain, Département de Physique, Louvain-la-Neuve (Belgique). 165 p.

Govaerts, Y., Jacquemoud, S., Verstraete, M. M. et Ustin, S. L. (1996). "Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf". *Applied Optics*, Vol. 35: p. 6585-6598.

Govaerts, Y. et Verstraete, M. M. (1998). "Raytran: a Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36: p. 493-505.

Grant, L. (1985). "Polarized and non-polarized components of leaf reflectance". PhD dissertation, Purdue University (Aug.1985).

Grant, L. (1987a). "Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 22: p. 309-322.

Grant, L., Daughtry, C. S. T. et Vanderbilt, V. C. (1987b). "Variations in the polarized leaf reflectance of *Sorghum bicolor*". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 21: p. 333-339.

Grant, L., Daughtry, C. S. T. et Vanderbilt, V. C. (1987c). "Polarized and non-polarized leaf reflectance of *Coleus blumei*". *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 27: p. 139-145.

Grant, L., Daughtry, C. S. T. et Vanderbilt, V. C. (1993). "Polarized and specular reflectance variation with leaf surface features". *Physiologia Plantarum*, Vol. 88: p. 1-9.

Grant, R. H., Heisler, G. M., Gao, W. et Jenks, M. (2003). "Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 120: p. 127-139.

Guyot, G. (1997). "Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes". Enseignement des sciences de la vie, Paris, Masson. 505 p.

Hale, G. M. et Querry, M. R. (1973). "Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region". *Applied Optics*, Vol. 12: p. 555-562.

Hallé, F. (1999). "Eloge de la plante. Pour une nouvelle biologie". Editions du Seuil. 354 p.

Hapke, B. (1993). "Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy". Cambridge (UK), Cambridge University Press. 455 p.

Hosgood, B., Jacquemoud, S., Andreoli, G., Verdebout, J., Pedrini, G. et Schmuck, G. (1994). "Leaf Optical Properties EXperiment 93 (LOPEX93)", N° EUR 16095 EN (revised 2005), European Commission - Joint Research Centre, Ispra, VA (Italie). 7 p.

Howard, J. A. (1969). "Increased luminance in the direction of reflex reflexion - a recently observed natural phenomenon". *Nature*, Vol. 224: p. 1102-1103.

Howard, J. A. (1971). "Luminance and luminous intensity indicatrices of isolateral leaves". *Applied Optics*, Vol. 10: p. 2354-2360.

Hume, L., McVicar, T. et Roderick, M. (2002). "Optical properties of leaves in the visible and near-infrared under beam and diffuse radiance". Technical report, N° 02 / 3, Cooperative research centre for catchment hydrology, Australia, April 2002. 68 p.

ISO (1995). "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure". Genève, Suisse, Organisation Internationale de Normalisation. 105 p.

Jacquemoud, S. et Baret, F. (1990). "PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 34: p. 75-91.

Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schmuck, G., Andreoli, G. et Hosgood, B. (1996). "Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56: p. 194-202.

Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M. et Hanrahan, P. (2001). "A practical model for subsurface light transport". SIGGRAPH'2001, 12-17 August 2001, Los Angeles (CA): p. 511-518.

Kestner, J. M., Leidecker, H. W., Irons, J. R., Smith, J. A., Brakke, T. W. et Horning, N. A. (1988). "Goniometric observations of light scattered from soils and leaves". *Journal of Wave-Material Interaction*, Vol. 3: p. 189-198.

Krauss, P., Markstadter, C. et Riederer, M. (1997). "Attenuation of UV radiation by plant cuticles from woody species". *Plant, Cell & Environment*, Vol. 20: p. 1079-1085.

Kumar, R. et Silva, L. (1973). "Light ray tracing through a leaf cross section". *Applied Optics*, Vol. 12: p. 2950-2954.

Kuusk, A. (1991). "The hot spot effect in plant canopy reflectance". In R. B. Myneni and J. Ross (Ed.), *Photon-vegetation interactions. Applications in optical remote sensing and plant ecology*. Berlin: Springer Verlag. pp. 139-159.

Kuusk, A. (1995). "A fast, invertible canopy reflectance model". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51: p. 342-350.

Lachérade, S. (2003). "Etude des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles : approche expérimentale et modélisation". Mémoire de DEA "Méthodes Physiques en télédétection", Université Paris 7, Paris, juin 2003. 33 p.

