# La BRDF des feuilles : mesure, modélisation et conséquence au niveau du couvert

Parmi les différents verrous techniques et scientifiques cités dans la première partie, l'amélioration de la compréhension de l'interaction plante/lumière et notamment les conséquences des propriétés directionnelles des feuilles a été privilégiée. Ce choix a été motivé par le fait que le sujet est à la fois d'un intérêt académique et applicatif. Dans un premier temps nous décrirons comment réaliser des mesures optiques et directionnelles des feuilles, puis nous explorerons les différentes voies possibles de modélisations pour prendre en compte ces propriétés. Finalement nous montrerons comment ce travail de mesure et de modélisation peut et doit s'intégrer dans les réflexions plus larges du phénotypage haut débit.

## 3.1 La mesure des propriétés directionnelles des feuilles

## 3.1.1 Comment réaliser des mesures de BRDF/BRF

Il existe une grande diversité de systèmes de mesure de la BRDF, certains étant particulièrement ingénieux. Pourtant les mesures de BRDF de feuilles disponibles dans la littérature sont très majoritairement réalisées avec des goniomètres. Toutefois, il semble important de décrire les différents systèmes recensés en montrant leurs avantages et leurs inconvénients. Il existe quatre grandes technologies: le goniomètre, la sphère imageante, le système imageant, le Conoscope (ou optique à transformée de Fourrier).

## 3.1.1.1 Le Goniomètre



FIGURE 25: ILLUSTRATION D'UN GONIOMETRE "DE REFERENCE" (OBEIN ET AL. 2005). ON NOTE QUE SUR CE GONIOMETRE LA SURFACE AUSSI PEUT EFFECTUER DES ROTATIONS, IL Y A DONC DES CONVERSIONS A FAIRE ENTRE LES ROTATIONS DU GONIO DE LA BRDF MESURE PAR LE GONIO.

Le goniomètre est le système le plus répandu pour réaliser des mesures de BRF/BRDF. Son principe est simple mais très efficace : il consiste en une source et un capteur directionnels. Un dispositif permet d'effectuer des rotations autour de la surface à mesurer. Il existe une grande diversité de goniomètres car il est possible de moduler les propriétés à la fois de la source, du capteur et du dispositif de rotation. En fonction des objectifs, des budgets et des disciplines, ce ne sont pas les mêmes solutions techniques qui sont choisies. Notons également que le goniomètre permet à la fois des mesures de BRDF (mesures de luminance et d'éclairement) et de BRF (mesures de luminance uniquement). Les goniomètres permettant de mesurer la BRDF sont souvent des dispositifs dits « de référence » (Obein et al. 2005; Höpe & Hauer 2010). En effet, ils permettent de mesurer les propriétés directionnelles des surfaces de manière absolue, sans utiliser de surfaces de référence.

C'est le cas des goniomètres fabriqués au Laboratoire Nationale de métrologie et d'essai (LNE) ou au NIST aux Etats unis. D'autres Goniomètres capables de mesurer des BRF existent dans la littérature et ont permis de décrire les propriétés de certaines feuilles (Breece lii & Holmes 1971; Woolley 1971; Combes et al. 2007; Biliouris et al. 2007). Tous ces goniomètres ont des propriétés différentes, et permettent ou pas de faire des mesures en transmittance. Dans notre laboratoire à l'INRA d'Avignon, nous avons également construit un goniomètre très simple où seule la surface et le capteur constitué d'une fibre optique relié à un spectrophotomètre peuvent effectuer des rotations. C'est ce goniomètre rudimentaire qui nous a permis de détailler les propriétés des références pour le système de phénotypage au champ ' phénoArche'.

#### 3.1.1.2 La sphère imageante

Le principe de la sphère imageante est de disposer d'un hémisphère dont le centre est situé au niveau de l'échantillon à analyser, sur laquelle on mesurera la variation directionnelle de la lumière réfléchie. Le positionnement de la source est la partie complexe du dispositif et plusieurs solutions techniques ont été proposées. (Sarto et al. 1990) semble être la plus ancienne référence sur le sujet, la surface d'étude étant déjà la feuille. (Ward 1992) a également développé un système très similaire à Sarto, mais est allé plus loin dans l'exploitation des données. Son sujet était cependant très éloigné du notre puisque qu'il s'est intéressé aux matériaux de construction. De nos jours une entreprise commercialise des sphères imageantes (http://www.radiantzemax.com/en/products/imaging-sphere/) très similaires au deux premières références Figure 26B. Enfin (Ben-Ezra et al. 2008) propose à l'aide des nouvelles technologies une sphère imageante très innovante qui est composée uniquement de LED qui peuvent à la fois servir de source et de capteur.



Figure 3. Basic structure and operation. The device consists of an aluminum hemisphere with many embedded LEDs, all pointing toward the center of the hemisphere. A lens is used with each LED to improve the optical performance. During operation, each LED is turned on momentarily. While one LED emits light, all others measure the reflected light from the sample (top). Next, a different LED is chosen to emit light, and the remaining ones (including the previous emitter) measure the reflected light(bot).



FIGURE 26: SCHEMA DE DEUX SYSTEMES EXPLOITANT LE CONCEPT D'UNE SPHERE IMAGEANTE. LE SCHEMA A) PROPOSE DE CE SERVIR DE LED QUI PEUVENT TOUR A TOUR SERVIR DE SOURCE OU DE RECEPTEUR (BEN-EZRA 2008). LE SCHEMA B) MONTRE LE SYSTEME PLUS CLASSIQUE ET COMMERCIALISE PAR LA SOCIETE RADIANT. LE RECEPTEUR EST COMPOSE D'UN MIROIR CONCAVE ET D'UNE CAMERA. IL AURAIT AUSSI ETE POSSIBLE D'UTILISER UN OBJECTIF FISH-EYE.

## 3.1.1.3 Le Système imageant

Le système imageant repose sur l'acquisition d'une image du matériau à échantillonner, celui-ci étant plaqué sur un cylindre. Une source directionnelle est dirigée vers le cylindre. A chaque pixel de l'image correspond un angle de visée et une direction d'incidence particuliers. Ce système a été décrit par (Marschner et al. 2000).



#### FIGURE 27: SCHEMA DU SYSTEME IMAGEANT ISSUE DE LA PUBLICATION DE (MARSCHNER ET AL. 2000)

#### 3.1.1.4 Le Conoscope

Le principe du conoscope est radicalement différent des 3 autres systèmes cités précédemment. Il consiste en un jeu de lentilles qui collecte les rayons réfléchis par l'échantillon dans toutes les directions en le projetant sur une surface plane. Une image est ensuite acquise. Une série d'équations simples permet de convertir les pixels qui sont décrits dans un plan cartésien (X, Y) de projection en fonction des angles  $(\theta, \phi)$  caractérisant les directions de réflexion. Ce système s'appelle également un système à optique à transformée de fourrier.

