



THÈSE

pour obtenir le grade de Docteur de l'INAPG

présentée et soutenue publiquement par

Nadia ROCHDI

Le 18 décembre 2003

à l'Institut National Agronomique de Paris Grignon

UN MODELE GENERIQUE D'AGREGATION DES FEUILLES DANS UN COUVERT VEGETAL : APPLICATION A LA SIMULATION DU TRANSFERT RADIATIF

—
devant le jury suivant :

A. Perrier,
B. Andrieu,
J.P. Gastellu-Etchegorry,
F.M. Bréon
J. C. Favard,
C. Godin,
J. L. Roujean,
F. Baret,

Professeur INAPG, Paris
Directeur de Recherche INRA, Grignon
Professeur UPS, CESBIO, Toulouse
Chercheur LSCE, Gif sur Yvette
Ingénieur CNES, Toulouse
Chercheur INRIA/CIRAD, Montpellier
Chercheur CNRM, Toulouse
Directeur de Recherche INRA, Avignon

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse

Remerciements

Voici venu le moment de remercier toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail. En espérant n'oublier personne...

Tout d'abord je tiens à remercier celui qui m'a encadré durant ces trois années Frédéric Baret, avec qui j'ai eu le plaisir de partager des réunions de travail plein d'ambition, de motivation et de bonne humeur.

Mes remerciements vont aussi à Jean-Claude Favard, responsable du projet ADAM (Assimilation des données de télédétection dans les agro-modèles) financé par le Centre National des Etudes Spatiales (CNES), dans le cadre duquel le travail de thèse a été réalisé.

Merci à Bruno Andrieu et Jean-Phillipe Gastellu qui, malgré les délais de temps assez serrés, ont accepté de juger ce travail en qualité de rapporteurs. Leurs critiques et leurs conseils ont été très constructifs.

Je voudrais aussi remercier Alain Perrier (Président du jury) et François-Marie Bréon, Christophe Godin, Jean-Louis Roujean (examineurs) qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Merci à tous les scientifiques qui ont participé au comité de pilotage de ma thèse et dont les conseils m'ont bien été bénéfiques : Bruno Andrieu, Tiit Nilson, Martine Guérif, Christophe François et Gérard Dedieu.

Je voudrais remercier Michaël Chelle, 'le papa du modèle PARCINOPY' chez qui j'ai toujours trouvé des réponses à mes questions, pour son aide face aux exigences de ce travail et aux différents bugs rencontrés.

Bien que le manuscrit soit axé sur un travail de modélisation, durant ma thèse j'ai eu à découvrir les 'plaisirs' du travail sur le terrain. Cette étape a été scientifiquement très riche pour moi puisque c'était ma première expérience avec le monde végétal, en l'occurrence le blé. Celle-ci m'a permis en plus d'acquérir une expérience très humaine avec l'équipe roumaine qui a contribué au projet ADAM. Merci à : Roxana Vintila, Elena Petcu, Georges Petcu, Catalin Lazar, Adrian, Stéphanie et toutes les techniciennes avec qui j'ai travaillé.

Un grand merci à Philippe Clastre, Patrice Lecharpentier, Dominique Ripoche et Sylvain Barbace (sosisce), sans qui ma vie en thèse aurait été 'TROP DURE!!'. Merci encore pour leur sympathie et leur disponibilité infailible.

Merci aussi à André Chanzy, Directeur de l'unité INRA-CSE (Climat Sol et Environnement), pour son accueil au sein de l'unité, sa disponibilité et ses conseils durant ma répétition de soutenance.

Je tiens à remercier mes collègues à l'unité CSE qui m'ont soutenu tout au long et n'ont jamais hésité à me donner un coup de main lorsque j'en avais besoin : Claire, David, les Marie W., Marie L., Olivier, Jean François, Albert, Rosy, Odile, Clément, Dominique Inaki, Laurent, Carlos, Bruno, Olivier, Boris, Marjorie, Vianney, Mohammed, Véronique, Frank, Nadine, Roland, Jacqueline et Jacques

Je remercie plus particulièrement (sachant que quoique je dise, je ne l'exprimerai pas aussi fort que ce que je ressens) : Sophie, Sébastien, Cédric, Jérôme, Stéphanie et Kawtar pour m'avoir écouté, aidé, 'SUPPORTÉ'...

Merci aux amis : Corinne, Estelle, Romain, Margueritte, Daniella, Laurent, et à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à ce parcours et que j'ai oublié de mentionner.

Je remercie toute ma famille au Maroc, en France et en Italie pour leur soutien.

Enfin merci merci merci..... à Carlo d'avoir partagé ces trois années et vécu pleinement cette fin de thèse avec moi.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Exposé de soutenance

1. Introduction.....	1
2 Réponse radiométrique des couverts végétaux : processus et modélisation.....	6
2.1 Interaction du rayonnement solaire au sein du couvert végétal.....	7
2.1.1 Au niveau de la feuille.....	7
2.1.1.1 Propriétés spectrales.....	7
2.1.1.2 Propriétés directionnelles.....	10
2.1.1.3 Modèles des propriétés optiques de la feuille.....	12
2.1.2 Au niveau du sol.....	14
2.1.2.1 Propriétés optiques des sols.....	14
2.1.2.2 Modèles des propriétés optiques des sols.....	15
2.1.3 Au niveau du couvert végétal : Effets de la structure du feuillage.....	16
2.1.3.1 Indice de surface foliaire.....	16
2.1.3.2 Inclinaison des feuilles.....	17
2.1.3.3 Arrangement spatial des feuilles.....	18
2.2 Fraction de trou mono-directionnelle : Mesures et Modèles.....	19
2.2.1 Modélisation de la fraction de trou.....	19
2.2.1.1 Le modèle Poisson.....	19
2.2.1.2 Le modèle Binomial.....	20
2.2.1.3 Le modèle Markov.....	21
2.2.2 Confrontations des modèles aux mesures.....	22
2.3 Modélisation du transfert radiatif au sein du couvert.....	24
2.3.1 Modèles semi-physiques de réflectance du couvert.....	25
2.3.2 Modèles Physiques de transfert radiatif.....	28
2.3.2.1 Les deux approches de modélisation du transfert radiatif.....	28
2.3.2.2 Modèles basés sur une approximation de la représentation de la structure.....	31
2.3.2.2.1 Modèles de milieux homogènes horizontalement (turbides).....	31
2.3.2.2.2 Modèles géométriques.....	36
2.3.2.2.3 Modèles Hybrides (Incluant modèles discrets).....	36
2.3.2.3 Modèles basés sur une représentation explicite de la structure.....	40
2.3.2.3.1 Les modèles à lancer de rayons.....	40
2.3.2.3.2 Modèles de radiosité.....	41
2.4 Conclusions.....	42
3 Modélisation de l'agrégation des feuilles dans le couvert : le modèle CLAMP.....	44
3.1 Introduction : contraintes et démarche.....	44
3.2 Approches utilisées pour décrire l'architecture des couverts végétaux.....	45
3.3 Le modèle générique de structure agrégée du couvert.....	46
3.3.1 Variables et mode de construction des maquettes.....	46
3.3.1.1 Variables du modèle.....	47

3.3.1.2	Processus de création des maquettes.....	48
3.3.2	Distribution des inclinaisons des feuilles.....	49
3.3.3	Test d'intersection entre les feuilles.....	53
3.3.4	Mise en œuvre des maquettes.....	54
3.4	Echantillonnage de l'espace des variables.....	55
3.5	Conclusion.....	58
4	Modèle de fraction de trous adapté à CLAMP.....	61
4.1	Calcul de la fraction de trou sur les maquettes 3D.....	61
4.2	Précisions des calculs de la fraction de trous.....	63
4.3	Sensibilité de la fraction de trous aux caractéristiques des maquettes 3D.....	65
4.4	Application du modèle de Markov à nos maquettes.....	68
4.4.1	Méthode d'ajustement des paramètres.....	68
4.4.2	Ajustement de l'épaisseur de la couche.....	68
4.4.3	Comparaison au modèle de Poisson et Poisson étendu.....	71
4.4.4	Sensibilité du paramètre d'agrégation aux caractéristiques du modèle d'agrégation.....	76
4.4.4.1	Effets de la taille relative des feuilles, de la densité des plantes et de la distance relative feuille-tige.....	76
4.4.4.2	Effet de la forme de la feuille 'b/h' et de l'inclinaison 'ALA'.....	78
4.4.4.2.1	Forme de la feuille.....	78
4.4.4.2.2	Inclinaison des feuilles.....	79
4.5	Modélisation du paramètre λ_0 en fonction des variables du couvert.....	81
4.5.1	Approche.....	81
4.5.2	Modélisation du paramètre d'agrégation.....	81
4.6	Conclusion.....	85
5	Validation de l'approche de modélisation de la fraction de trou.....	87
5.1	Méthodes et mesures de fraction de trous.....	87
5.1.1	Mesure de la fraction de trous par photographie hémisphérique.....	87
5.1.2	Echantillonnage spatial.....	89
5.1.3	Les couverts considérés.....	90
5.2	Résultats.....	92
5.2.1	Ajustement du modèle de Poisson.....	92
5.2.2	Ajustement du modèle paramétrique de Markov.....	96
5.2.3	Sensibilité des couverts à la distance relative feuille-tige.....	98
5.3	Conclusion.....	99
6	Vers le calcul du transfert radiatif.....	101
6.1	Approche.....	101
6.2	Termes d'extinctions et de diffusions dans l'approche à 4 flux.....	103
6.3	Sensibilité des termes de diffusion aux propriétés optiques et à l'architecture.....	106
6.3.1	Etude dans le cas turbide approximé par l'approche à 4 flux.....	106
6.3.2	Application au modèle de structure agrégé générique.....	107
6.3.2.1	Le modèle de lancer de rayon : PARCINOPY.....	108
6.3.2.2	Calcul des termes de diffusion.....	110

6.3.2.3 Plan d'échantillonnage.....	111
6.3.2.3.1 Structures et géométries d'éclairement et de visée considérées.....	111
6.3.2.3.2 Propriétés optiques des feuilles et du sol.....	112
6.3.2.4 Précision des simulations.....	112
6.4 Résultats de l'étude dans le cas d'un modèle turbide.....	113
6.4.1 La transmittance directionnelle-diffuse de la végétation τ_{sd}	113
6.4.2 La réflectance diffuse-diffuse de la végétation ρ_{dd}	115
6.4.3 La transmittance diffuse-directionnelle de la végétation τ_{do}	117
6.4.4 La réflectance directionnelle-directionnelle de la végétation ρ_{so}	119
6.4.5 Paramétrisation des termes de diffusion en fonction des propriétés optiques des feuilles.....	121
6.4.5.1 Approche.....	121
6.4.5.2 Le modèle paramétrique de la réflectance bidirectionnelle.....	121
6.5 Résultats de l'application au modèle de structure agrégé générique.....	123
6.5.1 Comparaison du modèle à quatre flux et de PARCINOPY.....	123
6.5.2 Transmittance directionnelle-diffuse de la végétation τ_{sd}	124
6.5.3 Réflectance diffuse-diffuse de la végétation ρ_{dd}	127
6.5.4 Transmittance diffuse-directionnelle de la végétation τ_{do}	129
6.5.5 Réflectance directionnelle-directionnelle de la végétation ρ_{so}	132
6.6 Conclusion.....	134

Conclusion Générale.....	136
--------------------------	-----

Références

EXPOSE SOUTENANCE

Un modèle générique d'agrégation des feuilles dans un couvert végétal: Application à la simulation du transfert radiatif

Nadia Rochdi

Projet : ADAM

Assimilation des données de télédétection dans les agro-modèles

Directeur de thèse : Frédéric Baret

INRA, Unité CSE

Décrire le fonctionnement des couverts végétaux



Agriculture de précision : (parcelle, région)

- Moduler les pratiques culturales
- Prévoir et estimer les rendements

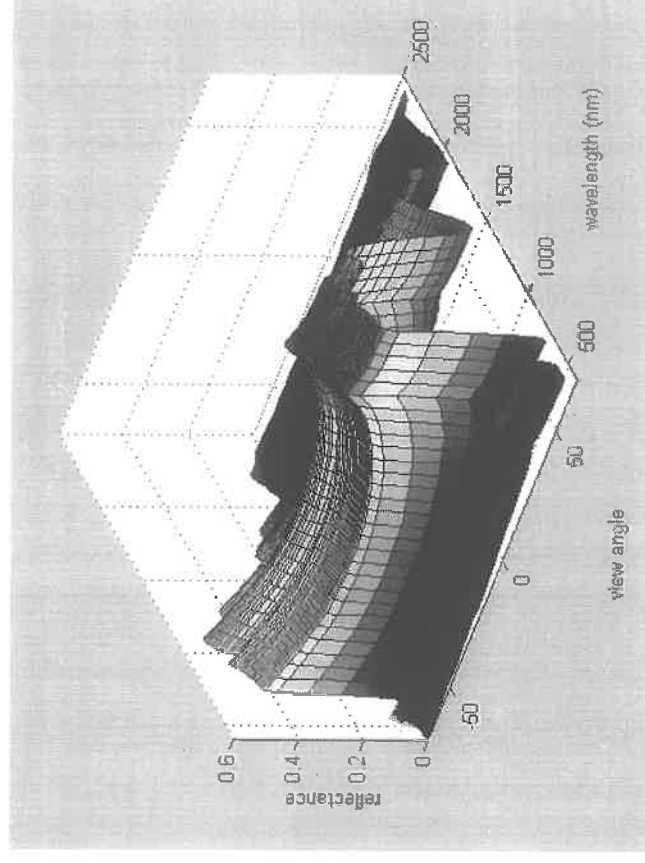
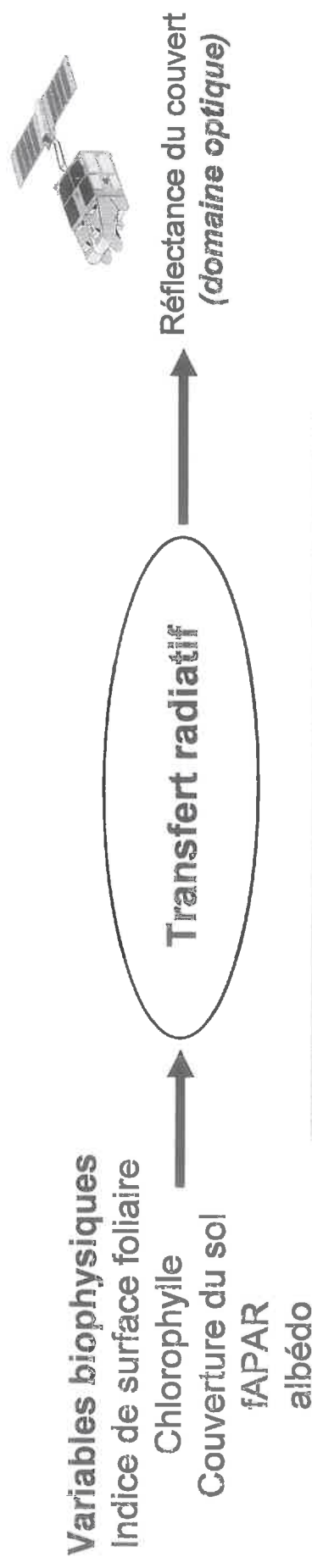
Fonctionnement de la biosphère en lien avec les changements climatiques : (globale)

- Caractériser les sources et puits des gaz à effets de serre

→ Comprendre et modéliser les processus à
différentes échelles



Estimation des variables biophysiques par télédétection



Variation spectrale et directionnelle

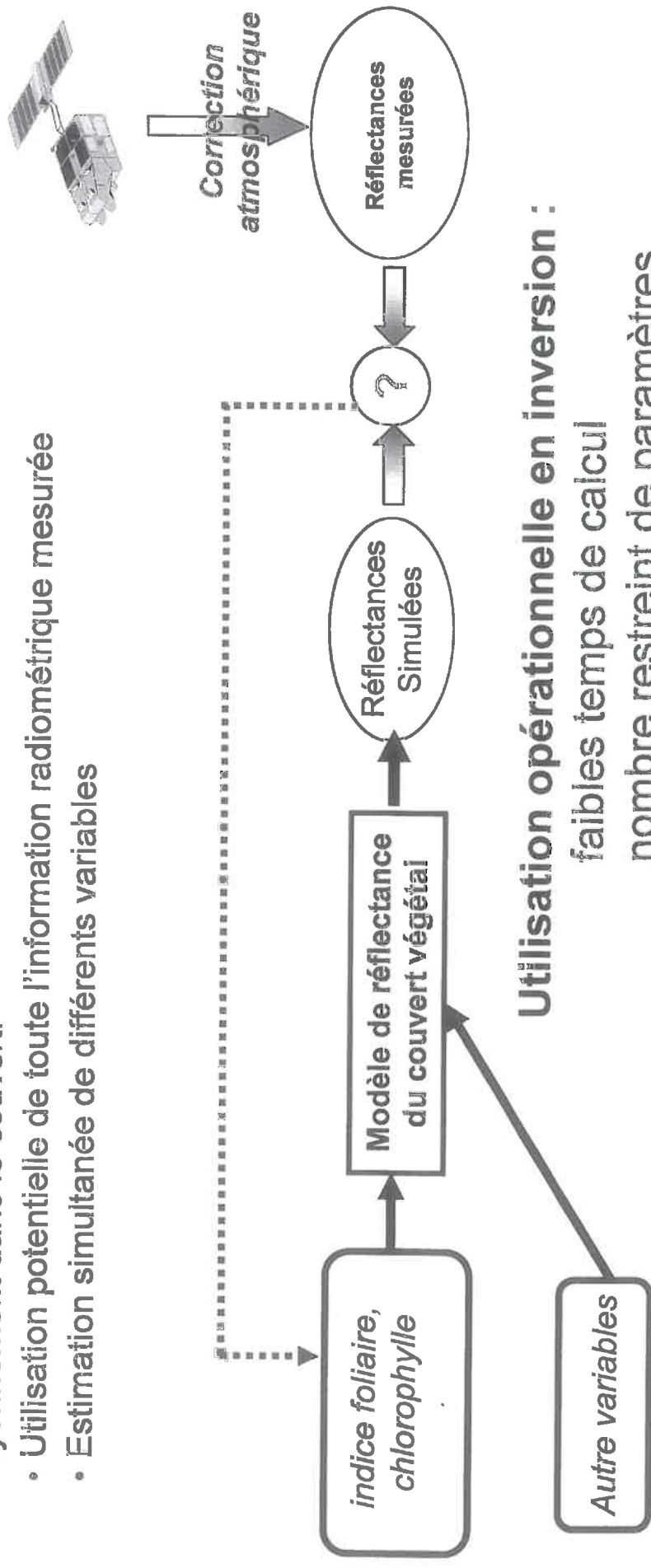
Méthodes d'estimation des variables biophysiques

Approche empirique Indices de végétation

- Relations empiriques simples
- Difficilement extrapolable

Approche physique Inversion des modèles de réflectance du couvert

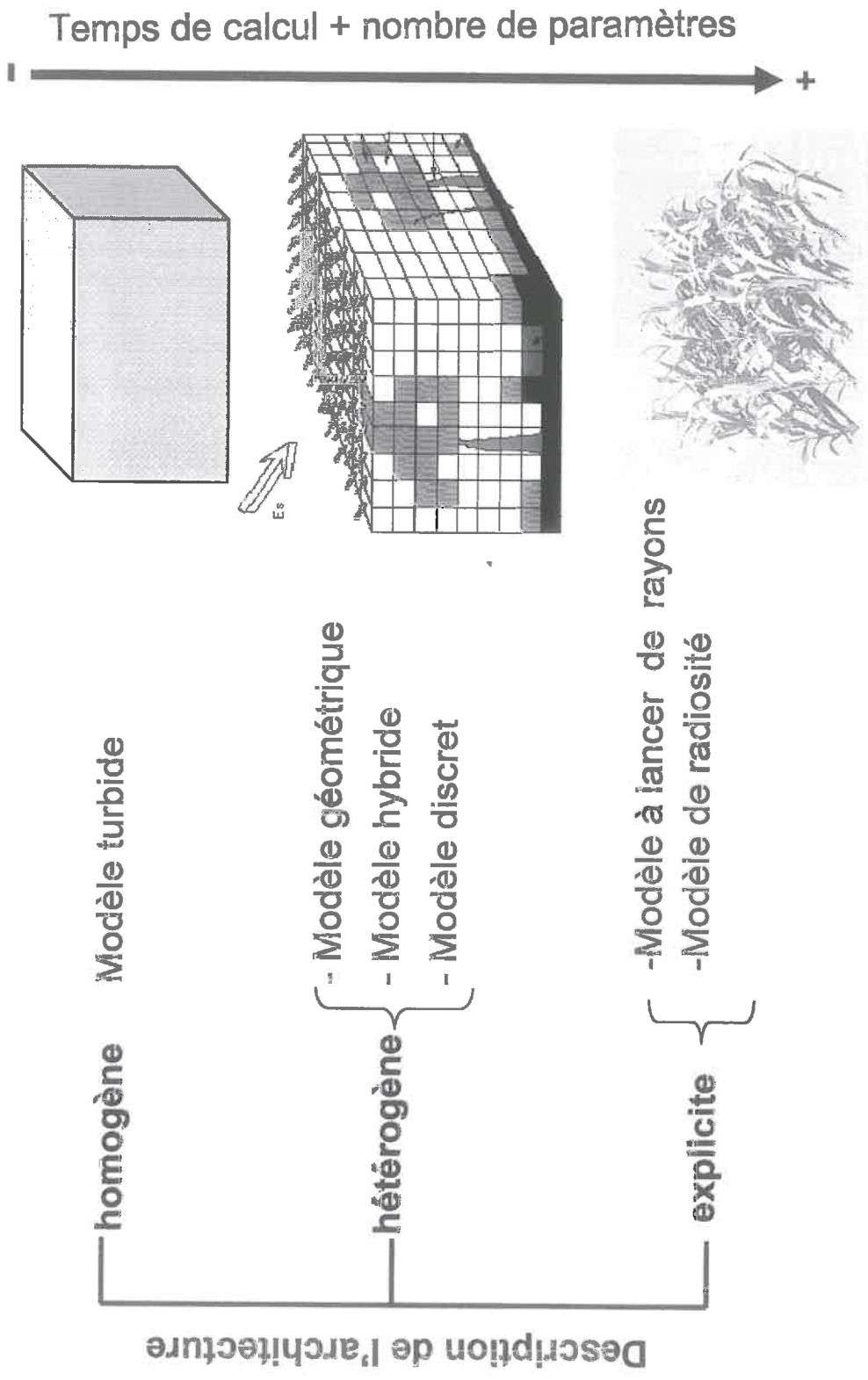
- Modèle de réflectance : processus physiques responsables des interactions du rayonnement dans le couvert.
- Utilisation potentielle de toute l'information radiométrique mesurée
- Estimation simultanée de différents variables



Utilisation opérationnelle en inversion :

faibles temps de calcul
nombre restreint de paramètres

Les principaux types de modèles de réflectance



- ➔
- Utilisation du MTR turbide dans le processus d'inversion
 - Structure du couvert trop simplifiée: Agrégation des feuilles

Agrégation des feuilles dans le couvert

variation spatiale de la densité foliaire:

•Echelle de la feuille:

- taille,
- forme,
- inclinaison

•Echelle de la plante:

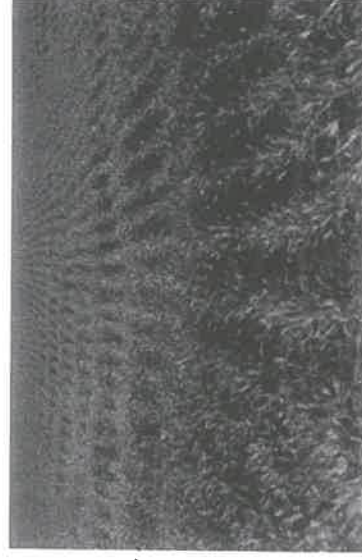
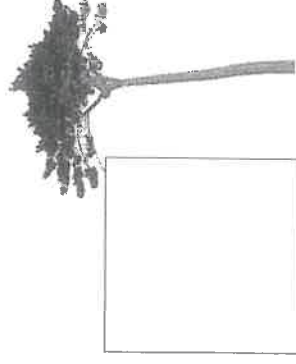
- distribution des feuilles
hauteur,
forme enveloppe...

•Echelle du couvert:

- Distribution des plantes
semis en rang
distribution en bouquet...

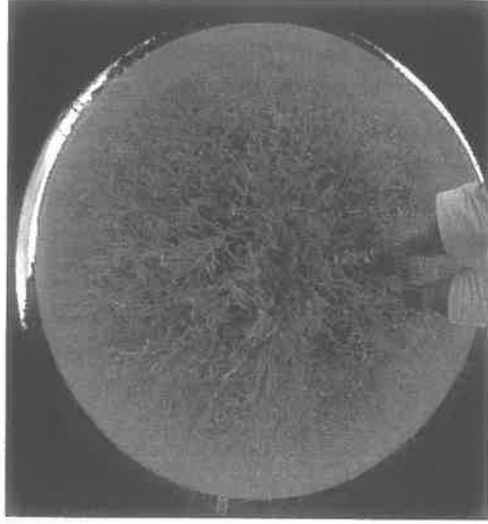
Facteur déterminant l'agrégation:

- Pratiques culturales,
- Compétitions inter-plantes,
- Tropismes: haptotropisme, heliotropisme
- Stress: nutriment, hydrique

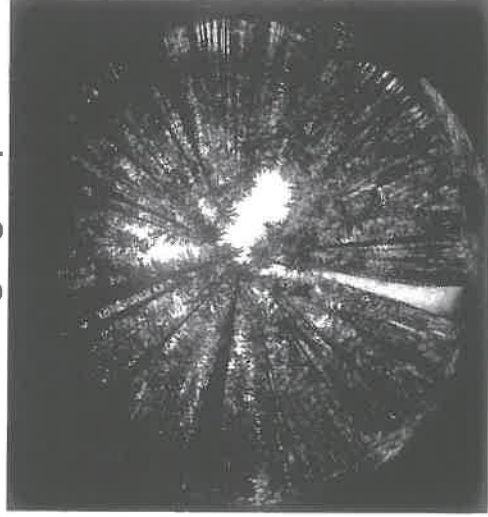


Effet de l'agrégation des feuilles sur le transfert radiatif

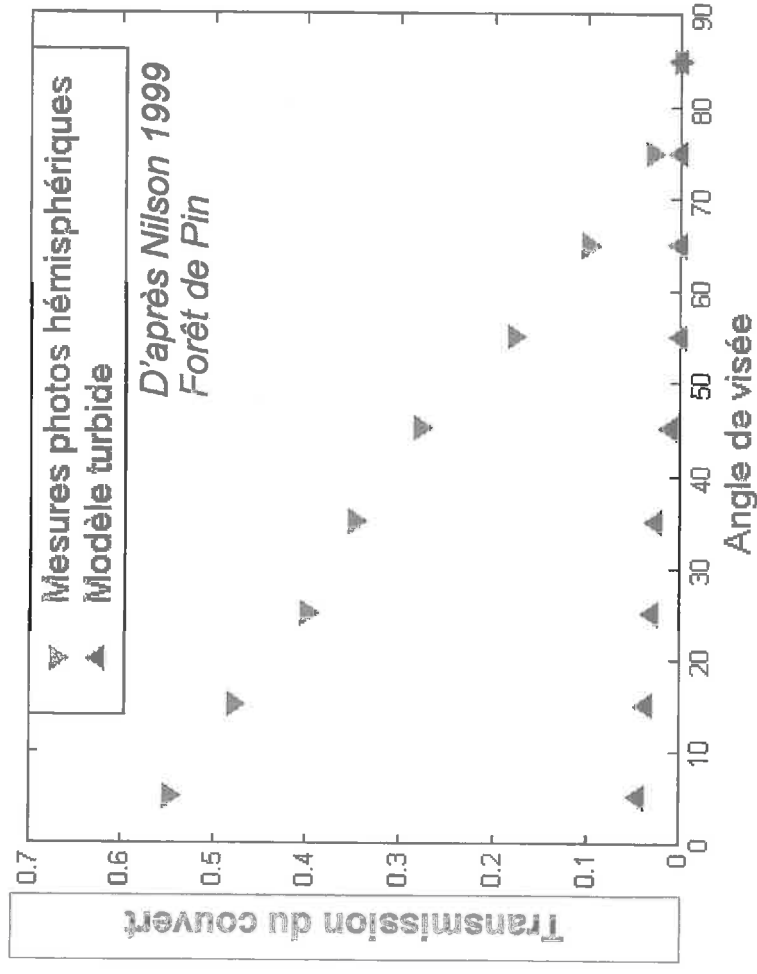
Couvert homogène : blé



Couvert agrégé : pin



Effet de l'agrégation sur la transmission du couvert



=> Nécessité de prendre en compte l'agrégation

Objectifs

Prise en compte de l'agrégation des feuilles dans la modélisation du transfert radiatif

- **Proposer un modèle d'architecture: CLAMP**
(CLumped Architecture Model of Plants)
 - Généricité
 - Transition continue d'un milieu aléatoire vers un autre agrégé
 - Faible nombre de paramètres
- **Proposer un modèle de réflectance inversible correspondant**
 - Temps de calcul réduit

Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP
- 3- Conclusions et Perspectives

Plan

1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP

- concepts du modèle d'agrégation des feuilles
- construction des maquettes 3D
- création de la base des maquette

2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP

3- Conclusions et Perspectives

1. Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP

Principes du modèle CLAMP

Hypothèse du modèle :

agrégation des feuilles par rapport à la verticale autour des tiges ou troncs

Variables d'entrée

(normalisées à la hauteur du couvert)

Feuille

- Forme de la feuille b/h
- Taille relative de la feuille S^*
- Inclinaison des feuilles ALA

Plante

- Distance relative tige-feuille χ

Couvert

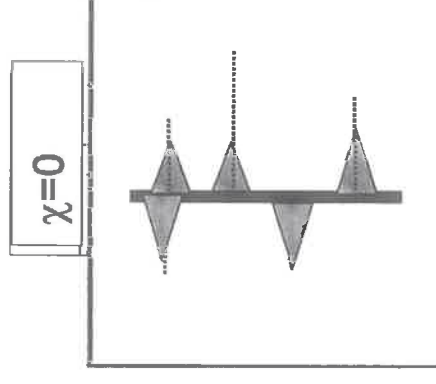
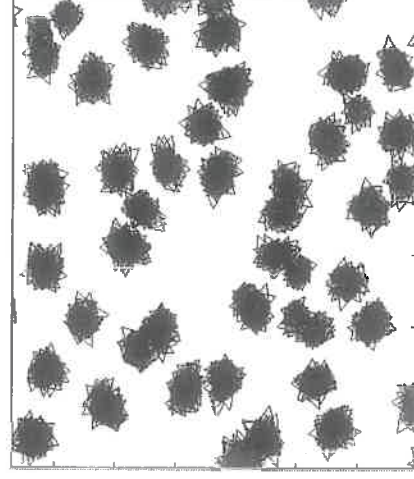
- Schéma de semis aléatoire
- Indice de surface foliaire LAI
- Densité relative des plantes d^*



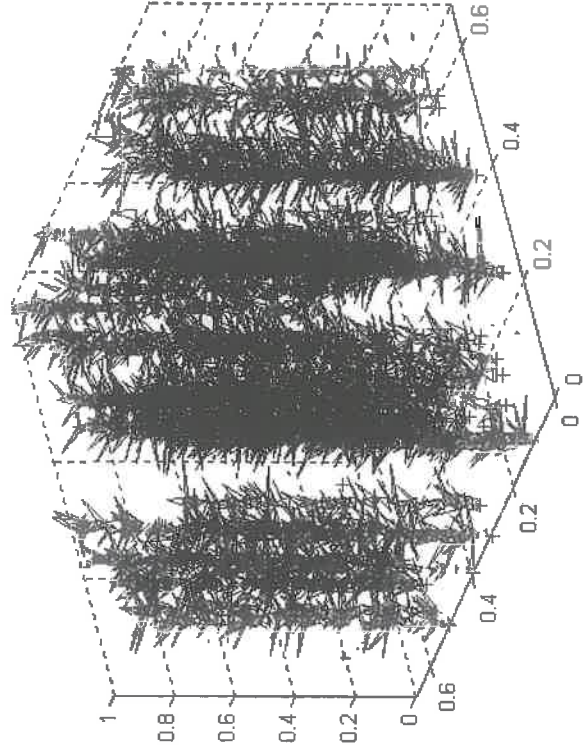
$b/h = \text{base/hauteur}$

CLAMP

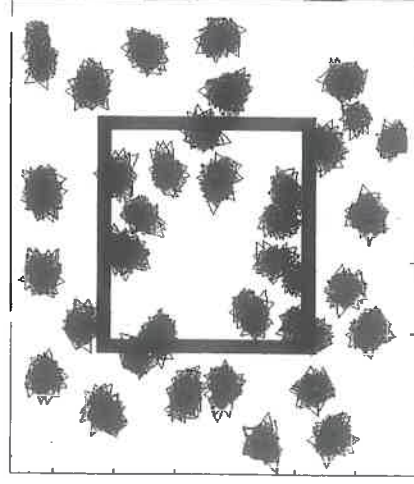
Maquettes 3D



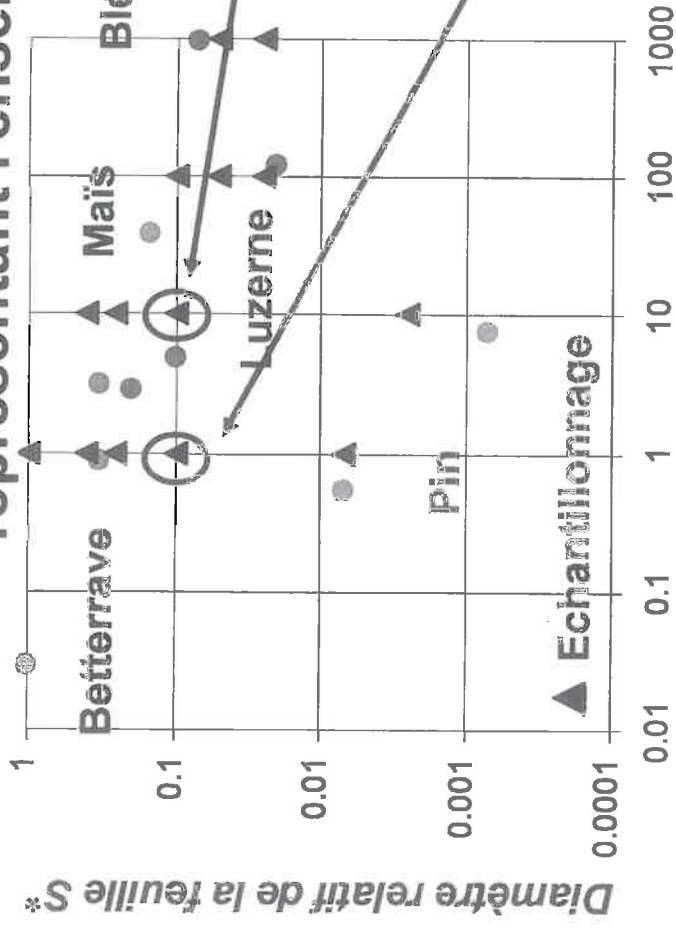
Construction des maquettes 3D



- 1- Distribution aléatoire des axes dans le milieu
- 2- Distribution homogène des feuilles dans le milieu
 - Affectation des axes
 - Orientation radiale du triangle
 - Inclinaison foliaire
- 3- Agrégation des feuilles vers le plant auquel elles appartiennent
- 4- stratégie d'évitement des feuilles
Variation de l'azimut
- 5- Suppression des effets de bord
Extraire le centre de la maquette

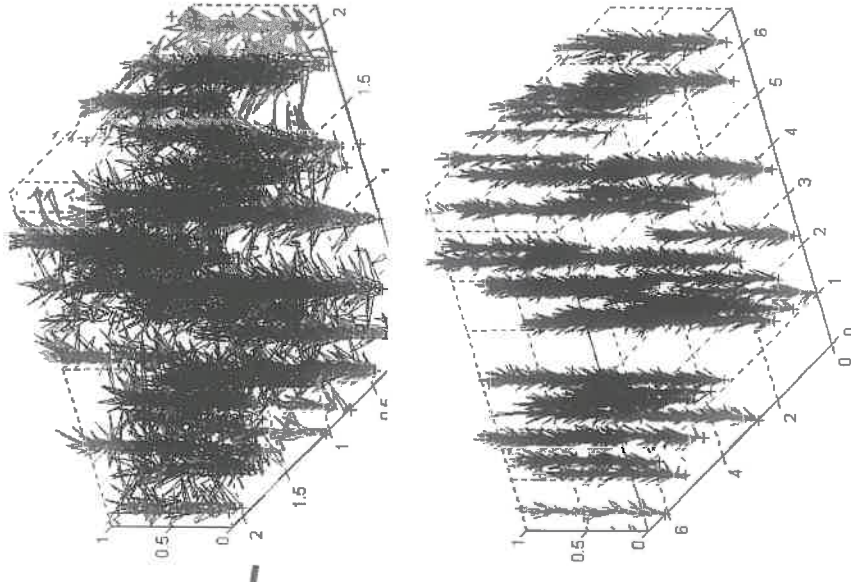


Création d'un ensemble de maquettes 3D représentant l'ensemble des situations possibles



Densité relative d^*

Variables d'entrée	valeurs
LAI	[0.5, 5]
ALA	[30°, 70°]
S*	[0.025, 1]
b/h	[0.25, 1]
χ	[0, 1]
d^*	[1, 1000]



465 maquettes construites
30mn-5jours.

Bilan

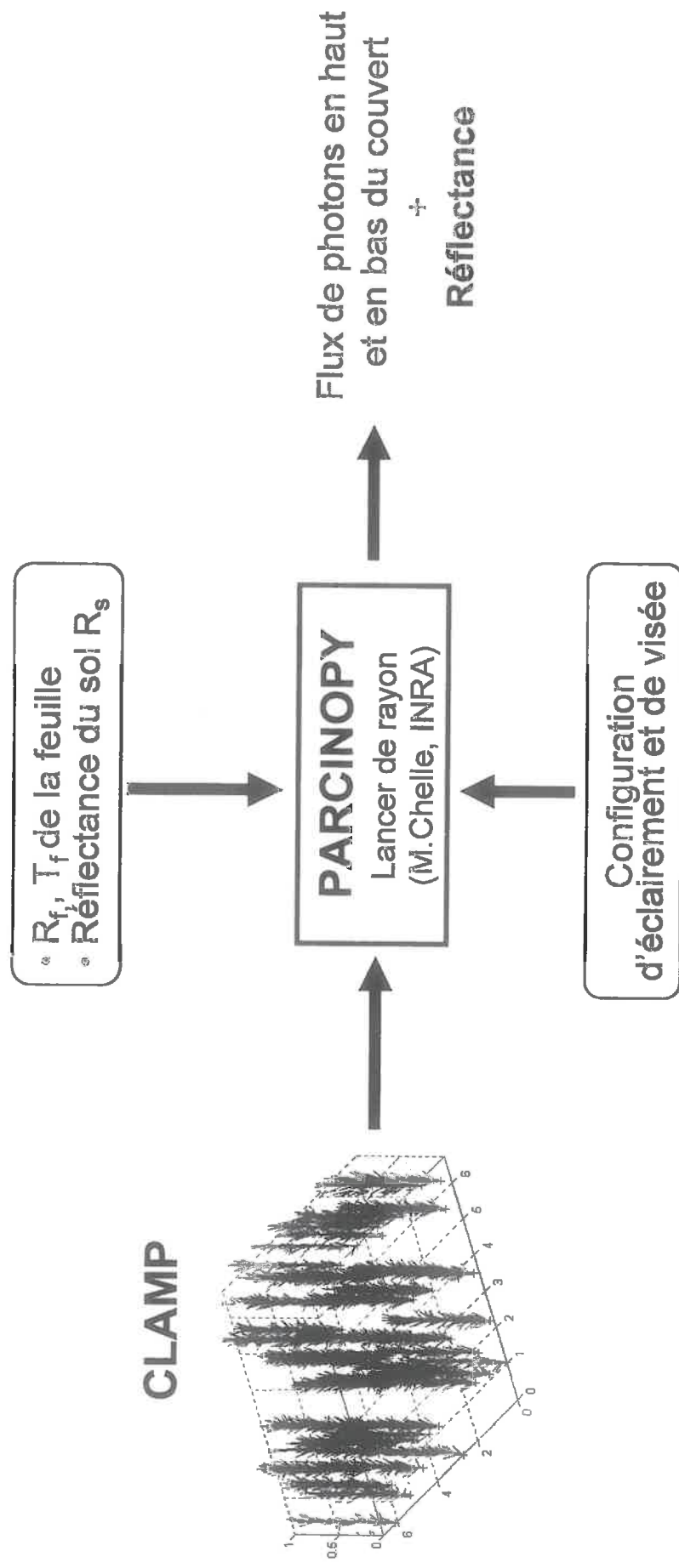
- Développement du modèle d'agrégation des feuilles CLAMP.
- Construction d'une base de 456 maquettes
- Temps de calcul est variable entre 30mn- 5jours.
- Cas des pins non étudié → limites du modèle.
- Possibilité de simuler les distributions en rang.

Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP**
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP**
 - 2.1- Approche adoptée
 - 2.2- Paramétrisation spectrale des termes de diffusions
 - 2.3- Paramétrisation structurale
 - 2.4- Éléments de validation
- 3- Conclusions et Perspectives**

2.1- approche adoptée

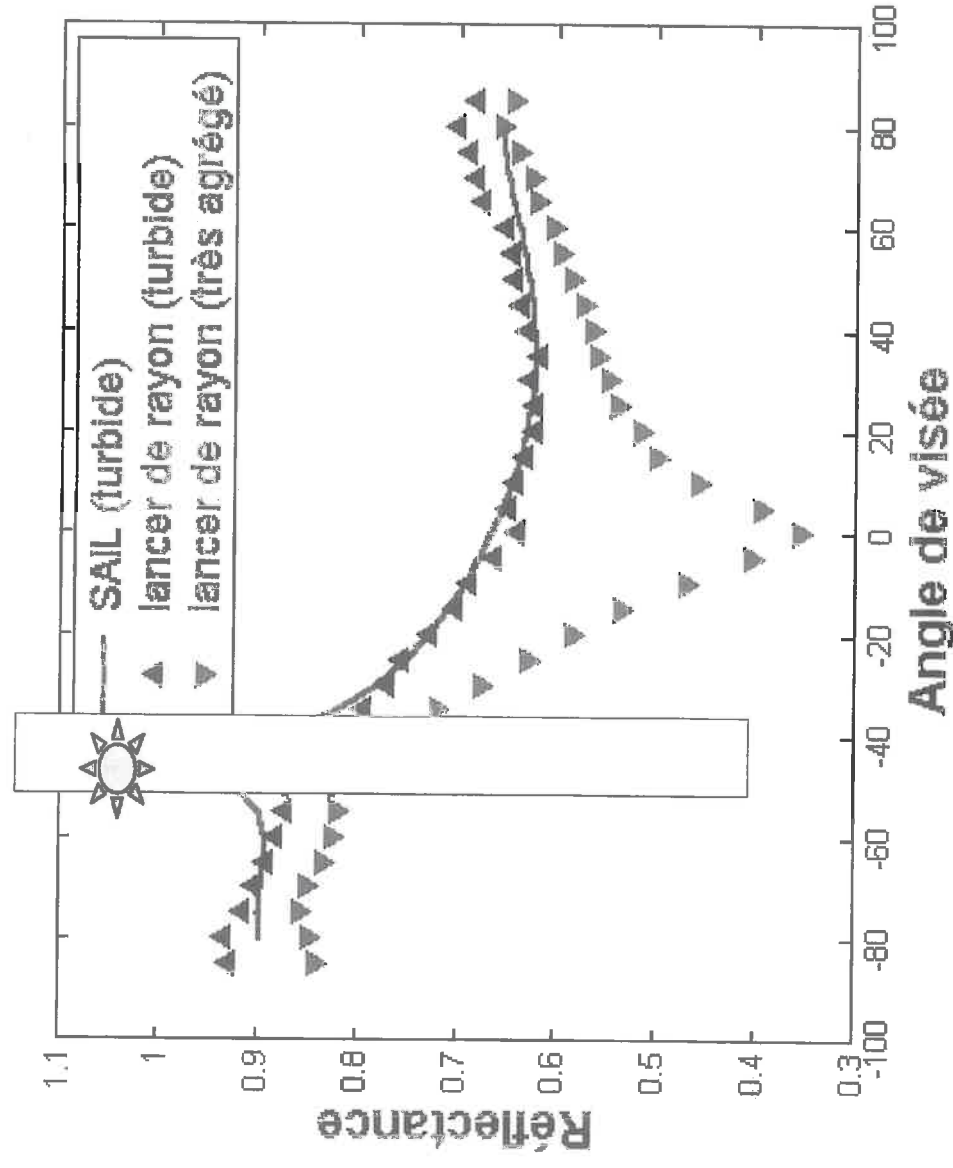
Calcul du transfert radiatif par lancer de rayons



Temps de calcul important : quelques mn à 40h

- réduit les cas d'échantillonnage
- limite l'utilisation de **PARCINOPY** en mode inverse

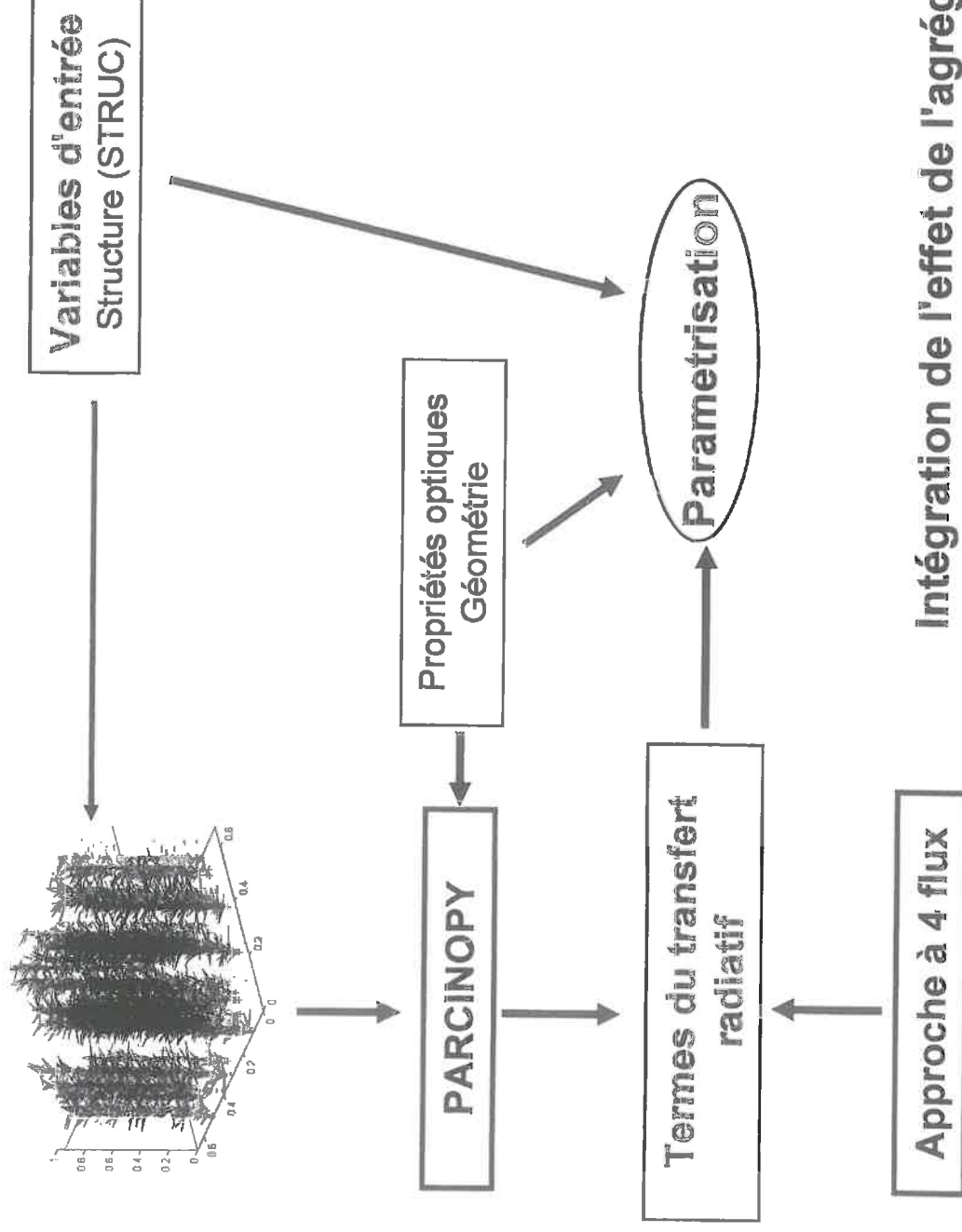
Résultats: simulation de la réflectance de couverts agrégés



- Cohérence avec modèle turbide dans le cas homogène
- Importance de l'effet d'agrégation

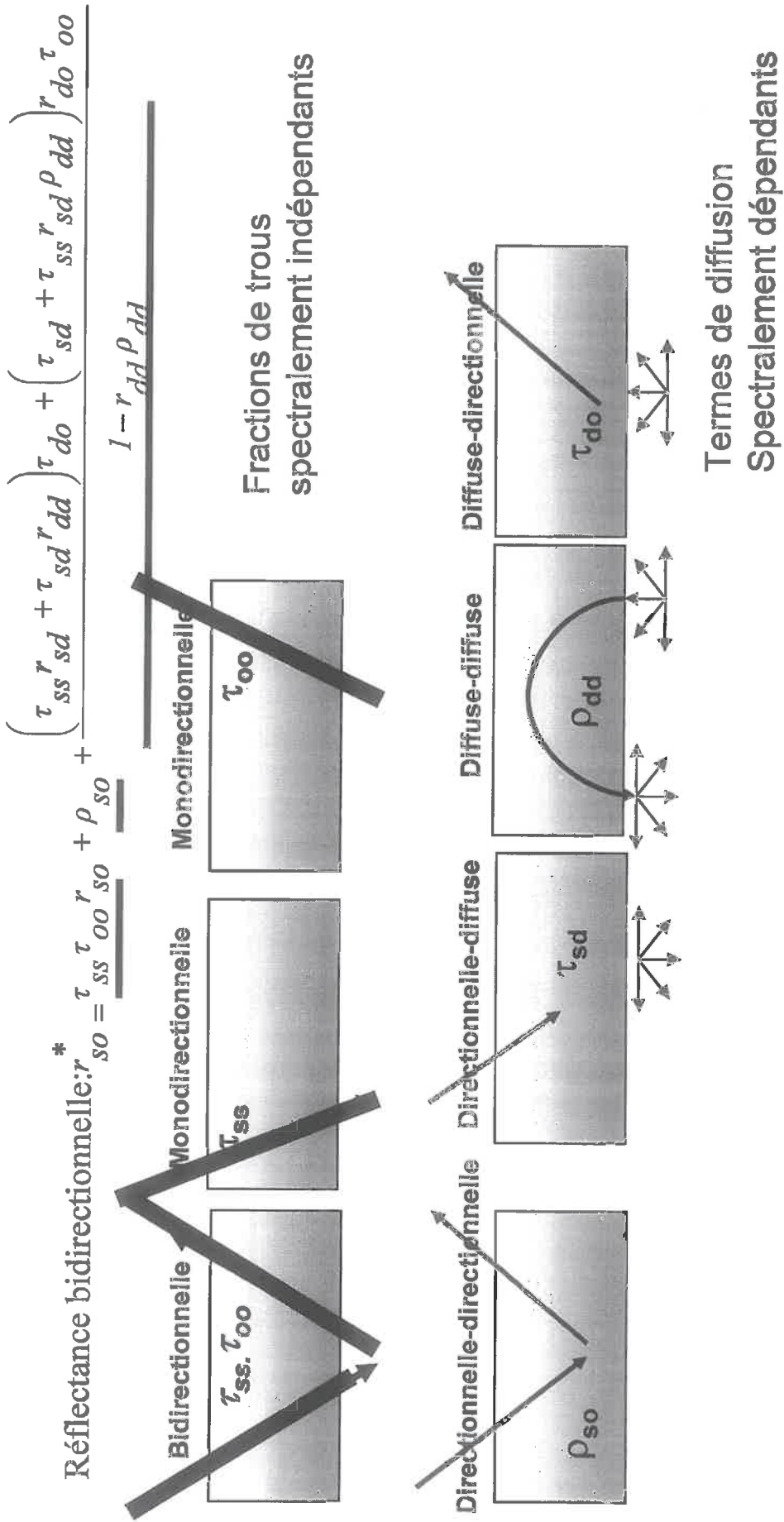
Prise en compte de l'agrégation des feuilles dans la modélisation de la réflectance

CLAMP



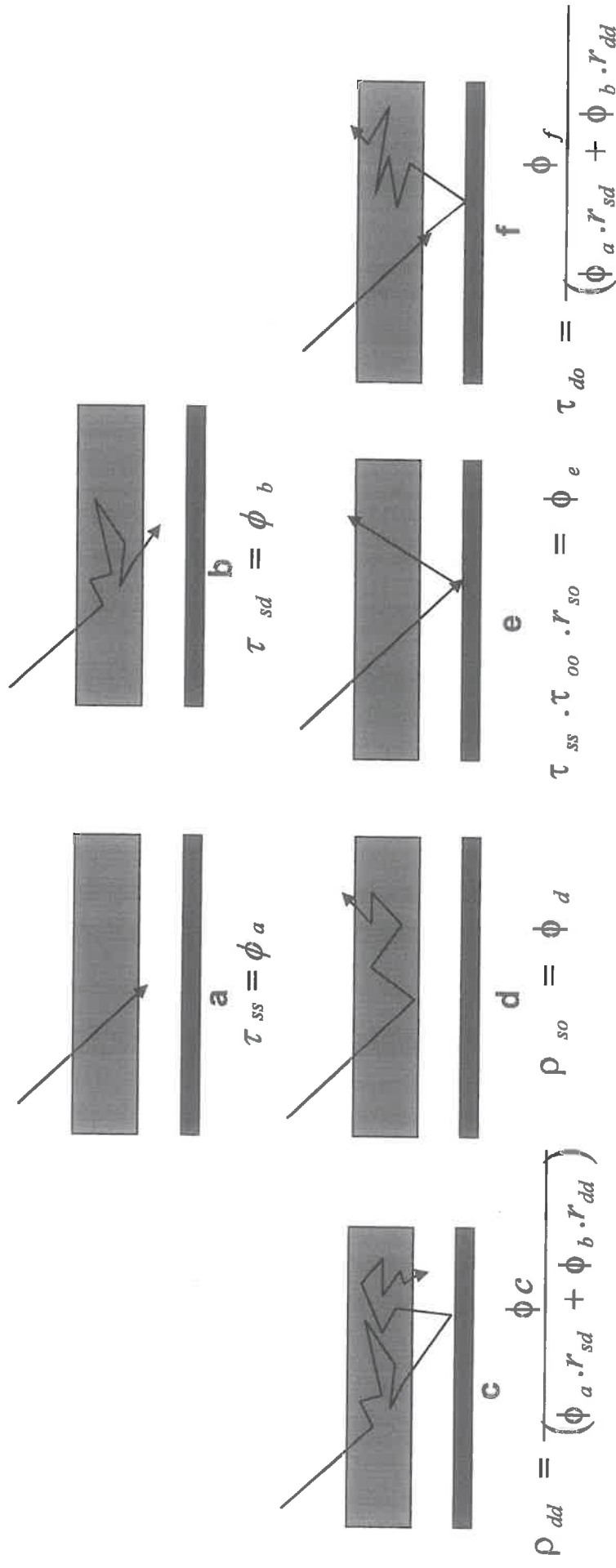
Intégration de l'effet de l'agrégation dans les termes du transfert radiatif paramétrés sur CLAMP

Approximation du transfert radiatif à 4 flux

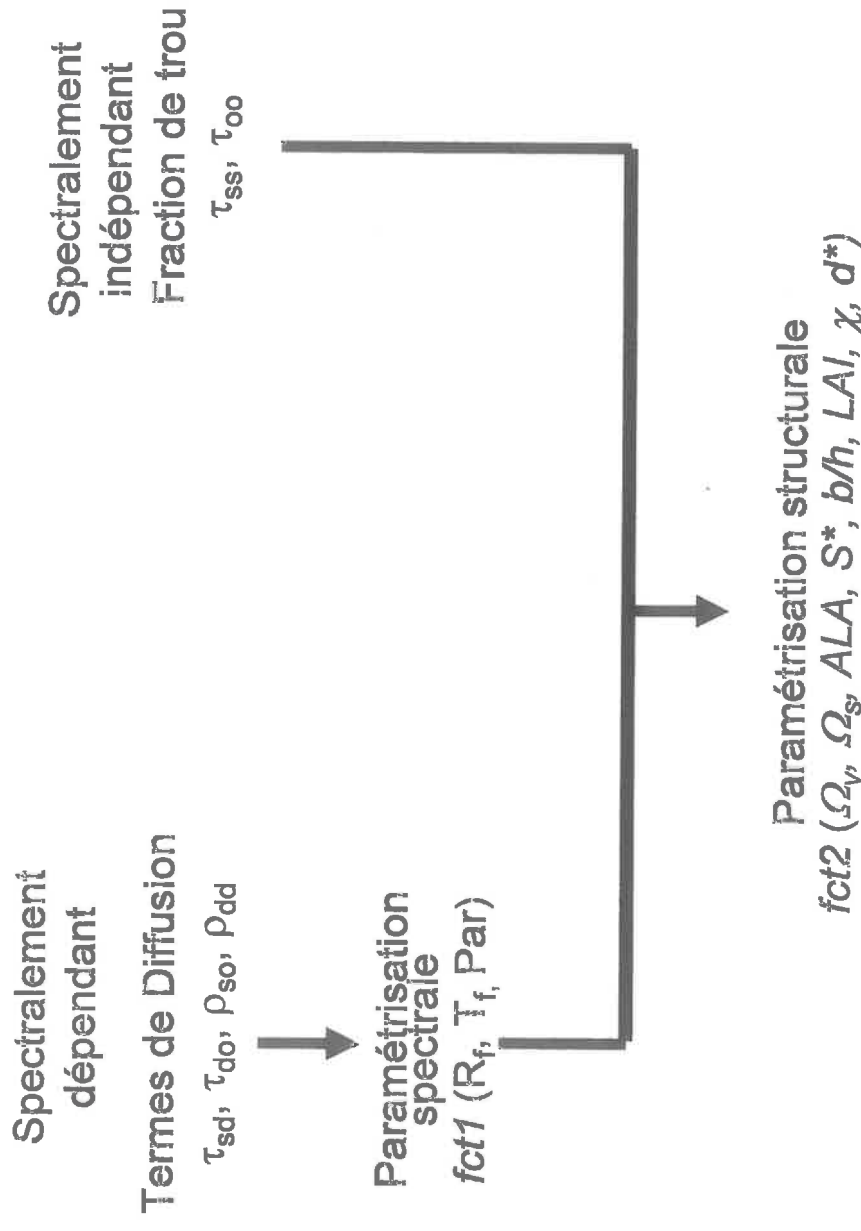


Calcul des termes du transfert radiatif (4 flux) sur les maquettes 3D

Simulation par PARCINOPLY des termes à partir des flux en haut et en bas du couvert



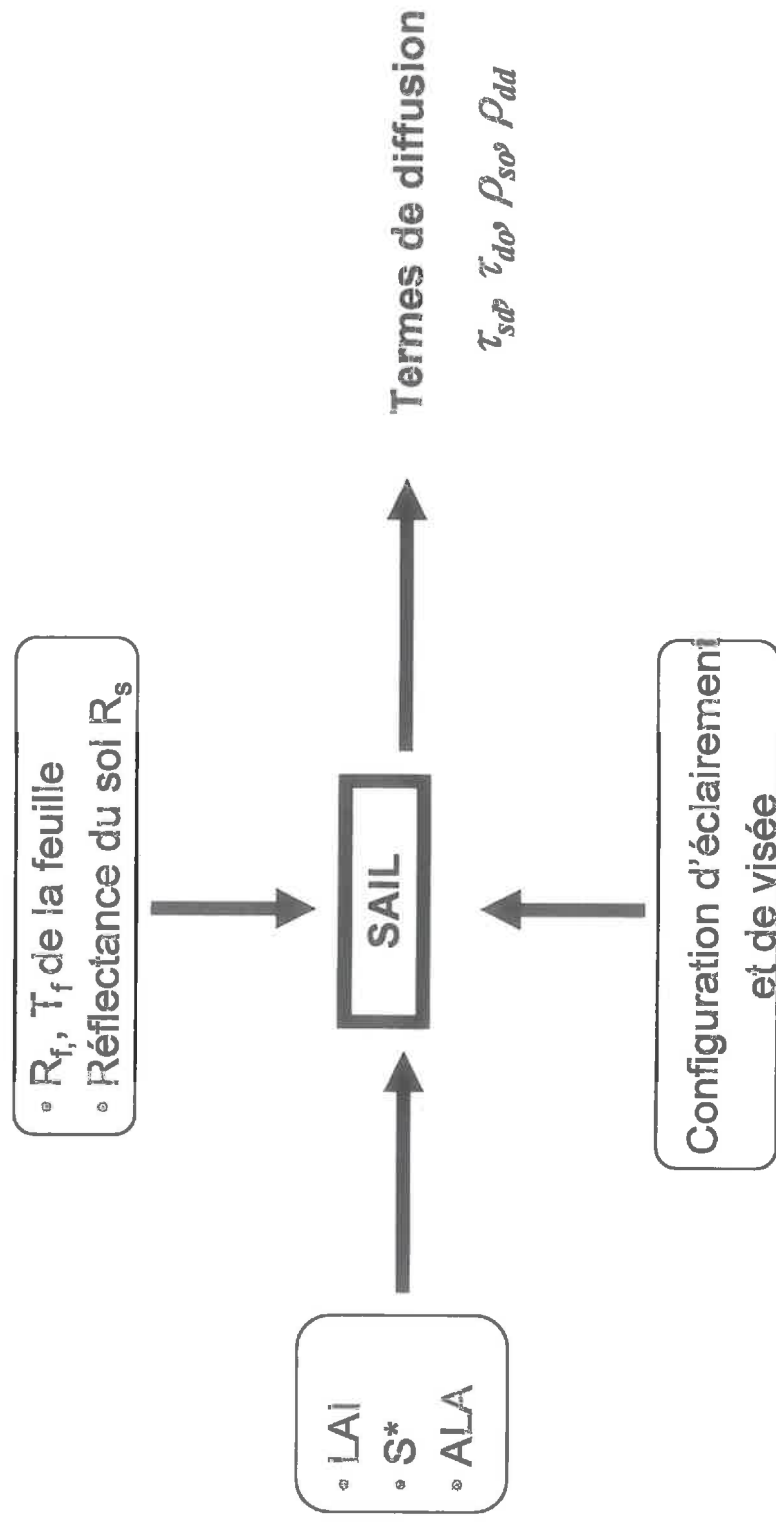
Paramétrisation de la fraction de trou et des termes de diffusions



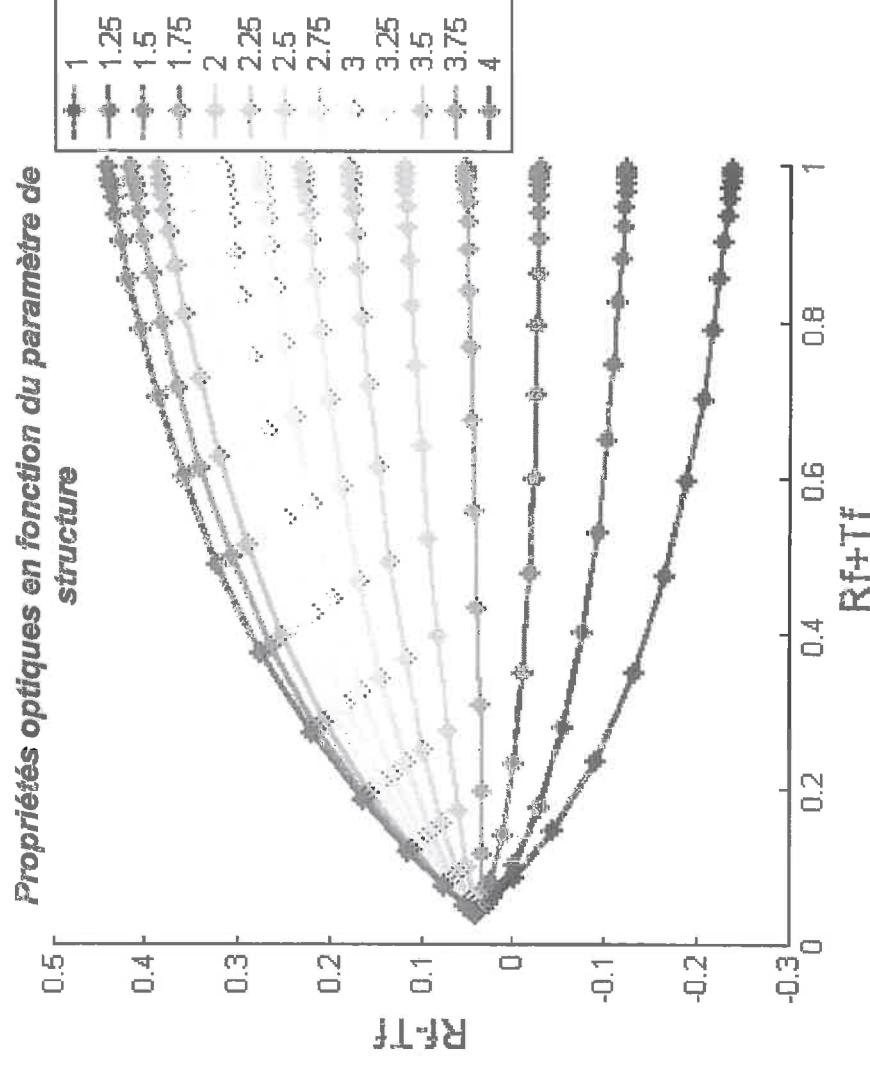
Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP**
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP**
 - 2.1- Approche adoptée**
 - 2.2- Paramétrisation spectrale des termes de diffusions**
 - 2.3- Paramétrisation structurale**
- 3- Conclusions et Perspectives**

Evaluation des termes de diffusion dans le modèle turbide SAIL

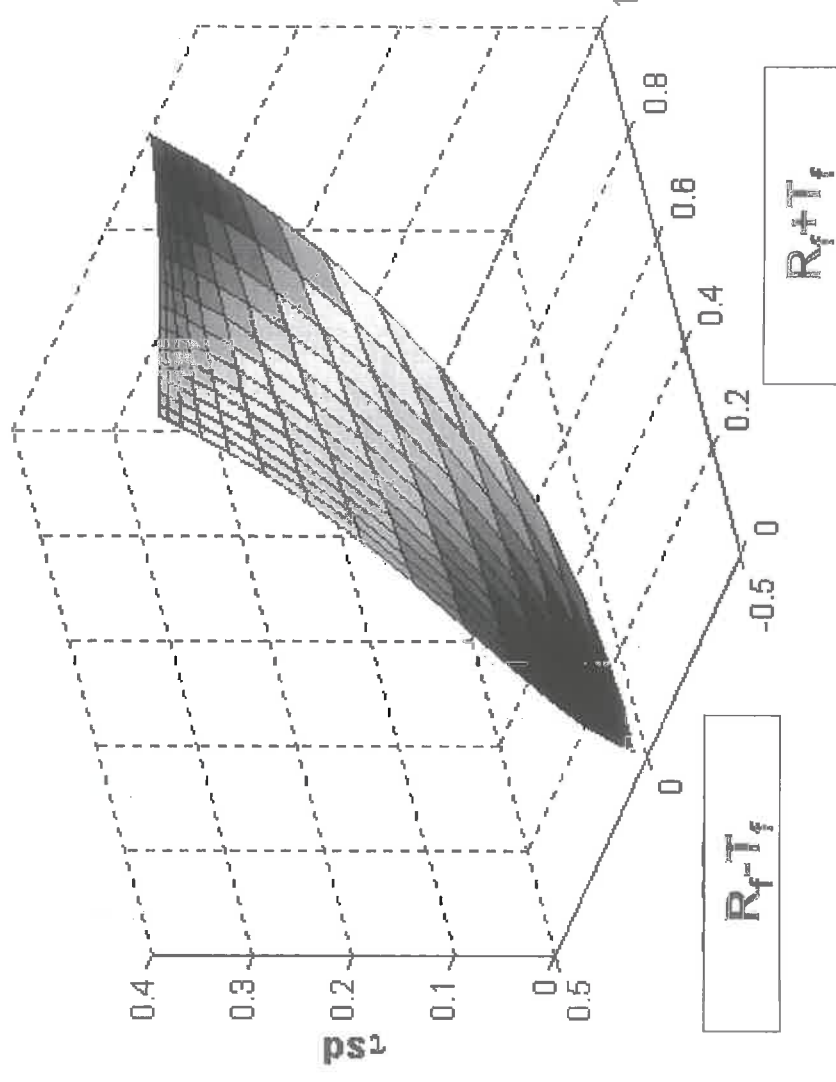


Echantillonnage des propriétés optiques des feuilles



- Les propriétés optiques de la feuille dépendent de:
coefficient d'absorption ($K=[0:10]$)
indice de structure $N=[1-4]$
- Evaluation des termes de diffusions en fonction de $(R_f + T_f)$ et $(R_f - T_f)$
- 286 combinaisons de $(R_f + T_f)$ et $(R_f - T_f)$ considérées

Importance de la prise en compte de R_f-T_f



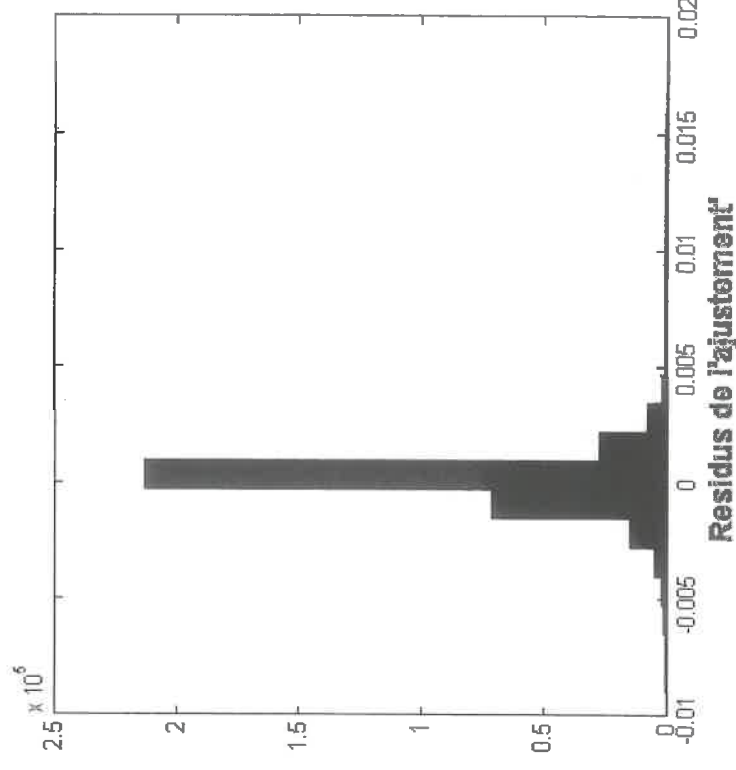
- Augmentation des valeurs des termes de diffusion en fonction de $(\rho_f + \tau_f)$
- Importance du terme (R_f-T_f) !!

Paramétrisation spectrale des termes de diffusions

-- Dépendance de $R_f + T_f$ et $R_f - T_f$

$$(R_f + T_f) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \tau_{sd} = 0 \\ \tau_{do} = 0 \\ \rho_{dd} = 0 \\ \rho_{so} = 0 \end{cases}$$

$$\{\tau_{sd}, \tau_{do}\} = (R_f - T_f) \cdot \sum_i a_i \cdot (R_f + T_f)^i + \sum_i b_i \cdot (R_f + T_f)^i$$



- 9 à 10 coefficients nécessaires pour paramétrer la dépendance spectrale des termes de diffusion

Bilan

- Importance de la prise en compte de $R_f - T_f$
- 9 à 10 coefficients nécessaires pour paramétrer la dépendance spectrale

Application au modèle CLAMP ? : limitation liées aux temps de calcul!!!

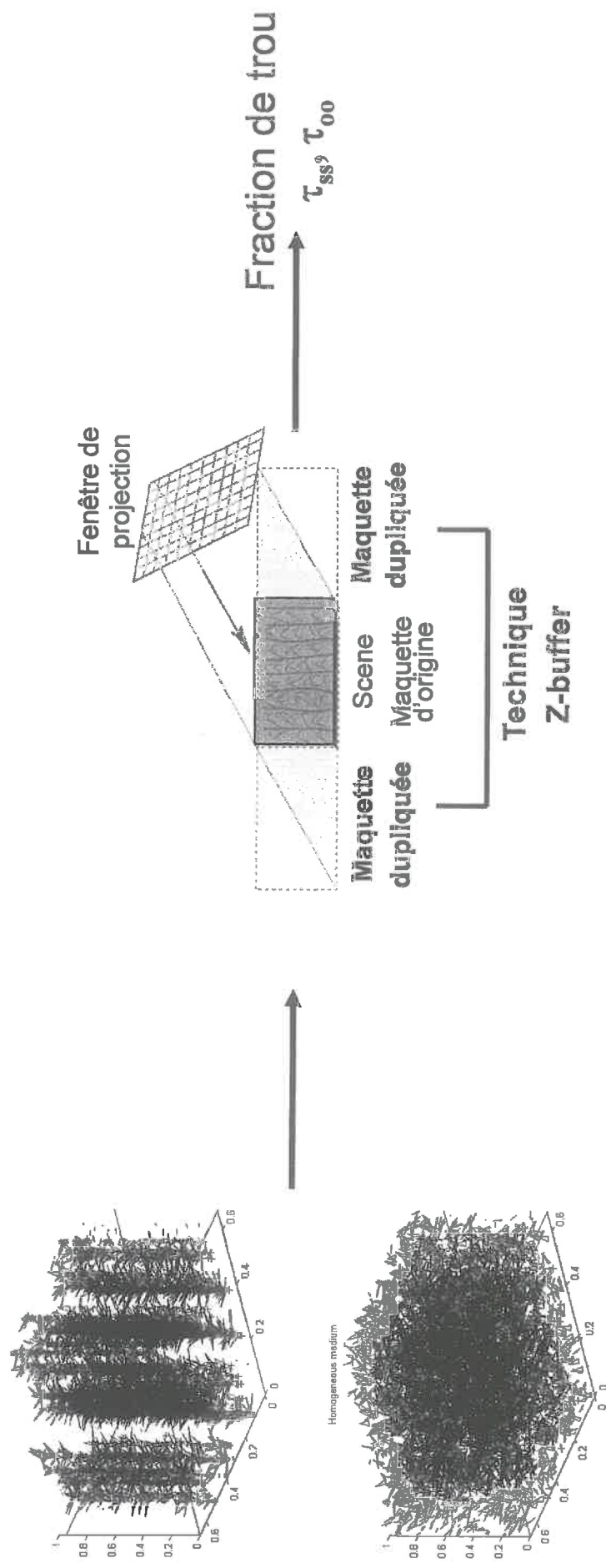
Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP**
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP**
 - 2.1- Approche adoptée
 - 2.2- Paramétrisation spectrale des termes de diffusions
 - 2.3- Paramétrisation structurale
 - 2.4- Eléments de validation
- 3- Conclusions et Perspectives**

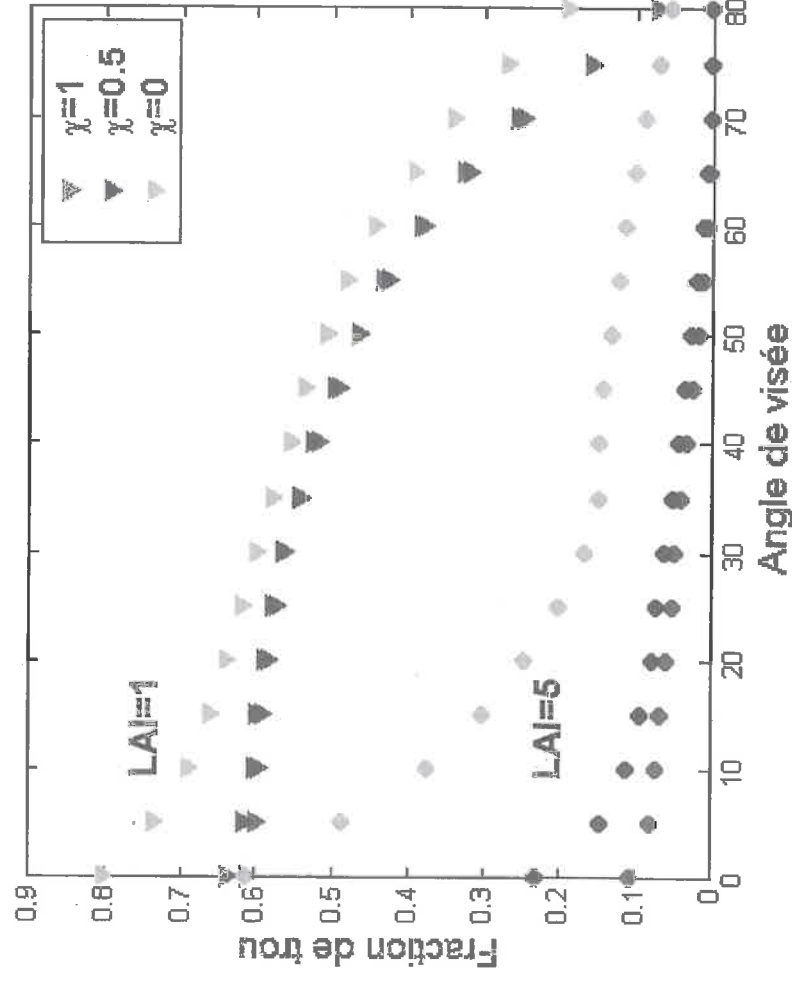
Calcul de la fraction de trou sur les maquettes 3D

$$\tau_{ss}, \tau_{00}$$

- Utilisation d'une approche géométrique (plus rapide que le lancer de rayons) pour le calcul de la fraction de trou



dépendance de la fraction de trou à la distance relative tige feuille χ et au LAI



- Diminution de la fraction de trou avec l'angle de visée
- Diminution de la sensibilité à χ avec l'angle de visée
- Sensibilité à χ augmente avec le LAI plus particulièrement autour du nadir

Utilisation du modèle de poisson étendu

Modèle de trou Poisson étendu

$$P_0(\theta) = \exp \left[\frac{-\lambda_0(\theta, \text{Struc}) \text{LAI} \cdot G(\theta, \text{ALA})}{\cos(\theta)} \right]$$

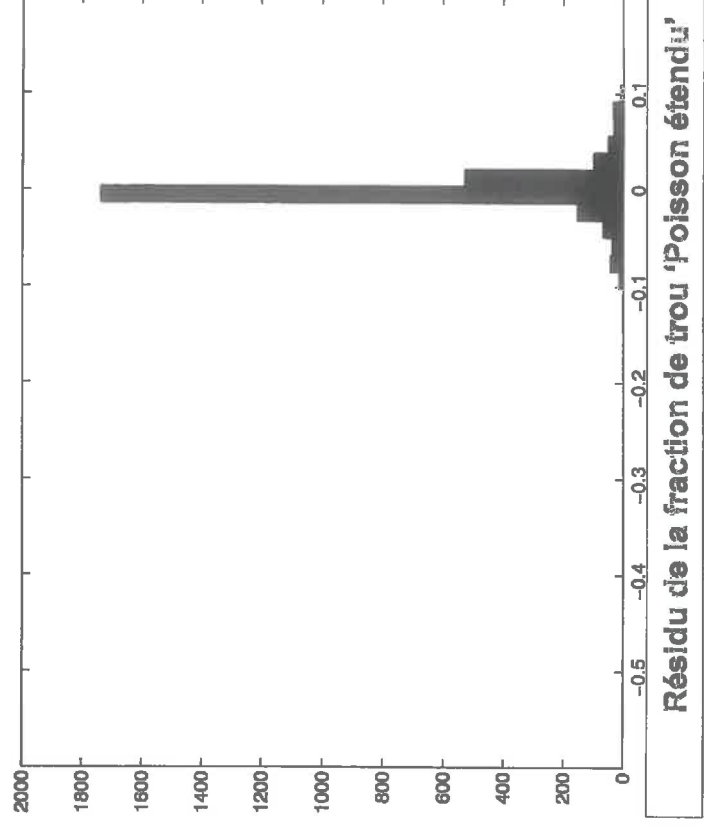
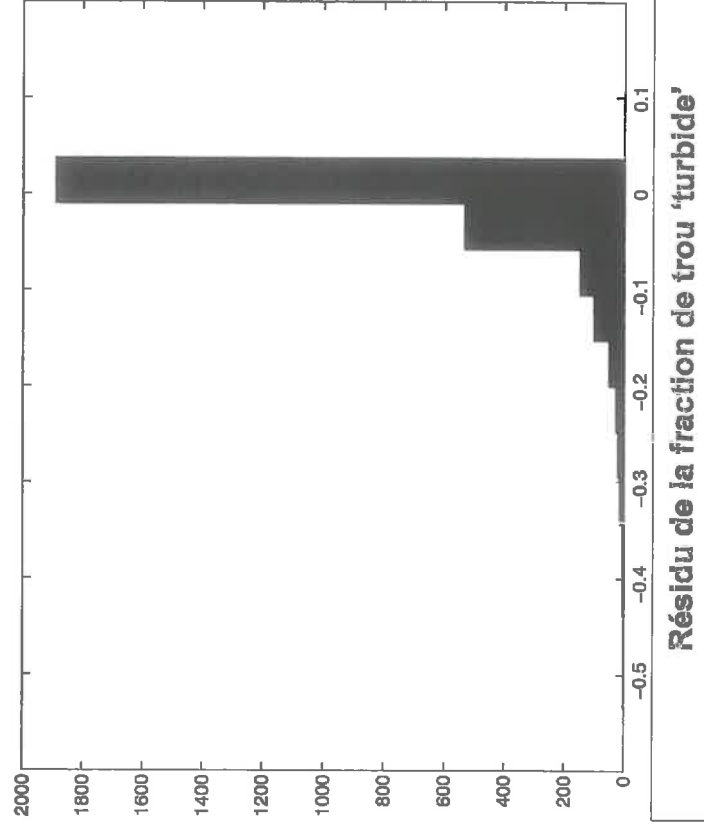
Struc : Caractéristiques du couvert

$G(\theta, \text{struc})$ = projection de l'inclinaison des feuilles suivant la direction de visée

- $\lambda_0(\theta, \text{struc}) = 1$ structure turbide
 - $\lambda_0(\theta, \text{struc}) < 1$ structure agrégée $\lambda_0(\theta, \text{struc})$: paramètre d'agrégation
- Ajustement du paramètre d'agrégation pour tous les LAI correspondant à un *STRUC*

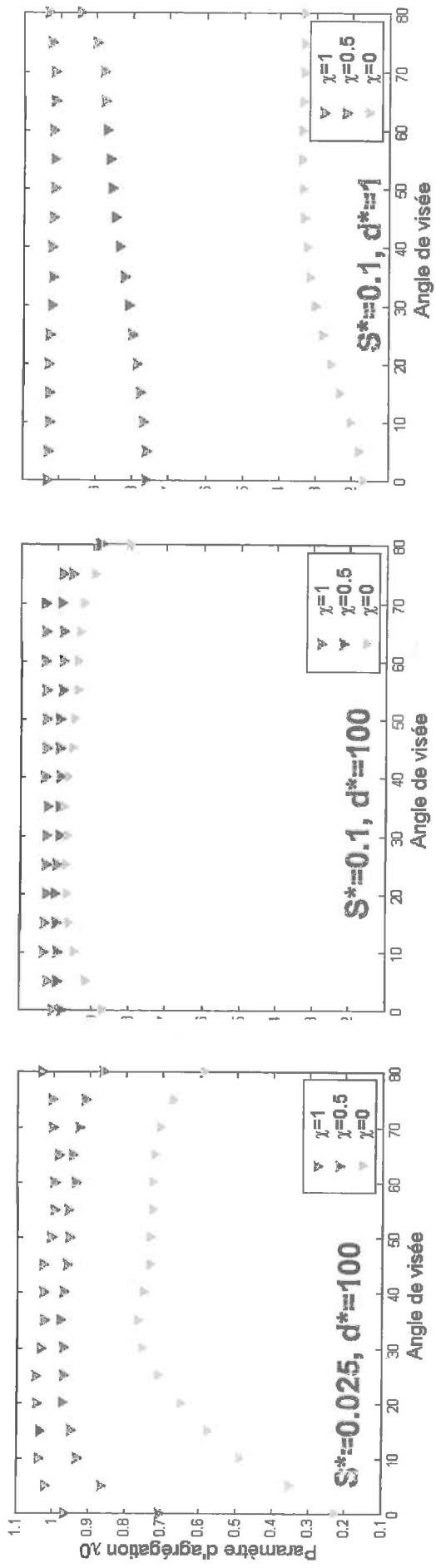
Performances du Poisson étendu

- Meilleure performance pour les maquettes agrégées du modèle de Poisson étendu
 - Bonne cohérence pour les maquettes homogènes
- Validation de la démarche : justification *a posteriori* de CLAMP et Z-buffer
- Bon ajustement de la fraction de trou à l'aide de $\lambda_o(\theta, \text{struc})$



- Evaluation de la dépendance en fonction de (θ, struc)
- Paramétrisation de en fonction de (θ, struc)

Sensibilité du λ_0 aux caractéristiques structurales du couvert

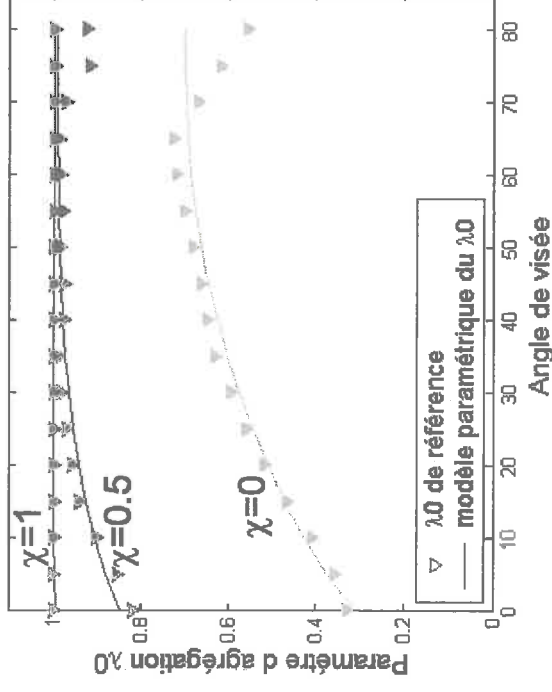


- Diminution du paramètre d'agrégation
 - en fonction de la distance relative tige-feuille
 - autour du nadir
- Sensibilité à χ
 - Maximum de au voisinage du nadir
 - Diminution lorsque la taille S^* et la densité relative des plantes d^* augmentent (nb feuilles/plante)

Paramétrisation du λ_0

➤ niveau 1: variation directionnelle

$$\lambda_0(\theta) = d(\chi, d^*, S^*) + b(\chi, d^*, S^*) \exp[-c(\chi, d^*, S^*) \tan(\theta)]$$



➤ niveau 2: dépendance à χ

$$d(\chi) = a_1 + (a_2 \cdot e^{(-a_3 \cdot \chi)} - a_4 \cdot e^{(-a_5 \cdot \chi)})$$

$$b(\chi) = b_1 \cdot e^{(-b_2 \cdot \chi)} - b_3 \cdot e^{(-b_4 \cdot \chi)}$$

$$c(\chi) = c_1 \cdot \chi^3 + c_2 \cdot \chi^2 + c_3 \cdot \chi + c_4$$

(a_i, b_i, c_i) = fonction(S^*, d^*)

- 13 coefficients nécessaires pour paramétrer la fraction de trou en fonction de χ et θ .