Lambert, J. H. (1760). "Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae". Augsburg, C. Detleffsen for the widow of Eberhard Klett.

Lecointre, G. et Le Guyader, H. (2001). "Classification phylogénétique du vivant". Paris, Belin. 543 p.

Lenk, S., Chaerle, L., Pfundel, E. E., Langsdorf, G., Hagenbeek, D., Lichtenthaler, H. K., Straeten, D. V. D. et Buschmann, C. (2007). "Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications". *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58: p. 807-814.

- Leuning, R., Hughes, D., Daniel, P., Coops, N. C. et Newnham, G. (2006). "A multi-angle spectrometer for automatic measurement of plant canopy reflectance spectra". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 103: p. 236-245.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). "Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes". *Methods in Enzymology*, Vol. 148: p. 350-382.
- Lide, D. R., Ed. (2003). "CRC Handbook of Chemistry and Physics". CRC Press.
- Liou, K. N. (2002). "An Introduction to Atmospheric Radiation". *International Geophysics Series*, Vol. 84, San Diego, Academic Press. 583 p.
- Lu, R., Koenderink, J. J. et Kappers, A. M. L. (1998). "Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet". *Applied Optics*, Vol. 37: p. 5974-5984.
- Maas, S. J. et Dunlap, J. R. (1989). "Reflectance, transmittance, and absorptance of light by normal, etiolated, and albino corn leaves". *Agronomy Journal*, Vol. 81: p. 105-110.
- Maier, S. W. (2000). "Modeling the radiative transfer in leaves in the 300 nm to 2.5 μm wavelength region taking into consideration chlorophyll fluorescence - The leaf model SLOPE". Doctorat de 3^{ème} cycle, Technische Universität München, Deutsches Fernerkundungstagsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen (Germany). 110 p.
- Maignan, F., Bréon, F. M. et Lacaze, R. (2004). "Bidirectional reflectance of Earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with the emphasis on the Hot Spot". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 90: p. 210-220.
- Maracci, G., Schmuck, G., Hosgood, B. et Andreoli, G. (1991). "Interpretation of reflectance spectra by plant physiological parameters". 11th International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91), IEEE, 3-6 June 1991, Helsinki (Finland): p. 2303-2306.
- McClendon, J. H. (1984). "The micro-optic of leaves. I. Patterns of reflection from the epidermis". *American Journal of Botany*, Vol. 71: p. 1391-1397.
- McGuckin, B., Haner, D., Menzies, R. T., Esproles, C. et Brothers, A. M. (1996). "Directional reflectance characterization facility and measurement methodology". *Applied Optics*, Vol. 35: p. 4827-4834.
- Meister, G. (2000). "Bidirectional reflectance of urban surfaces". Dissertation, Universität Hamburg, Institut für Experimentalphysik, Hamburg (Germany). 186 p.
- Meister, G., Rothkirch, A., Spitzer, H. et Bienlein, J. (2001). "Width of the Specular Peak Perpendicular to the Principal Plane for Rough Surfaces". *Appl. Opt.*, Vol. 40: p. 6072-6080.
- Metzner, P. (1957). "Zur Optik der Blattoberflächen". *Die Kulturpflanze*, Vol. 5: p. 221-239.
- Meyzonnette, J.-L. et Lépine, T. (2003). "Bases de radiométrie optique". Toulouse, Cépaduès-éditions. 252 p.
- Moldau, H. (1965). "On the use of polarized radiation to analyse the reflection indicatrices of leaves". p. 96-101.

Moldau, H. (1967). "Optical model of plant leaf". Phytoactinometric investigations of plant canopy. Tallinn: Valgus Publishers. pp. 89-109.

Myneni, R. B. et Ross, J., Eds. (1991). "Photon-vegetation interactions". Springer-Verlag. 565 p.

Nicodemus, F. E. (1968). "Emissivity of isothermal spherical cavity with gray Lambertian walls". Appl. Opt., Vol. 7: p. 1359.

Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Ginsberg, I. W. et Limperis, T. (1977). "Geometrical Consideration and Nomenclature for Reflectance". Monograph, N° MN-160, NBS, October 1977. 52 p.

Nilson, T. et Kuusk, A. (1989). "A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion". Remote Sensing of Environment, Vol. 27: p. 157-167.

Noel, M., Zwinkels, J. et Liu, J. (2006). "Optical characterization of a reference instrument for gloss measurements in both a collimated and a converging beam geometry". Applied Optics, Vol. 45: p. 3712-3720.