Nous avons sélectionné le système qui permet d'acquérir rapidement une grande quantité de points de mesure avec un bon échantillonnage angulaire. En effet, la feuille « transpire » et perd de l'eau rapidement, modifiant ainsi son état de surface et sa structure interne (Woolley 1971; Brakke et al. 1989). Il faut donc que les acquisitions se fassent dans un laps de temps restreint pour limiter cet effet. Le conoscope répond bin à cette contrainte et permet de plus d'avoir un échantillonnage angulaire extrêmement fin et pour des directions non atteignables avec les autres systèmes, en particulier autour du hot-spot, c'est-à-dire quand les directions dincidence et de réflexion sont très proches.



FIGURE 28: DEUX SCHEMAS PROPOSANT D'EXPLICITER LE FONCTIONNEMENT D'UN CONOSCOPE. ISSUE DE LA BROCHURE COMMERCIALE POUR LES EZ-CONTRASTE D'ELDIM (WWW.ELDIM.FR)

Au cours de ma thèse j'ai eu la chance de nouer un partenariat Pr Françoise Viénot qui possède un Conoscope au le Muséum d'Histoire naturelle de Paris. C'est donc avec cet instrument (EZ-Contrast 80) que j'ai réalisé toutes les acquisitions sur feuilles qui seront présentées dans ce travail.

## 3.1.2 Les mesures de réflectance directionnelles de feuilles

Dans cette partie nous discuterons des acquisitions décrites dans la publication relatives aux feuilles de blé (Comar et al. 2012), mais aussi une série de mesures réalisées sur des feuilles de différentes espèces sélectionnées pour avoir une large gamme de propriétés de surface.

## 3.1.2.1 De l'appareil à la mesure de BRF

L'EZ-contrast a été conçu par le fabriquant Eldim SA (<u>www.eldim.fr</u>) pour acquérir des données en luminance relative, suffisante pour la mesure de l'apparence et de la couleur. Il est donc important de passer d'une luminance à une BRF pour pouvoir interpréter la mesure. De même que précédemment dans le second chapitre, l'étalonnage de l'appareil en facteur de réflectance a nécessité de développer une méthode adaptée au système permettant la prise en compte des imperfections de la surface de référence. Celle-ci est une surface de spectralon qui a pour propriété certifiée une  $HDRF(8^\circ) = 0.991$  pour toutes les bandes spectrales considérées ici, c'est-à-dire dans le domaine du visible.

L'éclairement  $E_i$  dépend de l'angle d'incidence puisque la tache du faisceau lumineux estplus grande que la tache échantillonnée. Malheureusement l'éclairement ne suit pas exactement la loi théorique en cosinus du fait d'imperfections du système (observations de Gaël Obein (2003) confirmées par des mesures que nous avons réalisées ultérieurieurement). Par soucis de simplification, nous avons décidé dans un premier temps, de ne pas modifier la direction d'incidence en la fixant à 45°. L'étalonnage s'appuie alors sur quatre hypothèses:

- 1. Le principe d'Helmhotz est respecté. Cela entraine la relation  $HDRF(\theta_r) = DHRF(\theta_i)$
- 2. La HDRF du spectralon est constante en fonction de la direction d'incidence. Le travail de Weidner et Hsia (1981) montre que c'est bien vérifié pour des angles d'incidence modérés.
- 3. Les mesures du conoscope sont répétables, c'est-à-dire que la mesure est très stable au cours d'une série de mesures.
- 4. Il est possible de calculer la DHSF (Directional Hemispherical Signal Factor) en intégrant les mesures directionnelles selon l'équation :

DHSF(45°, 
$$\varphi_i$$
,) =  $\frac{\sum_{\varphi r=0^{\circ}}^{360^{\circ}} \sum_{\theta r=0^{\circ}}^{90^{\circ}} \operatorname{Signal}(45^{\circ}, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r,) \sin(\theta_r) \cos(\theta_r)}{\sum_{\varphi r=0^{\circ}}^{360^{\circ}} \sum_{\theta r=0^{\circ}}^{90^{\circ}} \sin(\theta_r) \cos(\theta_r)}$   
Pour les grands angles (80°-90°) pour lesquels la mesure n'a pas été possible, on réalise une interpolation linéaire du terme (Signal(45°,  $\varphi_i, \theta_r, \varphi_r, ) \sin(\theta_r) \cos(\theta_r)$ ) entre  $80^{\circ} < \theta_r < 90^{\circ}$ . En effet, pour  $\theta_r = 90^{\circ}$ on a : [Signal(45°,  $\varphi_i, 90^{\circ}, \varphi_r, ) \sin(90^{\circ}) \cos(90^{\circ}) = 0$ ].

En supposant que ces hypothèses soient vérifiées (elles sont toutes raisonables), alors la  $BRF(45^\circ, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \phi_r)$  se déduit des mesures du conoscope de la manière suivante :

$$BRF(45^{\circ}, \varphi_{i}, \theta_{r}, \varphi_{r}) = Signal(45^{\circ}, \varphi_{i}, \theta_{r}, \varphi_{r}) \frac{HDRF_{spectralon}(\theta_{r} = 8^{\circ})}{DHSF_{spectralon}(45^{\circ}, \varphi_{i}, )}$$

Ainsi le facteur  $\frac{HDRF_{spectralon}(\theta_r=8^\circ)}{DHSF_{spectralon}(45^\circ,\varphi_i,)}$  permet de transformer en BRF le signal mesuré en luminance.

Afin d'aller plus loin et étalonner l'appareil pour tous les angles d'incidence, une solution serait d'effectuer une mesure de référence pour tous les  $\theta_i$ . Cependant la seconde hypothèse (la HDRF du spectralon est constante) nous pose problème car elle semble partiellement fausse. Il est ainsi impossible de différencier les propriétés intrinsèques du spectralon des effets liés aux imperfections du système entrainant des pertes de flux lumineux. Ainsi pour étalonner le conoscope à plusieurs angles d'incidence, il faut avoir une description plus complète de la BRDF du spectralon utilisé comme référence. A terme nous espérons bénéficier des mesures issues du gonioréflectomètre de référence du LNE et du CNAM pour mieux caractériser le spectralon.

#### 3.1.2.2 Analyse des mesures effectuées sur des feuilles de blé

Il y a deux manières d'analyser les mesures réalisées avec l'EZ Contrast :

- Une première, plutôt qualitative qui consiste à décrire les principales caractéristiques des mesures effectuées, pour ensuite les comparer aux mesures disponibles dans la littérature.
- La seconde est plus de l'ordre quantitative, car l'échantillonnage directionnel est suffisamment dense et large pour pouvoir calculer la DHRF équivalente à ce que l'on mesure avec une sphère intégrante. Moyennant quelques hypothèses il est possible de séparer la composante diffuse de la composante spéculaire et de quantifier leurs contributions.