Bilan

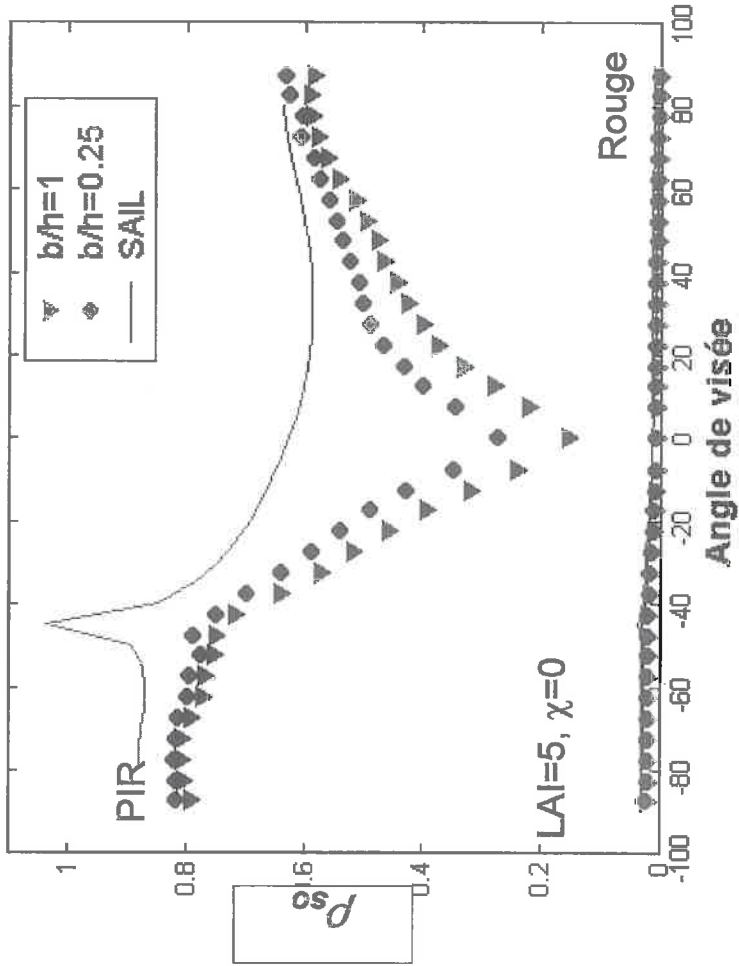
- Le modèle de Poisson étendu décrit d'une manière satisfaisante la fraction de trou des milieux agrégés
- Mise en évidence de la sensibilité du λ_0 à:
 1. l'angle zénithal
 2. la distance relative tige-feuille ' χ '
 3. la taille de la feuille ' S^* '
 4. la densité des plantes ' d^* '
- Effet de la forme et l'inclinaison de la feuille est marginal sur la fraction de trou
- Paramétrisation du paramètre d'agrégation λ_0 en fonction de l'angle de visée et χ

Problèmes à résoudre:

- Extension de la paramétrisation de la fraction de trous S^* et d^*
- Paramétrisation des termes de diffusion

Prise en compte de l'effet forme des feuilles

Effet de la forme de la feuille sur le réflectance directionnelle-
directionnelle de la végétation



- Diminution en fonction de la forme de la feuille 'b/h' dans les couverts très agrégés ayant un fort LAI.

Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP**
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP**
 - 2.1- Approche adoptée
 - 2.2- Paramétrisation spectrale des termes de diffusions
 - 2.3- Paramétrisation structurale
 - 2.4- Eléments de validation
- 3- Conclusions et Perspectives**

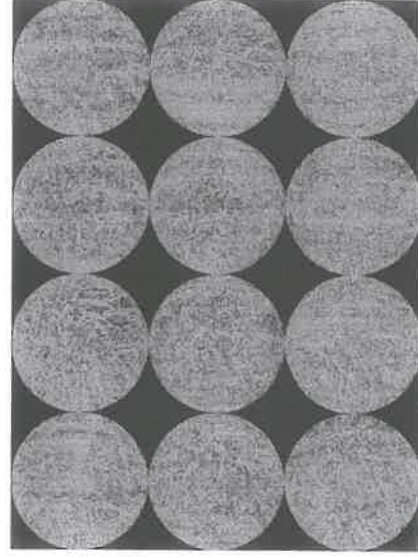
Validation du modèle paramétrique de fraction de trou

Méthode

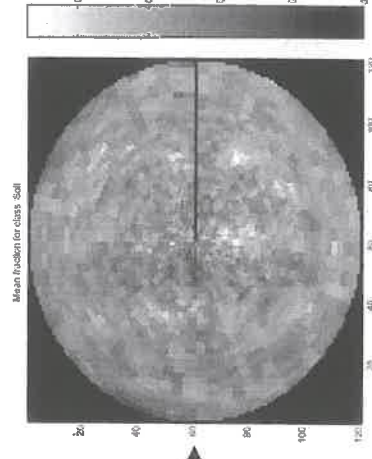
Estimation des paramètres du modèle de Poisson étendu sur des mesures de Fraction de trou

Mesures

- Plusieurs types de couvert : Blé, maïs, tournesol, prairie, forêt, ...
- Photos hémisphériques: Base de données VALERI
- Traitement des photos: Logiciel Can Eye INRA Avignon

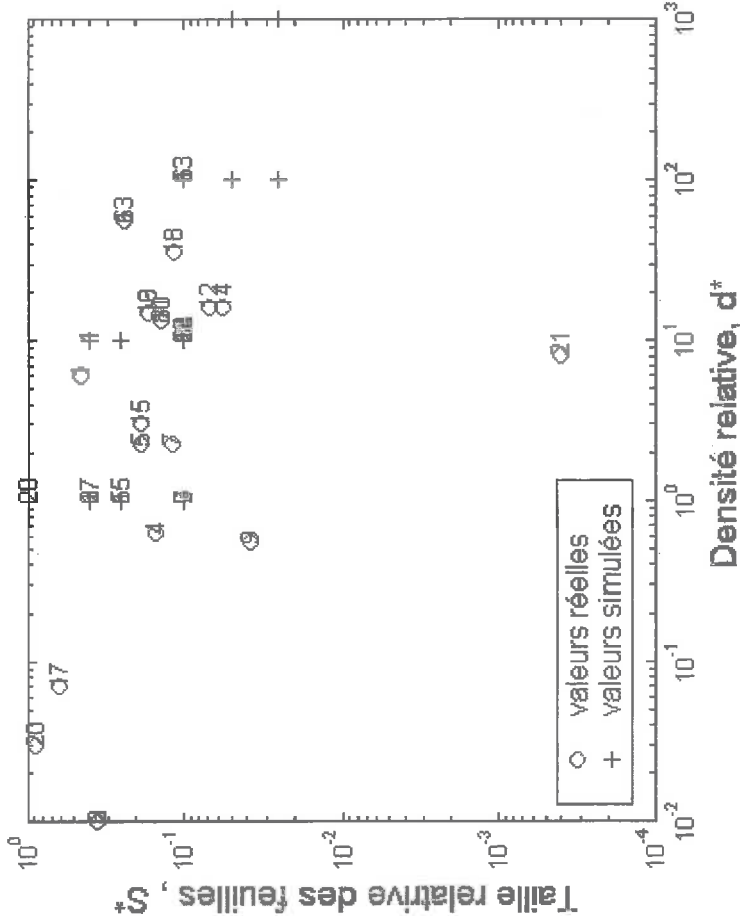


Segmentation
de l'hémisphère



Fraction de trou
moyenne azimutal

Ajustement du modèle de fraction de trou paramétré

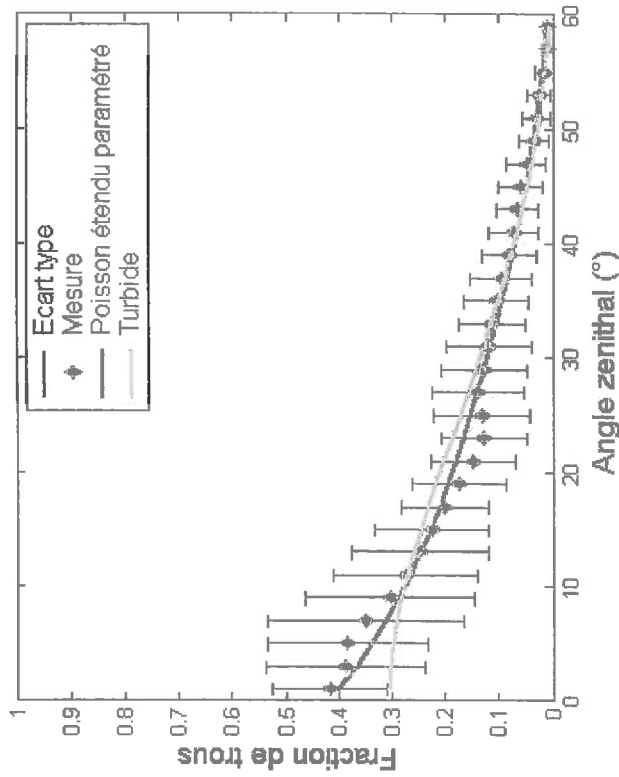
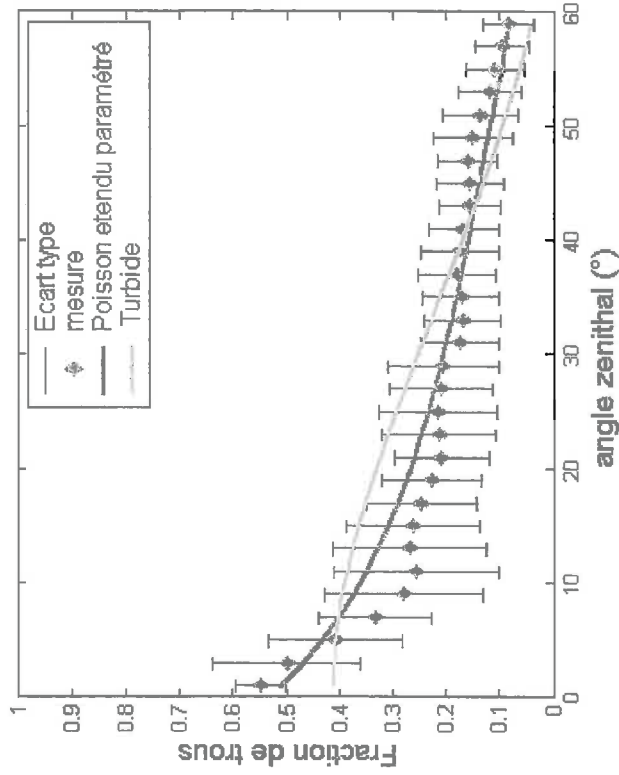
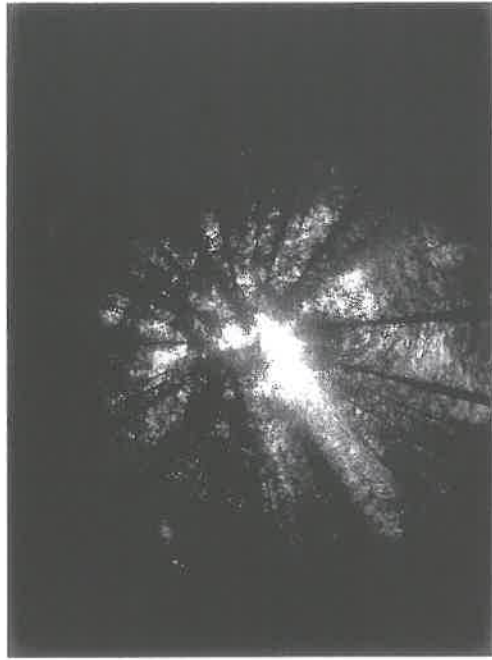


- Recherche du couple S*,d* le plus proche du cas considéré
- Utilisation des coefficients correspondant

■ Ajustement des modèles turbide et paramétrique sur les mesures de fraction de trou:

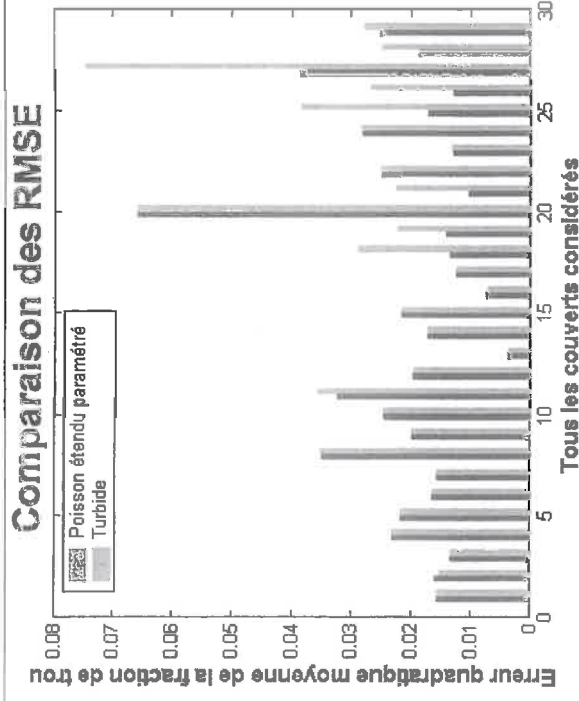
$$F_{m1} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_0^{\text{Modèle}}(\theta) - P_0^{\text{Photos}}(\theta)}{\sigma_{P_0}} \right]^2 + \left(\frac{ALA - 60}{15} \right)^2 + \left(\frac{\chi - 1}{0.5} \right)^2$$

Evaluation sur deux cas particuliers



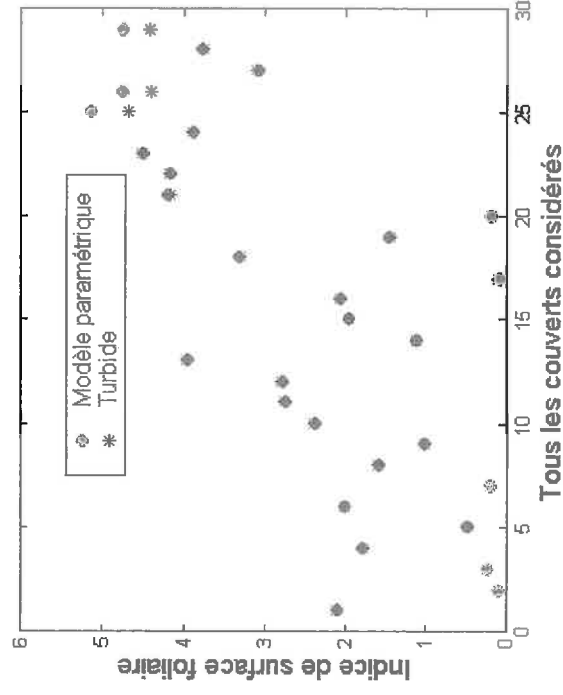
- Meilleur ajustement de Po avec notre modèle: prise en compte de l'agrégation

Evaluation sur un ensemble de couverts

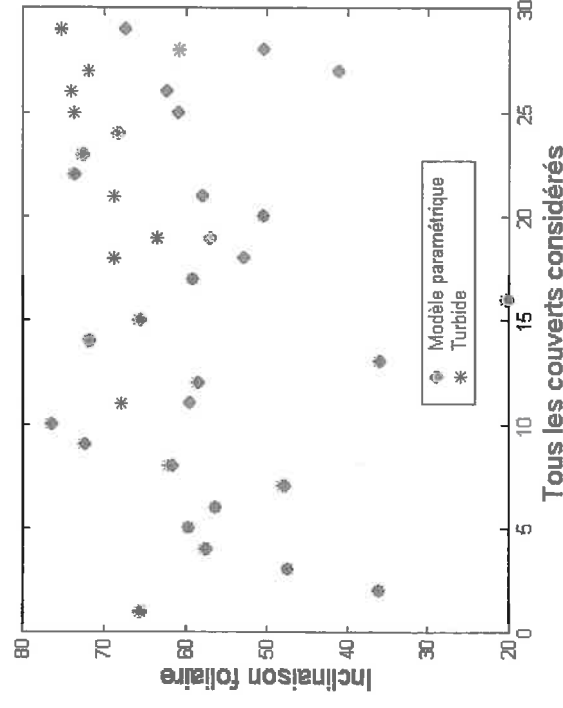


- le modèle paramétrique montre de meilleures performances pour les LAI élevés et les couverts agrégés (pins)
- les sous estimations de l'indice de surface foliaire par le modèle sont d'environ 10%
- Compensations des défauts d'agrégation par ALA

Estimation du LAI



Estimation du ALA



Bilan

Validation partielle :

- L'importance de l'agrégation pour les forts LAI
- La confusion possible de l'effet d'agrégation et d'inclinaison:
utiliser la distribution des tailles de trous?

Problemes à résoudre:

Valider le modèle de fraction de trous à partir de mesures directes de LAI

- Sur des mesures in situ
- Sur des simulations de maquettes réalistes

Plan

- 1- Modélisation de l'agrégation des feuilles: Modèle CLAMP**
- 2- Vers un modèle paramétrique de réflectance appliqué à CLAMP**
 - 2.1- Approche adoptée
 - 2.2- Paramétrisation spectrale des termes de diffusions
 - 2.3- Paramétrisation structurale
 - 2.4- Eléments de validation
- 3- Conclusions et Perspectives**

Conclusions

Apport du travail

Développement du modèle 'CLAMP': prise en compte générique de l'agrégation

- Variables d'entrée : LAI , ALA , S^* , d^* , χ , b/h (trois variables supplémentaires)

Vérification de l'importance de l'agrégation sur le transfert radiatif

- Dans les directions proches du nadir: conséquences sur l'estimation des variables par télédétection

Démarche pour décrire le transfert radiatif sur des maquettes complexes

- Utilisation de l'approche à quatre flux
- Paramétrisation en fonction de $(R_f T_f)$ et $(R_f + T_f)$
- Paramétrisation du λ_0 en fonction de l'angle zénithal et χ

Limites

Hypothèses

- L'agrégation des feuilles dans le modèle CLAMP tient compte d'un seul niveau d'agrégation (autour des tiges et troncs)
- Effet de rang n'a pas pu être traité
- L'approximation à quatre flux constitue une hypothèse de travail qui reste à vérifier

Réalisation

- Temps de calcul élevé pour la génération des maquettes et le lancer de rayon
- Le développement du modèle paramétrique de la réflectance inachevé

Perspectives

Compléter le modèle paramétrique de réflectance du couvert

Plan d'échantillonnage plus large à redéfinir (amélioration du code CLAMP)

Amélioration de PARCINOPY (multispectral)

Valider le modèle

Modèles architecturaux réalistes :

- aspects botaniques et écophysiologique considérés (AMAP- CIRAD)

Mesures de terrain (Fraction de trou, réflectance du couvert)

Appliquer le modèle

Au lieu du modèle turbide sur des données de télédétection à moyenne résolution.

- Distribution des variables du modèle
 - Utilisation des photos hémisphériques (VALERI)
- Application aux données hautes résolution sur blé (ADAM)
- Intégrer l'effet rang dans le modèle CLAMP

CHAPITRE I

1. Introduction

Les surfaces continentales constituent une composante majeure du fonctionnement de l'environnement terrestre : elles sont le siège des échanges énergétiques avec l'atmosphère, et participent à la régulation des cycles de l'eau et du carbone. Elles représentent en outre le domaine privilégié d'exploitation par l'homme pour satisfaire ses besoins énergétiques alimentaires tout en constituant son cadre de vie. Pour ces raisons, les surfaces continentales constituent un objet d'étude privilégié afin de gérer au mieux ses ressources sur des échelles de temps tendant de plus en plus sur le long terme.

Le suivi du fonctionnement des écosystèmes permet de diagnostiquer leur état et éventuellement pronostiquer leur devenir sous la contrainte de différents scénarios d'activité anthropique. Les applications visées par un suivi des écosystèmes naturels ou cultivés incluent :

- Gestion adaptée des pratiques agricoles qui se traduit par : i) une modulation des pratiques culturales en tenant compte de l'hétérogénéité inter et intra parcellaire de sorte à optimiser l'apport des intrants tout en préservant au maximum l'environnement (réduire la pollution de l'air et des nappes). C'est le domaine de l'agriculture de précision, une 'branche' de l'agriculture raisonnée qui fonde toute décision sur les pratiques culturales sur une analyse agronomique, économique et environnementale détaillée.
- L'estimation des productions des couverts végétaux à des échelles régionales, nationales et globales en vue d'une meilleure gestion à la fois économique, mais aussi en vue de palier les insuffisances alimentaires qui malheureusement sont encore bien présentes, en particulier pour les pays du sud.
- Aux échelles plus larges, la modélisation des cycles biogéochimiques du carbone, de l'eau et des éléments nutritifs majeurs (N, P, Fe) permet en particulier de caractériser la variabilité des sources et puits de gaz à effet de serre impliqués dans les changements climatiques que nous commençons à percevoir nettement.

La réponse à ces besoins nécessite une bonne compréhension et description des processus physiques chimiques et biologiques qui interviennent dans le fonctionnement de la biosphère. Ceci permet de développer des modèles qui représentent ces principaux processus et leurs interactions (transpiration, photosynthèse, échanges de masse et d'énergie, transfert du rayonnement solaire et atmosphérique, transfert de l'eau et des solutés dans les sols...). Toutefois, ces modèles requièrent une quantité importante d'information en entrée, ainsi qu'un étalonnage et une phase de validation nécessaires avant toute utilisation. La télédétection constitue un outil privilégié qui fournit des

informations pertinentes sur certaines variables d'état des sols ou de la végétation. Grâce à sa capacité à couvrir fréquemment de larges étendues à différentes résolutions spatiales et temporelles, l'observation satellitaire représente un bon complément au suivi in situ généralement ponctuel dans l'espace, voire dans le temps.

Ces dernières années la télédétection a connu le développement d'une panoplie de capteurs multispectraux fonctionnant dans le domaine solaire (400-2500 nm). (AVHRR/NOAA, VEGETATION/SPOT, POLDER/ADEOS, MODIS/TERRA-AQUA, MERIS/ENVISAT, SEVIRI/MSG...) à moyenne résolution (0.3-7.0 km) et ayant une large fauchée permettant d'assurer une forte répétitivité des observations. Ces systèmes sont complétés par les capteurs à haute résolution spatiales (1.0-30m) (IKONOS, Quickbird, SPOT, TM, ...) mais qui sont encore limités en fréquence d'observation (15 à 30 jours).

Le domaine spectral 'solaire' permet d'accéder à des caractéristiques biophysiques principales telles que l'indice foliaire (LAI), la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert (f_{APAR}), le taux de couverture (f_{Cover}) et la concentration en chlorophylle (C_{ab}) ou encore l'albédo. Ces variables biophysiques contrôlent et sont contrôlées par les processus principaux impliqués dans le fonctionnement de la surface. La connaissance de ces variables d'état, permet donc d'améliorer notre connaissance des processus, et leur variabilité spatiale et temporelle. De nombreux travaux ont été ainsi entrepris pour estimer ces variables d'intérêt à partir des données de télédétection. L'accès à une telle information à partir des données de télédétection nécessite l'utilisation de modèles basés sur des lois empiriques ou physiques qui décrivent les relations entre ces variables d'état du couvert et le signal radiométrique enregistré par le capteur.

Les modèles empiriques consistent à corrélérer, par des relations simples, les indices de végétation (NDVI, SAVI, ARVI...), à des caractéristiques du couvert (LAI , f_{APAR}). Ils ont l'avantage d'être rapides et faciles à mettre en œuvre. Ils sont cependant très sensibles à un certain nombre de facteurs perturbateurs telle que la contribution du sol, les effets atmosphériques et la géométrie de visée. Pour améliorer la robustesse des variables biophysiques estimées en prenant en compte explicitement l'influence de ces différents facteurs perturbateurs, on préfère souvent utiliser les modèles physiques. Ces modèles décrivent le transfert radiatif au sein du couvert et permettent ainsi de relier le signal radiométrique fourni par les capteurs aux caractéristiques du couvert. La détermination des variables biophysiques d'intérêt listées plus haut, nécessite d'inverser ces modèles à partir des données de télédétection (Figure 1). Le processus d'inversion consiste en une minimisation de l'écart entre les réflectances simulées et mesurées afin de déterminer les valeurs optimales des variables caractéristiques du couvert. Une bonne performance de l'algorithme d'inversion requiert d'une part un

modèle précis qui prend bien en compte la structure du couvert et d'autre part une connaissance *a priori* de la distribution des variables du modèle qui permettra de mieux contraindre l'inversion.

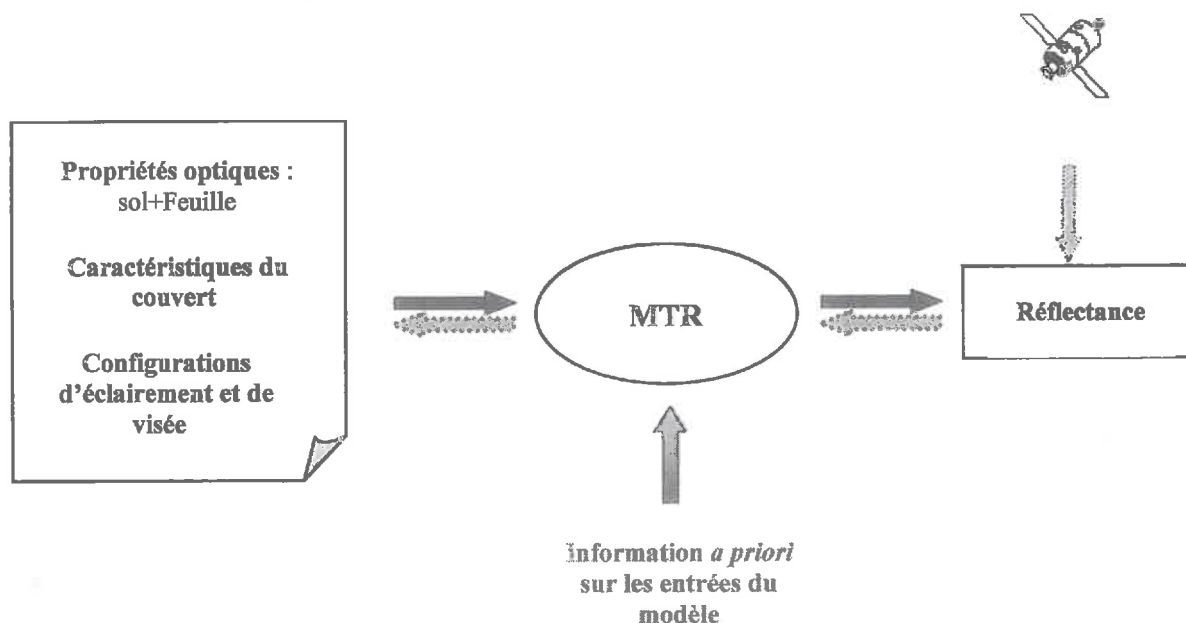


Figure 1 : Schéma décrivant le processus d'inversion des données de télédétection.

La technique d'inversion la plus classique emploie un modèle de réflectance de manière itérative dans le but de converger vers la solution recherchée. Pour pouvoir être opérationnelle, elle nécessite en plus d'une bonne description de la structure du couvert, des modèles rapides avec peu de paramètres permettant d'atteindre une bonne précision. Cependant, il est difficile de vérifier de telles conditions dans un même modèle puisque les modèles les plus complexes sont les plus exigeants en nombre de paramètres et en temps de calcul. Ceci explique l'utilisation jusqu'à maintenant de modèles rapides ne prenant en compte la structure du couvert que d'une manière très simplifiée. Ainsi l'estimation des variables biophysiques avec une précision satisfaisante exige de mettre en oeuvre des modèles plus précis prenant mieux en compte l'architecture réelle du couvert. L'agrégation des feuilles à différentes échelles est sans doute un des facteurs important à prendre en compte, tout en rendant plus complexe la description de la structure des couverts. Les modèles de transfert radiatif utilisés de manière opérationnelle supposent généralement les feuilles distribuées au hasard, donc sans prise en compte d'une agrégation possible autour d'un tronc, tige, branche ...

C'est dans ce contexte que le travail de thèse se positionne avec comme objectif principal de *proposer un modèle ayant une description de la distribution spatiale des feuilles réaliste tout en ne nécessitant que peu de variables supplémentaires et en ayant un caractère 'générique'*, c'est-à-dire qui puisse s'appliquer à un vaste ensemble de types de couvert. Nous nous concentrerons sur le développement d'un modèle générique décrivant la manière dont les feuilles sont agrégées dans le

couvert. Nous analyserons ensuite les conséquences de cette agrégation sur une variable importante du transfert radiatif : la fraction de trous. Nous proposerons ensuite une méthode permettant d'utiliser ces différents résultats dans la modélisation du transfert radiatif.

Ce manuscrit s'organise ainsi en six chapitres qui reprennent les étapes entreprises dans ce travail :

- Le **chapitre 1** correspond à cette brève introduction,
- Le **chapitre 2** reprend les bases physiques qui interviennent dans les processus d'interaction du rayonnement avec le couvert végétal. Les propriétés optiques des feuilles et du sol sont présentées en plus de quelques exemples de modélisation. Les caractéristiques du couvert qui modulent ces interactions sont ensuite succinctement décrites. Une partie de ce chapitre bibliographique porte sur la modélisation de la fraction de trou, une des principales variables de structure qui intègre ces caractéristiques et qui intervient explicitement dans les modèles physiques de transfert radiatif et de bilan d'énergie. Enfin, les principaux types de modèles physiques de réflectance sont présentés en mettant l'accent sur la manière dont l'architecture du couvert est prise en compte.
- Le **chapitre 3** présente notre modèle générique de structure agrégée des feuilles. Le couvert est décrit par des variables effectives et doit permettre de passer graduellement d'un milieu turbide comme décrit dans la majorité des modèles utilisés pour l'exploitation des données de télédétection vers un milieu dont les feuilles sont fortement agrégées.
- Dans le **chapitre 4** nous évaluons l'effet de l'agrégation des feuilles sur la fraction de trou au travers d'une analyse de dépendance en fonction des caractéristiques du couvert définies dans notre modèle d'agrégation. Cette étude a permis de mettre en avant les variables ayant un impact sur la fraction de trou et a donné lieu à une paramétrisation de cette dernière.
- Le **chapitre 5** porte sur la validation de l'approche adoptée dans ce travail pour décrire l'agrégation. Des mesures de fraction de trous par des photographies hémisphériques réalisées sur différents types de couvert ont été utilisées.
- Le **chapitre 6** développe une approche permettant de modéliser le transfert radiatif à partir de notre description de la structure générique de couverts agrégés. Pour ce faire, nous avons identifié et calculé les composantes décrivant les processus de diffusion et d'interception au sein de la végétation à partir des simulations du modèle de lancer de rayon PARCINOPY appliqué à nos structures agrégées. Ces composantes ont été ensuite évaluées en fonction des

propriétés optiques des feuilles et des caractéristiques du couvert définis dans le modèle d'agrégation. Une paramétrisation de ces composantes en fonction des coefficients de réflectance et transmittance de la feuille est enfin proposée.

- Enfin, ce manuscrit s'achève par une **conclusion générale** résumant les principaux résultats et les perspectives envisagées à l'issue de ce travail.

CHAPITRE II

2 Réponse radiométrique des couverts végétaux : processus et modélisation

Lors de sa pénétration au sein de tout matériau, le rayonnement solaire voit son intensité et sa direction changer le long de son trajet. Cette variation est due à des processus d'absorption et de diffusion qui sont fortement conditionnés par la nature du matériau et la longueur d'onde considérée.

Après avoir traversé l'atmosphère, le rayonnement solaire atteint le couvert végétal sous forme de deux composantes : une composante directe (rayonnement ni absorbé ni diffusé) et une autre diffuse (provenant de la diffusion dans l'atmosphère). Au sein du couvert, ces deux composantes subissent une série d'interactions provoquées d'une part par la structure et la composition interne des différents organes constituant le couvert et d'autre part par leur arrangement dans l'espace. La réponse radiométrique du couvert observée dans une longueur d'onde et des conditions géométriques (position du soleil, fraction diffuse, direction d'observation) données ne dépendra donc que de sa structure, des propriétés optiques de ses éléments et du sol sous-jacent.

L'application de la télédétection spatiale à l'étude des écosystèmes terrestres est basée sur ce concept. En télédétection, la mesure du rayonnement solaire, ayant interagi avec le couvert, peut être réalisée par des capteurs actifs ou passifs et dans diverses bandes spectrales et directions selon la nature de l'information recherchée. Dans ce travail on se limitera au signal mesuré, par un radiomètre passif, dans la partie visible et proche infrarouge du spectre solaire.

Ce chapitre bibliographique a pour objectif de dresser un état de l'art en matière de modélisation du transfert radiatif devant nous orienter pour le développement du modèle que nous proposons. La modélisation du transfert radiatif dans les couverts a pour but de simuler l'ensemble des processus physiques, permettant ainsi de mieux comprendre, analyser et exploiter les relations entre les mesures par télédétection et les caractéristiques biophysiques du couvert. Elle emploie les propriétés optiques des éléments foliaires, et prend généralement en compte la structure du couvert par l'intermédiaire de la fraction de trou.

Ainsi, nous avons choisi de présenter dans ce qui va suivre :

- Les propriétés optiques des feuilles et du sol suivi des principales approches de modélisation de ces propriétés et des caractéristiques du couvert.
- La fraction de trou qui caractérise l'agrégation des feuilles au sein du couvert.
- Les principaux types de modèles de transferts radiatifs développés jusqu'à ce jour pour décrire la réflectance du couvert.

2.1 Interaction du rayonnement solaire au sein du couvert végétal.

La quantité d'énergie solaire absorbée ou réfléchiée par le couvert est déterminée par les propriétés optiques des éléments végétaux qui le composent, de leur organisation spatiale et enfin de la réflectance du sol sous-jacent. Tous les organes aériens de la plante (tronc, branche, brindilles, feuilles) contribuent à la diffusion et l'absorption du rayonnement. Cependant, les interactions avec les feuilles vertes sont privilégiées pour plusieurs raisons :

- Elles représentent en général une surface très importante relativement aux autres éléments,
- Elles représentent les surfaces actives du point de vue des échanges gazeux (eau, carbone, oxygène) impliqués dans le fonctionnement photosynthétique de la plante,
- Elles correspondent à des propriétés optiques très contrastées par rapport aux autres éléments du couvert, liées à la présence de la chlorophylle. C'est ce qui les rend plus facilement accessibles à la mesure.

Ainsi, plusieurs études ont été menées afin de comprendre les mécanismes qui gouvernent l'absorption, la transmission et la réflexion de la feuille et ont mis en avant le rôle de la structure cellulaire, la composition biochimique, et les caractéristiques de la surface de la feuille dans ces mécanismes [(Allen, Gausman et al. 1969) ; (Fukshansky and Remisowsky 1992) ; (Jacquemoud and Baret 1990) ; (Tucker and Garratt 1977) ; (Zarco-Tejada, Miller et al. 2001) ; (Baranovski 1998)]. Un état de l'art des propriétés optiques des feuilles a été publié récemment par (Jacquemoud and Ustin 2001).