Obein, G., Knoblauch, K. et Vienot, F. (2004). "Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity, and constancy". Journal of Vision, Vol. 4: p. 711-720.

Obein, G., Bousquet, R. et Nadal, M. E. (2005). "New NIST reference goniospectrometer". Proceedings of SPIE - Optical Diagnostics, Vol. 5880: p. 241-250.

Okayama, H. (1996). "How different are the indicatrices of the leaves of various woody plant species?" Appl. Opt., Vol. 35: p. 3250-3254.

Olij, C., Groote Schaarsberg, J., Werij, H., Zoutman, E., Baudin, G., Chommeloux, B., Bézy, J.-L. et Gourmelon, G. (1997). "Spectralon diffuser calibration for MERIS". Sensors, Systems and Next-Generation Satellites, Proc SPIE, Dec 1997. Vol. 3221: p. 63-75.

Oren, M. et Nayar, S. K. (1995). "Generalization of the lambertian model and implications for machine vision". International Journal of Computer Vision, Vol. 14: p. 227-251.

Painter, T. H., Paden, B. et Dozier, J. (2003). "Automated spectro-goniometer: a spherical robot for the field measurement of the directional reflectance of snow". Review of Scientific Instruments, Vol. 74: p. 5179-5188.

Palmer, K. F. et Williams, D. (1974). "Optical properties of water in the near infrared". Journal of the Optical Society of America, Vol. 64: p. 1107-1110.

Parkhurst, D. F. (1982). "Stereological methods for measuring internal leaf structure variables". American Journal of Botany, Vol. 69: p. 31-39.

Pelletier, J. et Caventou, J. B. (1818). "Sur la matiere verte des feuilles". Ann. Chim. Phys. Ser., Vol. 2: p. 194 -196.

Pfündel, E. E., Agati, G. et Cerovic, Z. G. (2006). "Optical properties of plant surfaces". In M. Riederer and C. Müller (Ed.), Biology of the Plant Cuticle. Oxford: Blackwell publishing.

Phong, B. T. (1975). "Illumination for computer generated pictures". *Communications of the ACM*, Vol. 18: p. 311-317.

Pinty, B., N. Gobron, J.-L. Widlowski, S. A. W. Gerstl, M. M. Verstraete, M. Antunes, C. Bacour, F. Gascon, J.-P. Gastellu, N. Goel, S. Jacquemoud, P. North, W. Qin et Thompson, R. (2001). "Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106: p. 11,937-11,956.

Pinty, B., J.-L. Widlowski, M. Taberner, N. Gobron, M. M. Verstraete, M. Disney, F. Gascon, J.-P. Gastellu, L. Jiang, A. Kuusk, P. Lewis, X. Li, W. Ni-Meister, T. Nilson, P. North, W. Qin, L. Su, S. Tang, R. Thompson, W. Verhoef, H. Wang, J. Wang, G. Yan et Zang, H. (2004). "Radiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, D06210.

Porra, R. J., Thompson, W. A. et Kriedemann, P. E. (1989). "Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous-equations for assaying chlorophyll-a and chlorophyll-b extracted with 4 different solvents - verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic-absorption spectroscopy". *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol. 975: p. 384-394.

Rabideau, G. S., French, C. S. et Holt, A. S. (1946). "The absorption and reflection spectra of leaves, chloroplasts suspensions, and chloroplast fragments as measured in the Ulbricht sphere". *American Journal of Botany*, Vol. 33: p. 769-777.

Rense, W. A. (1950). "Polarization studies of light diffusely reflected from ground and etched glass surfaces". *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 40: p. 55-59.

Reyna, E. et Badhwar, G. D. (1985). "Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-23: p. 731-736.

Richter, T. et Fukshansky, L. (1994). "Authentic in vivo absorption spectra for chlorophyll in leaves as derived from in situ and in vitro measurements". *Photochemistry and Photobiology*, Vol. 59: p. 237-247.

Ross, J. (1981). "Optical properties of phytoelements". In J. Ross (Ed.), *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. The Hague (The Netherlands): Dr W. Junk Publishers. pp. 175-187.

Ross, J. et Marshak, A. (1989). "The influence of leaf orientation and the specular component of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 27: p. 251-260.

Ross, J. et Marshak, A. (1991). "Monte Carlo methods". In R. B. Myneni and J. Ross (Ed.), *Photon-vegetation interactions*. Springer-Verlag. pp. 441-464.