FIGURE 29: LA DEFINITION DE LA GEOMETRIE UTILISEE POUR DECRIRE LA BRDF DES FEUILLES DE BLE

Commençons par décrire les caractéristiques structurelles puis les propriétés directionnelles des feuilles de blé. Une feuille de blé possède les caractéristiques typiques des feuilles de

monocotylédones : elle est allongée et possède un système vasculaire orienté selon la grande dimension de la feuille. A noter que toutes les veines sont grossièrement parallèles et forment des sortes de stries à la surface de la feuille. Des trichomes (petits poils) sont également observés.



FIGURE 30: VISUALISATION AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE DE LA SURFACE D'UNE FEUILLE DE BLE



FIGURE 31: REPRESENTATION DE LA BRDF D'UNE FEUILLE DE BLE ISSUE DE LA MOYENNE DE 10 POINTS DE MESURE. UNE SYMETRISATION A EGALEMENT ETE REALISE.

Les mesures ont montré que la structure des feuilles de blé avait une incidence sur leurs propriétés directionnelles. En effet avec un angle zénithal d'incidence de 45°, la forme de la BRF est complètement différente selon que le rayon incident arrive parallèlement ou perpendiculairement au système vasculaire comme le montre la Figure 31. Ainsi lorsque le faisceau lumineux arrive parallèlement au système vasculaire, le lobe spéculaire est relativement large (90° en azimut) ayant pour amplitude maximum une BRF spéculaire d'environ 0.2. A l'inverse, lorsque le faisceau lumineux est perpendiculaire aux veines, le lobe spéculaire est beaucoup plus étroit (environ 35° en azimut) mais beaucoup plus intense : le maximum de la BRF spéculaire étant d'environ 0.6. Un

comportement identique a déjà été observé sur une feuille de fétuque, mais n'a jamais été aussi bien décrit (Combes et al. 2007).

Nous avons ensuite essayé d'identifier et quantifier les contributions de différentes composantes de la DHRF totale

 $DHRF(45^{\circ},\varphi s,\lambda) = \frac{\sum_{\varphi \nu = 0^{\circ}}^{360^{\circ}} \sum_{\theta \nu = 0^{\circ}}^{90^{\circ}} BRF(45^{\circ},\varphi s,\theta \nu,\varphi \nu,\lambda) \sin(\theta \nu) \cos(\theta \nu)}{360 \sum_{\theta \nu = 0^{\circ}}^{90^{\circ}} \sin(\theta \nu) \cos(\theta \nu)}$ 

- Une partie diffuse approximée par la valeur de BRF minimale mesurée. Dans la pratique le strict minimum pouvant être dû à un artefact de mesure, nous avons éliminé les premiers 5% pour prendre la valeur minimale en évitant d'éventuels artefacts de mesure. Une description plus rigoureuse de la méthode est disponible dans la publication. Nous donnons ici la formule discrète pour évaluer cette intégrale à l'aide des mesures.
- Une partie spéculaire qui peut se déduire de la différence entre la DHRF totale et la DHRF diffuse.

Cette décomposition permet de valider le fait que la composante spéculaire est indépendante de la longueur d'onde (Figure 32). Ceci est expliqué par la constance d l'indice de réfraction qui détermine la réflexion spéculaire.





La composante spéculaire apparait plus important à  $\varphi s = 0^\circ$ , qu'à  $\varphi s = 90^\circ$ , alors que le pic spéculaire de la BRF est plus fort à  $\varphi s = 90^\circ$  comparé à  $\varphi s = 0^\circ$  (Figure 31).

Cette décomposition nous a permis de développer un modèle simple pour décrire les interactions entre la diffusion de volume et la diffusion de surface. Ce petit modèle est décrit dans la publication.

#### 3.1.2.3 Mesures réalisées sur une large gamme de feuilles

La feuille est l'organe dont la fonction principale est de capter la lumière et de permettre les échanges gazeux (principalement dioxyde de carbone, oxygene, vapeur d'eau) avec l'atmosphère pour assurer la production de biomasse grâce à la photosynthèse. Elle peut jouer également un rôle important vis-à-vis la stratégie de gestion du rayonnement incident (exces, défaut, directionnalité) et de l'eau (interception par exemple), voire de défense contre des agresseurs divers. Certaines feuilles sont adaptées pour limiter la déperdition d'eau en période de sècheresse (densité de stomates, épaisseur et état de la cuticule, présence de poils). Ces différentes adaptations au milieu dans lequel

la plante vit porte également sur l'état de surface de la feuille. Nous nous sommes donc intéressés à évaluer la diversité de types de comportement directionnel en relation avec l'état de surface de la feuille. Cette étude à caractère exploratoire permet de situer les observations rélaisées sur les feuilles de blé dans la gamme de comportements directionnels que l'on peut observer sur différentes espèces.

Cinq espèces ont été sélectionnées de manière à maximiser la variabilité d'apparence visuelle (Figure 33). Notons qu'elles sont toutes des dicotylédones et présentent un état de surface qui est grossièrement isotrope en azimut contrairement à ce qui a été observé pour le blé qui est une monocotylédone. Des mesures au microscope électronique à balayage ont été réalisées pour appréhender la variabilité de l'état de surface et en particulier la rugosité à deux échelles différentes comme illustré Figure 33.



FIGURE 33: UNE SELECTION DE FEUILLES AYANT DES SURFACES TRES CONTRASTES. SUBGENUS VIREYA EST PROBABLEMENT LA FEUILLE LA PLUS RUGUEUSE ALORS QUE LAURUS NOBILIS EST LA MOINS RUGUEUSE Le protocole de mesure de la BRDF est similaire à celui utilisé précédemment pour les feuilles de blé avec toutefois une plus forte variabilité de l'angle d'incidence avec l'ajout d'observations à 30° et 70° d'angle zénithal. Si la mesure à 45° a pu être étalonnée de manière fiable comme décrit précédemment, des incertitudes demeurent pour les deux autres angles de visée compte tenu de la difficulté évoquée précédemment de la connaissance parfaite de la BRF des surfaces de références pour ces angles d'incidence.



FIGURE 34: BRDF DE LA SELECTION DES 5 FEUILLES POUR 3 ANGLES D'INCIDENCE: 30°, 45° ET 70°. LE DIAGRAMME EST POLAIRE EN 2D.