2.1.1 Au niveau de la feuille.

2.1.1.1 Propriétés spectrales

Les propriétés optiques de la feuille sont liées à sa composition biochimique et à sa structure interne sensible à son évolution biologique durant le cycle de croissance. La diffusion du rayonnement par la feuille est due essentiellement aux discontinuités d'indice de réfraction ($n=n_r+in_i$; défini comme la somme d'une partie réelle et une imaginaire) existant entre les parois hydratées des cellules ($n=1.4$), l'eau libre dans les espaces intercellulaires ($n=1.33$) et l'air des lacunes du parenchyme lacuneux ($n=1$). Il faut noter que, dans le domaine solaire, la variation spectrale de la partie réelle (n_r)

de l'indice de réfraction (n) est très faible, et n'engendrera donc pas de 'signatures' spectrales typiques. Au contraire, la partie complexe (n_i) de l'indice de réfraction, c'est à dire l'absorption, varie fortement avec la longueur d'onde et pourra être exploitée pour caractériser la feuille, voire le couvert. L'absorption est principalement liée à la présence de pigments photosynthétiques, à l'eau et à la matière sèche ((Fourty and Baret 1998) ; (Baret and Fourty 1997)). Pour cette raison, les spectres de réflectance et de transmittance (Figure 1) des feuilles de plantes basses ou d'essence forestière se caractérisent par une même allure typique. On distingue trois régions spectrales:

- **Le visible (400-700nm)** : Dans ce domaine, la feuille manifeste une faible réflectance et transmittance due à une forte absorption du rayonnement par les pigments foliaires. Les principaux pigments sont les chlorophylles a et b qui possèdent deux bandes d'absorption dans le bleu (450nm) et le rouge (660nm) et un maximum de réflectance dans le jaune-vert (environ 550nm). Les caroténoïdes présentent un pic d'absorption dans le bleu vers 450nm qui est superposé à celui de la chlorophylle. Ainsi celui-ci est masqué dans les feuilles saines mais devient dominant lors du vieillissement de la feuille ou sous l'effet d'un stress. Pour des longueurs d'ondes supérieures à 700nm tous les pigments foliaires deviennent transparents et ainsi leur concentration devient sans effet sur la réflectance des feuilles.
- **Le proche infrarouge (700-1300nm)** : En raison de la relative transparence dans ce domaine des pigments foliaires et de la cellulose qui constituent les parois cellulaires l'absorption du rayonnement par les feuilles est très faible. Dans ce domaine, le rayonnement subit des diffusions multiples par le mésophylle de la feuille faisant varier ainsi la réflectance et la transmittance de quelques pour cents à près de 50%. L'amplitude de la réflectance est déterminée par la structure anatomique interne de la feuille de telle sorte que plus les cellules ont des formes irrégulières et un contenu hétérogène et que le nombre d'assises cellulaires est grand plus la réflectance est élevée. Pour cette raison, les feuilles des dicotylédones réfléchissent beaucoup plus que celles des monocotylédones. La faible absorption peut être bien décrite par le contenu en matière sèche et l'eau (Baret and Fourty 1997).
- **L'infrarouge moyen (1300-2500 nm)** : La réflectance et la transmittance sont plus faibles que dans le proche infrarouge. Dans ce domaine, le contenu en eau de la feuille est le principal facteur qui affecte ses propriétés optiques. Ainsi, pour des longueurs d'ondes supérieures à 1300nm, le rayonnement est fortement absorbé par l'eau dans trois bandes 1450, 1950 et 2500 nm. L'absorption par l'eau reste néanmoins significative entre ces bandes.

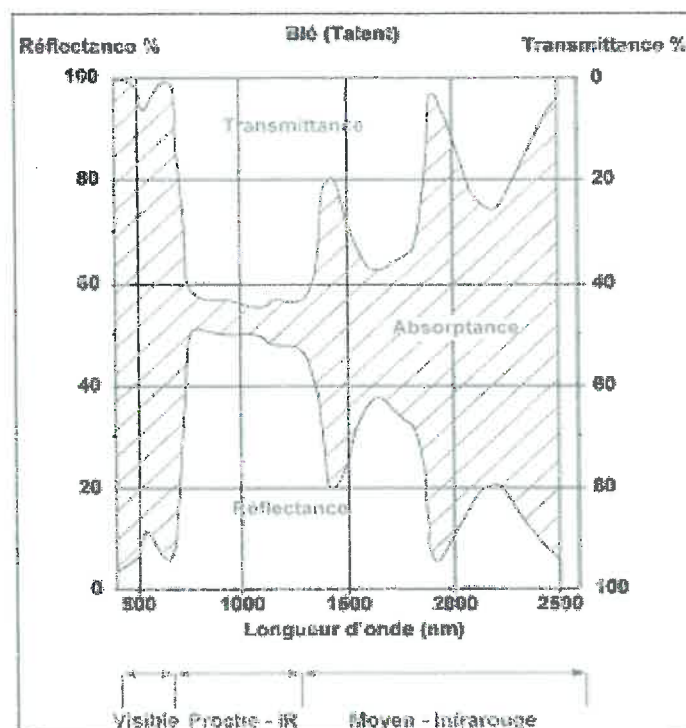


Figure 1 : spectre des propriétés spectrales d'une feuille saine dans le domaine du visible

Tout au long de son cycle de croissance les propriétés optiques de la feuille peuvent être affectées par plusieurs facteurs :

- l'évolution de la structure anatomique déterminée par le nombre d'assises cellulaires, la dimension des cellules et l'épaisseur du parenchyme lacuneux, affectent la réflectance dans le proche infrarouge. Ainsi, l'augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge durant la phase de croissance des feuilles de pois serait due à une évolution de la structure interne caractérisée par une extension des cellules qui s'accompagne par le développement de discontinuités des indices de réfractions intercellulaires (Walter-Shea, Norman et al. 1989). Les attaques parasitaires peuvent aussi abîmer la structure cellulaire et affecter alors la réflectance de la feuille (Guyot 1995).
- la sénescence de la feuille qui se manifeste par la disparition des pigments chlorophylliens induit une forte augmentation de la réflectance dans le jaune-vert et le rouge. Contrairement, une baisse de la réflectance, due à l'accumulation des pigments dans la feuille est observée durant la phase de croissance de cette dernière.
- une forte baisse de la teneur en eau s'accompagne d'une augmentation de la réflectance et la transmittance dans l'infrarouge moyen. De plus, un déficit hydrique peut indirectement provoquer une augmentation de la réflectance dans les régions du rouge et proche infrarouge (400-1300nm) suite à une modification de la turgescence des cellules. Néanmoins, cet effet du contenu en eau sur la réflectance de la feuille varie en fonction de l'espèce considérée.

- les déficiences minérales telle la carence en fer ou le manque d'azote affectent la teneur en chlorophylle et modifient alors la réflectance dans le visible.

2.1.1.2 Propriétés directionnelles

La diffusion de la lumière incidente par les tissus internes de la feuille n'intervient pas seule dans la réflectance de la feuille. La surface de cette dernière généralement recouverte de cuticule y contribue aussi. Le rayonnement réfléchi par la feuille sera ainsi la composition d'une fraction dont la distribution spectrale est affectée par la diffusion et l'absorption dans le volume de la feuille, et une autre qui ne l'est pas et qui correspond à la réflexion de surface qui peut présenter une composante spéculaire importante si la surface est bien lisse.

La réflectance de la feuille affiche donc une dépendance angulaire qui varie en fonction de la direction d'éclairement. Cette dépendance est due au caractère irrégulier des facettes composant la surface de la feuille à l'échelle microscopique. En effet, la rugosité de la surface détermine l'interaction avec le rayonnement. Si la taille des irrégularités est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident, la surface de la feuille est considérée optiquement lisse. La réflexion est alors modélisée par la loi de Fresnel : réflexion polarisée dans une direction unique, dite spéculaire, du plan d'incidence. Autrement, si la taille des irrégularités est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, le rayonnement réfléchi est diffusé dans toutes les directions. L'amplitude et la distribution de la réflectance autour de la direction spéculaire sont déterminées par la dimension et l'orientation des irrégularités.

Un tel phénomène est principalement marqué dans le visible, car la faible réflectance dans cette bande explique que le rayonnement réfléchi par la cuticule est proportionnellement beaucoup plus important que dans le proche infrarouge. Ceci est bien illustré par la figure 2 qui représente la distribution angulaire du rayonnement diffusé par une feuille de maïs dans le bleu ($\lambda=485\text{nm}$) et le proche infrarouge ($\lambda=731\text{nm}$) pour deux directions d'éclairement 0° et 60° (Ross 1981). Pour une incidence normale à la surface de la feuille, la diffusion se fait aussi bien en avant qu'en arrière. Les profils de diffusion, symétrique par rapport à la normale sont similaires dans le bleu et le proche infrarouge avec une faible amplitude dans la première bande. Pour un angle d'éclairement de 60° , la réflexion spéculaire par la cuticule est très forte et prédominante. La radiation transmise est beaucoup plus faible dans ce cas et la symétrie par rapport à la normale est légèrement déviée.

Dans le but de caractériser cette dépendance, plusieurs études ont essayé de mesurer la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle des feuilles BRDF (Bidirectionnal Réflectance distribution Function) (Vanderbilt, Rondeaux et al. 1993) ; (Vanderbilt, Grant et al. 1991). Cependant en raison du manque de goniomètres adaptés à la BRDF de la feuille, les propriétés directionnelles restent encore mal connues et modélisées.

2.1.1.3 Modèles des propriétés optiques de la feuille.

Afin d'avoir une description précise des propriétés optiques de la feuille et pour pouvoir estimer le contenu biochimique d'une feuille à partir de la mesure de la BRDF plusieurs types de modèles ont été développés. Ces derniers se distinguent par leurs hypothèses physiques et par le degré de complexité avec lequel la structure de la feuille est représentée. Trois types de modèles peuvent être listés:

- **Modèles basés sur les équations de transfert radiatif** : (Allen, Gausman et al. 1969) ont décrit la réflectance et la transmittance d'une feuille compacte par le "plate model" en considérant une monocouche absorbante et diffusante définie par deux variables : l'indice de réfraction n et le coefficient d'absorption k . Ce concept a été amélioré plus tard en considérant la feuille comme un empilement de N couches (Allen, Gausman et al. 1970). Ainsi contrairement au 'plate model', les réflexions multiples subies dans les feuilles de dicotylédones sont mieux simulées dans le modèle multicouches. Une variable supplémentaire VAI [Void Area index] liée au nombre de couches considérées est alors introduite. Celui-ci, égal à 0 pour les feuilles de monocotylédones compactes, prend des valeurs supérieures qui varient en fonction de l'espèce et le développement de la feuille pour les dicotylédones.

Une amélioration supplémentaire a été introduite par (Jacquemoud and Baret 1990) au travers du modèle PROSPECT. Dans celui-ci le coefficient d'absorption a été exprimé en fonction du contenu en eau et de la concentration des pigments en faisant l'hypothèse que la distribution de ces derniers au sein de la feuille est uniforme. Ce modèle, largement utilisé au sein de la communauté scientifique, permet ainsi de simuler les propriétés optiques des feuilles dans le visible, le proche et le moyen infrarouge. Des améliorations supplémentaires ont été introduites en considérant une description complète de la biochimie de la feuille et la variabilité du contenu en chlorophylle au sein de cette dernière (Fourty, Baret et al. 1996), (Jacquemoud, Ustin et al. 1996), (Baret and Fourty 1997).

Cette approche discrète du 'plate model' généralisé a été reconsidérée dans le cas d'un milieu continu [(Jacquemoud 1988), (Yamada and Fujimura 1988)]. Le système à deux équations de Kubelka et Munk (Kubelka and Munk 1931), de flux descendant et ascendant, a été ainsi utilisé pour simuler les propriétés optiques d'un milieu mono ou multicouches. La résolution analytique de ce système d'équation permet de calculer la transmittance et la réflectance de chaque couche à partir de ses coefficients propres de diffusion et d'absorption.

- **Modèles stochastiques** : dans ce type de modèle basé sur la chaîne de Markov, les propriétés optiques sont calculées à partir des probabilités d'interception, de transmission ou de réflexion des photons [(Tucker and Garratt 1977), (Maier S W., Lüdeker W. et al. 1999)]. La feuille est généralement décrite par un empilement de couches qui forment la structure interne (épiderme, mésophylle palissadique, mésophylle spongieux...)

- **Modèles de lancer de rayons** : ces modèles se distinguent par une description détaillée de la structure interne de la feuille (parois cellulaires, air, eau..) et une caractérisation par des constantes optiques des différents éléments de la structure. Ainsi, en suivant le trajet optique du photon au sein de la feuille jusqu'à sa sortie de la feuille ou son extinction, ces modèles permettent de simuler la réflectance et la transmittance de la feuille (Govaerts, Jacquemoud et al. 1996), (Ustin, Jacquemoud et al. 2001).

Ces trois types de concepts de modélisation conditionnent leurs utilisations. Les modèles stochastiques et à lancer de rayons qui requièrent un nombre élevé de paramètres et des temps de calcul (lancer de rayon) importants sont principalement utilisés dans le sens direct pour simuler les propriétés optiques. Les modèles appartenant à la première catégorie sont utilisables à la fois dans les sens direct et inverse afin d'estimer certaines variables d'entrée caractéristiques de l'anatomie de la feuille ou de sa composition biochimique (Baret and Fourty 1997). Enfin, étant donné le peu d'informations recueillies sur les propriétés directionnelles de la feuille et la validation au niveau du couvert l'intérêt d'inclure une composante spéculaire reste toujours une question posée.

2.1.2 Au niveau du sol

La contribution du sol à la réflectance du couvert est liée principalement au taux de couverture de ce dernier et à l'albédo de simple diffusion des feuilles (réflectance plus transmittance hémisphériques). Ainsi, le sol peut jouer un rôle non négligeable dans les premiers stades de développement où les plantes sont juvéniles ou dans certains couverts agrégés où les plantes s'organisent en agrégats (cas des forêts de conifères par exemple). Notons aussi que dans le domaine du proche infrarouge, où l'albédo de simple diffusion des feuilles est proche de 1.0, le sol peut également jouer un rôle significatif pour des indices foliaires relativement élevés.

2.1.2.1 Propriétés optiques des sols

Les propriétés optiques des sols sont déterminées, comme pour la feuille, par sa composition biochimique et sa structure. Le spectre de réflectance d'un sol (figure3) est généralement caractérisé par une augmentation progressive du visible à l'infrarouge moyen. Comparé à celle de la feuille verte, la réflectance du sol est généralement plus élevée dans le visible et le moyen infrarouge et plus faible dans le proche infrarouge. La réflectance des sols peut être affectée par plusieurs facteurs tels que la composition minérale, la matière organique, la structure du sol et le contenu en eau.

- **Composition minérale** : les sols sont composés de particules minérales de différentes tailles qui sont les produits des altérations physiques des roches. Les minéraux constituant les sols présentent des indices de réfraction supérieurs à celui de l'air et même légèrement supérieurs à celui de l'eau. De plus, ils peuvent être caractérisés par des bandes d'absorption spécifiques très utilisées en télédétection appliquée à la minéralogie (Clark and Roush 1984). Etant donné la complexité de la composition minérale ces bandes ont tendance à se recouvrir induisant ainsi une variation continue du spectre de réflectance. Le fer présent dans les sols sous forme d'ions ferreux et ferrique comporte de fortes bandes d'absorption dans le visible et le proche-infrarouge. L'existence des carbonates ou de sulfate se manifeste par une augmentation générale de la réflectance dans ces deux domaines, en raison d'une très faible absorption.
- **Matière organique** : Elle résulte de la biodégradation de l'humus et est à l'origine de la couleur brune à noire des sols (Ben-Dor, Inbar et al. 1997). Les sols très organiques peuvent avoir des réflectances inférieures à 2.5 % dans le visible et le proche infrarouge masquant en grande partie les réponses spectrales des minéraux. La matière organique peut affecter les propriétés optiques des sols en modifiant leur capacité de rétention en eau et leur structure, faisant varier ainsi indirectement la réflectance des sols.
- **Contenu en eau** : L'humidité du sol affecte la réflectance sur tout le spectre, car elle affecte les processus de diffusion (variation d'indice de réfraction entre les particules, l'air et l'eau) et d'absorption. Comme observé pour la végétation il existe trois bandes d'absorption de l'eau dans l'infrarouge moyen. Plus le sol est humide jusqu'à une humidité critique (Liu, Baret et al.

2003), plus la réflectance est faible et les bandes d'absorption de l'eau sont intenses [Figure 3] (Bach and Mauser 1994; Liu, Baret et al. 2002).

- **Structure du sol :** le sol est constitué d'un ensemble de particules de tailles différentes dont la distribution les unes par rapport aux autres est très variable. Les diffusions du rayonnement par le sol sont dues d'une part aux discontinuités des indices de réfraction (présence de l'air ou de l'eau). La dimension des particules constituant le sol a ainsi un effet sur sa réflectance. En effet, un sol avec des particules fines est une surface unie qui réfléchit beaucoup plus qu'un sol avec des grosses particules où l'existence d'un plus grand nombre de micro-aspérité augmente la diffusion du rayonnement dans le sol. La rugosité de la surface est aussi déterminante, liée à la présence de mottes et d'irrégularités à la surface du sol. Elle joue sur la distribution des zones ombrées et éclairées et induit ainsi une variabilité angulaire de la réflectance. Ainsi une augmentation de la rugosité s'accompagne par une réduction de la réflectance sur tout le spectre. Le maximum de réflectance est ainsi observé dans la direction du soleil 'hot spot' où les ombres ne sont pas vues.

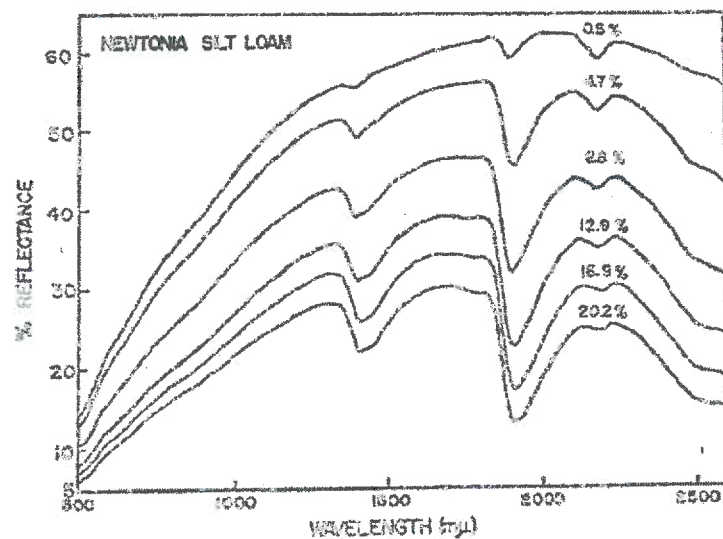


Figure 3. Profil de la réflectance du sol en fonction de la longueur d'onde dans le visible et pour différentes humidités.

2.1.2.2 Modèles des propriétés optiques des sols.

Contrairement, au cas des feuilles, un bon nombre de modèles a été développé pour simuler la réflectance bidirectionnelle des sols. Ainsi un modèle géométrique, où les diffusions en arrière et en avant sont prises en compte séparément, a été développé pour simuler les réflectances directionnelles de trois surfaces désertiques (Deering, Eck et al. 1990). (Cierniewski 1987) a conçu un modèle qui simule dans le rouge et le proche infrarouge l'influence de la rugosité de surface sur la réflectance du sol. Le sol est ici représenté par des particules sphériques de tailles égales distribuées sur une surface

incliné. Le calcul de la réflectance dans ce cas a été fortement corrélé à la proportion des surfaces ombrées par les particules. Cette hypothèse a été confirmée par (Escadafal 1992). Cet auteur a mis néanmoins en évidence une sous-estimation des mesures de réflectance par le modèle, due à la non prise en compte des diffusions multiples. Cet effet peut être important pour des sols ayant un fort albédo comme le sable par exemple. Le développement de modèles basés sur des équations de transfert radiatifs a permis de représenter ces diffusions multiples. (Pinty, Verstraete et al. 1989) ont conçu et validé sur des mesures de réflectance, un modèle de réflectance bidirectionnelle des sols dérivé du modèle de transfert radiatif de Hapke. (Jacquemoud, Baret et al. 1992) ont utilisé aussi le modèle de Hapke pour simuler les propriétés optiques des sols entre 450nm et 2450nm en séparant les paramètres d'entrées dépendant de la longueur d'ondes de ceux qui ne le sont pas. Ceci induit la prise en compte de la composante spectrale. Ainsi, ils ont trouvé que l'albédo de diffusion simple dépend de la longueur d'onde et du contenu en eau tandis que le paramètre caractérisant la rugosité du sol et la fonction de phase qui caractérise l'effet directionnel de la réflectance dépendent plutôt des conditions de surface.

Peu de modèles simulant les propriétés spectrales ont été développés. (Ishida, Ando et al. 1991) ont exprimé la réflectance des sols secs et humides en se basant sur la théorie de diffusion de Mie. Un indice de réfraction complexe, dépendant des composantes organiques et minérales du sol, a été ainsi introduit. Par la suite, une formulation empirique a été dérivée à partir de ce modèle dans le cas des sols secs (Ishida and Price 1996). (Liu, Baret et al. 2002; Liu, Baret et al. 2003) ont utilisé une expression non linéaire, basé sur la loi de Beer pour l'absorption dans un milieu aléatoire homogène, pour relier la réflectance au contenu en eau des sols.

2.1.3 Au niveau du couvert végétal : Effets de la structure du feuillage

Comme nous l'avons vu en introduction, l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire au sein du couvert sont gouvernées par son architecture. Celle-ci est déterminée d'une part par la forme, la taille et l'agencement des organes à l'échelle de la plante et d'autre part par l'organisation des plantes à l'échelle du couvert. La réflectance du couvert végétal est ainsi une composition de flux élémentaires réfléchis par les feuilles et le sol qui ont subi un ensemble d'interactions au sein du couvert. La description de l'architecture du couvert dans ce qui suit sera réduite à la structure du feuillage vert compte tenu des remarques déjà effectuées précédemment sur les propriétés optiques des éléments du couvert (§2.1). La structure du feuillage est généralement caractérisée par : l'indice de surface foliaire, l'angle d'inclinaison des feuilles et la dispersion des feuilles. Nous allons donc dans un premier temps définir et décrire ces différentes caractéristiques architecturales.

2.1.3.1 Indice de surface foliaire

La distribution spatiale de la surface des feuilles est caractérisée par la fonction de densité de surface foliaire $u(x,y,z)$. Celle-ci décrit la quantité de surface foliaire présente autour d'un point

$P(x,y,z)$ dans une unité de volume dv . Elle représente ainsi une distribution statistique qui décrit l'arrangement spatial moyen du feuillage. Dans un couvert supposé homogène horizontalement, la densité foliaire dépendra seulement de la hauteur du couvert $u(z)$. Elle décrit ainsi le profil vertical de la surface des feuilles. La surface des feuilles présentes entre le sommet du couvert et une hauteur donnée, z , exprimée par unité de surface de sol se calcule par l'intégrale suivante :

$$LAI(z) = \int_z^H u_L(z') dz'$$

où H est la hauteur du couvert. Pour un $z=0$, la somme des surfaces des feuilles cumulée par m^2 du sol correspond à l'indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index). Ce paramètre est d'une grande importance dans le transfert radiatif puisqu'il quantifie la surface qui interagit avec le rayonnement solaire. Ainsi, il détermine en grande partie les échanges de masse et d'énergie avec l'atmosphère.

2.1.3.2 Inclinaison des feuilles

L'orientation des feuilles est décrite par l'inclinaison et l'azimut de la normale à la feuille. L'inclinaison de la feuille correspond à l'angle entre l'axe vertical et la normale de la feuille qui varie entre 0° et 90° . L'azimut de la feuille, ϕ , varie entre 0 et 360° et est défini par l'angle entre la projection de la normale de la feuille sur le plan horizontal et l'axe de référence dans ce plan.

L'orientation des feuilles dans un couvert végétal est décrite par des fonctions de distribution ($g(\theta, \phi)$). Il existe ainsi deux types de fonctions de distribution : la fonction de distribution des orientations de la normale des feuilles et la fonction de distribution des inclinaisons des surfaces des feuilles.

- La première représente la fraction de surface de feuilles dont la normale se trouve dans un angle solide $d\Omega$ autour d'une direction (θ, ϕ) donnée tel que :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi = 1$$

- La deuxième décrit la fraction de surface foliaire dont l'angle d'inclinaison varie entre θ et $d\theta$ et l'azimut est compris entre ϕ et $d\phi$ de sorte que l'intégration sur tout l'hémisphère est donnée par :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} g(\theta, \phi) d\theta d\phi = 1$$

Bien qu'elles soient définies de deux manières différentes, les deux fonctions de distribution décrivent un même comportement. On suppose en général que la distribution des azimuts est aléatoire. La fonction de distribution de l'orientation foliaire peut alors être simplement réduite à la distribution des inclinaisons qui peut être caractérisée par son moment d'ordre 1 : l'angle d'inclinaison moyen. Une présentation détaillée des diverses distributions des orientations des feuilles développées jusqu'à ce jour sera donnée dans le chapitre 3.

2.1.3.3 Arrangement spatial des feuilles

Les feuilles ne sont généralement pas disposées de manière aléatoire dans le couvert. En effet, un couvert végétal résulte de phénomènes de croissance au sein de la plante, déterminée à la fois par son patrimoine génétique mais bien sûr aussi par les conditions du milieu. Le couvert est en général constitué de plantes, auxquelles sont attachées les feuilles, soit directement sur la tige, soit sur des branches ou rameaux portés par le tronc ou la tige principale. De plus, la croissance des tiges, troncs, branches ou rameaux obéit à des règles strictes qui dépendent de l'espèce et du climat local, en particulier lumineux, dans lequel ils vivent. De ce fait, l'arrangement spatial des feuilles n'est pas aléatoire et a généralement tendance à être de type aggloméré (agrégation) autour des plantes, des branches ou des rameaux.

L'arrangement spatial des feuilles peut être déterminé à partir du nombre de contacts, NC , effectués par unité de trajet ayant lieu le long d'un trajet optique dans le couvert selon une direction donnée. La méthode du point quadrat (Warren Wilson 1960) permet de calculer NC en introduisant une mince aiguille dans le couvert suivant une direction (θ, φ) donnée. L'arrangement spatial est ainsi déterminé par la variance relative (VR) de la fréquence de contact. Si la valeur de cette dernière est grande ($VR \gg 1$) ceci signifie qu'il existe beaucoup de trous et de feuilles regroupées décrivant ainsi un couvert à caractère agrégé. A l'inverse, une faible variance relative ($VR \ll 1$) serait indicatrice d'une faible variabilité du nombre de contact dans le couvert et ainsi la dispersion des feuilles serait plutôt régulière avec moins de recouvrement de feuilles et d'effet d'auto-ombrage des feuilles. Entre ces deux arrangements extrêmes des feuilles, il existe un état intermédiaire avec une variance relative proche de 1 qui correspond à un état aléatoire. Néanmoins, cette méthode de caractérisation de l'arrangement spatial des feuilles reste contraignante à cause de la lourdeur de la mesure des fréquences de contact.

A cause de la difficulté de mesure de cette caractéristique architecturale dans des couverts réels, l'arrangement spatial des feuilles est bien souvent supposé aléatoire. Cependant, cette approximation semble être violée dans de nombreux couverts réels. Ainsi, il a été observé une structure régulière dans le cas du pois (Bonhomme, Varlet Grancher et al. 1974) et une autre plutôt agrégée dans le cas du maïs (Prévoit 1985) et la canne à sucre (Bonhomme, Varlet Grancher et al. 1974). La dispersion des feuilles dans le couvert peut être définie par la variation spatiale de la densité foliaire. Celle-ci dépend des différentes échelles du couvert, la feuille (taille, forme et inclinaison), la plante (distribution de la feuille selon la hauteur et la forme de l'enveloppe foliaire) et le couvert (distribution en rang, aléatoire ou en bouquets). Les forêts de pin sont un exemple de couvert non aléatoire puisque la distribution des aiguilles se fait à deux échelles : au niveau des pousses et des branches. Cette dispersion est sensible à plusieurs facteurs comme : les pratiques culturales, les compétitions inter plantes, les tropismes (héliotropisme, haptotropisme...), les stress (hydrique, nutriments...).

Une manière indirecte de caractériser par une mesure physique la dispersion des feuilles est la mesure de la fraction de trou. Celle-ci correspond à la transmission au sein du couvert et dépend, en plus du LAI et de l'inclinaison foliaire, de l'arrangement spatial des feuilles. Une présentation plus détaillée de cette grandeur est fournie dans la partie suivante.

2.2 Fraction de trou mono-directionnelle : Mesures et Modèles.

La fraction de trou est une grandeur qui joue un rôle important dans le régime radiatif des couverts végétaux. Celle-ci est définie comme la probabilité, pour le rayonnement solaire, de pénétrer au sein du couvert sans être intercepté par les feuilles. La fraction de trou intervient alors dans des modèles physiologiques ((Monteith J.L. and Unsworth 1990; Jones H.G. 1992), décrivant la croissance de la végétation, et des modèles de transfert radiatif dans le couvert ((Verhoef 1984), (Nilson and Kuusk 1989) et (Verstraete, Pinty et al. 1990)).

La fraction de trou est déterminée par les caractéristiques du couvert tel que l'indice de surface foliaire 'LAI'. En effet, la fraction de trou serait plus élevée pour un couvert en début du cycle caractérisé par un faible 'LAI' que lors de son maximum de développement. Plusieurs formulations théoriques ont été utilisées pour relier la fraction de trou à la structure du couvert.

2.2.1 Modélisation de la fraction de trou.

Une revue des trois principaux modèles a été effectuée par (Nilson 1971) mettant l'accent sur les hypothèses sur la géométrie du couvert considérées dans chaque modèle.

2.2.1.1 Le modèle Poisson

Il est connu souvent sous le nom de la loi de Beer, a été largement utilisé dans la communauté scientifique ((Verhoef 1984), (Kuusk 1991)) Il suppose que :

- 1) le couvert est équivalent à une série infinie de N couches horizontales, d'épaisseur $\Delta L = LAI/N$ très petites et statistiquement indépendantes
- 2) l'épaisseur des couches est tellement faible que la probabilité d'avoir plus d'un contact photon-feuille au sein de la couche est négligeable.
- 3) La probabilité qu'il y ait un seul contact est égale au nombre moyen de contacts par couche ($G(\theta, \varphi) \Delta L / \cos(\theta)$) où $G(\theta, \varphi)$ est un facteur géométrique qui correspond à la projection d'une unité de surface de feuille sur le plan perpendiculaire à la direction définie par θ et φ .

Enfin la probabilité qu'un photon pénètre toutes les couches et atteint le sol sans être intercepté par les feuilles s'exprime comme suit :

$$R = \left(1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)}\right)^N = \exp \left[N \times \ln \left(1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)}\right) \right]$$

Pour un $N \rightarrow \infty$ ($\Delta L \rightarrow 0$), la fraction de trou dans le couvert est décrite par la distribution de Poisson :

$$P_0 = \exp \left(- \frac{G(\theta, \varphi) LAI}{\cos(\theta)} \right)$$

Ceci suppose que les positions des feuilles sont indépendantes et que leurs distributions dans l'espace est aléatoire. Dans le cas des couverts réels, cette approximation n'est pas souvent vérifiée comme nous l'avons vu précédemment (§2.1.3.3). Un écart par rapport au modèle de Poisson est alors observé. La description des distributions foliaires non aléatoires est considérée dans les approches binomiales et de Markov.

2.2.1.2 Le modèle Binomial

Il décrit la fraction de trou au sein des couverts, dont les positions des feuilles sont corrélées, par les distributions binomiales positive et négative. La première est adaptée aux couverts dont l'arrangement spatial des feuilles est régulier (les feuilles ont tendance à s'éviter et à ne pas se recouvrir). La seconde est définie pour des couverts agrégés où les feuilles ont tendance à se chevaucher.

Le modèle binomial positif est basé sur trois hypothèses principales:

- 1) le couvert est subdivisé en un nombre fini de couches horizontales indépendantes.
- 2) Il existe au plus un seul contact au sein d'une couche $\Delta L = LAI/N$
- 3) La probabilité d'avoir un seul contact au sein de la couche ΔL est $G(\theta, \varphi) \Delta L / \cos(\theta)$.

Enfin, la probabilité qu'il n'y ait aucun contact photon-feuille sur l'ensemble du couvert est égale à :

$$R = \exp \left[\frac{LAI}{\Delta L} \times \ln \left(1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)}\right) \right].$$

Dans le modèle binomial négatif, les deux dernières hypothèses diffèrent. Dans ce cas on considère :

- 1) la possibilité d'avoir plus d'un seul contact photon-feuillage au sein de la couche ΔL ;
- 2) La probabilité d'avoir n contacts au sein de la couche est égale à :

$$\left(\frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)} \right)^n \left(1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)} \right)^{n-1}.$$

Enfin la fraction de trou du couvert s'exprime alors par :

$$R = \exp \left[\frac{-LAI}{\Delta L} \times \ln \left(1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)} \right) \right]$$

L'épaisseur ΔL de la couche est ainsi un indice de l'agrégation (régularité) de la structure dans le modèle binomial négatif (positif) de telle sorte que plus ΔL est grand plus le couvert est agrégé (régulier) et la fraction de trou est élevée (faible) (Figure 4). De plus, pour une faible épaisseur $\Delta L \rightarrow 0$ le modèle binomial tend vers le modèle de Poisson.

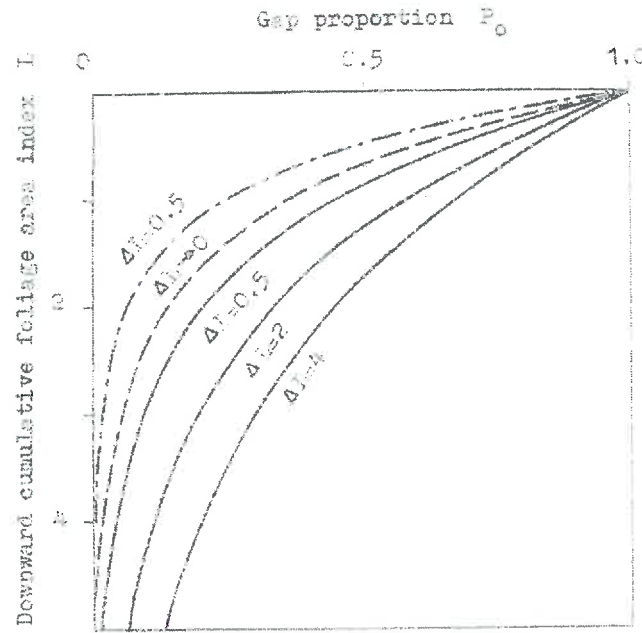


Figure 4 : Fractions de trou simulées par le modèle binomial positif ($\Delta L = 0.5$), le modèle Poisson ($\Delta L \rightarrow 0$) et le modèle binomial négatif ($\Delta L = 0.5, 2, 4$). $G/\mu=1$. (Nilson 1971)

2.2.1.3 Le modèle Markov

Ce modèle est une généralisation de l'expression de la fraction de trou pour toutes les structures foliaires. A la différence des deux modèles précédents, celui-ci subdivise le couvert en N couches horizontales dépendantes les unes des autres. En effet, la probabilité qu'il y ait contact photon-feuille au sein d'une couche ΔL dépend de l'occurrence d'un contact dans la couche précédente. Ainsi, au sein d'une couche donnée la probabilité de contact est égale à $\lambda G(\theta, \varphi) \Delta L / \cos(\theta)$ s'il y'a eu contact dans la couche au dessus, sinon elle est égale à $\lambda_0 G(\theta, \varphi) \Delta L / \cos(\theta)$. Les paramètres λ et λ_0 caractérisent la dépendance mutuelle entre couches. $G(\theta, \varphi) \Delta L / \cos(\theta)$ est la probabilité inconditionnelle d'avoir un contact. Celle-ci est vérifiée dans la première couche située au sommet du couvert. Enfin, la fraction de trou intégrée sur l'ensemble du couvert est définie alors par :

$$P_0 = \left[1 - \frac{G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)} \right] \times \left[1 - \frac{\lambda_0 G(\theta, \varphi) \Delta L}{\cos(\theta)} \right]^{\frac{LAI}{\Delta L}}$$

avec :

- $\lambda_0 > 1$ structure régulière
- $\lambda_0 < 1$ structure agrégée
- $\lambda_0 = 1$ structure aléatoire.

Ces trois modèles ont souvent été utilisés pour déterminer l'indice de surface foliaire, pour différents types de couvert, à partir des mesures optiques de la fraction de trou. En effet, durant les

dernières années, différentes techniques de mesures de fraction de trou ont été développées : les photos hémisphériques [(Andrieu and Valéry 1992), (Van Gardinen, Jackson et al. 1999)], le LAI2000 (Welles and Norman 1991) et le TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies) [(Chen and Black 1992)]. Une revue de l'ensemble de ces techniques a été présentée récemment dans (Weiss, Baret et al. 2003).

2.2.2 Confrontations des modèles aux mesures.

L'hypothèse d'arrangement spatial aléatoire des feuilles appliquée à l'estimation de l'indice de surface foliaire à partir de mesures de fractions de trous conduit à des valeurs souvent inférieures à celles du LAI vrai dans les couverts agrégés. Pour des plantations de conifères des sous-estimations de 67% et 74% ont été obtenues respectivement par (Gower and Norman 1991) et (Smith, Chen et al. 1993). Des résultats similaires ont été obtenus pour des forêts de feuillus (Herbert and Fownes 1997). De telles surestimations sont dues à l'agrégation des feuilles (aiguilles) à l'échelle des couronnes et des rameaux (pousses). Les mesures de fraction de trou effectuées sur un modèle de structure de maïs 3D (España, Baret et al. 1998) ont été bien supérieures à celles dérivées du modèle de Poisson. En effet, la disposition des plantes en rang et la taille des feuilles finie affectent l'arrangement spatial des feuilles et induisent un biais par rapport à l'hypothèse du milieu aléatoire. (Andrieu and Sinoquet 1993) a trouvé, à partir de maquettes physiques, que la fraction de trou varie en fonction de l'azimut dans le cas des structures en rang.

Une comparaison des indices foliaires, obtenus par les modèles de Poisson et Binomial à partir de mesures de LAI2000, a été effectuée par (Chason, Baldocchi et al. 1991) pour des forêts de chêne. Une surestimation d'environ 45% a été obtenue à partir du modèle de Poisson. Le modèle binomial négatif, surestime le LAI d'environ 12% pour une valeur de ΔL ajusté à 1.6. La prise en compte de l'effet d'agrégation, comparé au modèle de Poisson, améliore ainsi l'estimation du LAI. Néanmoins, en phase de sénescence le LAI estimé par le modèle binomial a tendance à surestimer le LAI vrai. En effet, durant cette phase il y a peu de feuilles et la contribution des troncs et des branches à la transmittance mesurée par le LAI2000 devient importante. De ce fait, Le LAI estimé représente plutôt le WAI (Wood Area Index). (Neumann, Den Hartog et al. 1989), ont trouvé des résultats similaires pour des forêts d'érables.

L'utilisation du modèle de Markov pour inverser les mesures de fraction de trou a souvent été effectuée en considérant une épaisseur très petite de la couche élémentaire ($\Delta L \rightarrow 0$). Une telle condition suppose que la structure peut être aléatoire ou agrégée et l'expression de la fraction de trou devient alors :

$$P_0 = \exp\left(-\frac{\lambda_0 LAIG(\theta, \varphi)}{\cos(\theta)}\right)$$

Cette expression est très voisine de celle associée au modèle de Poisson, et nous l'appellerons 'Poisson étendu'. En effet on peut considérer que dans cette expression, l'indice foliaire effectif, LAI_e , est le produit du LAI vrai et du paramètre d'agrégation λ_0 : $LAI_e = \lambda_0 \cdot LAI$.

La variabilité de ce paramètre a été démontrée pour différents types de couverts (Tableau 1). De plus, pour une culture de betterave, (Andrieu, Baret et al. 1997) a observée une variation en fonction de l'angle de visée dans une gamme de 0.63-1.1. Une variation plus faible entre 0.86 et 0.88 a été observée par (Nouvellon, Rambal et al. 2000) sur de l'herbe.

Référence	Technique	Type de couvert	Valeur du λ_0
Neuman et al 1989	Photos hémisphériques	Forêts feuillus	0.5
Chen et Black 1991	Photos hémisphériques	Forêt de sapins	0.42-0.48
Chen 1996	LAI2000/TRAC	Forêt de sapins/pins	0.71-0.95
(Baret, Andrieu et al. 1993)	Photos hémisphériques	Blé/Betterave	1.56-1.04

Tableau 1 : quelques valeurs de paramètre d'agrégation déduites à partir des mesures optiques de fraction de trou

L'utilisation des trois modèles précédents pour estimer le LAI des forêts d'érable a confirmé les limites du modèle de Poisson (Neumann, Den Hartog et al. 1989). Pour des LAI supérieurs à 2, les estimations des modèles binomial négatif et Markov se sont avérées plutôt satisfaisantes. Cependant, pour des LAI inférieurs à 1, les deux modèles ont tendance à surestimer le LAI mesuré à cause de la contribution des organes non foliaires qui devient importante. Comparée au modèle de Markov, la différence correspondant au modèle binomial est plus élevée et tend à augmenter pour des faibles valeurs de LAI . Ceci serait dû à la valeur du paramètre ΔL du modèle binomial, fixé à 2.42, qui a été supposée indépendante de la densité foliaire négligeant ainsi les variations saisonnières.

Dans le cas des forêts, la mesure de la fraction de trou ou de la transmittance par le LAI2000 ou le TRAC tient compte, en plus des surfaces foliaires, de la contribution des troncs et des branches. Une estimation précise du LAI nécessite alors la prise en compte de cette influence en plus de celle de l'agrégation des feuilles ou aiguilles. (Chen 1996) a proposé une correction de l'indice foliaire effectif des forêts conifères, estimé à partir de la mesure de la fraction de trou, pour déterminer l'indice de surface foliaire vrai des aiguilles ' NAI ' : $NAI = (1 - \alpha) LAI_e \gamma_F / \lambda_0$.