Salisbury, J. W., Milton, N. M. et Walsh, P. A. (1987). "Significance of non-isotropic scattering from vegetation for geobotanical remote sensing". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 8: p. 997-1009.

- Sandmeier, S. R. et Itten, J. I. (1999). "A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37: p. 978-986.
- Sanz, C. (1994). "Mesure et modélisation de la variation directionnelle des propriétés optiques des feuilles". Mémoire de DEA 'AGTS', Université Toulouse III, Toulouse, June 1994.
- Sarto, A. W., Woldemar, C. M. et Vanderbilt, V. C. (1989). "Polarized Light Angle Reflectance instrument I polarized incidence (POLAR:I)". *Polarization Considerations for Optical Systems II*, SPIE, 9-11 August 1989, San Diego (CA). Vol. 1166: p. 220-230.
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M. E., Painter, T. H., Dangel, S. et Martonchik, J. V. (2006). "Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 103: p. 27-42.
- Segelstein, D. (1981). "The Complex Refractive Index of Water". M. S. Thesis, University of Missouri, Kansas City, USA.
- Serrot, G., Bodilis, M., Briottet, X. et Cosnefroy, H. (1998). "Presentation of a new BRDF measurement device". *The European Symposium on Remote Sensing, SPIE Europto*, 21-25 September, Barcelona, Spain. Vol. 3494: p. 34-40.
- Seybold, A. (1933). "Über die Optischen Eigenschaften der Laubblätter. III." *Planta*, Vol. 20: p. 577-601.
- Seyfried, M., Fukshansky, L. et Schafer, E. (1983). "Correcting remission and transmission spectra of plant of plant tissue measured in glass cuvettes: a technique". *Applied Optics*, Vol. 22: p. 492-496.
- Shul'gin, I. A., Khazanov, V. S. et Kleshnin, A. F. (1960). "On the reflection of light as related to leaf structure". *Doklady Botanical Sciences Sections*, Vol. 134: p. 197-199.
- Shul'gin, I. A. et khazanov, V. S. (1961). "On the problem of light conditions in plant associations". *Doklady Botanical Sciences Sections*, Vol. 141: p. 210-212.
- Shul'gin, I. A. et Moldau, K. H. (1964). "On coefficients of brightness of leaves in natural and polarized light". *Doklady Botanical Sciences Sections*, Vol. 162: p. 99-101.
- Shuplyak, V. I., Atrashevskii, Y. I., Sikorskii, V. V., Stel'makh, G. F. et Fomichev, A. Y. (1994). "Spectral and polarization characteristics of light reflected from the leaves of plants infected with bacterial cancer". *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 60: p. 175-179.
- Shuplyak, V. I., Belyaev, B. I., Belyaev, Y. V., Chumakov, A. V., Kurikina, T. M. et Nekrasov, V. P. (1997). "Investigation of the spectropolarization characteristics angular dependence of radiation reflected by potato leaves". *Earth Surface Remote Sensing, SPIE*, 21-25 September 1997, London (UK). Vol. 3222: p. 88-95.
- Slatyer, R. O. (1967). "Plant-Water Relationships". *Experimental Botany Monographs*, New York, Academic Press. 378 p.