Figure 34 et Figure 35 montrent la forte variabilité de comportement directionnel observée entre les 5 feuilles avec un gradient de 'spécularité' fort entre Subgenus Vireya peu spéculaire et associée à une rugosité de surface importante (Figure 33) et Laurus Nobilis à la surface très lisse et donc très spéculaire. Les feuilles de blé se situeraient entre Ampelopsis (vigne de collection) et Laurus Nobilis (Laurier) avec un caractère spéculaire assez marqué. Les feuilles qui ont une forte rugosité de surface présentent des valeurs de BRF relativement fortes dans la direction d'éclairement, Cet effet étant plus marqué pour les angles d'incidence faibles. Ceci peut correspondre localement au phénomène de hot-spot (maximum local de réflectance autour de la direction d'incidence car dans cette direction on ne voit que très peu d'ombres crées par la rugosité de surface. Ceci peut également être expliqué par une composante diffuse significative qui prend naissance au niveau de la facette élémentaire.

On note l'augmentation importante du phénomène spéculaire au fur et à mesure que l'incidence devient rasante. Pour une incidence de 70°, un pic de BRDF très fort est observé dans la direction spéculaire. Ce phénomène est décrit dans la littérature (He, Li), mais son existence réelle mériterait néanmoins quelques vérifications supplémentaires. En effet ce phénomène a également été remarqué sur la référence de spectralon, et pourrait correspondre à un artefact instrumental.

Cette première analyse qualitative montre la complexité et la richesse des phénomènes de directionnalité de la réflectance des feuilles qui est en relation avec leur état de surface. Néanmoins, pour aller plus loin, il nous faut résoudre le problème d'étalonnage en grandeur physique des mesures réalisées pour les directions d'incidence différentes de 45°. Ce ne sera possible qu'en ayant accès à une description précise de la BRF de la surface de référence réalisable grâce à un goniomètre

très précis. Alors ce jeu de données pourrait ensuite être confronté à un modèle intégrant la composante 'diffuse' au niveau de la facette afin de la valider.



FIGURE 35: IDEM QUE FIGURE 12 SUIVANT UNE REPESENTATION POLAIRE 3D. L'HEMISPHERE REPRESENTE LE FACTEUR DE REFLECTANCE D'UNE REFERENCE PARFAITE

## 3.2 Modélisation de la BRDF des feuilles de blé

Les mesures réalisées avec l'EZ-Contrast permettent d'aller au-delà de la description phénoménologique précédente en utilisant une description physique des processus. Les modèles physiques présentent en effet de gros avantages : ils permettent de simuler dans le sens direct la BRF dans des configurations qui n'ont pas pu être mesurées et qui sont importantes pour les différentes applications que nous envisageons. D'autre part, l'inversion du modèle permet de transformer des mesures directionnelles en paramètres décrivant les propriétés de la surface. De plus les modèles peuvent valider/invalider les hypothèses que nous avons posées pour quantifier le signal directionnel.

## 3.2.1 Revue des modèles disponibles

## 3.2.1.1 Les modèles actuels de BRDF et leurs limites

La plupart des modèles de BRDF sont issus de la communauté scientifique travaillant sur l'image de synthèse (computer graphics). La Figure 36 schématise les différentes composantes de la BRF. La plupart des modèles (K. E Torrance & Sparrow 1967; R. L. Cook & K. E Torrance 1981; He et al. 1991; Ward 1992; M. Oren & Shree K. Nayar 1994; Ashikmin et al. 2000; H. Li & K. E. Torrance 2005; Simonot 2009) considèrent que:

- La surface est constituée de micro-facettes caractérisées par la distribution de leur pente.
- Une fonction permet de prendre en compte le masquage/ombrage des facettes entre elles comme proposé dans la Figure 37. Elle dépend de la micro-topographie de la surface.
- Un 'fond' généralement caractérisé par une réflectance et une transmittance diffuse, constitue l'interface entre la surface composée des micro-facettes et le volume de l'objet.



FIGURE 36: DESCRIPTION SCHEMATIQUE DU MODELE DE MICRO-FACETTE PROPOSE PAR (HONGSONG LI & KENNETH E. TORRANCE 2005)

Certains modèles incluent également une description de la polarisation de la lumière. Le Tableau 4 explicite les spécificités des principaux modèles répertoriés qui peuvent s'appliquer à la description de la BRF des feuilles. On note que la plupart des modèles associent aux facettes un indice de réfraction *n* utilisé dans les équations de Fresnel pour décrire la réflexion spéculaire, et un (ou plusieurs) paramètre(s) de rugosité qui définissent la distribution des pentes des micro-facettes. Un paramètre caractérisant la fonction d'ombrage/masquage. Un dernier paramètre caractérise la diffusion de volume.



FIGURE 37: FIGURE REPRESENTANT LE MASQUAGE OMBRAGE DES FACETTES SELON BLINN (1977).

TABLEAU 4: DESCRIPTION DES PRINCIPALES PROPRIETES DES DIFFERENTS MODELES ETUDIES POUR SIMULER LA REFLECTANCE DES FEUILLES.

Composante considérée	(K. E Torrance & Sparrow 1967)	(R. L. Cook & K. E Torrance 1981)	(He et al. 1991)	(Ward 1992)	(M. Oren & Shree K. Nayar 1994)	(Ashikmin et al. 2000)	(H. Li & K. E. Torrance 2005)	(Simonot 2009)
Propriété de la partie diffuse	Lambert	Lambert	Lambert	Lambert	Modélisation de la partie diffuse, sans spéculaire	Lambert	3 composantes pour le prendre en compte	Deux couches interagissant ensembles
Propriétés des facettes	Spéculaires Fresnel	Spéculaires Fresnel	Spéculaires Fresnel	Spéculaires Pas de Fresnel	Diffuse (lambert)	Spéculaires Fresnel Possibilité de mettre d'autres propriétés	Spéculaires Fresnel	Spéculaires Fresnel
Distribution des pentes des facettes	Gaussienne	(Beckmann 1965) (Gaussienne des pentes)	Suite gaussienne complexe	(Beckmann 1965) (Gaussienne des pentes) Anisotropie	Gaussienne	(Beckmann 1965) (Gaussienne des pentes) Anisotropie	Reprise du travail de (He et al. 1991) Définition de la rugosité apparente et effective	Gaussienne
Masquage ombrage	Facettes en V + discussions conséquences	Facettes en V selon démonstration de (Blinn 1977)	Hypothèses de (B. Smith 1967)	Absence	Facettes en V selon démonstration de(Blinn 1977)	Approche plus numérique, et se calcul à partir de la distribution	Hypothèses de (B. Smith 1967)	Absence
Autres	Polarisation discutée	RAS	Polarisation discutée Spéculaire pur	Hypothèse de compensation de Fresnel et Masquage ombrage	Contribution à l'amélioration de la compréhension de la partie diffuse	Contribution du modèle : amélioration du masquage ombrage. Les autres composantes sont modifiables	Spéculaire pur 2 composantes de diffusion sous surfaciques	Modèle permettant de combiner (R. L. Cook & K. E Torrance 1981) et (M. Oren & Shree K. Nayar 1994) avec les loi de (Stokes 1860), Alternative à (He et al. 1991) et (H. Li & K. E. Torrance 2005)

Notons également d'autres modèles potentiellement intéressant : (B. Walter et al. 2007) a ainsi proposé un modèle de micro-facettes permettant de simuler la transmittance d'objet translucide. (Poulin & Fournier 1990) ont proposé un modèle anisotrope basé sur des cylindres étant eux même composés de micro-facettes.