Où :

- λ_0 décrit l'agrégation des pousses dans le couvert
- γ_F décrit l'agrégation des aiguilles dans la pousse, approximée par le rapport de la surface des aiguilles par la surface des pousses ;
- α est le rapport de la surface des troncs et branches par la surface totale des éléments du couvert. Ce paramètre est généralement supposé dépendant de l'espèce étudiée.

Ces auteurs ont ainsi démontré que la variation saisonnière de l'indice foliaire des conifères est associée à une variation de l'agrégation des aiguilles dans les pousses.

Une nouvelle approche a été proposée par (Nilson 1999) pour décrire la fraction de trou dans les forêts : la contribution des trous entre couronnes a été séparée de la contribution des trous dans les couronnes. En effet, cette dernière est le facteur déterminant dans l'estimation de la surface foliaire au sein de la couronne. Ainsi, en plus de l'indice d'agrégation des aiguilles/feuilles, de nouvelles caractéristiques du couvert telle que la densité, la distribution et la forme de la couronne ont été considérées. La comparaison de la fraction de trou mesurée par le LAI2000 à celle simulée par ce nouveau modèle a montré que, pour la majorité de sites de forêts étudiés, la description de l'arrangement des arbres par une distribution binomiale fournit de meilleurs résultats.

Différentes approches ont ainsi été développées pour tenter de décrire explicitement la fraction de trou et d'en déduire le *LAI* du couvert. Le souci commun de ces différentes approches est d'essayer de décrire la structure d'une manière suffisamment précise avec un minimum de paramètres. De telles conditions antagonistes sont difficiles à remplir simultanément sans opérer un compromis. Aux erreurs associées à ces hypothèses, il faut ajouter les incertitudes de la mesure de la fraction de trous qui va conduire à augmenter le bilan d'erreur de l'estimation du *LAI* par ces méthodes indirectes.

Nous nous sommes intéressés à la fraction de trous pour introduire le problème de l'agrégation des feuilles dans le couvert. Cette grandeur présente l'avantage de ne dépendre que des caractéristiques structurales, et de disposer de fondements théoriques permettant de décrire les effets de l'agrégation. Toutefois, nous noterons que les hypothèses sous jacentes à ces modèles sont encore relativement simples et ne fournissent pas de solution générale et efficace pour décrire la variation de l'agrégation avec la direction considérée.

Dans la suite de l'analyse bibliographique, nous allons nous intéresser aux modèles de transfert radiatif, dont beaucoup utilisent explicitement la notion de fraction de trous dans la formulation du problème.

2.3 Modélisation du transfert radiatif au sein du couvert

La modélisation du transfert radiatif dans les couverts a pour objectif de simuler l'ensemble des interactions rayonnement-couvert décrites précédemment permettant ainsi de relier les caractéristiques biophysiques du couvert aux données de télédétection.

Comme présenté auparavant, étant donné la complexité de la structure du couvert et des propriétés optiques de ces différents organes et du sol, le couvert a un comportement en réflectance généralement anisotrope. Sa diffusion est représentée, pour une longueur d'onde donnée, par la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle BRDF (Bidirectional reflectance distribution function) qui décrit la variation de la réflectance en fonction des directions de visée et d'éclairement,

ces deux directions étant associées à des angles solides élémentaires. Pour simuler cette fonction de distribution de la réflectance, plusieurs approches ont été développées ces dernières décennies. Celles-ci ont été motivées d'une part par la volonté de comprendre et reproduire les processus physiques mis en jeu et d'autre part par l'utilisation de cette connaissance pour interpréter les observations des capteurs de télédétection. L'objectif de cette partie est de décrire et classer les différentes approches pour orienter le type de modélisation que nous développerons pour atteindre nos objectifs. On distingue deux grands groupes de modèles.

- Les modèles semi-physiques qui représentent la réflectance du couvert soit par une simple expression analytique ajustée sur des observations ou des simulations de modèles physiques, soit dérivés par analogie avec d'autres processus.
- Les modèles physiques qui sont basés sur une description physique des processus du transfert radiatif.

2.3.1 Modèles semi-physiques de réflectance du couvert.

La réflectance bidirectionnelle du couvert végétal $R(\Omega_s, \Omega_v, \lambda)$ pour une longueur d'onde λ et des directions d'éclairement Ω_s et de visée Ω_v est décrite par une expression analytique déduite d'un ajustement empirique sur des données radiométriques ou d'une résolution simplifiée du transfert radiatif. Par souci de simplicité, nous ne représenterons pas explicitement la variable longueur d'onde λ dans l'expression de la réflectance, mais la considérerons implicite, cette quantité étant par nature spectrale. On notera ainsi la BRDF $R(\Omega_s, \Omega_v)$. Ces modèles sont utilisés principalement pour la correction et la normalisation des données de télédétection multidirectionnelles telles qu'acquises par accumulation d'observations sur une fenêtre temporelle réduite (de quelques jours à quelques semaines) (Weiss, Baret et al. 1999). Ils peuvent servir de condition aux limites pour les modèles de transfert radiatif dans l'atmosphère (Roujean, Leroy et al. 1992). Ils sont généralement caractérisés par un faible nombre de paramètres ce qui permet leur utilisation en cas de peu de mesures directionnelles. Ces modèles relativement simples et d'exécution rapide ne permettent pourtant pas d'avoir accès aux caractéristiques biophysiques détaillées du couvert. Plusieurs modèles analytiques ont vu le jour durant ces dernières décennies (Walthall, Norman et al. 1985), (Shibayama and Wiegand 1985) (Ahmad and Deering 1992) (Roujean, Leroy et al. 1992), (Li and Strahler 1985) ; (Weiss, Jacob et al. 2002) ; (Pinty and Verstraete 1991) (Dymond, Sheperd et al. 1999) ; (Lucht and Roujean 2001) ; (Engelsen, Pinty et al. 1996), quelques exemples de ces modèles sont brièvement présentés dans ce qui suit.

- Walthall (Walthall, Norman et al. 1985) décrit la réflectance bidirectionnelle $R(\Omega_s, \Omega_v)$ au moyen d'une simple formulation empirique. Cette formulation a initialement été calée sur des mesures de BRDF. Elle a ensuite été ajustée sur des simulations de BRDF des cultures de soja réalisées avec un modèle physique de transfert radiatif. Le modèle empirique à trois paramètres s'exprime comme suit :

$$R(\Omega_s, \Omega_v) = a \cdot \theta_s^2 + b \cdot \theta_v \cos(\varphi_s - \varphi_v) + c$$

L'ajustement des paramètres a, b et c sur un nouveau jeu de simulation généré par un modèle turbide de réflectance de couvert a été effectué en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre les simulations et le modèle analytique (Walthall 1997). Une sensibilité de ces paramètres à l'indice de surface foliaire et à l'angle d'éclairement a été mise en évidence.

○ Un deuxième modèle semi-empirique basé sur trois paramètres aussi a été développé par (Rahman H., Pinty B. et al. 1993). Ce dernier simule l'anisotropie des surfaces terrestres et l'effet de maximum de rétro-diffusions dans la direction d'éclairement 'Hot spot' en fonction des directions d'éclairement (θ_s, φ_s) et de visée (θ_v, φ_v) :

$$R(\Omega_s; \Omega_v) = R_0 \frac{(\cos(\theta_s) \cos(\theta_v))^{k-1}}{(\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v))^{k-1}} \times F(g) \times \left[1 + \frac{1 - R_0}{1 + G} \right]$$

$$F(g) = \frac{1 - \theta^2}{[1 + \theta^2 - 2\theta \cos(\pi - g)]^5} \quad \text{et} \quad G = [\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos(\varphi_s - \varphi_v)]^{1/2}$$

les trois paramètres du modèle sont R_0, θ et k . la fonction $F(g)$ est introduite pour moduler la diffusion avant et arrière via le paramètre empirique θ et l'angle de phase g donné par $\cos(g) = \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) + \sin(\theta_s) \sin(\theta_v) \cos(\varphi_s - \varphi_v)$. Le pic de réflectance dans la direction du hot spot est pris en compte par le terme : $\left[1 + \frac{1 - R_0}{1 + G} \right]$.

○ Hapke (Hapke 1986) a introduit un modèle semi-empirique de la réflectance bidirectionnelle basée sur une solution approchée de l'équation du transfert radiatif pour un milieu composé de particules d'albédo de simple diffusion ω . La diffusion multiple et l'effet du hot spot ont été pris en compte :

$$R(\Omega_s, \Omega_v) = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\cos(\theta_s)}{\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)} \{ [1 + B(g)] P(g) + H(\omega, \cos(\theta_s)) H(\omega, \cos(\theta_v)) - 1 \}$$

$$H(\omega, \cos(\theta_i)) = \frac{1 + 2 \cos(\theta_i)}{1 + 2 \cos(\theta_i) (1 - \omega)^{1/2}} \quad \text{et} \quad B(g) = B_0 \left[1 - \frac{\tan |g|}{2h} \left(3 - e^{-h/\tan |g|} \right) \left(1 - e^{-h/\tan |g|} \right) \right]$$

où $P(g)$ est la fonction de phase des particules normalisée, $B(g)$ est la fonction de rétrodiffusion, $H(\omega, \cos(\theta_i))$ est la fonction de diffusion multiple et h décrit l'espace entre particules

○ Le modèle semi-empirique de (Deering, Eck et al. 1990) a été développé suivant une approche géométrique. Celui-ci suppose un milieu constitué d'un sol dont une fraction lambertienne f de réflectance ρ_s et une fraction $1-f$ couverte aléatoirement de facettes de réflectance ρ_f et de transmittance τ_s . La végétation est décrite par des protusions opaques de réflectance ρ_p , les contributions à la rétro-diffusion, et à la diffusion en avant ont été séparées dans ce modèle. La réflectance bidirectionnelle de la surface s'exprime par :

$$R(\Omega_s, \Omega_v) = R_{sol} \{ \exp[-s(\tan\theta_v + \tan\theta_s)] \} + R_p \{ 1 - \exp[-s(\tan\theta_v + \tan\theta_s)] \}$$

$$R_{sol} = f \cdot \rho_s + (1-f) \cdot \frac{\rho_f (\sin(\varphi_v - \varphi_s) - (\varphi_v - \varphi_s) \cos(\varphi_v - \varphi_s))}{4(\cot\theta_s + \cot\theta_v)} + (1-f) \cdot \frac{\tau_s ((\varphi_v - \varphi_s - \pi) \cos(\varphi_v - \varphi_s - \pi) - \sin(\varphi_v - \varphi_s - \pi))}{4(\cot\theta_s + \cot\theta_v)}$$

$$R_p = \frac{\rho_p (\sin(\varphi_v - \varphi_s) - (\varphi_v - \varphi_s) \cos(\varphi_v - \varphi_s))}{4(\cot\theta_s + \cot\theta_v)}$$

s est la projection verticale par unité de sol des protusions. Ce modèle est adapté pour des surfaces désertiques dont la couverture végétale est très faible où l'effet d'ombrage entre plantes est négligé.

○ (Roujean, Leroy et al. 1992) ont développé un modèle semi empirique à noyaux : 'kernel based Semi-empirical BRDF model'. La réflectance bidirectionnelle est exprimée par une somme linéaire de deux fonctions noyaux f_v et f_s :

$$R(\Omega_s, \Omega_v) = k_0 + k_s f_s(\theta_s, \theta_v, \phi) + k_v f_v(\theta_s, \theta_v, \phi)$$

où

$$f_s(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos\phi + \sin\phi] \tan\theta_s \tan\theta_v - \frac{1}{\pi} \left(\tan\theta_s + \tan\theta_v + \sqrt{\tan^2\theta_s + \tan^2\theta_v - 2\tan\theta_s \tan\theta_v \cos\phi} \right)$$

$$f_v(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)} \left[\left(\frac{\pi}{2} - g \right) \cos(g) + \sin(g) \right] - \frac{1}{3}$$

et ϕ est l'azimut relatif entre les directions du soleil et d'observation et k_0 , k_s , k_v sont les 3 paramètres empiriques du modèle caractérisant la surface. La conception de ce modèle est basée sur deux processus : 1) la diffusion par la surface prenant en compte la structure géométrique des réflecteurs

opaques, disposés aléatoirement sur la surface et l'ombre du sol (composante surfacique). 2) la diffusion par une série de facettes distribuées aléatoirement qui simulent les propriétés diffusantes du sol et de la végétation 'composante volumique'. Cette dernière a été déterminée à partir de la résolution du transfert radiatif en supposant que seules les diffusions simples ont lieu. La réflectance totale résulte finalement de la somme de ces deux composantes.

En conclusion, une variété de modèles empiriques et semi-empiriques ont été développés pour corriger les données satellitaires des effets bidirectionnels de la surface et déterminer l'albédo (Wanner W., Strahler A. H. et al. 1997), (Roujean, Tanré et al. 1997). Un résumé des principaux modèles développés à ce jour est donné par (Jupp 1998). Etant donné le faible nombre de paramètres qu'ils nécessitent et leur nature généralement linéaire, les modèles analytiques sont très rapides en inversion. Cependant, la prise en compte des caractéristiques de la surface n'est pas explicite, ce qui limite l'utilisation de ces modèles pour déterminer les caractéristiques biophysiques du couvert tel le LAI, le contenu en eau ou en chlorophylle. Pour répondre à de tels besoins il convient d'utiliser plutôt des modèles physiques de réflectance de couverts.

2.3.2 Modèles Physiques de transfert radiatif

Plusieurs approches ont été développées pour modéliser le transfert radiatif dans les couverts végétaux. Elles sont basées sur des formulations mathématiques dont le degré de complexité est principalement lié à la précision avec laquelle les interactions électromagnétiques sont décrites. Ainsi, les modèles physiques se distinguent d'une part par la manière de représenter le milieu de propagation c'est à dire le couvert, et d'autre part par l'approche mathématique adoptée pour résoudre la physique radiative au sein du couvert. une présentation des bases théoriques sur laquelle se basent les modèles physiques sera présentée dans ce qui suit avant de décrire les principaux types de modèles physiques existants.

2.3.2.1 Les deux approches de modélisation du transfert radiatif

Les interactions du rayonnement solaire au sein du couvert peuvent être modélisées suivant deux approches : surfacique ou volumique. L'approche surfacique décrit le régime radiatif du couvert en considérant les interactions rayonnement-surface (feuille, tige, tronc...). L'approche volumique représente les interactions au sein d'un volume constitué de particules diffusantes.

- *Approche surfacique*

Les éléments du couvert sont ici caractérisés par trois coefficients optiques propres : l'absorptance, la transmittance et la réflectance. Ces derniers, déterminés par les rapports entre les flux absorbés, transmis et réfléchis et le flux incident, caractérisent statistiquement le comportement d'une surface en interaction avec le rayonnement solaire. Cette approche nécessite ainsi une description détaillée de l'architecture du couvert en terme de position, orientation, dimension et forme des organes foliaires.

La modélisation du transfert radiatif par cette approche consiste à résoudre l'équation du rendu (Chelle, Andrieu et al. 1997) définie pour une longueur d'onde donnée par :

$$L_{\lambda}(r, \Omega) = \int_{\pi} \gamma_r(r, \Omega' \rightarrow \Omega) L_{\lambda}(r, \Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' + \int_{\pi} \gamma_t(r, \Omega'' \rightarrow \Omega) L_{\lambda}(r, \Omega'' \rightarrow \Omega) d\Omega''$$

où $L_{\lambda}(r, \Omega)$ est la luminance à un point r vue suivant la direction Ω . Celle-ci est égale à la somme des luminances qui arrivent suivant une direction Ω' et sont réfléchies suivant la direction Ω et celles qui arrivent suivant la direction Ω'' et sont transmises suivant la même direction Ω . $\gamma_r(r, \Omega' \rightarrow \Omega)$ et $\gamma_t(r, \Omega'' \rightarrow \Omega)$ sont les fonctions de phases de la surface qui décrivent la distribution directionnelle de la réflectance et la transmittance du diffuseur. Cette fonction de phase est décrite par un modèle de BRDF qui permet de représenter des phénomènes particuliers tels que la réflexion spéculaire de certaines feuilles.

L'approche surfacique reste néanmoins complexe à mettre en place à cause du grand nombre d'éléments qui constituent le couvert et du besoin d'une description explicite de la structure de ces éléments.

- *Approche volumique :*

Le couvert, dans ce cas est considéré comme un milieu turbide constitué de particules diffusantes de taille infinitésimale. Les interactions des ondes électromagnétiques au sein d'un milieu homogène sont traduites par l'équation générale du transfert radiatif. Cette dernière exprime la propagation de la luminance $L(r, \Omega)$ dépendante de la longueur d'onde λ , la position r et la direction Ω comme suit [(Knyazikhin, Marshak et al. 1992)]:

$$\left[\mu \cdot \frac{d}{dz} + \eta \cdot \frac{d}{dy} + \xi \cdot \frac{d}{dx} \right] L(r, \Omega) = -\alpha(r, \Omega) \cdot L(r, \Omega) + \int_{4\pi} \alpha_d(r, \Omega' \rightarrow \Omega) \cdot L(r, \Omega') \cdot d\Omega'$$

où μ , η et ξ sont les cosinus directeurs selon les axes (Ox), (Oy), (Oz) respectivement ; $\alpha(r, \Omega)$ est le coefficient d'extinction dans la direction Ω qui correspond à la probabilité par unité de longueur pour qu'un photon soit intercepté (absorbé ou diffusé) durant son trajet, et $\alpha_d(r, \Omega' \rightarrow \Omega)$ est la probabilité pour qu'un photon provenant d'une direction Ω' soit diffusé dans un angle solide autour de la direction Ω .

Ainsi les trois termes de l'équation correspondent respectivement à :

- 1) la variation de la luminance au point r et suivant la direction Ω (terme de gauche)
- 2) l'extinction (absorption et diffusion) au point r (premier terme de droite) selon la direction

Ω

3) les diffusions selon Ω au point r (deuxième terme de droite).

Le coefficient d'interception $\alpha(r, \Omega)$ dépend de la géométrie du couvert et s'exprime ainsi par :

$$\alpha(r, \Omega) = u(r) \cdot G(r, \Omega)$$

$$\text{avec } G(r, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} d\Omega_L g(r, \Omega_L) |\Omega \cdot \Omega_L|$$

$u(r)$ est la densité de surface foliaire au point r , $g(r, \Omega_L)$ est la distribution des angles foliaires avec une direction d'inclinaison Ω_L et $G(r, \Omega)$ est la projection d'une unité de surface foliaire sur le plan perpendiculaire à la direction d'incidence des photons.

Le coefficient de diffusion dépend de la géométrie du couvert et des propriétés optiques des feuilles. Son expression est donnée par :

$$\alpha_d(r, \Omega) = u(r) \cdot \frac{1}{\pi} \Gamma(r, \Omega' \rightarrow \Omega)$$

$$\text{avec } \Gamma(r, \Omega' \rightarrow \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} d\Omega_L g(r, \Omega_L) |\Omega' \cdot \Omega_L| \gamma_L(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)$$

où $\Gamma(r, \Omega' \rightarrow \Omega)$ est la fonction de phase du volume qui comprend l'effet de la distribution des inclinaisons des feuilles en plus de la fonction de phase de la feuille $\gamma_L(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)$. Celle-ci est généralement décrite comme la somme d'une composante diffuse $\gamma_{LD}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)$ et une autre spéculaire $\gamma_{LS}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)$. La composante diffuse est décrite par un modèle de réflectance bi-lambertien (Shultis and Myneni 1988) :

$$\gamma_{LD}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} n_{LD} |\Omega \cdot \Omega_L| & \text{si } (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega) < 0 \\ \frac{1}{\pi} t_{LD} |\Omega \cdot \Omega_L| & \text{si } (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega) > 0 \end{cases}$$

n_{LD} et t_{LD} sont respectivement les coefficients de réflectance et transmittance hémisphériques de la feuille. Ces derniers, correspondent aux flux diffusés par la feuille intégrés sur tout l'hémisphère. Ils peuvent dépendre de la face inférieure et supérieure de la feuille.

La fonction de phase spéculaire est déterminée par l'état de la surface de la feuille. Elle dépend de trois facteurs :

- 1) l'angle α entre la normale de la feuille Ω_L et la direction d'incidence des photons Ω' ;
- 2) l'indice de réfraction de la surface foliaire n ;
- 3) le facteur de correction $K(\kappa, \alpha)$ de la réflexion spéculaire avec κ un paramètre qui caractérise la rugosité de la surface. La composante spéculaire s'exprime ainsi par :

$$\gamma_{LS}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) = K(\kappa, \alpha) F_r(n, \alpha) \delta_2(\Omega, \Omega^*)$$

$$F_r(n, \alpha) = 0.5 \left[\frac{\sin^2(\alpha - \Theta)}{\sin^2(\alpha + \Theta)} + \frac{\tan^2(\alpha - \Theta)}{\tan^2(\alpha + \Theta)} \right]$$

où F_r est la fonction de Fresnel qui décrit la quantité d'énergie spéculairement réfléchie moyennée sur tous les états de polarisation et $\Theta = \sin^{-1}(n^{-1} \sin \alpha)$. δ_2 est la fonction de Dirac et Ω^* est le vecteur qui définit la direction de la réflexion spéculaire.

En conclusion, ces deux approches constituent les fondements des modèles physiques de transfert radiatif. Ainsi, l'approche surfacique intervient dans les modèles de lancer de rayons et de radiosité tandis que l'approche volumique est intégrée dans les modèles de type turbide et discrets. Les modèles de type géométriques ou hybrides sont généralement basés sur l'optique géométriques ou/et l'approche volumique. Les quatre types de modèles physiques existants seront présentés dans ce qui va suivre. On mettra l'accent d'une part sur la manière dont l'architecture est présentée et d'autre part sur la méthode utilisée pour résoudre le transfert radiatif dans le couvert.

2.3.2.2 Modèles basés sur une approximation de la représentation de la structure

Dans cette partie nous allons introduire les modèles physiques dont la résolution du transfert radiatif a été effectuée en considérant une représentation plus ou moins approchée de l'architecture du couvert. Trois grands types de modèles seront alors introduits classés suivant l'ordre de complexité de leur description architecturale.

2.3.2.2.1 Modèles de milieux homogènes horizontalement (turbides)

Ce type de modèles décrit la structure par un milieu horizontalement homogène et infini qui peut être composé d'une ou plusieurs couches superposées. La décomposition du milieu en couches permet de représenter la variabilité suivant la verticale. Au sein de chaque couche, les composantes du couvert sont assimilées à des petites particules ayant une distribution aléatoire et des propriétés optiques supposées constantes. La dimension foliaire et la distance inter feuilles ne sont pas prises en compte dans ce type de modèle.

La résolution du transfert radiatif au sein de ces modèles se fait souvent par de nouvelles approximations sur la résolution numérique de l'équation du transfert radiatif. Il existe ainsi trois principales approches de résolution:

1. *Approches basées sur la théorie de Kubelka et Munk:*

Kubelka et Munk (Kubelka and Munk 1931) décrit le transfert radiatif au moyen de deux flux se propageant verticalement (Figure 5: un flux diffus descendant E_- et un flux diffus ascendant

E_+). La variation verticale des flux diffus est caractérisée par deux coefficients a et b qui représentent respectivement les processus d'extinction (absorption et diffusion dans la direction opposée) et la diffusion (changement de direction considéré identique pour les deux flux).

$$\begin{cases} \frac{dE_-}{d(z)} = a.E_- - b.E_+ \\ \frac{dE_+}{dz} = -a.E_+ + b.E_- \end{cases}$$

(Suits 1972) proposa d'ajouter deux flux directionnels au système d'équations différentielles de Kubelka et Munk. Ils décrivent la source supposée placée à l'infini (le soleil), E_s , et la direction d'observation, E_o (Figure 5). La variation verticale de ces flux directionnels est décrite par des coefficients d'extinction (k , K) et des coefficients de diffusion (c , c' , u , v , w). Suits suppose un couvert constitué d'éléments orientés verticalement ou horizontalement lambertiens en transmission et en réflexion. Les éléments du couvert sont ainsi remplacés par leurs projections horizontale et verticale. Les coefficients d'extinction et de diffusion sont exprimés en fonction

- de l'indice foliaire,
- de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles,
- de la réflectance et la transmittance hémisphérique de la feuille
- des directions d'observation et d'éclairement.

Le système d'équation différentielles considéré est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dE_-}{d(z)} = aE_- - b.E_+ - c'.E_s \\ \frac{dE_+}{dz} = -a.E_+ + b.E_- + c.E_s \\ \frac{dE_s}{d(z)} = k.E_s \\ \frac{dE_o}{dz} = uE_+ + vE_- + wE_s - KE_o \end{cases}$$

La réflectance du couvert est ensuite calculée comme le rapport entre le rayonnement E_o et la somme des flux descendant direct $E_s(0)$ et diffus $E_-(0)$ au sommet du couvert.

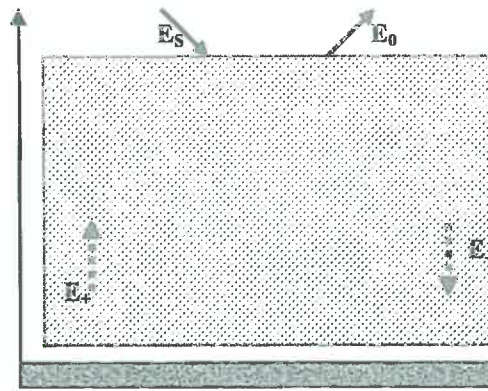


Figure 5 : schéma des flux dans un modèle turbide monocouche.

L'approximation concernant les orientations verticales et horizontales des feuilles reste néanmoins loin de la réalité des couverts végétaux. L'extension de ce modèle aux différents types d'inclinaison foliaire a été introduite par la suite dans le modèle SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef 1984). La comparaison du modèle de Suit et SAIL à des réflectances mesurées sur des couverts de pois et de maïs a montré que les simulations par SAIL tendent à mieux approcher les observations [Badwhar et al 1985]. Le modèle original SAIL a été récemment amélioré en introduisant une meilleure description de l'anisotropie de la diffusion multiple par une discrétisation de l'espace des directions et ce en remplaçant les deux flux hémisphériques par un nombre plus important de flux directionnels (Verhoef 2003). Cette approche est donc similaire à celle que nous présentons ci-dessous, consistant à discrétiser l'espace des directions. La comparaison au modèle originel montre toutefois que l'approximation hémisphérique conduit à des erreurs qui sont relativement faibles. Une description plus détaillée du modèle SAIL originel sera donnée dans le chapitre 5. Etant donné ses bonnes performances, sa simplicité, et le peu de paramètre qu'il nécessite en entrée, le modèle SAIL est un des plus largement utilisés au sein de la communauté télédétection.

Dans le cas de couverts composés de plusieurs couches horizontales, le calcul du transfert radiatif est basé sur la méthode 'adding' (Verhoef 1985), (Verhoef and H. 2003) permettant un couplage entre les différentes couches.

2. Discrétisation de l'espace des ordonnées.

Dans cette méthode, connue sous le nom de la méthode des ordonnées discrètes (Myneni, Gutschick et al. 1988; Myneni, Marshak et al. 1991), la dépendance angulaire de la propagation des photons est approchée par une discrétisation de l'espace des directions Ω . Cette discrétisation permet de simuler la propagation du rayonnement avec une bonne précision toutefois dépendante du pas de discrétisation. Il est donc souhaitable d'avoir un nombre de directions qui présente un bon compromis entre la précision et la lourdeur de calcul. L'équation de transfert radiatif discrète dans un milieu supposé horizontalement isotrope s'exprime alors comme suit :

$$-\mu_{ij} \cdot \frac{d}{dz} L(z, \Omega_{ij}) = -\alpha(z, \Omega_{ij}) \cdot L(z, \Omega_{ij}) + \sum_{n=1}^{2N} W_n \sum_{m=1}^{2M} W_m \cdot \alpha_d(z, \Omega_{nm} \rightarrow \Omega_{ij}) \cdot L(z, \Omega_{nm})$$

$i, n=1, 2, \dots, 2N$ et $j, m=1, 2, \dots, 2M$ sont respectivement l'ordre de discrétisation de l'angle zénithal θ et azimutal ϕ et W_n et W_m sont les poids associés aux directions d'incidence n et m . Dans un système de discrétisation idéal, trois conditions sont à vérifier par les coefficients μ_{ij} , α et α_d :

- 1) la positivité :
$$\begin{cases} \mu_{ij} < 0; -\mu_{ij} = \mu_{q-i, j}, \alpha(z, \Omega_{ij}) = \alpha(z, \Omega_{q-i, j}) \\ \alpha_d(z, \Omega_{nm} \rightarrow \Omega_{ij}) > 0 \end{cases}$$
- 2) la symétrie :
$$\alpha_d(z, \Omega_{nm} \rightarrow \Omega_{ij}) = \alpha_d(z, \Omega_{ij} \rightarrow \Omega_{nm})$$
- 3) la conservation d'énergie :
$$\sum_{n=1}^{2N} W_n \sum_{m=1}^{2M} W_m \cdot \alpha_d(z, \Omega_{nm} \rightarrow \Omega_{ij}) = \alpha_d(\Omega_{ij})$$

où $q=2N+1$. En plus du nombre de directions, la précision de la solution dépend aussi de la distribution de ces dernières. Ainsi, dans des situations fortement anisotropiques, il est recommandé de choisir une distribution asymétrique avec un échantillonnage plus dense autour des anisotropies. Cette méthode a souvent été combinée à une discrétisation de l'espace (Liang and Strahler 1993), un système d'équation différentielles est défini dans ce cas pour résoudre le transfert radiatif entre couches et entre directions de propagation (Myneni, Marshak et al. 1991)].

3. Utilisation directe de l'équation du transfert radiatif

La troisième méthode consiste à utiliser les méthodes itératives pour résoudre l'équation du transfert radiatif [(Myneni R B, Ross J. et al. 1989; Knyazikhin and Marshak 1991)].

La méthode de l'approximation des ordres successifs de diffusions SOSA (Successive Orders of Scattering approximation) est une des méthodes les plus utilisées. Celle-ci approche l'intensité des photons ayant subi n diffusions par la somme de n fonctions associées à une diffusion d'ordre 1 :

$$I_n(z, \Omega) = J_1(z, \Omega) + J_2(z, \Omega) + J_3(z, \Omega) + \dots + J_n(z, \Omega)$$

où les fonctions $J_k(z, \Omega)$, $k=1, 2, \dots, n$ sont les solutions des équations différentielles suivantes :

$$\mu \frac{dJ_k}{dz} + \sigma(z, \Omega) J_k(z, \Omega) = R_{k-1}(z, \Omega)$$

$$\text{avec } J_k(0, \Omega) = 0, \mu < 0; \quad J_k(H, \Omega) = 0, \mu > 0$$

et

$$R_k(z, \Omega) = \int_{4\pi} \sigma_s(z, \Omega \rightarrow \Omega') J_k(z, \Omega') d\Omega'$$

une simple résolution de l'équation différentielle permet d'exprimer l'intensité d'ordre k par les relations suivantes :

$$J_k(z, \Omega) = \begin{cases} -\frac{1}{\mu} \int_0^z \exp\left[-\frac{1}{\mu} \tau(z', z, \Omega)\right] \sigma(z', \Omega) R_{k-1}(z', \Omega) dz', & \mu < 0, \\ -\frac{1}{\mu} \int_z^H \exp\left[-\frac{1}{\mu} \tau(z', z, \Omega)\right] \sigma(z', \Omega) R_{k-1}(z', \Omega) dz', & \mu > 0, \end{cases}$$

où τ est l'épaisseur optique définie entre les hauteurs z et z' suivant la direction Ω : $\tau(z', z, \Omega) = \int_z^{z'} \sigma(z'', \Omega) dz''$. L'efficacité de la méthode de SOSA est conditionnée par le choix de la méthode de convergence.

4. Améliorations additionnelles

(Nilson and Kuusk 1989) et (Andrieu, Baret et al. 1997) proposent d'ajouter une composante spéculaire à la composante lambertienne des feuilles en transformant le terme de simple diffusion. Suite aux travaux de (Kuusk 1985), ils proposent de considérer les feuilles comme étant de taille finie, permettant ainsi de représenter leur ombrage mutuel. La composante de simple diffusion s'écrit ainsi :

$$R_{VS}(\Omega_s, \Omega_v) = \rho_{sol} \cdot P(\Omega_s, \Omega_v, H) + \int_0^H \frac{\Gamma(\Omega_s, \Omega_v, z)}{\cos(\theta_s) \cos(\theta_v)} u(z) P(\Omega_s, \Omega_v, z) dz$$

où $P(\Omega_s, \Omega_v, z)$ est la fraction de trou bidirectionnelle à une hauteur z . Celle-ci correspond à la probabilité qu'un élément du couvert soit vu suivant la direction Ω_v et éclairé suivant la direction Ω_s simultanément. Elle est égale au produit des fractions de trou monodirectionnelles suivant ces deux directions multiplié par une fonction de correction qui tient compte de l'effet du hot spot dans les directions de rétrodiffusion (Kuusk 1994). L'effet de hot spot est du à l'absence d'ombre vue dans la direction d'éclairement et correspond à un maximum local de réflectance. Assimilées à des surfaces circulaires, les feuilles sont caractérisées par leur diamètre équivalent relatif à la hauteur du couvert. La prise en compte de l'effet du hot spot dans la modélisation de la réflectance des milieux homogènes a aussi été introduite par différents autres auteurs ((Gerstl and Simmer 1986) ; (Verstraete, Pinty et al. 1990) ; (Jaquinta and Pinty 1997) ; (Gobron, Pinty et al. 1997).

Différents modèles basés sur l'hypothèse de milieu turbide avec une correction apportée pour décrire le hot-spot ont été comparés ((Jacquemoud, Bacour et al. 2000) ; (Pinty, Gobron et al. 2001). Les résultats montrent en général une très bonne cohérence des résultats. Ces modèles simulent ainsi de manière assez performante la réflectance de couverts correspondant à l'hypothèse simpliste d'une densité de surface foliaire constante dans le plan horizontal. Cette hypothèse d'homogénéité horizontale du milieu n'est pas vérifiée pour de nombreux types de couverts réels notamment dans le cas des cultures en rangs marqués et des couverts hétérogènes comme les forêts. En particulier, les effets importants liés aux ombres causées par les rangs et par les couronnes ne sont pas pris en compte.

2.3.2.2 Modèles géométriques

Le couvert est supposé constitué d'une surface horizontale (ou non) représentant le sol caractérisée par une réflectance bidirectionnelle connue, sur laquelle sont distribués des objets (végétation) géométriques ayant des formes (cylindres, sphères, cônes, ellipsoïdes...), tailles et propriétés optiques (réflectance, transmittance et absorptance) prédéfinies. Le calcul de la réflectance se base sur les lois de l'optique géométrique compte tenu des configurations d'éclairement et d'observation. On prend ainsi en compte explicitement, les proportions vues des surfaces éclairées et l'ombre des différentes composantes de la scène.

Le modèle développé par (Otterman and Weiss 1984) décrit le couvert par un ensemble de cylindres verticaux, opaques, distribués aléatoirement sur une surface plane, ayant un rapport entre leur hauteur et leur diamètre. Ainsi, une augmentation de ce rapport permet de passer d'un couvert épars vers un couvert dense. Une extension de ce modèle a été proposée par (Otterman 1985) pour inclure des surfaces réfléchissantes horizontales au sommet des cylindres.

Le modèle de (Li and Strahler 1985) a été développé pour caractériser les couverts forestiers à partir d'une série de cônes distribués aléatoirement et dont le rapport base/hauteur est fixe. Les hauteurs et les rayons de ces cônes sont distribués suivant une loi log-normale. Les couronnes des arbres sont là aussi supposées opaques et de comportement lambertien. La réflectance du couvert est calculée comme la somme pondérée des luminances des surfaces du cône et du sol sous-jacent éclairées ou à l'ombre. Pour les parties à l'ombre, la luminance est généralement supposée nulle, en cohérence avec l'hypothèse d'opacité des couronnes. Les variables d'entrée du modèle sont ainsi, en plus de la réflectance du sol et des couronnes, la hauteur et l'angle d'ouverture du cône, la densité de couronnes par unité de surface et les directions de visée et d'éclairement.

2.3.2.3 Modèles Hybrides (Incluant modèles discrets)

• *Modèles hybrides*

Les couronnes des arbres ne sont généralement pas complètement opaques. (Li and Strahler 1988) (Begué 1992) et (Goel and Grier 1987) ont levé cette hypothèse limitante en décrivant l'atténuation du rayonnement au sein de la couronne par une loi de poisson fonction du trajet optique dans l'objet. On est passé ainsi d'une description purement géométrique à une description 'hybride', en combinant les hypothèses du milieu turbide avec celles d'une description purement géométrique. Contrairement aux modèles purement turbides, les modèles hybrides autorisent une description plus complexe de l'architecture du couvert permettant de faire varier la densité de surface foliaire dans les plans horizontaux. Toutefois, le calcul des rediffusions multiples est généralement assez simple, considérant un couvert homogène équivalent. (Kuusk and Nilson 2000) a proposé des améliorations du traitement des diffusions multiples en considérant un LAI effectif qui dépend de l'angle zénithal solaire et de la distribution (agrégée ou régulière) des arbres et qui intègre l'agrégation des feuilles dans le couvert. En effet, si les modèles précédents autorisent une variation de la densité de surface foliaire dans l'espace, l'agrégation des feuilles est représentée selon deux échelles :

- l'échelle de la couronne, où les feuilles sont 'agrégées' autour des axes verticaux virtuels représentant les troncs ou les tiges.
- L'échelle du couvert où les arbres peuvent être plus ou moins distribués par groupes. En effet, les plantes ne sont généralement pas distribuées aléatoirement, leur arrangement étant conditionnée par la compétition pour la lumière et les ressources hydriques ou minérales. A grande échelle, ils sont organisés d'une manière agrégée en raison de la variabilité du sol et des conditions topographiques. Ainsi, (Chen J. M. and Leblanc S. G. 1997) proposent d'utiliser des distributions de Neyman qui permettent de représenter l'arrangement des arbres en bouquets "patchiness".

A ces deux échelles d'agrégation, les auteurs proposent d'ajouter deux autres échelles plus fines :

- L'agrégation autour des branches. Dans ce cas, les branches sont définies par un seul angle d'inclinaison. Chaque branche est composée de feuilles (pour les feuillus) ou de pousses (ou rameaux pour les conifères) ayant une distribution angulaire donnée.
- L'agrégation des aiguilles dans les pousses ou rameaux pour les conifères.

Le modèle 4-SCALE développé par (Chen J. M. and Leblanc S. G. 1997) pour bien représenter la structure des forêts considère ainsi explicitement ces 4 échelles d'agrégation. L'effet du hot spot lié à l'ombrage des feuilles sur elles mêmes et sur le sol a été calculé en considérant deux composantes, une première due à l'espace entre les couronnes et une seconde provoquée par la taille des éléments foliaires au sein de la couronne. Le calcul de la fonction du hot spot est basé sur la distribution des tailles des trous (Chen and Black 1991; Chen and Cihlar 1995). Les diffusions multiples (Chen and Leblanc 2001) sont évaluées par une approche de type 'radiosité' en calculant les facteurs de forme (view factors) pour chaque élément.

• Modèles discrets

Ce type de modèles améliore la représentation de la structure du couvert adoptée dans les modèles hybrides en considérant une discrétisation spatiale du couvert. (Kimes and Kirchner 1982) ont simulé le transfert radiatif dans des milieux hétérogènes en représentant la structure du couvert par un ensemble de cellules cubiques (Figure 6). Chaque cellule est identifiée par des coordonnées x, y, z et des informations concernant : le type de composantes de la cellule (feuille, branches, sol...), la densité de surface de ces composantes, leurs distributions angulaires et leurs propriétés optiques. La variation spatiale des contenus des cellules détermine ainsi la structure du couvert. La scène simulée ayant une taille finie, des techniques spéciales sont utilisées pour éviter les effets de bord. Les cellules sont généralement décrites par un milieu turbide, où de manière explicite par les objets qu'elles contiennent représentés par des surfaces de propriétés connues. Les directions de propagation sont régulièrement discrétisées dans l'espace des directions. Le trajet des rayons est alors suivi au sein de la scène. Les diffusions multiples au sein de la cellule sont considérées négligeables. Les cellules doivent donc être suffisamment petites pour que cette hypothèse soit valide. La proportion du rayonnement transmis (la fraction de trou) par les cellules foliaires est donnée par :

$$T(\Delta l, \Omega_s) = \exp(-G(\Omega_s)u.\Delta l)$$

Où Δl est le trajet du rayon incident au sein de la cellule, $G(\Omega_s)$ est la projection d'une unité de surface foliaire suivant la direction perpendiculaire à la direction d'incidence Ω_s et u est la densité foliaire au sein de la cellule.