- Smith, H. (2000). "Phytochromes and light signal perception by plants - an emerging synthesis". *Nature*, Vol. 407: p. 585-591.
- Solheim, I., Engelsen, O., Hosgood, B. et Andreoli, G. (2000). "Measurement and modeling of the spectral and directional reflection properties of lichen and moss canopies". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 72: p. 78-84.
- Solovchenko, A. et Merzlyak, M. (2003). "Optical properties and contribution of cuticle to UV protection in plants: experiments with apple fruit". *Photochemical Photobiological Sciences*, Vol. 2: p. 861-866.
- Stamm, A. J. et Sanders, H. T. (1966). "Specific gravity of the wood substance of loblolly pine as affected by chemical composition". *Tappi*, Vol. 49: p. 397-400.
- Stern, F. (1964). "Transmission of isotropic radiation across an interface between two dielectrics". *Applied Optics*, Vol. 3: p. 111-113.
- Sterner, R. W. et Elser, J. J. (2002). "Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere". Princeton University Press. 442 p.
- Stokes, G. G. (1862). "On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates". *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, Vol. 11: p. 545-556.
- Torrance, K. E. et Sparrow, E. M. (1967). "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces". *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57: p. 1105-1114.
- Tucker, C. J. (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation." *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 8:127-150.
- Turrell, F. M. (1936). "The area of the internal exposed surface of dicotyledon leaves". *American Journal of Botany*, Vol. 23: p. 255-264.
- Ustin, S. L., Jacquemoud, S. et Govaerts, Y. (2001). "Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis". *Plant, Cell & Environment*, Vol. 24: p. 1095-1103.
- Ustin, S. L., Jacquemoud, S., Zarco-Tejada, P. J. et Asner, G. P. (2004). "Remote sensing of the environment: state of the science and new directions". In S. L. Ustin (Ed.), *Manual of remote sensing, volume 4: remote sensing for natural resource management and environmental monitoring*. John Wiley & Sons.
- Vanderbilt, V. C. et Grant, L. (1985). "Plant canopy specular reflectance model". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 23: p. 722-730.
- Vanderbilt, V. C., Grant, L. et Daughtry, C. S. T. (1985). "Polarization of light scattered by vegetation". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73: p. 1012-1024.
- Vanderbilt, V. C. et Grant, L. (1986). "Polarization photometer to measure bidirectional reflectance factor $R(55^\circ, 0^\circ; 55^\circ, 180^\circ)$ of leaves". *Optical Engineering*, Vol. 25: p. 566-571.

- Vanderbilt, V. C. et de Venecia, K. J. (1988). "Specular, diffuse, and polarized imagery of an oat canopy". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Vol. 26: p. 451-462.
- Vanderbilt, V. C., Grant, L. et Ustin, S. L. (1991). "Polarization of light by vegetation". In R. B. Myneni and J. Ross (Ed.), *Photon-Vegetation Interactions*. Springer-Verlag.
- Voss, K. J., Chapin, A., Monti, M. et Zhang, H. (2000). "Instrument to measure the bidirectional reflectance distribution function of surfaces". *Applied Optics*, Vol. 39: p. 6197-6206.
- Walter-Shea, E. A., Norman, J. M. et Blad, B. L. (1989). "Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 29: p. 161-174.
- Ward, G. J. (1992). "Measuring and modeling anisotropic reflection". *Computer Graphics*, Vol. 26: p. 265-272.
- Weast, R. C. (1989). "CRC handbook of chemistry and physics". Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Wehrli, C. (1985). "Extraterrestrial Solar Spectrum", N° Publication no.615, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium and World Radiation Center (PMO/WRC) Davos Dorf, Switzerland, July 1985.
- Wessman, C. A. (1990). "Evaluation of canopy biochemistry". In R. J. Hobbs and H. A. Mooney (Ed.), *Remote Sensing of Biosphere Functioning*. New York: Springer-Verlag. pp. 135-156.
- White, D. R., Saunders, P., Bonsey, S., van de Ven, J. et Edgar, H. (1998). "Reflectometer for measuring the bidirectional reflectance of rough surfaces". *Applied Optics*, Vol. 37: p. 3450-3454.
- Wilkinson, H. P. (1979). "The plant surface (mainly leaf)". In C. R. Metcalfe and L. Clark (Ed.), *Anatomy of the Dicotyledones: Vol 1. Systematic Anatomy of Leaf and Stem with a Brief History of the Subject*. Oxford: Clarendon Press. pp. 97-165.
- Willstätter, R. et Stoll, A. (1918). "Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure". Berlin, Verlag von Julius Springer. 448 p.
- Woessner, P. (1985). "A study of the polarization of light scattered by vegetation". M.S. Thesis, University of Pittsburgh. 91 p.
- Woessner, P. et Hapke, B. (1987). "Polarization of light scattered by clovers". *Remote Sensing of Environment*, Vol. 21: p. 243-261.
- Woolley, J. T. (1971). "Reflectance and transmittance of light by leaves". *Plant Physiology*, Vol. 47: p. 656-662.
- Woolley, J. T. (1975). "Refractive index of soybean leaf cell walls". *Plant Physiology*, Vol. 55: p. 172-174.
- Wylie, R. B. (1943). "The role of the epidermis in foliar organization and its relations to the minor venation". *American Journal of Botany*, Vol. 30: p. 273-280.

Yamada, N. et Fujimura, S. (1991). "Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three-color reflectance and transmittance". *Applied Optics*, Vol. 30: p. 3964-3973.