## 3.2.1.2 Les modèles de BRDF de feuilles

Très peu d'études ont tenté de décrire la BRDF mesurée de feuilles à partir d'un modèle physique de BRDF. Les seuls travaux disponibles sont ceux de (L. A. Bousquet 2007; L. Bousquet et al. 2005) et concernent le laurier, le hêtre et le noisetier, toutes étant des espèces dicotylédones. Les principaux résultats de ce travail sont représentés Figure 38.



Figure 3.12 : BRDF (sr<sup>-1</sup>) 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°.

	Indice de réfraction $\overline{n}$	Paramètre de rugosité $\overline{\sigma}$
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.

#### FIGURE 38: RESULTATS DE L'INVERSION DU MODELE DE COOK TORRANCE POUR DES MESURES REALISEES SUR UN GONIOMETRE. CE FUT UNE PARTIE DU TRAVAIL DE THESE DE (L. A. BOUSQUET 2007)

Cette étude fournit plusieurs enseignements:

- Le modèle de Cook-Torrance s'ajuste relativement bien aux feuilles de dicotylédones considérées.
- L'inversion du modèle fournit un indice de réfraction relativement fort et peu réaliste : d'autres travaux sur la polarisation de la feuille suggèrent un indice de réfraction aux alentours de 1.4 (V. C. Vanderbilt & Grant 1986). Par contre les indices de rugosités semblent être cohérents avec l'observation : le laurier feuille lisse a un paramètre de rugosité plus faible que celui du noisetier dont la feuille est 'duveteuse'.

Appliquer le modèle de (R. L. Cook & K. E Torrance 1981) aux feuilles semblent donc pertinent et constituera pour nous une référence. Toutefois, le modèle ne permet pas de représenter

l'anisotropie azimutale de la BRDF observée sur blé, liée à l'orientation azimutale privilégiée des facettes en relation avec l'orientation des veines de la feuille.

## 3.2.2 Extension du modèle de Cook et Torrance cas anisotrope des feuilles de blé

Le problème de l'anisotropie azimutale liée à la présence des veines longitudinales des feuilles de monocotylédones doit être pris en compte dans modélisation de la BRDF des feuilles. Dans ce papier nous avons uniquement exploré une modélisation « simple » pour étendre le modèle de Cook et Torrance déjà testé sur les feuilles de dicotylédones par (L. Bousquet et al. 2005).

## 3.2.2.1 Définition du modèle



FIGURE 39: REPRESENTATION DES DIFFERENTS ANGLES UTILISES POUR LA MODELISATION DE LA BRDF DES FEUILLES

Afin d'alléger la démonstration pour construire le modèle de micro-facettes de manière cohérente avec celui de Cook et Torrance, nous considèrerons uniquement la configuration de mesure correspondant à celle du conoscope. Pour une discussion plus générale sur la validité de ce modèle quelles que soient les configurations, se référer à l'article en l'annexe.

Il s'agit de déterminer l'expression de la BRDF d'une surface représentée par une succession de micro-facettes dont on connait la probabilité d'occurrence des pentes dans les deux directions azimutales. On se restreint ici au cas de micro-facettes spéculaires. Pour la commodité de la démonstration, on suppose que les micro-facettes présentent la même surface a. Pour rappel, la BRDF  $f_r$  s'écrit :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

Avec  $L_r$  la luminance et  $E_i$  l'éclairement qui se définissent :

$$E_i(\theta_i, \varphi_i) = \frac{d\Phi_i(\theta_i, \varphi_i)}{dS}$$
$$L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{d^2 \Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dS \cos(\theta_r) d\omega_r}$$

Avec  $d\Phi_i$  le flux incident sur la surface dS considérée,  $d^2\Phi_r$  le flux réfléchi et  $dScos(\theta_r)d\omega_r$  l'étendue géométrique considérée pour le flux.

Pour établir le modèle, il suffit de déterminer l'expression du flux  $d^2 \Phi_r$  de la luminance. Il s'établit comme le produit de quatre facteurs :

- le nombre  $n_{\mu}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$  de microfacettes concernées, c'est-à-dire celles dont la normale correspond à la direction bissectrice entre la direction d'incidence et la direction de réflexion :  $n_{\mu}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = P(\alpha, \beta) \, \delta \omega_h n_{tot}$  où  $\delta \omega_h$ est l'angle solide contenant les normales des micro-facettes concernées et  $n_{tot}$ , le nombre total de microfacettes
- le flux  $\Phi_{\mu}$  reçu par microfacette :  $\Phi_{\mu}(\theta_h) = a E_0 \delta \omega_h$
- la fraction *F*(*n*, θ<sub>h</sub>) de lumière réfléchie par une micro-facette, donnée par la formulation de Fresnel ;
- le facteur d'atténuation géométrique  $SM(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$  due à l'auto-ombrage et masquage de la surface.

En regroupant l'ensemble des facteurs on peut exprimer la luminance de la manière suivante :

$$L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{a E_0 \delta \omega_h P(\alpha, \beta) \delta \omega_h n_{tot}}{S_L \cos(\theta_r) \delta \omega_r} SM(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) F(n, \theta_h)$$

Cette expression se simplifie en considérant les deux points suivant :

- la relation géométrique entre les angles solides δω<sub>r</sub> et δω<sub>h</sub> : δω<sub>r</sub> = 4 cos(θ<sub>h</sub>) δω<sub>h</sub> . Les publications de références pour justifier cette relation sont : (RENSE 1950; Papetti et al. 2007; S. K. Nayar et al. 1991)
- le lien entre le nombre total de micro-facettes n<sub>tot</sub> et la surface SL. Pour établir ce lien, on suppose que la surface soit un « champ de hauteurs » i.e. pour lesquelles les normales des micro-facettes soient nécessairement situées dans l'hémisphère supérieur : P(α, β) = 0 if cos(α) < 0</li>

On a alors: 
$$S_L = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha n_{tot} P(\alpha, \beta) \cos(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha d\beta$$

L'aire *a* des micro-facettes étant supposée constante, elle peut être sortie de l'intégrale :  $S_L = a n_{tot} P_{int}$  où  $P_{int} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P(\alpha, \beta) \cos(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha d\beta$ 

La luminance peut alors s'écrire :  $L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{P(\alpha, \beta)}{P_{int}} \frac{E_0}{4\cos(\theta_r)} SM(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)F(n, \theta_h)$ 