Le partie du rayonnement interceptée au sein de la cellule devient une source secondaire qui sera diffusée plusieurs fois fonction des propriétés optiques des feuilles : réflectance et transmittance. La proportion d'énergie diffusée selon une direction Ω_v est exprimée alors par :

$$T(\Omega_s, \Omega_v) = [1 - T(\Delta l, \Omega_s)] \frac{P(\Omega_s, \Omega_v)}{4\pi}$$

$$\text{et } \frac{P(\Omega_s, \Omega_v)}{4\pi} = \frac{\int g_f(\Omega_f) |\Omega_s \cdot \Omega_f| \cdot f(\Omega_f, \Omega_s \rightarrow \Omega_v) d\Omega_f}{G(\Omega_s)}$$

où $\frac{P(\Omega_s, \Omega_v)}{4\pi}$ est la fonction de phase de la cellule, qui, intégrée sur l'espace des directions est égale à l'albédo de la simple diffusion de la cellule, $f(\Omega_f, \Omega_s \rightarrow \Omega_v)$ est la fonction de phase des feuilles et $G(\Omega_s)$ est la projection d'une unité de surface foliaire sur la direction perpendiculaire à la direction d'incidence. Le modèle effectue alors une série d'itérations sur les cellules et les ordres de diffusion

jusqu'à ce que les rediffusions deviennent négligeables. Ainsi, l'ensemble du rayonnement incident est absorbé ou/et réfléchi par la scène permettant de calculer l'intensité et la distribution directionnelle des flux quittant cette dernière. Les concepts de ce modèle permettent ainsi de décrire le transfert radiatif dans les couverts hétérogènes. Néanmoins, celui-ci ne tient pas compte de certains phénomènes tel : le hot spot, la réflexion spéculaire, la BRDF et les diffusions multiples au sein des cellules. Aussi, l'hypothèse d'une discrétisation régulière de l'espace des directions, n'est pas optimale pour des couverts hétérogènes. Il serait préférable d'augmenter l'échantillonnage dans la direction du hot spot et au nadir où il est susceptible d'avoir de fortes anisotropies.

(Myneni, Marshak et al. 1991) (Gastellu-Etchegorry, Demarez et al. 1996) ont développé des approches similaires à celles de (Kimes and Kirchner 1982) basée sur la méthode des ordonnées discrètes et sur l'approche itérative. Le modèle DART (Gastellu-Etchegorry, Demarez et al. 1996) est sans doute le plus évolué de cette catégorie. Il permet de représenter la topographie, l'effet du hot spot dans les cellules (basé sur l'approche de Kuusk 1985), la réflectance spéculaire des feuilles et quatre types de diffuseur dont les propriétés optiques sont différentes (feuille, sol, eau et tronc). Dans les cellules feuilles les interactions sont décrites par l'approche volumique tandis que dans les autres types de cellules (sol, tronc, eau) celles-ci sont considérées surfaciques. Dans ce modèle les cellules sont décrites par des parallélépipèdes au lieu de cubes comme dans le modèle de Kimes. Dans le cas de larges scènes où la variabilité suivant une direction particulière est plus faible, cette solution permet une réduction des ressources informatiques et du temps de calcul.

La discrétisation de l'espace des directions n'est pas équidistante dans ce modèle : N secteurs angulaires contigus sont considérés, chacun étant sur une direction Ω_u avec une largeur angulaire $\Delta\Omega_{uv}$ où u et v sont les niveaux de discrétisation de $\mu=\cos(\theta)$ et φ . L'équation 3D du transfert radiatif discrétisée s'écrit alors sous la forme suivante si les secteurs angulaires sont très petits et le rayonnement diffus relativement anisotrope:

$$\left[\mu_{ij} \frac{d}{dz} + \eta_{ij} \frac{d}{dy} + \xi_{ij} \frac{d}{dx} \right] W(r, \Omega_{ij}) = -\alpha(r, \Omega_{ij}) W(r, \Omega_{ij}) + Q(r, \Omega_{ij}) \Delta\Omega_{ij} + \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^{V(u)} \Delta\Omega_{ij} \cdot \alpha_{ij}(z, \Omega_{uv} \rightarrow \Omega_{ij}) W(r, \Omega_{uv})$$

et $W(r, \Omega_{ij}) = I(r, \Omega_{ij}) \Delta(r, \Omega_{ij})$

où $W(r, \Omega_{ij})$ est le flux d'énergie suivant la direction Ω_{ij} et dans l'angle solide $\Delta\Omega_{ij}$, et $Q(r, \Omega_{ij})$ est la fonction source de première diffusion.

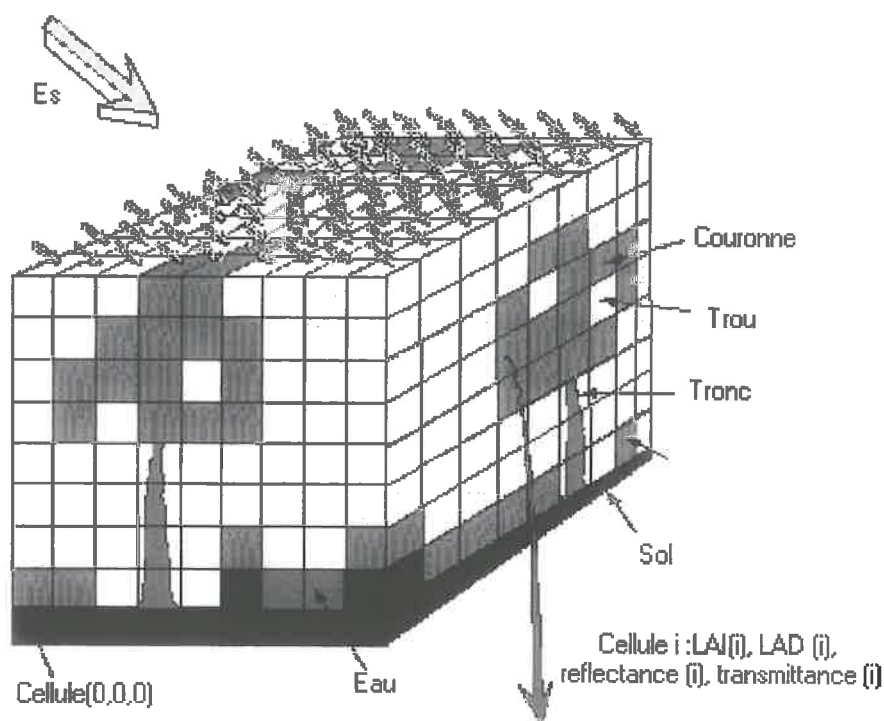


Figure 6 : schéma descriptif de la discrétisation dans le modèle DART (Gastellu-Etchegorry, Demarez et al. 1996)

2.3.2.3 Modèles basés sur une représentation explicite de la structure

Cette deuxième catégorie de modèles physiques, contrairement à la précédente, traite le transfert radiatif dans le couvert à l'échelle de l'organe. En effet, basée sur l'approche surfacique présentée dans le §2.3.2.1, ce type de modèle prend en compte l'architecture du couvert d'une manière explicite.

2.3.2.3.1 Les modèles à lancer de rayons

(Disney, Lewis et al. 2000) présente une revue détaillée des différents modèles de type lancer de rayons. Cette technique est basée sur une description explicite du transfert radiatif où le devenir de chaque photon dans le couvert est décrit de manière stochastique à partir des lois physiques élémentaires régissant l'interaction surface/rayonnement. Le point de départ du photon, sa direction et son poids sont déterminés aléatoirement. Le trajet du photon est rectiligne, suite à une interaction avec un élément du milieu l'énergie affectée au photon est actualisée en fonction des propriétés optiques du diffuseur. Ce processus itératif simulant les diffusions multiples s'achève quand le photon sort de la scène par le haut, ou quand son énergie est inférieure à un seuil donné. La simulation du transfert radiatif nécessite ici un grand nombre de photons (rayons) pour atteindre une bonne précision. Ce modèle s'appuie sur une description également explicite de la structure du couvert, autorisant des niveaux de détail et de réalisme inégalables par les approches précédentes.

Si le principe du lancer de rayon en fait certainement la technique la plus simple, sa mise en œuvre informatique est complexe pour arriver à des performances compatibles avec les capacités de calcul courantes. Différentes implémentations existent, en particulier RAYTRAN (Govaerts and Verstraete 1998) qui offre l'avantage du choix d'une large palette de primitives géométriques décrivant les éléments du couvert. (Chelle 1996; Chelle 1997) ont développé le modèle PARCINOPY, basé sur une représentation des surfaces par des triangles. L'implémentation réalisée pour ce modèle offre l'avantage de permettre de calculer les flux à différents niveaux et dans différentes directions. (North 1996) a pour sa part développé le modèle FLIGHT qui intègre une description paramétrique de couverts forestiers.

2.3.2.3.2 Modèles de radiosité.

La méthode de radiosité est un concept physique qui consiste à calculer les diffusions entre des surfaces diffusantes. Cette méthode développée à l'origine pour étudier les échanges thermiques, a été largement utilisée en infographie pour simuler des images de synthèse. Elle permet de résoudre l'équation du rendu à la surface de tout élément au sein d'une maquette numérique. L'équation de la radiosité décrit ainsi le bilan des flux qui quittent ou atteignent des surfaces lambertiennes discrètes. L'équation est donnée ainsi par l'expression suivante (Gerstl and Borel 1992):

$$B_i = E_i + \chi_i \sum_j F_{ij} B_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 2N$$

$$\text{et } \chi_i = \begin{cases} \rho_i, & \text{si } \left(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j \right) < 0 \\ \tau_i, & \text{si } \left(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j \right) > 0 \end{cases}$$

où B_i est la radiosité d'un élément de surface i , défini comme la densité du flux total qui quitte la surface. E_i est l'émission propre (terme source) de la surface considérée comme négligeable dans le domaine solaire. χ_i est le coefficient de transmission ou de réflexion de la surface défini par l'orientation de la normale des surfaces les unes aux autres, F_{ij} est le facteur de forme qui exprime la fraction du flux qui quitte la surface j pour atteindre la surface i , et N est le nombre d'éléments de surfaces dans la scène. Le facteur de forme est un paramètre purement géométrique qui est proportionnel à l'angle solide sous lequel une surface donnée voit une autre surface. Il peut être calculé analytiquement par projection géométrique ou numériquement par lancer de rayons. Cependant, le calcul de ces facteurs de forme présente un inconvénient dans la méthode de radiosité. pour N surfaces présentes dans la scène il faut N^2 calculs de facteurs de forme. Ceci nécessite donc des temps de calcul et des ressources mémoires importantes pour des scènes présentant un nombre élevé d'éléments. Ainsi, pour les couverts végétaux dont une description détaillée est souvent associée à un grand nombre de primitives (España, Baret et al. 1999), la simulation du bilan radiatif peut devenir

très coûteuse en ressources informatiques. Toutefois, des approximations permettent de réduire la dimension du problème. (Goel, Rozehnal et al. 1991) propose de négliger les facteurs de forme au dessous d'un certain seuil. Le nombre de terme à considérer sera d'autant réduit, mais un biais significatif peut être introduit. (Chelle, Andrieu et al. 1997) proposent de coupler l'approche radiosité pour les éléments se trouvant à proximité de l'élément considéré, et une approche milieu homogène pour traiter la contribution des éléments lointains.

2.4 Conclusions

Dans ce chapitre les principaux facteurs qui interviennent dans les interactions que peut subir le rayonnement solaire avant sa sortie du couvert ont été présentés. Une description des propriétés optiques des feuilles et du sol a été fournie en plus d'une présentation succincte de quelques approches de modélisation à l'échelle de ces éléments. Les principales caractéristiques structurales du couvert, ayant un impact sur la diffusion du rayonnement et la fraction de trou qui joue un rôle important dans son interception ont été définies et décrites. Enfin, les principaux types de modèles de réflectance du couvert développés à ce jour ont été présentés.

On a noté, la diversité des concepts utilisés pour représenter la distribution spatiale des feuilles et modéliser les interactions avec le rayonnement. Le choix d'un modèle au lieu d'un autre est gouverné par les objectifs recherchés. Ainsi, dans le processus d'inversion des données de télédétection, utilisé pour déterminer les caractéristiques biophysiques du couvert, ces modèles ne sont pas équivalents. En effet, le modèle à utiliser dans ce processus doit d'une part représenter la structure du couvert d'une manière réaliste et d'autre part être rapide et nécessiter peu de paramètres : un compromis qui reste difficile à réaliser. La complexité des modèles de type discrets, lancer de rayons et de radiosité définie au prix d'un grand nombre de paramètres nécessaires à la description de la scène et à un temps de calcul long, limite leurs utilisations dans le processus d'inversion. Toutefois, ces modèles peuvent être utilisés comme des outils d'analyse très efficace permettant ainsi d'améliorer les connaissances sur le transfert radiatif au sein du couvert.

Les modèles turbides et géométriques restent ainsi les plus convenables dans le processus d'inversion puisque ils nécessitent beaucoup moins de paramètres. (Strahler and Jupp 1990; Jacquemoud, Baret et al. 1995)

Pour les modèles turbides fondés sur l'hypothèse d'homogénéité horizontale, l'estimation des variables biophysiques à partir des données de télédétection est souvent biaisée dans le cas de nombreux couverts (couverts épars, cultures en rang, forêts...). Ainsi, il est nécessaire d'améliorer la description de l'architecture, notamment l'agrégation des feuilles en maintenant un minimum de variables. C'est cette question qui constituera l'objectif principal de ce travail : proposer un modèle de

transfert radiatif basé sur une description générique de l'agrégation des feuilles dans le couverts, et nécessitant un nombre limité de variables.

Nous avons alors adopté la démarche suivante qui s'organise en trois étapes :

1. Développement d'un modèle générique décrivant l'agrégation des feuilles au sein du couvert.
2. Utilisation de ce modèle pour identifier les variables du couvert ayant un poids sur la fraction de trou qui est un des termes essentiels du transfert radiatif.
3. Evaluation de l'effet de l'agrégation des feuilles sur le transfert radiatif et proposition d'une paramétrisation de la réflectance bidirectionnelle en fonction des coefficients de transmittance et de réflectance des feuilles.

Ces étapes sont respectivement développées dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III

3 Modélisation de l'agrégation des feuilles dans le couvert : le modèle CLAMP

3.1 Introduction : contraintes et démarche

Un modèle de structure CLAMP 'CLumped Architecture Model of Plant' du couvert a été développé en prenant en compte explicitement l'agrégation des feuilles dans le couvert. Plusieurs contraintes ont été considérées dans le choix de la modélisation :

- **Généricité.** L'objet du travail est de permettre de représenter une grande diversité de types de couverts végétaux à partir d'un formalisme unique. Il sera ainsi possible de l'appliquer dans un grand nombre de situations différentes en ajustant quelques variables caractéristiques des feuilles (taille, forme, inclinaison), des plantes (arrangement relatif des feuilles) et du couvert (hauteur, densité des plantes, schéma de semis).
- **Performances.** Le caractère générique d'un modèle est souvent associé à une diminution de ses performances dans des situations particulières. Les performances seront ici évaluées par rapport au transfert radiatif. On pourra donc se contenter d'un comportement effectif, c'est-à-dire où un jeu particulier de caractéristiques architecturales du couvert permettra de représenter d'une manière fidèle les variables du transfert radiatif d'intérêt telles que la fraction de trous ou la réflectance bidirectionnelle.
- **Continuité avec le milieu turbide.** Une architecture de type milieu turbide convient à un nombre significatif de couverts pour décrire le transfert radiatif d'une manière assez précise. J'ai donc inclus cette contrainte supplémentaire en adoptant une modélisation permettant d'évoluer d'une manière continue d'une architecture de type milieu turbide vers un couvert très agrégé. Il sera ainsi possible d'évaluer directement l'écart que peut induire l'hypothèse du milieu turbide par rapport à des cas agrégés.
- **Faible dimensionnalité.** L'objectif sous-jacent à ce travail est la possibilité d'inverser le modèle de transfert radiatif à partir de mesures de télédétection. Un faible nombre de variables d'entrée décrivant les caractéristiques architecturales principales du couvert est donc nécessaire.

Dans un premier temps, nous décrirons les différentes techniques utilisées pour décrire l'architecture des couverts. Ceci nous permettra de justifier notre choix de construire des maquettes informatiques 3D de couverts qui vérifient les contraintes que nous nous sommes imposées. Ainsi, une série de maquettes numériques 3D a été générée en essayant de représenter l'ensemble des situations rencontrées par un échantillonnage adapté. Ces maquettes seront ensuite utilisées pour étudier l'agrégation du point de vue du transfert radiatif en commençant par la fraction de trous.

3.2 Approches utilisées pour décrire l'architecture des couverts végétaux

La simulation numérique de l'architecture des couverts végétaux est une approche maintenant bien maîtrisée et relativement facile à utiliser grâce aux progrès importants réalisés au niveau des puissances de calcul. Le couvert est considéré comme un peuplement de plantes en interaction. Les structures topologiques (architecture botanique) et géométriques (taille, forme et position des organes) des plantes, sont décrites en prenant parfois en compte le développement des plantes et leurs interactions avec le milieu. Plusieurs études ont porté sur la modélisation de l'architecture du couvert (Prévot, Aries et al. 1991) (Ivanov N., Boissard P. et al. 1995; Godin C., Costes E. et al. 1999)

Parmi les techniques de modélisation architecturale développées à ce jour, trois grandes catégories se dégagent :

- 1) La méthode de digitalisation et de visualisation 3D de l'architecture des plantes a été utilisée par (Planchais I. and Sinoquet H. 1998) pour l'étude des relations entre l'architecture de la plante et l'interception du rayonnement. La digitalisation tridimensionnelle consiste à acquérir les coordonnées spatiales d'un ensemble de points sur la plante à l'aide d'un outil appelé digitaliseur. (Sinoquet H., Rivet P. et al. 1997). Afin de reconstituer la maquette de la plante d'une manière plus ou moins réaliste, un nombre limité de points représentant les spécificités de la plante (insertion des feuille, les nœuds, la courbure des feuilles...) est donc acquis parallèlement à des mesures de dimensions d'organes. La reconstitution de la structure de la plante consiste à décrire les différents organes digitalisés par une succession de triangles. La surface des organes est souvent estimée à partir de relations allométriques en fonction des dimensions des organes. L'architecture de plusieurs plantes telles que le cotonnier, le noyer ou le maïs a été caractérisée par cette méthode (Drouet J. L. and Moulia B. 1997; Thanisawanyaangkura, Sinoquet et al. 1997). La caractérisation de l'architecture des couverts végétaux à partir de mesures de terrain est lourde à mettre en œuvre car elle souffre de fortes contraintes humaines et techniques.
- 2) La modélisation architecturale de type statistique consiste à générer des maquettes 3D de couvert dont les variables de structure (longueur des entre-nœuds, inclinaison et azimuth des feuilles...) sont déterminées par tirage aléatoire dans des fonctions de distribution prédéfinies. Ces distributions de probabilité sont déduites à partir de mesures de terrain (Prévot, Aries et al. 1991). Cette méthode a été appliquée pour construire un couvert de maïs en vue de simuler sa réflectance (Espana 1997). Dans ce modèle, les caractéristiques des feuilles (nervure centrale,

dimension...) ont été décrites par des modèles paramétriques. Les surfaces des feuilles ont été ensuite représentées dans l'espace 3D par une série de triangles élémentaires. La nature statistique réductrice de la méthode utilisée dans ce type d'approche néglige généralement les possibles interactions entre plantes.

- 3) Les modèles architecturaux dynamiques, contrairement aux modèles statistiques, tiennent compte des corrélations entre organes et parfois entre plantes en considérant la succession d'apparition et de développement des différents organes pour chaque plante. Les processus écophysiologiques et botaniques intrinsèques à chaque type de plante sont ainsi pris en compte. Le logiciel AMAP développé par le CIRAD (De Reffye P, Blaise F. et al. 1997) et les modèles basés sur le L-système (Fournier and Andrieu 1998) (Prusinkiewicz P. 1997) s'insèrent dans cette catégorie de modèles. L'approche de type L-système représente la plante par une série d'unités élémentaires qui se développent parallèlement. Chaque unité est caractérisée par une loi d'évolution décrite sous forme de substitutions qui permettent de représenter des transformations qualitatives et quantitatives. Cette méthode a été utilisée pour modéliser le développement du maïs en fonction de la température et du rayonnement (Fournier and Andrieu 1998). Trois unités élémentaires ont été considérées dans ce cas (l'apex, la feuille et l'entre-nœud). Les lois d'évolutions étaient décrites par i) les conditions d'apparition de l'unité structurale, ii) les processus décrivant sa croissance, iii) les conditions de fin de croissance.

Compte tenu du contexte dans lequel ce travail s'inscrit, il nous a paru pertinent d'utiliser l'approche 'statistique'. En effet, il ne nous est pas possible de représenter de manière très réaliste par digitalisation la structure d'un grand nombre de couvert. De plus cette approche ne vérifierait pas notre contrainte de faible dimensionnalité ni de continuité par rapport au milieu turbide. De même ; l'approche dynamique, bien que présentant des atouts certains, ne vérifierait que difficilement ces mêmes contraintes.

Afin d'atteindre la généricité tout en préservant les performances pour le transfert radiatif, nous avons utilisé une connaissance minimale des processus et règles botaniques et physiologiques associées aux couverts végétaux. Nous allons donc décrire dans ce chapitre la manière de générer les maquettes 3D ainsi que l'échantillonnage de l'espace des possibles. Dans les chapitres suivants, nous exploiterons ces maquettes pour étudier plus en détail les effets de l'agrégation sur le transfert radiatif.

3.3 Le modèle générique de structure agrégée du couvert

3.3.1 Variables et mode de construction des maquettes

Nous avons choisi de ne considérer que les feuilles comme seul organe végétal. Ce choix est justifié par la proportion importante en surface qu'occupent celles-ci au sein du couvert et leur rôle d'une part dans la mise en place de l'architecture et d'autre part dans la réponse radiométrique du couvert. De même, nous ne considérerons qu'un type de propriétés optiques associé aux feuilles. Ceci sera abordé plus en détail quand nous traiterons du transfert radiatif.

3.3.1.1 Variables du modèle

La construction des maquettes numériques 3D considère trois échelles : la feuille, la plante et le couvert. Nous avons normalisé toutes les dimensions des caractéristiques du couvert par sa hauteur, H . En effet, le transfert radiatif ne sera pas sensible à un changement d'échelle du couvert tant que les dimensions des organes restent grandes vis-à-vis de la longueur d'onde.

La feuille. Toutes les feuilles sont supposées vertes et sont décrites, de manière schématique, par des triangles isocèles (Figure 1) de taille et de forme bien définies. La taille de la feuille ' S^* ' est exprimée par le diamètre d'un disque, équivalent à la surface de la feuille, normalisé par la hauteur du couvert :

$$S^* = \frac{2}{H} \sqrt{\frac{b \cdot h}{2\pi}}$$

où b est la base du triangle, h est sa hauteur et H est la hauteur du couvert. La définition de la taille relative de la feuille est ainsi cohérente avec celle utilisée par (Kuusk 1991) pour décrire le paramètre de hot-spot. La forme de la feuille est définie par le rapport de la base du triangle par sa hauteur ' b/h '.

La plante est décrite par un axe vertical virtuel équivalent à une tige. La plante est l'échelle à laquelle nous avons choisi de faire porter l'agrégation. Ceci correspond en effet au schéma le plus courant, bien que d'autres schémas existent :

- l'agrégation de feuilles sur un rameau (le cas 'bouquets' d'aiguilles de conifères par exemple). Dans ce cas, on pourra considérer l'agrégat comme étant une feuille équivalente.
- l'agrégation de plantes (semis par 'paquet', 'bosquet', 'touffes' de plantes). Ce cas pourra se rapprocher d'une 'super' plante faite de l'ensemble des feuilles des plantes individuelles.

L'agrégation dans la plante sera contrôlée par la distance relative feuille-tige χ . Cette variable représente le diamètre effectif de la couronne de la plante. Les feuilles sont distribuées de manière aléatoire uniforme selon la verticale et également dans le plan horizontal à l'intérieur de l'enveloppe de la plante. On observe ainsi des variations horizontales de densité d'indice foliaire à l'échelle du couvert. L'agrégation se fait donc par rapport à la tige, privilégiant ainsi la direction verticale.

Les feuilles sont orientées suivant une distribution d'inclinaison donnée caractérisée par un angle moyen d'inclinaison (ALA : Average Leaf Angle voir §3.3.2). L'azimut des feuilles est radial : la hauteur du triangle représentant la feuille est orientée de manière radiale à l'axe vertical auquel la feuille appartient (la base du triangle est située vers la tige et le sommet du triangle vers l'extérieur Figure 2). L'orientation azimutale à tendance radiale des feuilles est une caractéristique assez générale des couverts. Toutefois, avec ces hypothèses sur les distributions des orientations des feuilles, on ne décrira donc pas explicitement les couverts héliotropes.

Aucune intersection entre feuilles est autorisée et ceci sera géré d'une manière particulière décrite plus loin (voir §3.3.3).

Le couvert. Il est représenté par une série de plantes 'semées' à une densité donnée ' d '. La densité de plantes a aussi été normalisée par la hauteur du couvert en la multipliant par le carré de la hauteur du couvert : $d^* = d \cdot H^2$. Cette dernière variable est caractéristique de la distance inter plantes rapportée à la

hauteur du couvert ($1/\sqrt{d^*}$). Nous n'avons considéré ici qu'un schéma de 'semis' aléatoire uniforme, bien qu'il soit possible de prendre en compte d'autres schémas tels que le semis en rang pour mieux représenter les couverts cultivés.



Figure 1 : Description de la feuille par un triangle. La forme du triangle est définie par le rapport base/hauteur 'b/h'.

3.3.1.2 Processus de création des maquettes

La création de la maquette 3D se déroule comme suit :

- 1 Définition des caractéristiques du couvert : [S^* , b/h , LAI, ALA, χ , d^*]
- 2 Semis d'un nombre d'axes verticaux virtuels sur une surface, représentant le sol, suivant la densité de plantes d^* et le schéma de semis considéré (ici aléatoire).
- 3 Tirage aléatoire uniforme de la position des feuilles dans l'enveloppe de la maquette. La distribution des positions des feuilles suivant la verticale est uniforme. La position de la feuille est définie par le milieu de la base du triangle. Ainsi quand $\chi=0$, les feuilles sont directement 'attachées' à l'axe vertical virtuel. Le nombre de feuilles par unité de surface est défini par $LAI/(\pi S^{*2}/4)$
- 4 Agrégation des feuilles en attirant les feuilles horizontalement vers leurs axes. Pour ce faire, les feuilles sont d'abord associées à l'axe qui leur est le plus proche. Elles sont ensuite translatées horizontalement vers leur axe vertical associé d'un facteur ' $1-\chi$ ' où χ correspond à la distance relative tige-feuille (Figure 2). C'est ainsi que l'on change localement la densité horizontale des feuilles.
- 5 Orientation des feuilles suivant la distribution d'inclinaison des feuilles définie par l'angle moyen d'inclinaison des feuilles 'ALA' et un azimuth radial .
- 6 Création des triangles représentant les feuilles à partir de leurs positions en fonction de leurs caractéristiques associées (S^* , b/h , orientation);
- 7 Test d'intersection entre les feuilles. Si le test est positif une rotation aléatoire de l'azimut de la feuille autour de son axe est appliquée pour éviter l'intersection. Cette procédure permet de conserver la distribution d'inclinaison foliaire et la distribution des distances à l'axe vertical virtuel.

Cette conception du modèle d'agrégation permet de satisfaire les contraintes que nous nous étions imposées :

- représenter une grande variété de types de couvert
- utiliser un faible nombre de variables. Par rapport à la description utilisée dans le modèle pseudo-turbide SAIL qui en comporte 3 variables (LAI, ALA, S^*), il a donc fallu en ajouter 3 autres pour décrire l'agrégation : d^* , χ et b/h .
- passage continu entre le cas pseudo-turbide (représenté par $\chi=1$ et S^* petit) et un couvert agrégé en jouant sur la variable χ .

Dans la suite, nous allons décrire de manière plus précise les fonctions de distribution des inclinaisons foliaires que nous avons utilisées, ainsi que le test d'intersection entre feuilles.

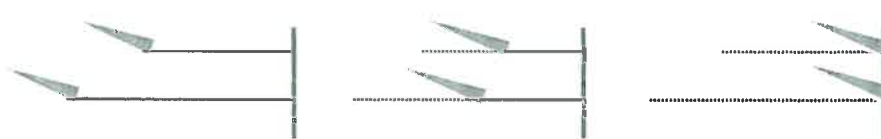


Figure 2 : La distribution spatiale des feuilles est contrôlée par la distance feuille-tige. $\chi=1$ (distribution aléatoire) ; $\chi=0$ (distribution très agrégée).

3.3.2 Distribution des inclinaisons des feuilles

Les mesures faites sur plusieurs types de couvert ont démontré qu'il existe une large variété de distribution d'orientation des feuilles. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs tels que :

- l'espèce. Par exemple, les feuilles de la pomme de terre ou du concombre tendent à être horizontale tandis que chez les céréales les feuilles sont orientées plus ou moins uniformément,
- la lumière disponible : les feuilles s'orientent généralement de telle sorte à capter le maximum de radiation nécessaire à leur photosynthèse. Au contraire, dans des conditions de stress, les feuilles tendent à minimiser leur surface efficace à l'interception de la lumière ;
- la déficience hydrique qui pousse les feuilles à s'orienter verticalement pour baisser leur surface de contact et réduire ainsi leur évapotranspiration.

L'orientation des feuilles est décrite par la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles $g(\theta_i, \varphi_i)$ où θ_i et φ_i sont respectivement l'angle d'inclinaison et l'angle azimutal de la feuille. La distribution azimutale des feuilles est généralement supposée uniforme. Cette approximation semble être valable pour différents types de couverts (maïs, tabac, sorgho, betterave ...). Néanmoins elle n'est pas vérifiée dans le cas du soja (Myneni R B, Ross J. et al. 1989) et pour des plantes héliotropes comme le tournesol (figure 2) (Steven, Daughtry et al. 1991).

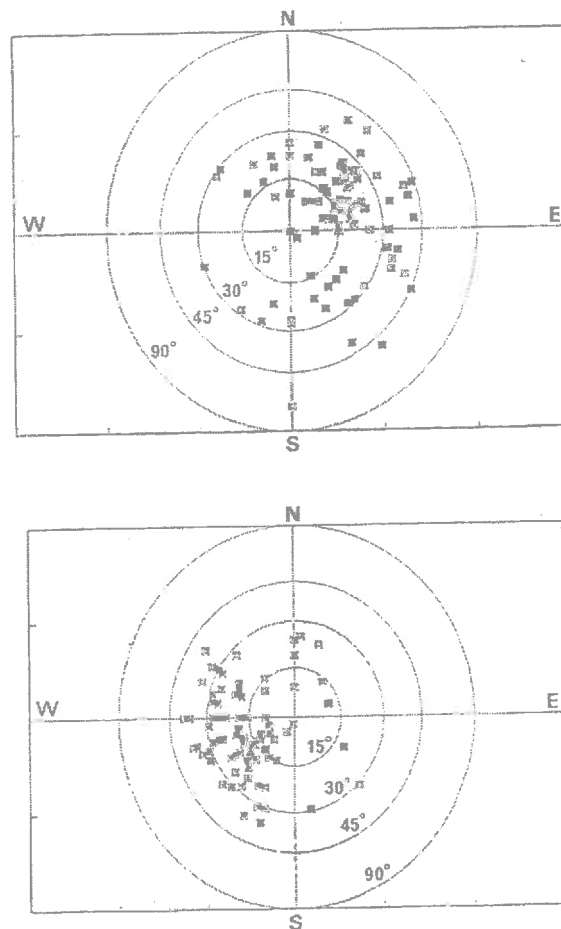


Figure 3 : Distribution des inclinaisons des feuilles mesurées pour le tournesol. a) 12 juillet 1992 12h00 heure locale. b) le même jour à 16h00 heure locale (Steven, Daughtry et al. 1991)

Distribution	Orientation prédominante	$g(\theta_l)$	Angle moyen d'inclinaison <i>ALA</i>
Planophile	Horizontale	$\frac{2(1 + \cos 2\theta_l)}{\pi}$	26.67
Erectophile	Verticale	$\frac{2(1 - \cos 2\theta_l)}{\pi}$	63.24
Plagiophile	Autour de 45°	$\frac{2(1 - \cos 4\theta_l)}{\pi}$	45.0
Extremophile	Horizontale et verticale	$\frac{2(1 + \cos 4\theta_l)}{\pi}$	45.00
Uniforme	Pas d'inclinaison prédominante	$\frac{2}{\pi}$	45.00
Sphérique	Surface des feuilles arrangées comme sur une sphère. L'orientation de la normale de la feuille est équiprobable dans toutes les directions.	$\sin \theta_l$	57.3

Tableau 1 : Distributions des inclinaisons des feuilles au sein du couvert définies par (De Wit C. T. 1965)

Six distributions d'inclinaison des feuilles, décrivant l'orientation globale au sein du couvert, ont été introduites par (De Wit C. T. 1965) cité dans (Goel 1988) (Tableau 1). Afin de décrire ces distributions d'une manière générale et continue trois fonctions paramétriques de distribution d'inclinaison des feuilles ont été proposées :

- (Goel and Strebel 1984) ont démontré que la distribution Beta à deux paramètres μ et ν , dépendant de la fonction Gamma Γ , décrit l'ensemble des six distributions citées précédemment en plus de celles de certains couverts réels :

$$g(\theta_i, \mu, \nu) = \frac{1}{\pi \cdot \pi/2} \frac{\Gamma(\mu + \nu)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\nu)} \left(1 - \frac{\theta_i}{\pi/2}\right)^{\mu-1} \left(\frac{\theta_i}{\pi/2}\right)^{\nu-1} \cdot \frac{1}{\sin \theta_i}$$

Les paramètres μ et ν sont reliés à l'angle d'inclinaison moyen ALA et à son moment du second ordre $\langle \theta_i^2 \rangle$ par :

$$ALA = 90 \times \nu / (\mu + \nu)$$

$$\langle \theta_i^2 \rangle = 90^2 \times \nu(\nu+1) / [(\mu+\nu)(\mu+\nu+1)]$$

Dans le cas de couvert ne vérifiant pas l'approximation d'une orientation azimutale uniforme, cette distribution est substituée par une autre considérant deux paramètres supplémentaires qui en tiennent compte (Strebel, Goel et al. 1985).

- (Campbell 1986; Campbell 1990) a généralisé la distribution sphérique en introduisant la distribution d'inclinaison ellipsoïdale. Celle-ci suppose que la distribution angulaire des surfaces de feuilles est similaire à la distribution d'éléments d'aire à la surface d'un sphéroïde. L'expression analytique de la distribution des angles foliaire est définie alors :

$$g(\theta_i) = \frac{2\delta^3 \sin \theta_i}{\Lambda (\cos^2 \theta_i + \delta^2 \sin^2 \theta_i)}$$

où δ est le rapport de l'axe horizontal sur l'axe vertical de l'ellipsoïde et Λ la surface normalisée de l'ellipse ajustée par la forme empirique : $\Lambda = \delta + 1.774(\delta + 1.182)^{-0.733}$. Dans le cas où $\delta=1$ cette distribution tend vers la distribution sphérique. Quelques expressions empiriques reliant δ à l'angle moyen d'inclinaison ALA ont été proposées par et. (Campbell 1986; Wang and Jarvis 1988; Campbell 1990)

- La fonction de distribution elliptique se veut d'être une généralisation de la distribution ellipsoïdale en introduisant l'angle modal d'inclinaison des axes principaux de l'ellipse θ_m (Kuusk 1995). Celle-ci est exprimée comme suit :

$$g(\theta_l) = \frac{B_g}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2(\theta_l - \theta_m)}}$$

où B_g est un facteur de normalisation et ε l'excentricité de l'ellipsoïde telle que $\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$ avec a son demi petit axe et b son demi grand axe. Selon le cas on a alors $\varepsilon = \sqrt{1 - \delta^2}$ ou $\varepsilon = \sqrt{1 - 1/\delta^2}$.

La comparaison entre les distributions ellipsoïdales et elliptiques montre néanmoins que celles-ci ne sont pas tout à fait comparables (Bacour 2001). En effet, il s'avère qu'il n'y a pas de correspondance entre les paramètres (θ_m, ε) et ALA de sorte que $g(\theta_l, \theta_m, \varepsilon) = g(\theta_l, ALA)$.

Nous avons choisi une fonction de distribution selon sa capacité à représenter la gamme d'inclinaison des feuilles observées et le nombre de paramètres nécessaires. Ainsi nous avons sélectionné la fonction ellipsoïdale puisqu'elle ne nécessite que l'angle moyen d'inclinaison foliaire. Le rapport de l'axe horizontal à l'axe vertical de l'ellipsoïde a été déterminé à partir d'une formulation empirique en fonction de l'angle moyen d'inclinaison 'ALA' proposée par Baret :

$$\delta = \exp(-1.6184e^{-5} \times ALA^3 + 2.1145e^{-3} \times ALA^2 - 1.2390e^{-1} \times ALA + 3.2491)$$

Celle-ci a été comparée à deux relations empiriques proposées respectivement par Campbell 1990 et : (Wang and Jarvis 1988)

$$\delta = \left(\frac{ALA}{9.65}\right)^{-1.65} - 3 \quad (\text{Campbell})$$

$$\begin{cases} ALA = \frac{1}{0.0066\delta + 0.0107} & (\delta \leq 1) \\ ALA = \frac{1}{0.0103\delta + 0.0053} & (\delta > 1) \end{cases} \quad (\text{Wang et Jarvis})$$

La comparaison a été effectuée sur l'estimation de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles par les deux formules à partir de la définition suivante [weiss2003] :

$$ALA = \int_0^{\pi/2} \theta_l \cdot g(\theta_l) \cdot d\theta_l$$

Les résultats obtenus par les trois formalismes semi-empiriques sont quasi-similaires. Les erreurs quadratiques moyennes obtenues par les trois méthodes sont assez proches. Une légère déviation est observée pour les inclinaisons extrémophiles dans le cas des trois formalismes. Néanmoins, une sous-estimation de l'angle moyen est observée pour Wang et Jarvis pour des angles intermédiaires autour de 55°.

Les angles d'inclinaison des feuilles θ_i compris entre 0 et $\pi/2$, ont été tirés aléatoirement dans la loi de distribution ellipsoïdale $g(\theta_i)$ en utilisant la méthode d'acceptation rejet [Lubes-Niel H.]. Celle-ci consiste d'abord à tirer indépendamment, suivant une loi uniforme, une série de doublets de variables aléatoires $[U_n, V_n]$. Ensuite pour chaque doublet, on compare la valeur de U_n à $\frac{g(V_n \times \pi/2)}{\text{Max}(g(V_n \times \pi/2))}$. Si U_n est inférieure à $\frac{g(V_n \times \pi/2)}{\text{Max}(g(V_n \times \pi/2))}$, la valeur d'inclinaison $\theta_{in} = V_n \times \pi/2$ est retenue sinon celle-ci est rejetée. Enfin, l'ensemble des angles inclinaison θ_{in} conservés représentent l'aire au dessous de la courbe de la fonction ellipsoïdale normalisée par son maximum et suit ainsi la fonction de distribution $g(\theta_i)$.

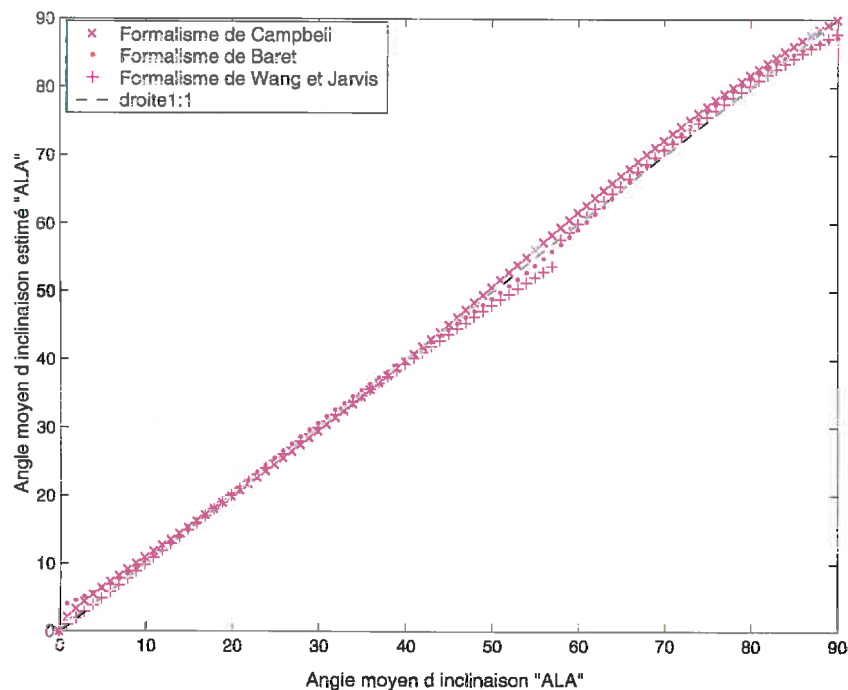


Figure 4 : Comparaison des angles d'inclinaisons moyen estimés à partir de deux expressions semi-empiriques différentes du rapport de l'axe horizontal sur l'axe vertical de l'ellipsoïde ' δ ' dans le cas d'une distribution ellipsoïdale

3.3.3 Test d'intersection entre les feuilles

Afin de rester dans une situation proche de la réalité, on impose que les feuilles n'aient pas d'intersections les unes avec les autres. Les triangles qui présentent des intersections sont donc 'tournés', horizontalement autour des axes auxquels ils sont associés, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'intersections entre les différents triangles qui composent la scène. Cette procédure se définit en deux étapes :

- Un premier test a pour objet d'identifier très rapidement les triangles qui ne peuvent pas avoir d'intersections. Le test est basé sur la comparaison des coordonnées de deux triangles. Pour ce faire, chaque triangle est associé à un parallélépipède qui le contient ("Boîte englobante"). Si les boîtes englobantes ne possèdent aucune intersection, alors les deux triangles n'ont pas de point

commun. Sinon, un deuxième test est effectué pour vérifier si les triangles ont effectivement une intersection. La figure 3 montre un exemple où, bien que les boîtes englobantes se coupent, les triangles n'ont aucun point d'intersection.