Si on considère que la surface éclairée est plus large que la surface mesurée, on a alors :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{P(\alpha, \beta)}{P_{int}} \frac{1}{4\cos(\theta_r)\cos(\theta_i)} SM(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) F(n, \theta_h)$$

Ce cas est le plus fréquent et correspond à notre configuration de mesure. D'autres cas sont possibles et ont été discutés en annexe de ma publication. Comme notre mesure s'effectue en facteur de réflectance le modèle final s'écrit :

$$\rho_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi \frac{P(\alpha, \beta)}{P_{int}} \frac{1}{4 \cos(\theta_i) \cos(\theta_r)} SM(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) F(n, \theta_h)$$

Notons que la construction d'un modèle de micro-facettes a pour la première fois été publiée par Torrance and Sparrow [1967]. Son équation finale était cependant fausse (B. Walter et al. 2007). La nouveauté de notre modèle réside dans la définition de  $P(\alpha, \beta)$  qui reprend le travail de (Ward 1992). Cependant ce dernier a préféré simplifier son modèle et le normaliser différemment.

#### 3.2.2.2 Ajout d'une distribution anisotrope

Prenons la distribution proposée par (Beckmann 1965) et reprise par (R. L. Cook & K. E Torrance 1981) et par (L. Bousquet et al. 2005) s'écrit:  $P(\alpha, \beta) = \frac{c(\sigma)}{cos^4(\alpha)} \exp\left(-\left(\frac{\tan(\alpha)}{\sigma}\right)^2\right)$ 

Remarquons que  $c(\sigma)$  est une fonction qui dépend de la rugosité inconnue mais telle que  $P(\alpha, \beta)$  est une probabilité. Il est alors possible de calculer  $P_{int}$ . Deux méthodes peuvent être utilisées, soit en utilisant un dérivateur formel tel que MATHEMATICA, soit en faisant un changement de variable  $\xi = \tan(\alpha)$ . Dans les deux cas on obtient :  $P_{int} = \sigma^2 \pi c(\sigma)$ 

Il est intéressant de préciser que les travaux de (R. L. Cook & K. E Torrance 1981; L. Bousquet et al. 2005) n'incluent pas une probabilité d'apparition des facettes mais une distribution qui s'écrit  $D(\alpha,\beta)$  et correspond à :  $D(\alpha,\beta) = \frac{P(\alpha,\beta)}{P_{int}} = \frac{1}{\sigma^2 cos^4(\alpha)} \exp\left(-\left(\frac{\tan(\alpha)}{\sigma}\right)^2\right)$ 

Si l'on se base sur les travaux de (Ward 1992) on peut étendre la probabilité d'apparition des pentes des facettes en considérant deux rugosités orthogonales ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ):

$$P(\alpha,\beta) = \frac{c(\sigma_{\chi},\sigma_{y})}{\cos^{4}(\alpha)} \exp\left(-\tan^{2}(\alpha)\left(\frac{\cos^{2}(\beta)}{\sigma_{\chi}^{2}} + \frac{\sin^{2}(\beta)}{\sigma_{y}^{2}}\right)\right)$$

La fonction  $c(\sigma_x, \sigma_y)$  qui vérifie les propriétés de  $P(\alpha, \beta)$  comporte donc deux paramètres  $(\sigma_x, \sigma_y)$ :

$$P_{int} = c(\sigma_x, \sigma_y)\pi\sigma_x\sigma_y$$

Dans le cas anisotrope azimutalement, le terme  $D(\alpha, \beta)$  s'écrit finalement:

$$D(\alpha,\beta) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \cos^4(\alpha)} \exp\left(-\tan^2(\alpha) \left(\frac{\cos^2(\beta)}{\sigma_x^2} + \frac{\sin^2(\beta)}{\sigma_y^2}\right)\right)$$

Remarquons que si ( $\sigma_x = \sigma_y$ ) alors on retrouve l'expression du cas isotrope de (R. L. Cook & K. E Torrance 1981). C'est l'intégration de cette distribution dans le modèle général de micro-facette qui constitue notre contribution à la modélisation de la BRDF des objets.

#### 3.2.2.3 Ajustement du modèle de BRDF aux mesures sur feuilles de blé

Le modèle étant défini, il s'agit d'ajuster ses paramètres de manière à minimiser l'écart entre la simulation du modèle et la mesure. En pratique la minimisation est un peu plus complexe car nous avons voulu pondérer chaque mesure afin de représenter de manière homogène l'hémisphère.

La Figure 40 représente l'ajustement du modèle suivant deux représentations. L'ajustement montre que le modèle arrive à prendre en compte l'anisotropie décrite dans la partie précédente, en changeant la forme du lobe spéculaire en fonction de l'azimut. Visuellement, des différences persistent entre les mesures et le modèle, à la fois dans les zones ou le spéculaire doit dominer, mais aussi dans les autres directions. Essayons de quantifier l'erreur du modèle.

Nous avons établis 3 métriques qui permettent de comparer le modèle aux mesures, ces trois métriques sont apparentées à un RMSE.

• La première métrique, *RMSE*, correspond à un RMSE classique ou chaque observation (directions) a le même poids :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{\varphi_i = [0 \ 90^\circ]} \sum_{\varphi_r = 0.5}^{359.5} \sum_{\Theta_r = 0.5}^{79.5} (BRF - \widehat{BRF})^2}{n-1}}$$

 La deuxième métrique, RMSE<sub>fit</sub> est construite de manière à donner autant de poids à chaque couronne de l'hémisphère. En effet les mesures issues du conoscope dans le mode sélectionné surreprésentent les mesures proches du Nadir. C'est la métrique utilisée pour inverser le modèle :

$$RMSE_{fit} = \sqrt{\frac{\sum_{\varphi_i = [0 \ 90^\circ]} \sum_{\varphi_r = 0.5}^{359.5} \sum_{\theta_r = 0.5}^{79.5} \sin(\theta_r) (BRF - \overline{BRF})^2}{\sum_{\varphi_i = [0 \ 90^\circ]} \sum_{\varphi_r = 0.5}^{359.5} \sum_{\theta_r = 0.5}^{79.5} \sin(\theta_r)}}$$

• La troisième métrique, RMSE<sub>DHRF</sub>, pondère les mesures de la même manière que pour le calcul de la DHRF. Ainsi c'est la métrique à comparer avec les valeurs de DHRF.



FIGURE 40: MESURES A GAUCHE ET MODELE AJUSTE A DROITE POUR LES DEUX CONFIGURATIONS D'ANGLE INCIDENT

Afin d'évaluer les performances de notre modèle, nous l'avons comparé à un modèle lambertien et au modèle de Cook-Torrance qui ne prend pas en compte l'anisotropie azimutale. Nous avons inversé le modèle indépendamment pour chacune des trois bandes spectrales disponibles.