- Le deuxième test, consiste à vérifier si l'un des segments du triangle T1 a un point d'intersection avec le triangle T2. Il faut d'abord exprimer les coordonnées de T2 dans le repère 3D (u,v,w) défini par T1. Une fois ces coordonnées trouvées, il faut chercher si un segment de T2 coupe le plan de T1 (intersection plan/droite). Si on ne trouve pas de point d'intersection, c'est que les triangles ne se touchent pas. Sinon, on détermine si le point d'intersection se trouve à l'intérieur du triangle ou sur l'une de ses arêtes. Et, on conclue qu'à condition qu'il y'ait une seule intersection segment(T1)/segment(T2) les triangles se coupent.

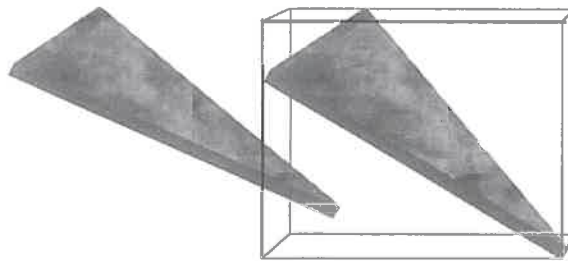


Figure 5 : Test d'intersection : Intersection des boîtes englobantes sans l'intersection des feuilles.

3.3.4 Mise en œuvre des maquettes

Le programme de conception des maquettes, a été écrit en langage matlab. La durée de simulation varie entre 2 minutes et 5 jours. Celle-ci dépend du nombre de feuilles dans la scène et du test d'intersection qui nécessite plus de temps de calcul pour les cas agrégés. La maquette correspond à un parallélépipède dont la base est décrite par un carré. Dans la conception des maquettes, nous avons essayé d'éliminer les effets de bord qui sont provoqués lors de la translation des feuilles vers leurs axes. En effet, cette opération se traduit par une apparition des espaces vides aux limites de la scène. Lorsqu'on duplique la maquette pour simuler un couvert infini (§ paragraphe 4.1), ces effets de bords affectent la structure faisant apparaître des discontinuités entre les maquettes Figure 6. Pour contourner ce problème une maquette plus grande a été d'abord construite, ensuite seule la partie centre a été récupérée. Celle-ci correspond à la maquette finale sur laquelle notre étude a été faite. Pour avoir assez de répétition de plantes, le nombre d'axes au sein de la maquette est fixé à 45 axes. Ces derniers ont été semés aléatoirement dans une scène de hauteur égale à 1. Par conséquent, la surface de la scène varie selon la densité des plantes considérée. La largeur et la profondeur de la maquette sont égales à

$$\sqrt{\frac{\text{nombre de plantes}}{\text{densité de plantes}}} \text{ et elles varient entre 0.21 et 6.78 m.}$$

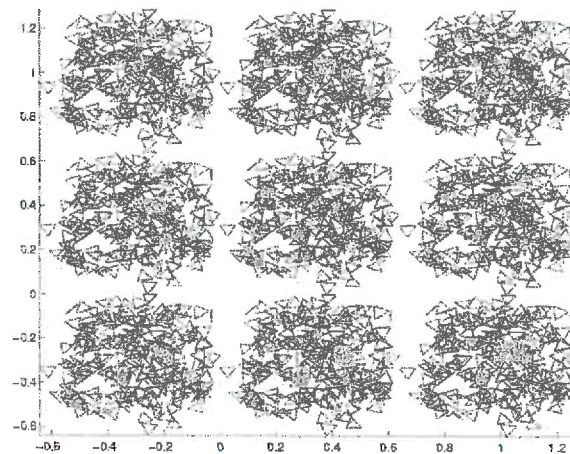


Figure 6 : illustration des effets de bord que peut induire la duplication des maquettes

3.4 Échantillonnage de l'espace des variables

Dans notre approche, nous allons simuler un certain nombre de couverts végétaux qui devront représenter l'ensemble des situations possibles. Il nous faudra donc déterminer les distributions et co-distributions réalistes des variables d'entrée du couvert. Pour ce faire, nous avons considéré trois groupes de variables parmi les variables d'entrée :

- Les variables principales du couvert (S^* , d^* , LAI). Ces caractéristiques conditionnent la sensibilité à l'agrégation évaluée par la variable χ .
- Les variables complémentaires (b/h , ALA) qui comme nous le verrons plus loin jouent un rôle secondaire (b/h) ou dont l'effet peut être facilement découplé de celui des autres variables (ALA).
- La variable d'agrégation, χ dont l'effet sera systématiquement évalué pour l'ensemble des autres combinaisons de variables.

Nous avons donc principalement échantillonné les variables principales (S^* , d^* , LAI) en définissant les distributions de ces variables à partir de couverts typiques. Les ordres de grandeur de ces caractéristiques ont été considérés aux stades correspondant au début du cycle et au maximum du développement foliaire (Tableau 4). Les couverts suivants ont été considérés : maïs, blé, betterave, luzerne et pin maritime. Les ordres de grandeurs des variables principales sont représentés dans le tableau 4.

La Figure 7 montre les distributions de ces deux variables. On note une organisation relativement linéaire des principales cultures typiques. Cette organisation correspond à une faible gamme de variation du nombre de feuilles par plante, compris entre 1 et 100. À l'opposé, les conifères se caractérisent par un nombre de feuilles (aiguilles) par plante très important, de l'ordre du million. Le nombre de feuilles par plante, N , est sans doute une caractéristique essentielle de l'architecture des couverts et se calcule simplement selon : $N = \frac{4 \cdot LAI}{\pi \cdot d^* \cdot S^{*2}}$. C'est une variable 'botanique' qui, comme on le verra, détermine la sensibilité du transfert radiatif à l'agrégation.

Un échantillonnage des variables du couvert a été défini à partir de ces observations (Tableau 3). Les critères utilisés pour définir cet échantillonnage étaient les suivants :

- Représenter au mieux l'ensemble des cas possibles, avec une densité de point rendant possible l'interpolation entre les cas simulés.
- Limiter le nombre de cas considérés, afin d'aboutir à un volume de calcul compatible avec les ressources informatiques disponibles.

Nous avons considéré quatre niveaux de densité relative des plantes d^* et huit tailles de feuille S^* . L'échantillonnage n'est pas orthogonal, de manière à respecter les co-distributions observées entre S^* et d^* . A chaque combinaison $[d^*, S^*]$, différentes valeurs de LAI ont été considérées, comprises entre 0.5 et 5. L'échantillonnage des variables $[d^*, S^*, LAI]$ n'est pas systématique, prenant en compte les co-distributions observées des valeurs. Pour chaque combinaison $[d^*, S^*, LAI]$ étudiée, cinq distances relatives tige-feuille χ ont été considérées de manière systématique. Pour les variables complémentaires forme des feuilles (b/h), et angle moyen d'inclinaison ALA, seuls quelques cas ont été échantillonnés afin de limiter le temps de calcul. Ces cas correspondent à une valeur moyenne de densité relative de plantes : $d^*=100$. Le Tableau 3 et la figure 7 montrent l'échantillonnage réalisé.

Quelques exemples de ces maquettes numériques 3D sont présentées dans la Figure 8 pour les caractéristiques du couvert suivantes : $d^*=100$, $S^*=0.025$, $LAI=5$, $b/h=0.25$ et $\chi=[0.5 \ 1]$. Les vues au nadir de ces maquettes montrent, lorsqu'on réduit la distance feuille-tige, une évolution progressive du couvert d'un milieu aléatoire vers un milieu très agrégé Figure 9. Celle-ci, s'accompagne d'une augmentation de la proportion du sol vu.

Types de couverts	Notation	Unité	Blé		Maïs		Pin		Luzerne		Betterave	
Stade de développement			Déb	Max	Déb	Max	Déb	Max	Déb	Max	Déb	Max
Hauteur du couvert	H	m	0.1	1	0.3	2	1.5	15	0.1	0.5	0.05	0.6
Densité des plantes	d	plt/m ²	300	1000	10	10	0.25	0.035	500	500	13	13
Diamètre équivalent de la feuille	S	m	0.02	0.07	0.1	0.3	0.004	0.004	0.01	0.01	0.05	0.20
Indice de surface foliaire	LAI	m ² /m ²	1	6	1	6	1	4	1	4.5	1	6
Densité relative des plantes	$d^*=d.H^2$	plt	3	1000	0.9	40	0.56	7.87	5	125	0.03	3.25
Taille relative des feuilles	$S^*=S/H$	m/m	0.2	0.07	0.33	0.15	0.007	0.0007	0.1	0.02	1	0.33

Tableau 2 : Caractéristiques de couverts réels typiques en début de cycle et au stade de maximum de développement foliaire.

Densité relative des plantes 'd'	Taille relative de la feuille 'S'	Indice de surface foliaire 'LAI'	Angle d'inclinaison moyen 'ALA'	Forme de la feuille 'b/h'	Distance relative feuille-tige 'z'
1	0.007	0.5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.007	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.1	0.5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.1	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.25	0.5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.25	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.4	0.5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.4	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.4	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	0.4	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1	1	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.0025	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.0025	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.1	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.1	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.1	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.25	1	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.25	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.25	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.4	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
10	0.4	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.025	0.5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.025	1	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.025	3	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.025	5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.05	0.5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.05	1	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.05	3	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.05	5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.1	0.5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.1	1	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.1	3	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
100	0.1	5	[30° 58° 70°]	[0.25 1]	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1000	0.025	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1000	0.025	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1000	0.05	3	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]
1000	0.05	5	58°	0.25	[0 0.25 0.5 0.75 1]

Tableau 3 : Caractéristiques du couvert considérées pour générer les maquettes 3D. le domaine de variation choisi tient compte des ordres de grandeurs considérés dans le tableau précédent .

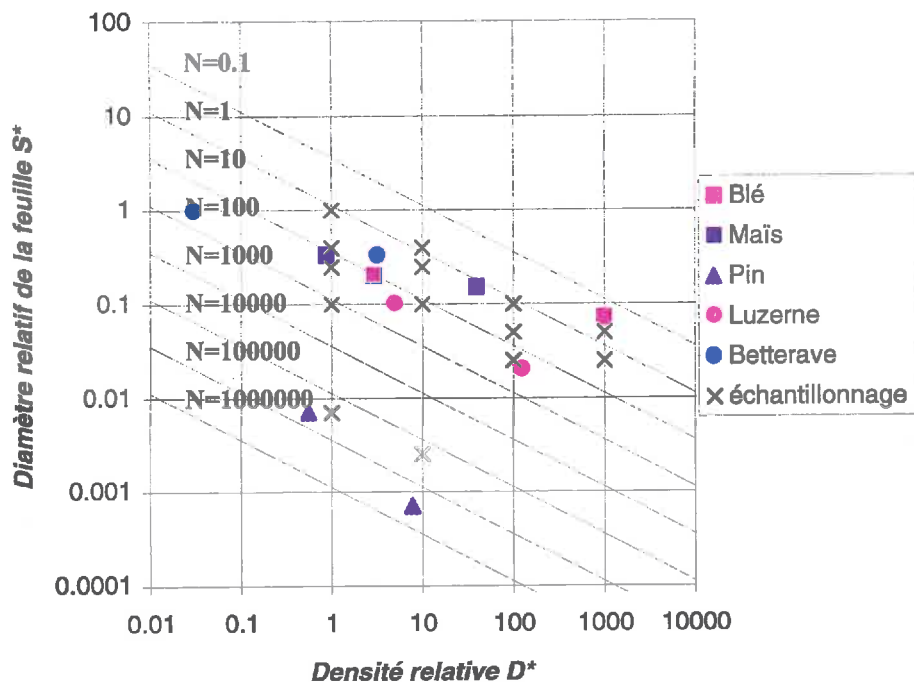


Figure 7: Distribution des variables densité relative (d^*) et diamètre relatif de la feuille (S^*). Les axes sont représentés en valeur logarithmique. Les valeurs typiques observées sur les cultures considérées (Tableau 2) sont indiquées par les symboles pleins. L'échantillonnage réalisé est indiqué par les croix (x). Les droites continues correspondent aux lignes de même nombre de feuilles par plante (N) calculées pour $LAI=1$. Les lignes sont figurées pour $N=0.1$ à $N=1000000$.

3.5 Conclusion

La description du modèle d'agrégation des feuilles dans le couvert qui a été développé au cours de ce travail a été présentée. L'agrégation des feuilles a été considérée d'une manière explicite en tenant compte du caractère générique du modèle, de la continuité avec le milieu turbide et du faible nombre des variables d'entrée. Ainsi, six variables d'entrée sont nécessaires : l'indice de surface foliaire 'LAI', l'angle moyen d'inclinaison des feuilles 'ALA', la taille relative de la feuille ' S^* ', la densité relative des plantes ' d^* ', la distance relative feuille tige ' χ ' et la forme de la feuille ' b/h '. La variation de l'agrégation des feuilles a été modulée par la variable χ permettant ainsi de transiter graduellement du milieu 'théorique' turbide vers un milieu très agrégé. Ce modèle a permis de construire ainsi une base de maquettes numériques 3D simulant un ensemble d'architectures foliaires échantillonnées en prenant en compte la variabilité de quelques couverts réels.

Ces architectures seront notre base d'étude pour évaluer l'effet de l'agrégation des feuilles sur le transfert radiatif dans le couvert. La sensibilité de la fraction de trou aux variables d'entrée du modèle d'agrégation des feuilles et à l'angle zénithal de visée sera d'abord examinée puisque c'est par son intermédiaire que la structure est généralement prise en compte dans la modélisation du transfert radiatif. Une paramétrisation de l'agrégation des feuilles en fonction des caractéristiques architecturales sensibles sera ainsi proposée.

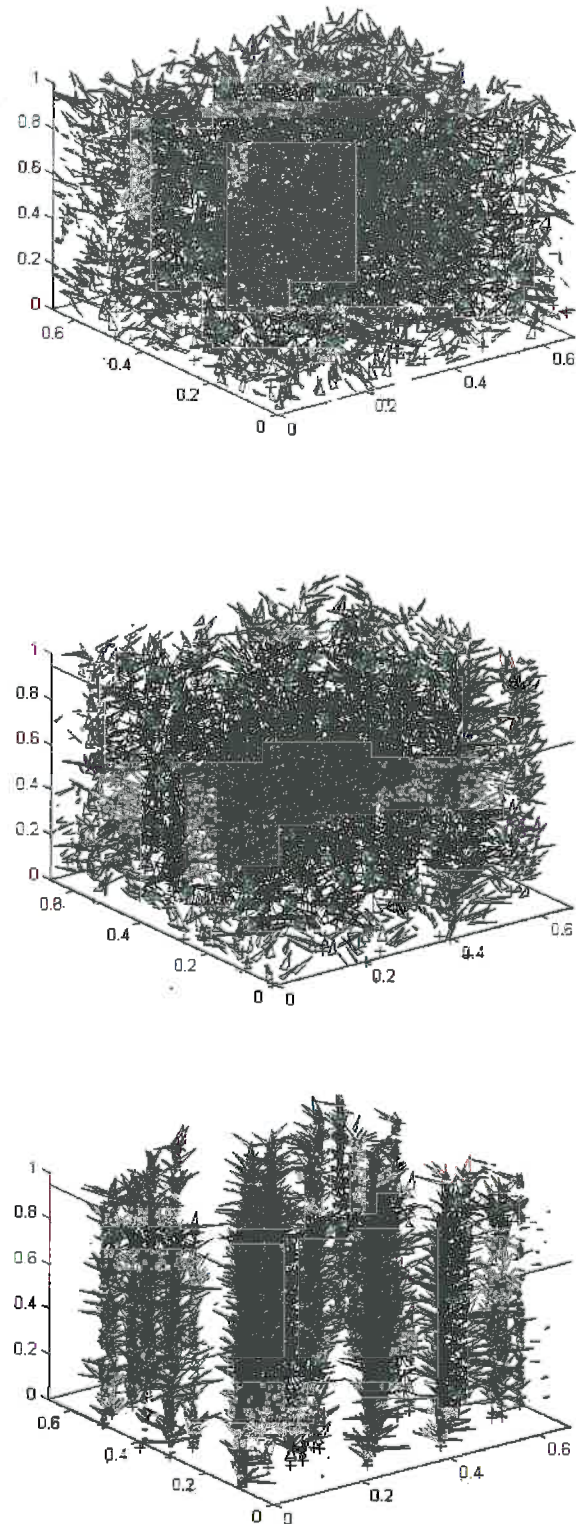


Figure 8 : Exemples de maquettes numériques 3D [LAI=5, $S^*=0.025$, $d^*=100$, $b/h=0.25$] décrivant trois niveaux d'agrégation : milieu aléatoire ($\chi=1$), milieu moyennement agrégé ($\chi=0.5$), milieu fortement agrégé ($\chi=0$).

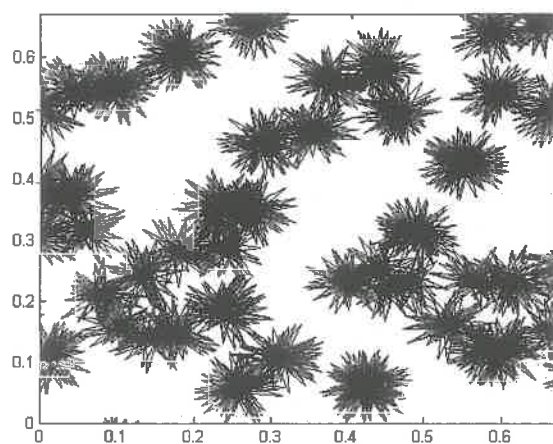
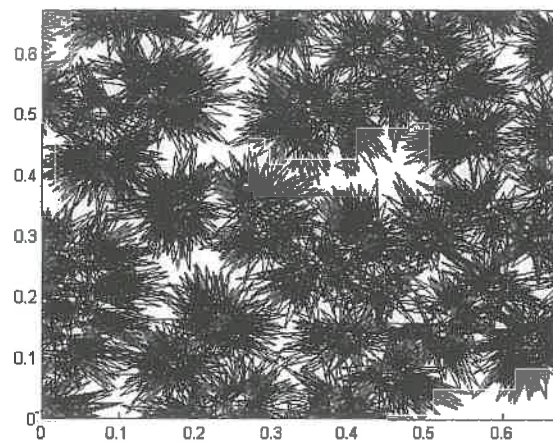
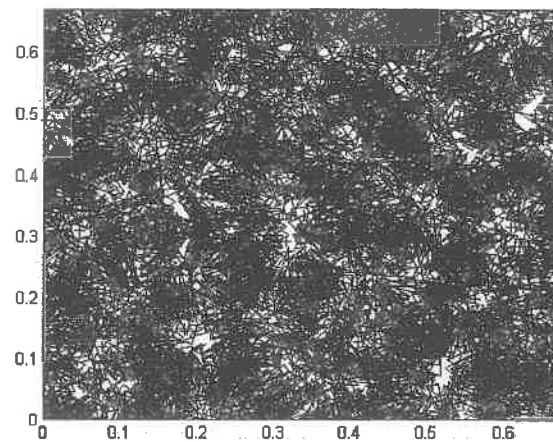


Figure 9 : Vue au nadir des maquettes 3D . Les caractéristiques du couvert considérés sont : $LAI=5$, $S^*=0.025$, $d^*=100$, $b/h=0.25$ et $\chi=[0 \ 0.5 \ 1]$.

CHAPITRE IV

4 Modèle de fraction de trous adapté à CLAMP

Comme nous l'avons vu en introduction, la fraction de trous est une variable essentielle du transfert radiatif. La partie bibliographique nous a montré différentes approches permettant de modéliser la fraction de trous, certaines permettant de prendre en compte l'effet de l'agrégation des feuilles. Nous proposons à présent d'étudier l'effet de l'agrégation sur la fraction de trous en tentant de décrire explicitement l'effet des caractéristiques du couvert considéré. Cette analyse est basée sur les maquettes 3D générées précédemment et représentatives d'un ensemble de situations. Nous allons dans un premier temps décrire comment nous avons calculé la fraction de trous des maquettes 3D considérées. Nous allons ensuite analyser la sensibilité de la fraction de trous aux différentes caractéristiques du couvert, en faisant ressortir l'effet de l'agrégation. Nous évaluerons ensuite les différents modèles théoriques de fraction de trous décrits en introduction. Enfin, nous proposerons un modèle paramétrique décrivant la variation d'un paramètre d'agrégation en fonction des caractéristiques de structure du couvert considéré.

4.1 Calcul de la fraction de trou sur les maquettes 3D.

La fraction de trous a été calculée à partir de la méthode du Z-buffer développée par Edwin Catmull en 1975 et largement utilisée en infographie. Celle-ci consiste à éliminer les parties cachées en visualisant la scène et en supprimant tout élément ou partie d'élément masqué par un autre élément. Elle est basée sur une discrétisation de l'image projetée en pixels. Cette technique traite séquentiellement les éléments de la scène pour calculer la profondeur associée à l'ensemble des pixels de chaque élément. Lors du traitement de chaque élément, chaque pixel calculé voit sa profondeur comparée à celle calculée auparavant pour n'afficher finalement que l'élément le moins profond présent dans ce pixel. La Figure 1 montre un exemple où si on ne considère que les coordonnées en (x,y) de deux triangles il serait possible d'envisager deux scénarios différents où les deux triangles se chevauchent (a). La prise en compte de la troisième dimension 'z' à travers la technique du Z-buffer (b) permet de montrer que les triangles se coupent (c). L'algorithme de cette technique est donné par le Tableau 1

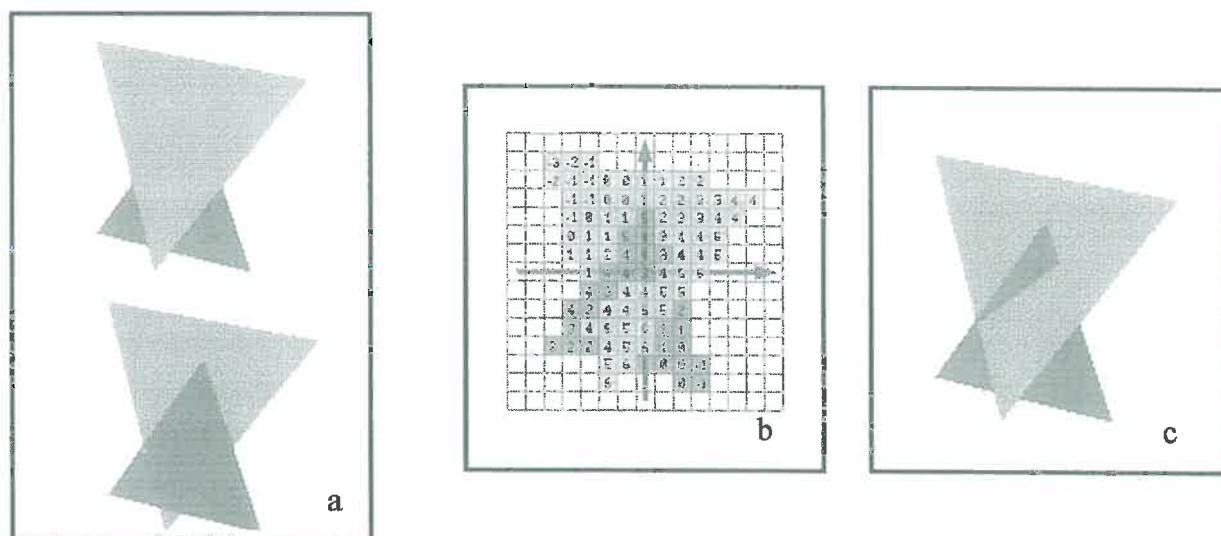


Figure 1 : Visualisation de deux triangles par la technique du Z-buffer. Sans la prise en compte de la dimension z, il est possible d'envisager des scénarios comme ceux présentés (a)

```

Initialiser le tableau profondeur 'PROF' à  $-\infty$ 
Initialiser le tableau couleur 'COUL' à la couleur de fond
-Pour chaque triangle T à afficher
  -Pour chaque pixel  $p=(x, y)$  de T
    Calculer la profondeur z de  $p(x, y)$ 
    -Si  $z > PROF(x, y)$  alors
       $PROF(x, y) = z$ 
       $COUL(x, y) = COUL(T, x, y)$ 
    Fin de si
  Fin de pour
Fin de pour
  
```

Tableau 1 : Algorithme de la technique du Z-buffer

Le calcul de la fraction de trou des maquettes 3D a été effectué en considérant une fenêtre de projection de taille égale à celle de la maquette et dont la résolution est de 1563x1563 pixels. Le sol est décrit par deux triangles.

La fraction de trous dépend de la direction considérée. Etant donné le caractère aléatoire de la distribution des tiges et des feuilles, on suppose que la maquette est isotrope en azimuth. Ainsi, l'angle azimuthal a été fixé arbitrairement à 0° . Par contre, l'angle zénithal a été échantillonné entre -80° et $+80^\circ$ avec un pas de 5° . De plus, étant donné que le champ de visée augmente en fonction de l'angle zénithal, la maquette a été

dupliquée plusieurs fois pour simuler un couvert infini et pour éviter ainsi que la fenêtre de projection vise les bords de la maquette.

4.2 Précisions des calculs de la fraction de trous

Les maquettes 3D ayant été générées par un processus de Monte Carlo, il est important d'évaluer les incertitudes associées au calcul de la fraction de trou. Les incertitudes ont été calculées pour tous les angles zénithaux et sur un sous échantillon des maquettes générées précédemment. Elles ont été choisies de sorte à représenter une grande variabilité de structures foliaires en utilisant la gamme de variation maximale du LAI : indices de surfaces foliaires $LAI=[0.5 \ 1 \ 3 \ 5]$, densité relative de plantes fixée à $d^*=100$, taille relative de feuille $S^*=0.025$, une forme de feuille $b/h=0.25$, et distance relative feuille-tige $\chi= [1 \ 0.25]$. Pour $\chi=0.25$, seules les incertitudes des maquettes ayant un $LAI=[0.5 \ 5]$ ont été calculées afin de réduire encore les temps de calcul associés

Dix répétitions nous ont permis de calculer l'écart type associé à la valeur de la fraction de trous, σ . La Figure 2 montre que l'écart type de la fraction de trous, calculée par Z-buffer, est généralement inférieure à 0.025. Il augmente lorsque le LAI diminue. Cette augmentation d'incertitude est due au nombre de feuilles dans la maquette qui diminue pour des faibles LAI et autorise une plus grande variabilité de génération de scènes. De la même manière l'aggrégation des feuilles provoque une augmentation de l'incertitude, liée principalement à la position des plantes dans la scène.

Globalement, l'incertitude est maximale pour des valeurs de fraction de trous intermédiaires. En effet, le calcul de la fraction de trou est basé sur l'emploi d'une variable de Bernoulli, x , qui prend la valeur 1 (trou) avec une probabilité p et 0 (pas de trou) avec une probabilité q . Celle-ci est caractérisée par une moyenne p et une variance $p(1-p)$ dont le maximum est atteint pour des valeurs intermédiaires autour de 0.5.

En dehors de la valeur de la fraction de trous elle-même, le facteur le plus influant sur la valeur de l'incertitude est donc le nombre de feuilles par maquette. Un exemple montrant l'évolution de l'écart type en fonction du nombre de feuilles total considérées a été réalisé. Pour ce faire, nous avons considéré une maquette particulière : $S^*=0.1$, $d^*=100$, $LAI=0.5$, $\chi=1$, $ALA=58^\circ$, $b/h=0.25$. Le nombre de répétitions de la maquette a été augmenté progressivement. Trois ordres de grandeurs de fraction de trous ont été considérés (0.28 0.48 et 0.78) décrivant une large gamme de variation, en utilisant la variation directionnelle de la fraction de trous. La Figure 3 montre une décroissance très significative de l'écart type en fonction du nombre de feuilles total des répétitions.

De manière à obtenir des maquettes homogènes du point de vue de leur variabilité et assurer une précision suffisante au calcul de la fraction de trous, nous considérerons, pour une densité relative de plantes donnée, un nombre de feuilles total équivalent à celui des maquettes ayant de petites feuilles : $S^*=0.025$ pour $d^*=[100 \ 1000]$ et $S^*=0.1$ pour $d^*=[1 \ 10]$. Les maquettes, ayant des tailles de feuilles plus grandes,

ont ainsi été répétées jusqu'à atteindre un nombre de feuilles total égal à celui de la maquette équivalente avec une petite taille de feuille. La fraction de trous ensuite a été moyennée sur l'ensemble des répétitions.

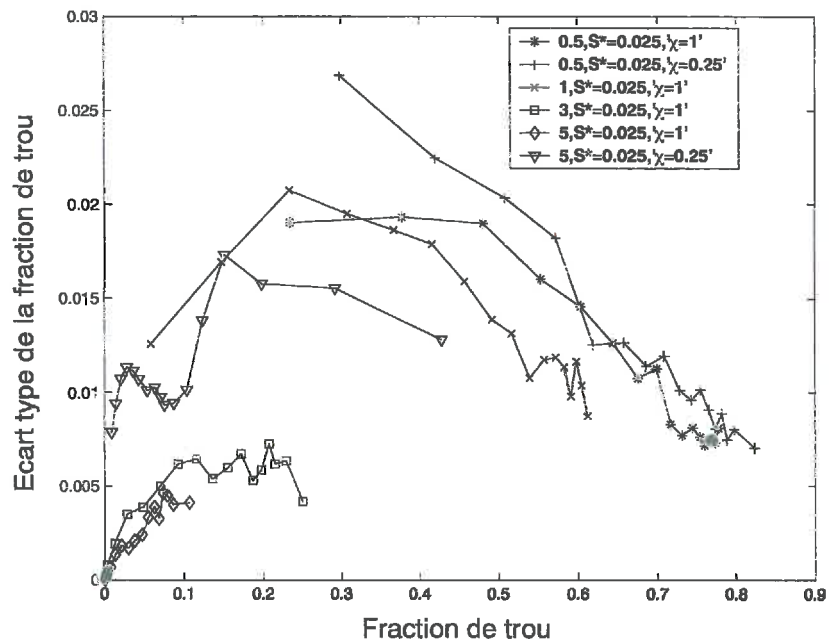


Figure 2 : Evolution de l'écart type de la fraction de trou en fonction de la valeur moyenne de la fraction de trous. Le calcul de la moyenne et de l'écart type s'est réalisé sur 10 répétitions de maquettes avec les caractéristiques du couvert suivantes : $LAI = [0.5 \ 1 \ 3 \ 5]$; $d^*=100$, $S^*=0.025$ et $\chi=[0.25, 1]$. Pour chaque maquette, les différentes directions zénithales sont représentées liées par une ligne.

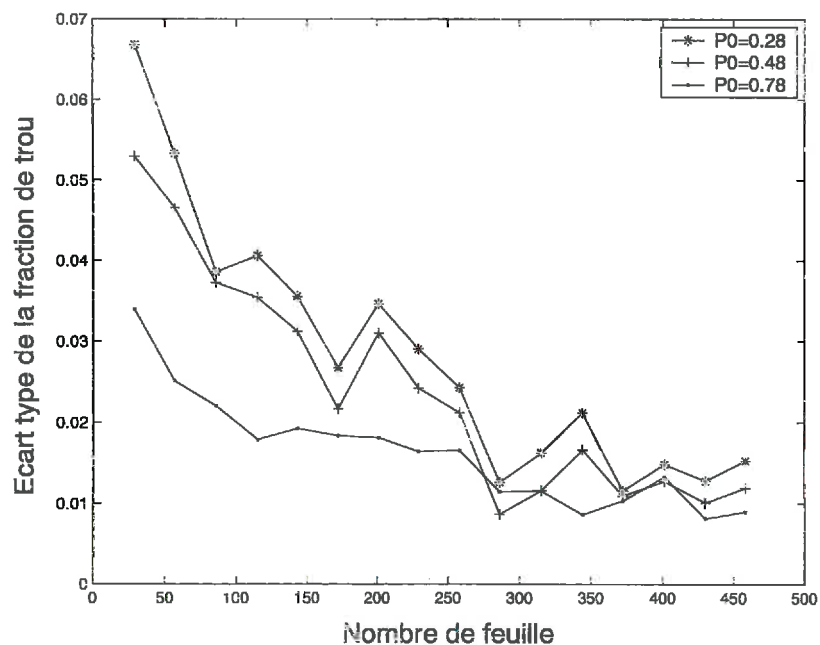


Figure 3 Evolution de l'écart type de la fraction de trou en fonction du nombre de feuilles sommé sur toutes les répétitions de maquettes pour trois valeurs de fractions de trous. Les caractéristiques de la maquette considérée sont : $S^*=0.1$, $d^*=100$, $LAI=0.5$, $\chi=1$, $ALA=58^\circ$, $b/h=1$.

4.3 Sensibilité de la fraction de trous aux caractéristiques des maquettes 3D

Le but de cette partie est d'évaluer la sensibilité de la fraction de trous aux caractéristiques du couvert pour l'ensemble des maquettes 3D construites. Une attention particulière sera bien sûr portée à la variable χ gérant l'agrégation des feuilles. La Figure 4 illustre la variation de la fraction de trous, en fonction de l'angle zénithal θ pour différents indices foliaires LAI et tailles relatives de la feuille S^* et la distance relative feuille-tige χ et une densité relative de plantes $d^*=100$.

Pour les structures aléatoires, le maximum de fraction de trou est observé pour des directions proches du nadir. En effet, c'est dans ces directions qu'on voit le maximum de sol. Lorsqu'on s'en écarte, les feuilles ont tendance à couvrir le sol réduisant ainsi sa fraction vue. Le trajet optique augmente alors en fonction de l'angle zénithal, faisant ainsi augmenter la probabilité de contact avec les feuilles et décroître la fraction de trous vue. De la même manière, une augmentation de l'indice foliaire LAI s'accompagne d'une augmentation du nombre de feuilles et donc d'une baisse de la fraction de trous vue pour tous les angles zénithaux.

Lorsqu'on réduit la distance feuille-tige χ , la fraction de trous augmente pour toutes les directions de visées. La sensibilité de la fraction de trous à la distance relative feuille-tige, est d'autant plus élevée que l'indice foliaire LAI est fort. En effet, pour des couverts de faible LAI , le nombre de feuilles par tige est faible et la proportion de sol vue est assez grande et proche du maximum. L'évolution d'un tel couvert d'un milieu aléatoire $\chi=1$ vers un milieu agrégé $\chi=0$, présentera peu de recouvrement entre les feuilles et se traduit par une faible augmentation de la fraction de trous. A l'inverse, pour des maquettes de fort LAI , le nombre de feuilles par tige est plus élevée et le passage d'un milieu aléatoire, avec peu de sol découvert, vers un milieu agrégé s'accompagne d'un recouvrement de feuilles beaucoup plus important et donc d'une portion de sol vue beaucoup plus élevée. De plus cette sensibilité à la distance relative tige feuille a tendance à augmenter, à même LAI , lorsque la densité relative des plantes diminue.

La sensibilité à la distance relative feuille-tige varie aussi en fonction de la direction de visée : elle augmente lorsqu'on s'approche d'une visée au nadir. En effet dans cette direction lorsqu'on attire les feuilles vers la tige, le sol se découvre et le contraste entre l'état aléatoire ($\chi=1$) et l'état agrégé ($\chi=0$) est alors beaucoup plus important.

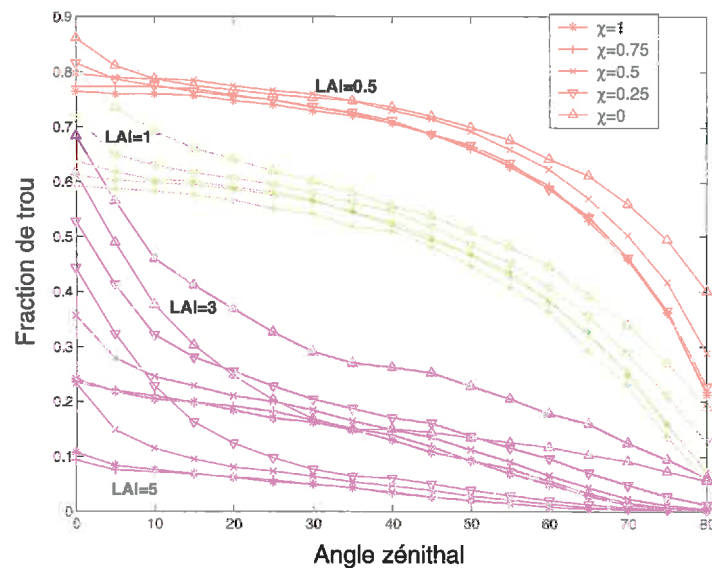
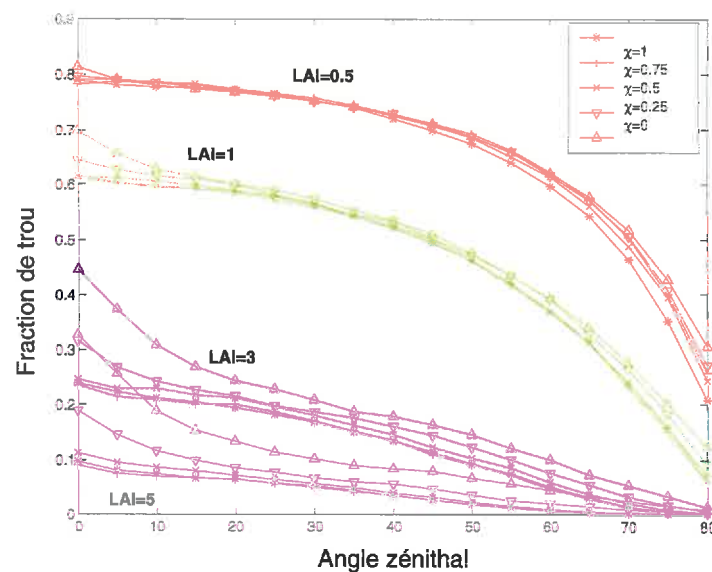
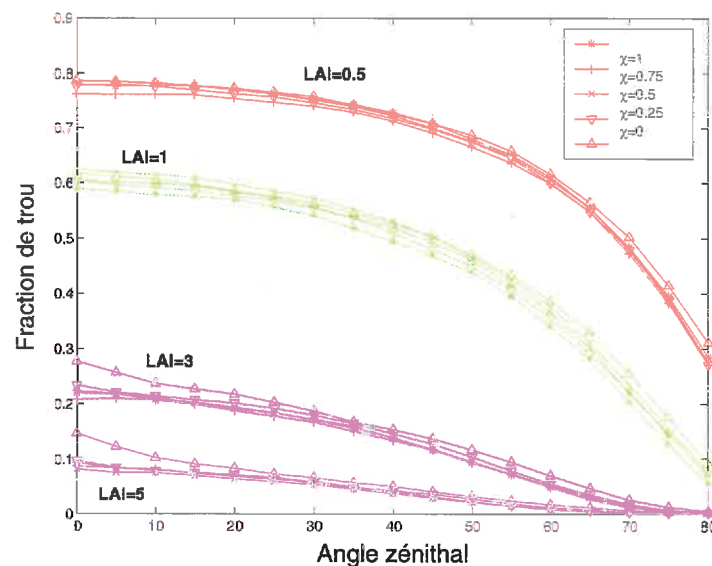
$S^*=0.025$

 $S^*=0.05$

 $S^*=0.1$


Figure 4 : sensibilité de la fraction à la distance feuille tige pour tous les angles de visées, indices foliaires LAI=[0.5 1 3 5], tailles de feuilles $S^*=[0.025, 0.05, 0.1]$, $b/h=0.25$, $ALA=58^\circ$ et une densité relative des plantes $d^*=100$ plt.

Lorsque la taille relative de la feuille augmente, la sensibilité de la fraction de trou à la distance feuille tige χ diminue. Dans le cas des grandes feuilles, la fraction de trous des maquettes agrégées (χ petit) tend alors vers celle des maquettes aléatoires ($\chi=1$). En effet, considérons n feuilles de petite taille dont la somme des surfaces est égale à celle d'une seule grande feuille. Dans ces conditions, la Figure 5 montre que si l'on réduit de la même quantité la distance feuille-tige des maquettes de petites et de grandes feuilles, les petites feuilles vont avoir tendance à se chevaucher davantage que les grandes feuilles, découvrant ainsi plus de sol. Toutefois, une analyse plus approfondie montre que le facteur déterminant n'est finalement pas uniquement lié à la taille de la feuille, mais plus au nombre N de feuilles par plante qui dépendra du LAI, de la taille des feuilles et de la densité de plantes comme nous l'avons vu précédemment (§3.4). En effet, on remarque que dans le cas extrême où les plantes n'ont qu'une seule feuille, la distance feuille-tige n'aura statistiquement aucune influence sur la distribution horizontale des feuilles. Il y aura donc dans ce cas limite une insensibilité à l'agrégation. Au contraire, dans le cas d'un grand nombre de feuilles par plante, une diminution de la distance feuille-tige sera associée à une superposition des feuilles de plus en plus importante expliquant la forte sensibilité à l'agrégation.