Les résultats montrent :

- Un meilleur ajustement est obtenu avec le modèle de Cook Torrance, qu'avec le modèle lambertien. Cela montre qu'une modélisation physique est utile pour interpréter les mesures directionnelles, même si ce dernier n'est pas parfait.
- Ajouter une rugosité supplémentaire au modèle de Cook Torrance permet de mieux modéliser le comportement de la feuille de blé : le *RMSE*<sub>DHRF</sub> passe ainsi de 0.039 à 0.029.
- Conformément aux attentes le modèle s'ajuste globalement de la même manière pour les 3 longueurs d'ondes. Les rugosités estimées de manière indépendante pour les trois bandes spectrales considérées ont des valeurs très proches comme on l'espérait. Les rugosités trouvées se situent de manière attendue entre celles de la feuille de hêtre et de la feuille de noisetier dans l'étude de Bousquet. Seule la *BRF<sub>diff</sub>* varie sensiblement avec la bande spectrale, dépendante de l'absorption par la chlorophylle dans le volume de la feuille.
- L'indice de réfraction ne varie que très peu avec la bande spectrale comme on l'attendait. La valeur estimée avec le nouveau modèle est légèrement supérieure à celle estimée avec le modèle de Cook et Torrance.

TABLEAU 5	: AJUSTEMENT	DES DIFFERENTS	MODELES A	UX MESURES	DE BRF DE	FEUILLE DE BLE

Model	Variables		Wheat		
	properties	Species	$x(\lambda)$ :r	$y(\lambda)$ :gre	$z(\lambda)$ :bl
	properties		ed	en	ue
Lambertian	Goodpore of	RMSE <sub>fit</sub>	0.072	0.076	0.074
model	fit	RMSE <sub>DHRF</sub>	0.066	0.069	0.067
		RMSE	0.063	0.066	0.065
	Retrieved parameters	$BRF_{diff}$ (DHRF <sub>diff</sub> )	0.118	0.138	0.113
Cook-	Goodness of fit	<i>RMSE<sub>fit</sub></i>	0.044	0.047	0.046
Torrance		<i>RMSE<sub>DHRF</sub></i>	0.038	0.040	0.039
model		RMSE	0.039	0.041	0.040
	Retrieved parameters	n	1.26	1.27	1.27
		σ	0.225	0.229	0.250
		BRF <sub>diff</sub> (DHRF <sub>diff</sub> )	0.095	0.114	0.088
New model	Goodness of fit	<i>RMSE<sub>fit</sub></i>	0.034	0.036	0.033
including		<i>RMSE<sub>DHRF</sub></i>	0.028	0.029	0.027
azimuth		RMSE	0.029	0.031	0.029
anisotropy		n	1.31	1.32	1.33
	Retrieved parameters	σχ	0.182	0.184	0.194
		σ <sub>y</sub>	0.456	0.464	0.502
		BRF <sub>diff</sub> (DHRF <sub>diff</sub> )	0.089	0.108	0.081

Le nouveau modèle semble mieux modéliser le comportement des feuilles de blé. Toutefois, il est intéressant de mieux comprendre la structure des erreurs.



FIGURE 41: ERREUR ENTRE LA MESURE ET LE MODELE. EN BLEU LES MESURES SONT INFERIEURES AU MODELE ET EN ROUGE LES MESURES SUPERIEURES AU MODELE. La Figure 41 montre que les erreurs se situent dans 4 zones bien distinctes :

- La zone où le spéculaire est modélisé. Du fait de la présence de fortes valeurs de BRF, ce sont les zones où l'erreur est la plus importante en valeur absolue. Dans cette zone le modèle a tendance à sous-estimer la BRF mesurée (zone rouge).
- Les zones périphériques au lobe spéculaire. De la même manière le modèle sous estime la mesure.
- Les zones diffuses : le modèle surestime le diffus de manière plus ou moins forte.
- Le retro-spéculaire (ou hot-spot ?) : cette zone est surtout observée lorsque la direction d'incidence est perpendiculaire au système vasculaire. Le modèle ne prenant pas en compte ce phénomène, il sous-estime la mesure.

Ces résultats présentent une certaine similitude avec ceux qu'avait observés Bousquet. Il serait intéressant de tester l'intérêt de décrire les propriétés des facettes en leur ajoutant une composante lambertienne comme l'ont proposé (M. Oren & Shree K. Nayar 1994). Il serait également judicieux de coupler une modélisation physique des effets de surface telle que décrite précédemment, avec une modélisation de la diffusion de volume telle que proposée dans le modèle PROSPECT.

## 3.3 Prise en compte des propriétés directionnelles des feuilles de blé sur le couvert

L'intérêt de connaitre et de modéliser de manière précise les propriétés directionnelles des feuilles pour le phénotypage haut débit est double :

- Cela permet d'optimiser les systèmes de mesure des propriétés optiques des feuilles en prenant en compte leur spécificité directionnelles. En effet si l'opérateur souhaite faire des mesures de BRF ou BTF pour estimer la composition biochimique de la feuille, il est utile de déterminer les différentes configurations optimales pour réaliser la mesure.
- Améliorer la modélisation le couvert végétal. En effet la plupart des modèles de transfert radiatif considèrent la feuille comme lambertienne, et peu d'études ont abordé les conséquences d'une telle hypothèse. Les rares études disponibles sur le sujet (Chelle 2006; J. Stuckens et al. 2009)rapportent des résultats contradictoires.

C'est ce deuxième point qui va être discuté dans cette partie.

## 3.3.1 Les différentes modélisations du couvert végétal et leurs utilités

Au niveau du couvert, on peut schématiquement classer les modèles de transfert radiatif en fonction de leur complexité à représenter le couvert végétal. Ainsi le modèle le plus simple considère le couvert végétal comme un milieu turbide (« une soupe ») de feuilles (1D), et les modèles les plus complexes intègrent une représentation 3D du couvert couplée à un lancer de rayon et un modèle de propriétés optiques des feuilles.

Voici schématiquement les principales tendances dans la modélisation du transfert radiatif du couvert végétal que l'on retrouve dans la communauté « télédétection ».

- PROSAIL : association du modèle SAIL (W. Verhoef 1985) avec le modèle PROSPECT (S. Jacquemoud & F. Baret 1990). Le modèle est simple et comporte peu de variables d'entrée. En effet le couvert est décrit par un LAI, un angle foliaire moyen. Les propriétés optiques des feuilles sont décrites par le modèle PROSPECT, les feuilles étant supposées bi-lambertiennes. Le sol est caractérisé par une BRF.
- Modélisation 3D d'un couvert végétal. A partir d'une représentation tridimensionnelle de la structure du couvert, des méthodes de lancer de rayons ou de radiosité peuvent être appliquées pour simuler la BRF de la scène correspondante. Ces méthodes ont également la

capacité de prendre en compte les propriétés directionnelles des éléments du couvert. C'est donc à cette catégorie de modèle que nous nous intéresserons ici

 Modèles hybrides. Cette catégorie suppose que la scène peut être représentée par un ensemble de primitives 'volume' (cubes, sphères, ellipsoïdes, cônes) représentant des éléments du couvert (plante, couronne, agrégat de feuille). Ces primitives sont supposées remplies de milieu turbide. On retrouve donc ici les limitations des milieux turbides concernant la description des propriétés directionnelles des feuilles.



FIGURE 42: UNE REPRESENTATION 3D DES HYPOTHESES D'UN MODELE DE TYPE SAIL (GAUCHE) COMPAREE A UNE REPRESENTATION 3D (DROITE) D'UN COUVERT DE BLE AVEC 16CM D'INTER-RANG ET 300 TIGES PAR M<sup>2</sup> TEL QUE SIMULE PAR LE MODELE ADEL-WHEAT.

Notons qu'il existe une initiative européenne nommée RAMI pour Radiation transfer Model Intercomparison (http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/Home.php), qui compare les différents modèles disponibles. RAMI s'intéresse à la réflectance à l'échelle du couvert, sans chercher également à valider les images de réflectance qui peuvent être simulées utilement pour des applications en phénotypage haut-débit.

C'est donc vers une modélisation 3D que nous nous sommes orientés pour évaluer l'impact de la directionnalité des feuilles sur la réflectance du couvert. Nous avons utilisé le modèle de lancer de rayons développé par D. Meneveaux qui accepte en entrée :

- Les caractéristiques des sources
- Les caractéristiques des capteurs
- La description de la structure du couvert ici décomposée en triangles élémentaires
- La description de la BRDF de chaque triangle. On s'appuiera ici sur les différents modèles mis en œuvre précédemment.

Le modèle fournit simule une image de la scène en luminance ou en BRF dans trois bandes spectrales (généralement, bleu, vert, rouge). Dans sa version actuelle, le modèle ne permet pas de prendre en compte une transmittance diffuse des triangles (feuilles). Cette limitation n'est sans doute pas dramatique dans la mesure où la transmittance des feuilles dans le domaine spectral du visible est négligeable.

#### 3.3.2 Intégration de la BRDF des feuilles dans un modèle décrivant le couvert

Intégrer un modèle de BRDF d'une surface nécessite de réécrire le modèle sous forme de vecteur afin d'optimiser le temps de calcul. C'est ce que nous avons fait nous inspirant du travail de (B. Walter 2005).



Figure 2: Coordinate frame used in BRDF calculations. The z-axis is equal to the local surface normal  $\mathbf{n}$ , and the x and y axes lie in the surface's tangent plane. The BRDF is a function of two directions, the incident direction,  $\mathbf{i}$ , and out direction  $\mathbf{o}$  (e.g., the directions to the eye and light). The half direction  $\mathbf{h}$  is defined to lie midway between  $\mathbf{i}$  and  $\mathbf{o}$ , and plays an important role in the Ward BRDF.

FIGURE 43: NOTATION VECTORIELLE CLASSIQUEMENT UTILISEE DANS LA COMMUNAUTE DE LA SYNTHESE D'IMAGE. FIGURE ISSUE DE LA PUBLICATION DE (B. WALTER 2005)

Si l'on considère le système de coordonnées défini Figure 43, on peut écrire le modèle simplement :

$$\rho_r(\vec{i}, \vec{o}) = \frac{\pi}{4(i.n)(o.n)} \frac{1}{\sigma_x \sigma_y(h.n)^4} e\left(-\frac{(h.x/\sigma_x)^2 + (h.y/\sigma_y)^2}{(h.n)^2}\right) SM(\vec{i}, \vec{o})F(\vec{i}, h)$$

Avec le facteur de masquage ombrage  $SM(\vec{i}, \vec{o})$ :

 $SM(\vec{i}, \vec{o}) = \min(1, 2(n, h)(n, o)/(o, h), 2(n, h)(n, i)/(o, h))$ 

Et  $F(\vec{i}, h)$  le facteur de Fresnel qui peut soit être approximé, soit être calculé de manière exacte. L'approximation la plus classique étant celle de (Schlick 1994).

Il faut ensuite définir l'orientation de chaque feuille. La méthode classique de la communauté de rendu d'image est d'insérer une texture orientée par rapport à l'objet. Ceci n'est pas approprié dans notre cas. Nous avons préféré définir l'orientation de la rugosité de chaque triangle composant une feuille à l'aide d'un de ses cotés (Figure 44). Ceci a été rendu possible grâce a une description simple de la feuille.



FIGURE 44: LES COTES DES TRIANGLES DES FEUILLES SONT DEFINIS DE TELLES MANIERES POUR QU'ILS ORIENTENT L'ANISOTROPIE DU MODELE. AINSI LES COTE BLEU ET ROUGE INDIQUE LE SENS DU SYSTEME VASCULAIRE DE LA PLANTE.



FIGURE 45: TENTATIVE DE DECOMPOSITION DU SPECULAIRE ET DE LA PARTIE DIFFUSE DANS LA MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF D'UN COUVERT VEGETAL. SEULE LA PREMIERE INTERACTION EST PRISE EN COMPTE

Trois scènes ont été générées correspondant à 3 hypothèses de directionnalité des feuilles :

- Feuille purement lambertienne
- Feuille purement spéculaire
- Feuille avec une composante lambertienne et une composante spéculaire

Les images correspondant aux trois hypothèses de directionnalité des feuilles sont représentées Figure 45. Dans cette configuration particulière, l'image correspondant à l'hypothèse spéculaire est très sombre. On ne voit nulle part des 'éclats blancs' qui seraient observés sur les feuilles étant orientées de telle manière que le lobe spéculaire serait orienté vers le capteurs. L'image correspondant à l'hypothèse 'lambertienne' montre des valeurs plus fortes avec une variabilité liée à la direction d'incidence locale au niveau de la feuille. L'image correspondant à l'hypothèse 'spéculaire et lambertienne' est la somme des deux images précédentes. La composante diffuse est majoritaire.

D'autres tests complémentaires méritent d'être réalisés pour confirmer la possibilité de décomposer la BRF mesurée au niveau du couvert, en une composante diffuse et une composante spéculaire. Il serait également intéressant de confirmer, toujours au niveau du couvert, que l'hypothèse d'anisotropie azimutale de la BRDF de la feuille est équivalente à l'isotropie azimutale (les deux paramètres de rugosité de surface sont égaux). Néanmoins, cette étude qualitative préliminaire a permis de montrer que des outils d'interprétation sont disponibles pour évaluer l'impact de différentes hypothèses sur la directionnalité des feuilles sur la réflectance du couvert.