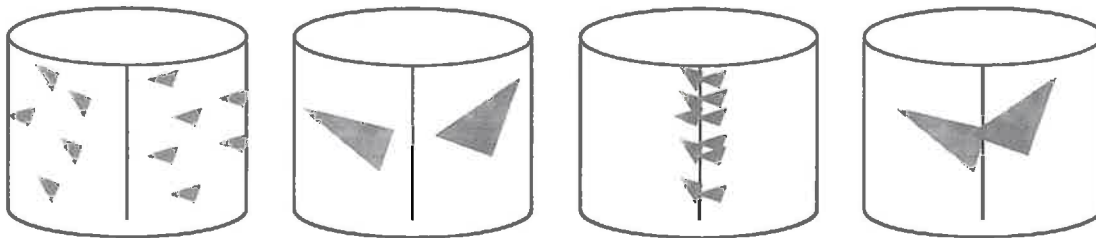


Figure 5 : schéma descriptif de l'effet de taille sur le recouvrement ou l'agrégation des feuilles

Cette brève étude de dépendance fait ressortir les variables du couvert les plus influentes sur l'agrégation. En particulier, la sensibilité à l'agrégation a fait émerger la variable N , le nombre de feuilles par plante qui est une combinaison du LAI, de la densité de plante et de la taille des feuilles. On montre également que l'agrégation est plus forte dans les directions proches du nadir, en relation avec les structures verticales des plantes définies par leur axe vertical et qui s'individualisent de plus en plus au fur et à mesure que la distance feuille-tige diminue.

Cette analyse de dépendance est de nature qualitative et ne permet pas de réellement quantifier l'effet des différents facteurs. Nous allons donc la compléter par une analyse de sensibilité basée sur une modélisation particulière de la fraction de trous. C'est pour cela que nous allons dans un premier temps évaluer la capacité du modèle de Markov à représenter la variabilité de la fraction de trous de nos maquettes.

4.4 Application du modèle de Markov à nos maquettes

Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique, le modèle de Markov permet de représenter théoriquement l'agrégation au sein des couverts. Nous nous proposons donc d'évaluer les performances de ce modèle sur nos maquettes. Le modèle de Markov comporte deux paramètres en dehors de la variable indice foliaire et angle d'inclinaison des feuilles : l'épaisseur de la couche élémentaire, ΔL , et le paramètre d'agrégation λ_0 . Etant donné que le paramètre épaisseur de la couche de Markov ' $\Delta L = LAI/N$ ' est généralement fixe pour un couvert donné, celui-ci a été d'abord ajusté afin de se concentrer sur la variation du paramètre de dispersion λ_0 en fonction de l'angle zénithal et des variables du modèle d'agrégation. Nous allons donc commencer par ajuster l'épaisseur de la couche ΔL .

4.4.1 Méthode d'ajustement des paramètres

Les fractions de trous calculées par la technique du Z-buffer, pour l'ensemble des maquettes 3D des couverts, ont permis d'une part d'effectuer une analyse de dépendance aux différentes caractéristiques du couvert considérées et d'autre part l'évaluation de deux modèles de fraction de trous : Poisson et Markov. Une technique d'optimisation non linéaire basée sur un algorithme de descente 'quasi-newton' et sur la fonction de mérite F_m ci-dessous a été utilisée pour ajuster les paramètres de Markov ΔL et λ_0 .

$$F_m = \sum_{i=1}^N \left[P_0^{\text{modèle}}(\text{paramètres}, \theta, \varphi) - P_0^{Z\text{-buffer}}(\theta, \varphi) \right]^2$$

Cet ajustement a été ainsi effectué sur l'ensemble des indices foliaires considérés supposant ainsi que les variables ajustées sont indépendantes du LAI. Les critères d'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) et le biais B ont été ensuite utilisés pour évaluer les performances des deux modèles :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[P_0^{\text{modèle}}(\text{paramètres}, \theta, \varphi) - P_0^{Z\text{-buffer}}(\theta, \varphi) \right]^2}$$

et $B = \overline{P_0^{\text{modèle}}} - \overline{P_0^{Z\text{-buffer}}}$

où $P_0^{\text{modèle}}$ et $P_0^{Z\text{-buffer}}$ sont les valeurs de fractions de trou simulées et mesurées, N est le nombre de mesures disponibles et $\overline{P_0^{\text{modèle}}}$ et $\overline{P_0^{Z\text{-buffer}}}$ sont les moyennes des fractions de trous simulées et mesurées. Le biais représente la tendance générale de la simulation à la sous-estimation ($B < 0$) ou la surestimation ($B > 0$).

4.4.2 Ajustement de l'épaisseur de la couche ΔL

Nilson 1971 suggère que le paramètre ΔL est relié à la taille des feuilles et la distance inter-nœud. Afin de vérifier cette hypothèse, on a procédé à un ajustement des fractions de trou pour l'ensemble des maquettes en considérant que le paramètre ΔL est proportionnel à la surface d'une

feuille $\Delta L = \alpha \times \frac{\pi S^{*2}}{4}$, α étant la constante de proportionnalité. L'ajustement a montré que le paramètre de proportionnalité α pouvait être fixé à 0.41. la comparaison des fractions de trou pour toutes les combinaisons des variables d'entrée du modèle avec $b/h=0.25$ et $ALA=58^\circ$ montre une bonne cohérence entre le modèle de Markov et les mesures Z-buffer avec une erreur quadratique moyenne RMSE de 0.022 (Figure 6).

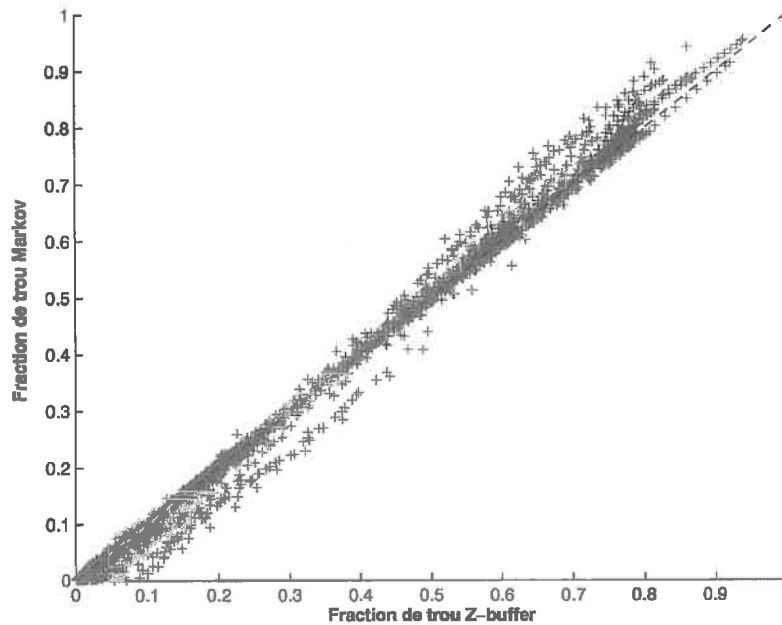


Figure 6 : Comparaison des fractions calculées par le modèle de Markov avec un α ajusté à 0.41 à celles calculées par la méthode du Z-buffer.

Cependant, pour une grande taille de feuille ($S^*=1$) et une densité faible ($d^*=1$) on observe que pour la maquette simulant un milieu aléatoire ($\chi=1$) la valeur du paramètre de dispersion λ a tendance à être inférieure à 1 et à décroître en fonction de l'angle zénithal de visée. En effet, pour cette taille de feuilles l'épaisseur de la couche est assez élevée. Ainsi, sachant que, pour un milieu aléatoire, le paramètre de dispersion doit être théoriquement égal à 1 et que l'épaisseur de couche ΔL doit être très petite pour tous les angles zénithaux et indices de surface foliaire (Nilson 1971), le modèle de Markov a été réajusté sur toutes les maquettes 3D de telle sorte que la théorie du milieu turbide soit vérifiée. La Figure 7 illustre un exemple de la variation du paramètre de dispersion λ_0 en fonction de l'angle zénithal pour différentes valeurs d'épaisseur de couche ΔL . Les caractéristiques considérées sont : $S^*=1$, $d^*=1$, $b/h=0.25$, $ALA=58^\circ$, $LAI=1$ et $\chi=1$. Ainsi, La théorie du milieu aléatoire $\lambda_0=1$ est vérifiée sur l'ensemble des maquettes aléatoires pour des valeurs de ΔL inférieures ou égales à 0.01.

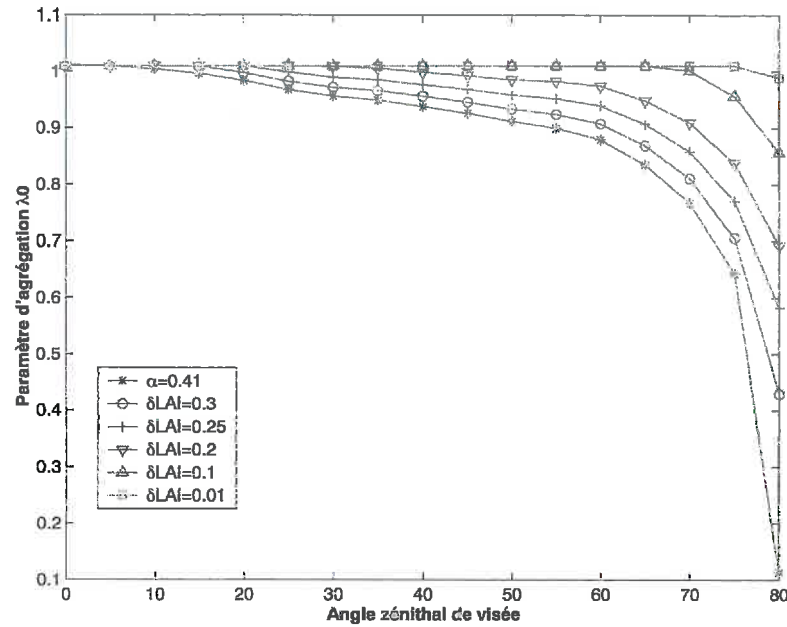


Figure 7 : Sensibilité du paramètre d'agrégation λ_0 à l'épaisseur de la couche pour toutes les directions zénithales. La maquette décrit un milieu aléatoire avec $\chi=1$, $S^*=1$, $d^*=1$, $b/h=0.25$ et pour un $LAI=1$

Ceci suppose que l'épaisseur de la couche ΔL est constante quelles que soient les caractéristiques du couvert. L'ajustement du paramètre de dispersion λ_0 a été effectué avec des épaisseurs de couche $\Delta L = [0.01 \quad \alpha(\pi S^{*2}/4)]$, pour toutes les valeurs de LAI et toutes les combinaisons des autres variables : densité relative d^* , taille relative des feuilles S^* , forme des feuilles b/h , distance relative feuille-tige χ et angle zénithal θ . Il faut noter que pour toutes les combinaisons les valeurs de LAI considérées ne sont pas toujours les mêmes. En effet, en prenant en compte les codistributions des variables d'entrée dans le cas de quelques couverts réels (§chapitre3), certaines combinaisons de valeurs des caractéristiques de la maquette ne seraient pas réalistes. Afin d'évaluer le poids de l'épaisseur de la couche sur l'ajustement de la fraction de trou, les fractions calculées par le modèle de Markov avec

$\Delta L=0.01$ et $\Delta L=\alpha \times \frac{\pi S^{*2}}{4}$ ont été comparées pour toutes les combinaisons des variables du modèle d'agrégation considérées.

La Figure 8 qui illustre cette comparaison montre que les deux méthodes d'ajustement sont équivalentes. Nous avons comparé, les erreurs quadratiques moyenne (RMSE) obtenues, sur tous les indices de surface foliaire LAI , avec $\Delta L=0.01$ à ceux obtenus à partir de l'ajustement du modèle de Markov avec une épaisseur $\Delta L=\alpha(\pi S^{*2}/4)$. Les résultats de la comparaison montrent une légère différence entre les deux méthodes qui se traduit par une petite augmentation de la RMSE qui est égale à 0.0221. En conclusion, supposer que l'épaisseur de couche est corrélée à la taille de la feuille, donne des

valeurs de fractions de trou similaires à celles obtenues en supposant l'épaisseur des couches constantes mais très faibles ($\Delta L = 0.01$).

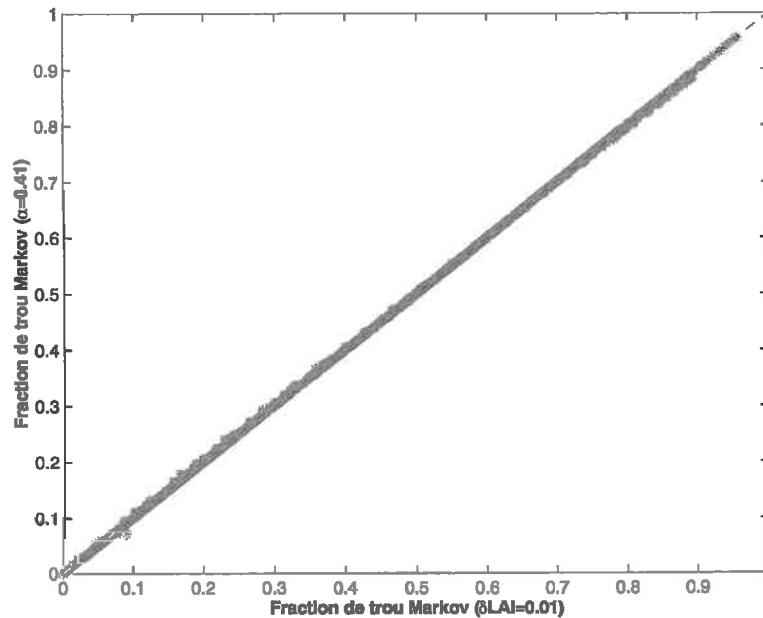


Figure 8 comparaison des fraction de trous simulées par le modèle de Markov avec une épaisseur de couche égale à 0.01 à celles calculées avec une épaisseur $\Delta L = 0.41\pi S^2/4$. Toutes les combinaisons caractéristiques du couvert considérées sont représentées.

Les fraction de trou de toutes les maquettes 3D, calculées par la technique du Z-buffer, ont été utilisées pour évaluer les deux modèles de fraction de trou: Poisson et Markov.

4.4.3 Comparaison au modèle de Poisson et Poisson étendu

Pour un arrangement aléatoire des feuilles ($\chi=1$), les fractions de trous calculées par la technique Z-buffer devraient être en parfait accord avec les valeurs théoriques calculées par le modèle de Poisson ou le modèle de Markov ($\Delta L = 0.01$). Ceci a été vérifié pour l'ensemble des maquettes 3D disponibles avec $\chi=1$. Les simulations du modèle Poisson affichent une bonne cohérence avec les fractions de trou calculées par la technique Z-buffer (Figure 9). Une cohérence similaire est observée aussi pour le modèle de Markov (Figure 9). L'erreur quadratique moyenne RMSE obtenue sur toutes les maquettes disponibles avec $\chi=1$ par les deux modèles Poisson et Markov est égal respectivement à 0.014 et 0.0074. Ce bon accord avec la théorie du milieu aléatoire valide ainsi les processus de conception du modèle d'agrégation et la méthode Z-buffer de calcul de fraction de trou. Il justifie aussi la valeur ajustée de l'épaisseur de la couche $\Delta L = 0.01$ pour le modèle de Markov.

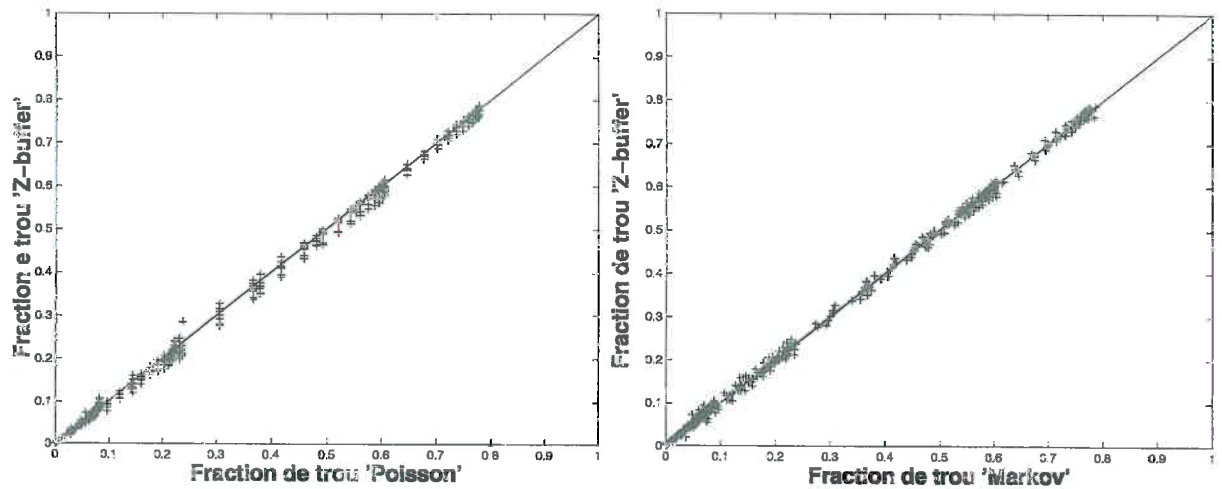


Figure 9 Comparaison de la fraction de trous mesurée par Z-buffer pour tous les angles de visées aux simulations des modèles de Poisson et Markov. Exemple des maquettes avec $S^*=0.1$, $d^*=10$, $LAI=[1\ 3\ 5]$, $ALA=58^\circ$ et $\chi=1$, $b/h=0.25$. L'épaisseur de la couche ΔL pour le modèle de Markov est prise égale à 0.01.

Contrairement au milieu aléatoire ($\chi=1$), le milieux agrégé ($\chi<1$) montre l'avantage du modèle de Markov. Ceci, est clairement observé sur la Figure 10 : le modèle de Poisson, valide pour des milieux aléatoires, a tendance à surestimer la fraction de trous des couverts agrégés. Cette surestimation, augmente avec le LAI et quand la distance feuille-tige diminue. Les valeurs de RMSE dans le cas des distances relatives $\chi=[0\ 0.25\ 0.5]$ sont respectivement égal à 0.175, 0.096 et 0.02 et les valeurs de biais sont de -0.015, -0.066 et -0.147. Le modèle de Markov dont l'épaisseur ΔL est fixé à 0.01 tend à mieux approcher les mesures Z-buffer avec des RMSE plus faibles égales respectivement à 0.05, 0.05 et 0.013 et des biais qui valent -0.002, -0.006, -0.001. Néanmoins, il existe une légère dégradation qui se manifeste par une déviation systématique.

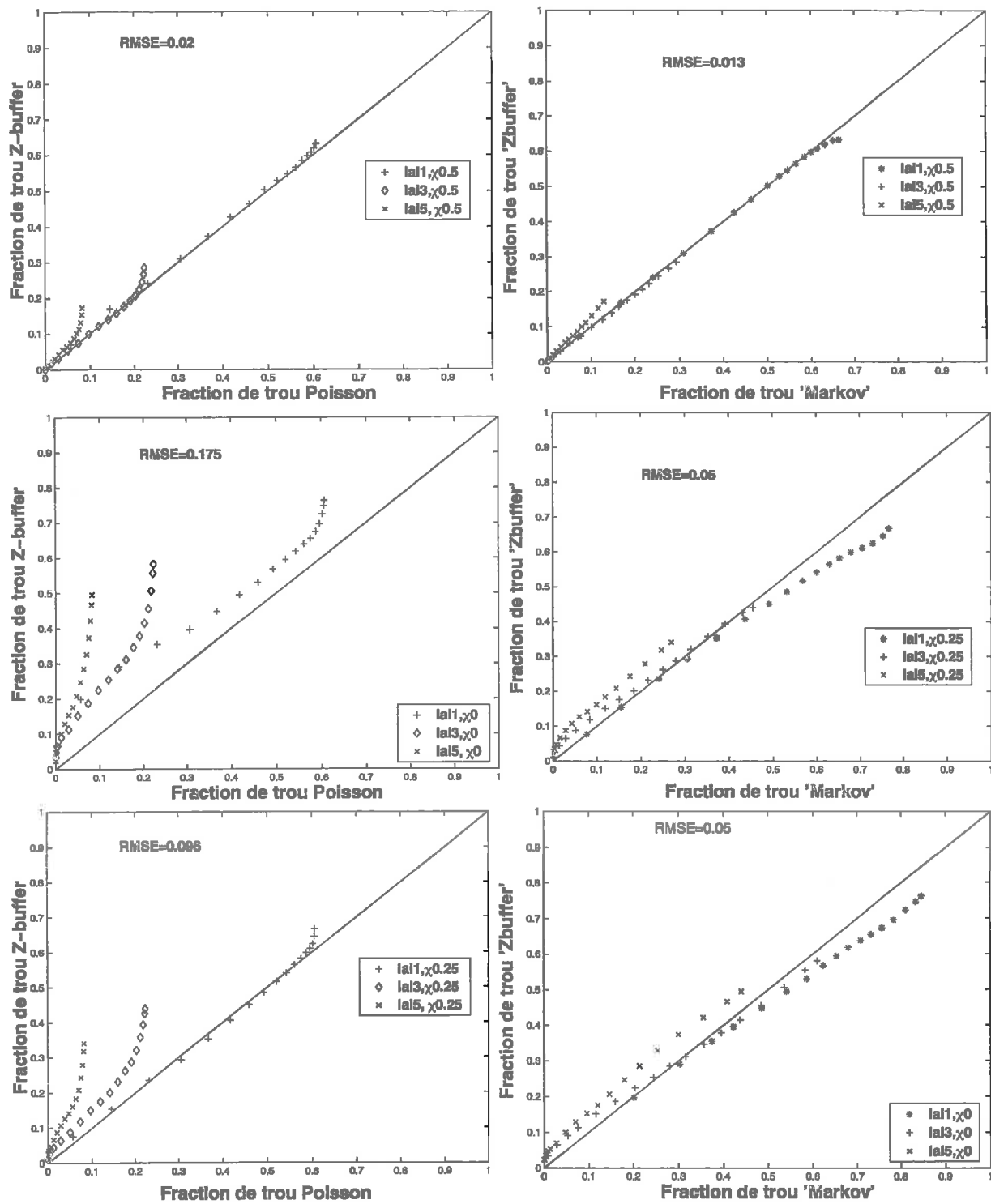


Figure 10 Comparaison de la fraction de trous mesurée par Z-buffer pour tous les angles de visées aux simulations des modèles de Poisson et Markov. Les maquettes considérées décrivent des milieux agrégés avec $\chi = [0, 0.25, 0.5]$, $LAI = [1 \ 3 \ 5]$, $d^* = 10$, $S^* = 0.1$, $ALA = 58^\circ$ et $b/h = 0.25$.

La comparaison des distributions des résidus de la fraction de trous obtenus par les deux modèles pour toutes les combinaisons des variables du modèle d'agrégation [d^* , S^* , LAI , χ , b/h , θ] est illustrée par la **Figure 11**. Le modèle de Poisson présente une gamme de variation des résidus négative assez large avec une moyenne $Moy = -0.024$ et un écart type $\sigma = 0.059$. Tandis que le modèle de Markov décrit une distribution symétrique avec une gamme de variation plus faible, une moyenne égale à 0 et un écart type de 0.022.

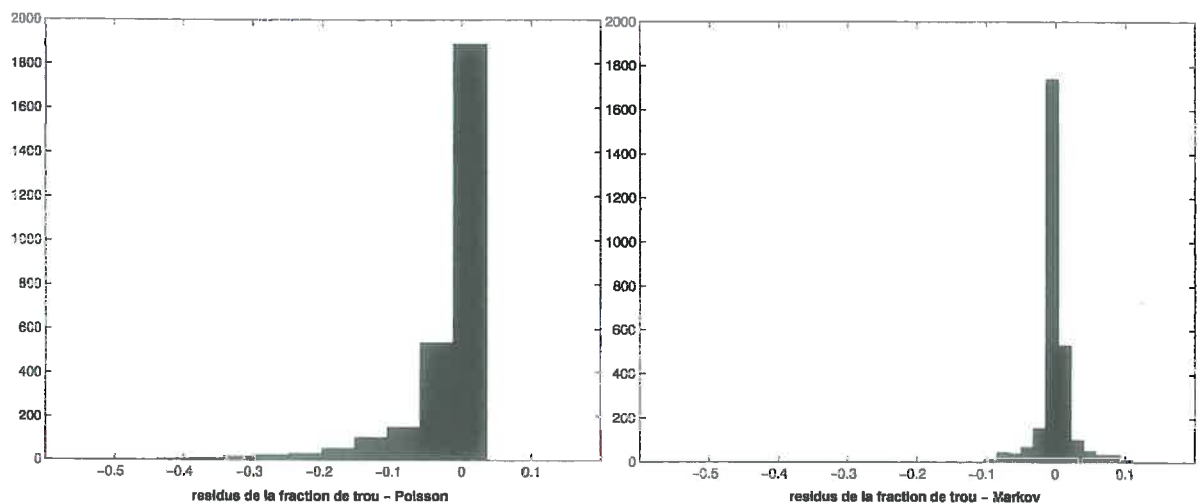


Figure 11 : Comparaison des distributions des résidus de la fraction de trous obtenus par les modèles Poisson et Markov. Toutes les combinaisons des caractéristiques du couvert considérées sont représentées.

Nous avons analysé plus en détail les facteurs qui expliquent les différences entre les performances des modèles de Poisson et de Markov. Pour le modèle de Poisson, le RMSE augmente avec le LAI d'autant plus que la distance feuille tige diminue comme l'illustre la Figure 12. Cependant, lorsque la taille de la feuille augmente, l'erreur décroît pour toutes les distances relatives feuille-tige et la structure de la maquette semble être proche d'un milieu aléatoire du fait d'un faible nombre de feuilles par plante. De la même manière, une réduction de la densité relative des plantes pour des $\chi < 1$ se traduit par une augmentation la fraction de trous et s'accompagne donc d'une hausse du RMSE pour le modèle de Poisson.

Comparé au modèle de Poisson, le modèle de Markov a des valeurs de RMSE beaucoup plus faibles principalement pour les structures agrégées avec de fortes valeurs de LAI . Ainsi, pour un indice foliaire $LAI=5$, $S^*=0.025$ et $\chi=0$, le RMSE obtenu par le modèle Poisson, est réduit d'environ 70% par le modèle de Markov. On note toutefois des RMSE supérieurs à 0.01 dans les cas très agrégés

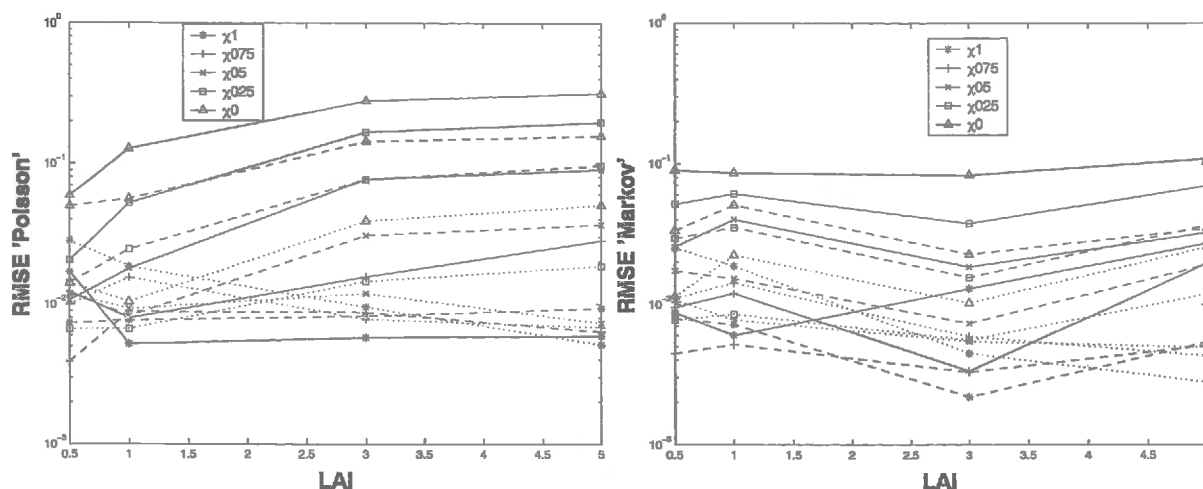


Figure 12 : Exemple de sensibilité à l'indice foliaire de l'erreur quadratique moyenne des deux modèles pour $\chi=[0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1]$, $S^*=[0.025 \text{ --- } 0.05 \text{ --- } 0.1 \dots]$, $d^*=100\text{pt}$, $b/h=0.25$, $ALA=58^\circ$.

Cette évaluation du modèle de Markov montre qu'il peut s'appliquer avec une précision satisfaisante à la description de la fraction de trous de nos maquettes. L'intérêt du modèle de Markov par rapport au modèle de Poisson est bien sûr plus important dans le cas des couverts agrégés. Par contre, le modèle de Poisson étendu se comporte de manière très similaire au modèle de Markov Figure 13. L'hypothèse formulée sur la valeur de ΔL est donc équivalente à une couche infinitésimale correspondant au modèle de Poisson étendu.

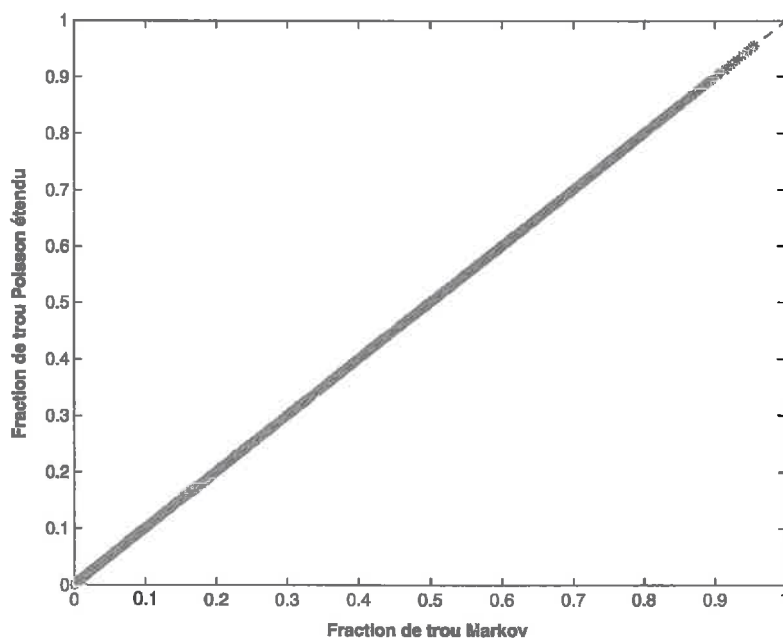


Figure 13 : Comparaison des fractions de trou simulées par le modèle de Markov à celles obtenu par le modèle de Poisson étendu.

4.4.4 Sensibilité du paramètre d'agrégation aux caractéristiques du modèle d'agrégation.

Après nous être assurés de la validité du modèle de Markov pour décrire la variation de la fraction de trous de nos maquettes de couvert, il nous faut analyser la sensibilité du paramètre d'agrégation λ_0 aux différentes variables caractéristiques du couvert. Notons au passage que cette procédure basée sur le modèle Markovien pour lequel nous avons fixé ΔL à 0.01 permet d'économiser l'étude de l'influence du LAI qui est explicitement décrite par le modèle.

Nous allons d'abord étudier l'influence des variables principales que sont la taille relative des feuilles, la densité de plantes et la distance relative feuille-tige. Pour ce faire, nous fixerons les variables complémentaires à des valeurs par défaut : $b/h=0.25$ et $ALA=58^\circ$. Dans un deuxième temps, nous étudierons l'effet de ces variables complémentaires.

4.4.4.1 Effets de la taille relative des feuilles, de la densité des plantes et de la distance relative feuille-tige

Nous fixerons ici les variables complémentaires b/h et ALA à leurs valeurs par défaut : $b/h=0.25$ et $ALA=58^\circ$.

D'une manière générale, le paramètre d'agrégation λ_0 peut varier considérablement en fonction de la direction de visée et la distance relative χ , de la densité de plantes d^* , et de la taille relative des feuilles S^* , comme le montrent les figures 14 et 15. Le paramètre d'agrégation peut atteindre des valeurs inférieures à 0.2 dans les cas les plus agrégés (figure 15 pour $d^*=1$ et une direction nadir). Au contraire, on vérifie bien que dans les cas faiblement agrégés, correspondant à des valeurs de χ proches de 1 ou d'un faible nombre de feuilles par plante, le paramètre d'agrégation λ_0 est proche de l'unité.

La variation directionnelle du paramètre d'agrégation suit toujours le même patron : la valeur la plus faible est observée au nadir, puis augmente régulièrement pour tendre vers un plateau pour les plus forts angles. On note toutefois des 'irrégularités' pour les plus fortes valeurs d'angles, en général au delà de 70° . Ceci est principalement dû à des artefacts introduits dans le calcul du paramètre λ_0 pour les très faibles valeurs de fraction de trous (cf §4.2). La très forte sensibilité du paramètres d'agrégation pour les directions proches du nadir s'explique bien sûr par la structuration verticale du couvert des que la distance relative feuille-tige diminue, en faisant apparaître des plantes à développement vertical.

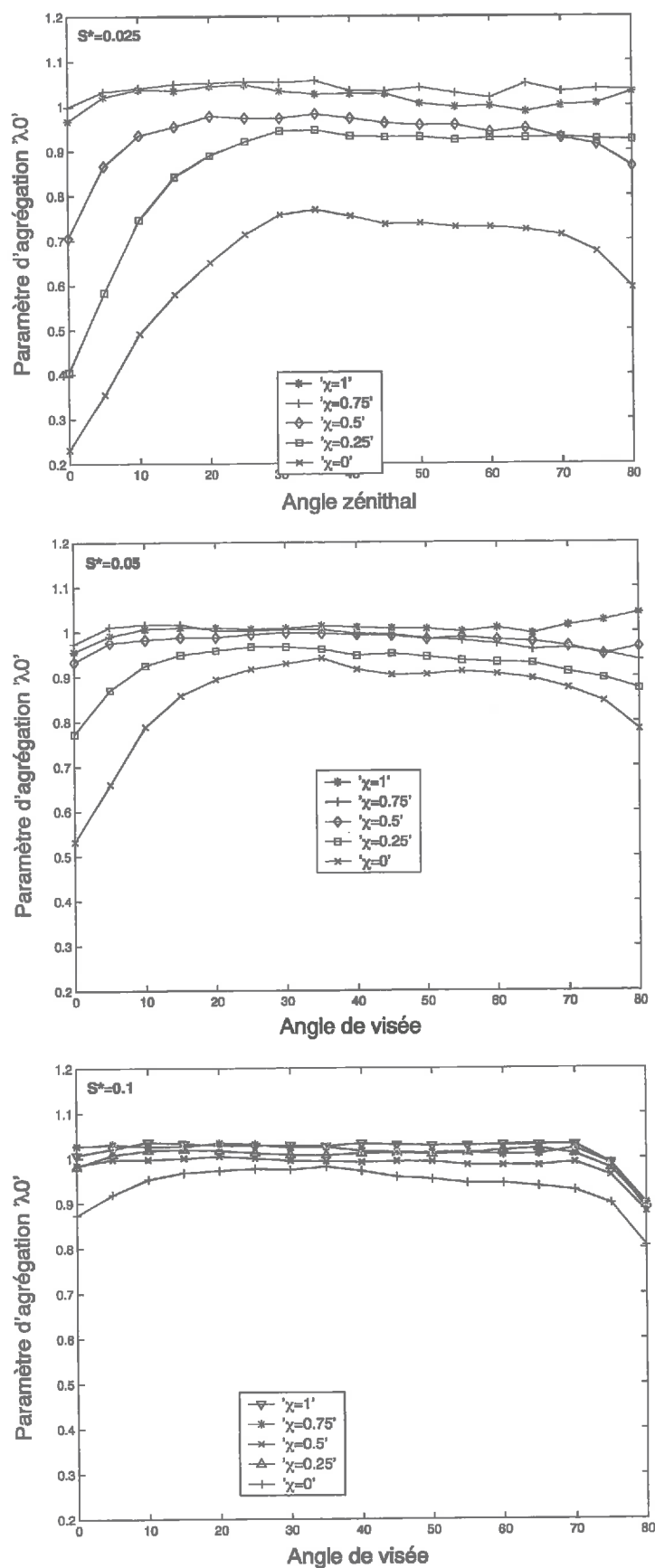


Figure 14 : sensibilité du paramètre d'agrégation λ_0 à la distance feuille-tige χ pour des tailles de feuilles $S^*=[0.025, 0.05, 0.1]$ et une densité relative des plantes $d^*=100$ plt.

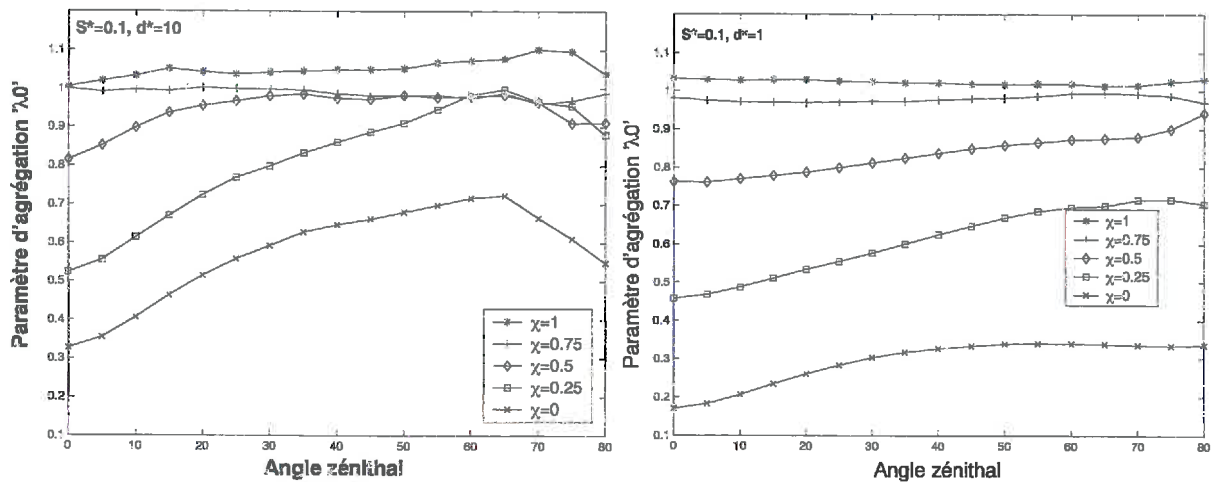


Figure 15 Sensibilité du paramètre d'agrégation λ_0 à la distance feuille-tige χ pour une taille de feuille $S^*=0.1$ et deux densités relatives de plantes $d^*=[1 \ 10]$.

4.4.4.2 Effet de la forme de la feuille 'b/h' et de l'inclinaison 'ALA'

4.4.4.2.1 Forme de la feuille

Afin d'évaluer l'effet forme de la feuille sans multiplier démesurément le nombre de maquettes à simuler, nous nous sommes limités à la densité de 100. Nous avons alors ajusté le paramètre λ_0 pour chaque valeur du paramètre $b/h=[0.25 \ 1]$. Les résultats montrent des valeurs globalement proches des estimations du paramètre λ_0 pour les deux formes de feuille Figure 16. Il existe néanmoins, pour des χ proche de 0, une agrégation plus forte pour la forme $b/h=1$ qui se traduit par des paramètres d'agrégation plus faibles. Toutefois, Il semble que la forme de la feuille influe peu sur la fraction de trous. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse de la distribution des résidus de l'ajustement du modèle de Markov en considérant deux cas de figure :

- Le cas où λ_0 dépend de la forme de la feuille : ajustement du λ_0 individuellement pour chaque forme de feuille comme précédemment.
- Le cas où λ_0 ne dépend pas de la forme des feuilles : ajustement d'un paramètre λ_0 unique pour les deux formes de feuille.

Les distributions des résidus d'ajustement de la fraction de trous au modèle de Markov ont des gammes de variation assez faible confirmant la validité du modèle de Markov Figure 17. Les moyennes et écart types des deux distributions sont quasi similaires. Ainsi, on pourra considérer que le paramètre d'agrégation λ_0 est indépendant de la forme de la feuille.

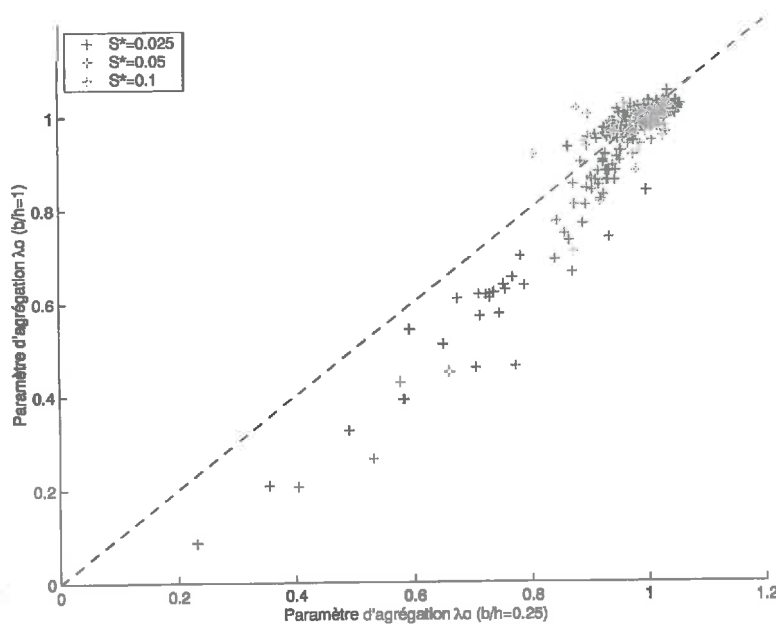


Figure 16 : comparaison du paramètre d'agrégation pour deux formes de feuilles différentes $b/h=[0.25\ 1]$. Les caractéristiques du couvert considérées sont : $LAI=[0.5\ 1\ 3\ 5]$; $S^*=[0.025\ 0.05\ 0.1]$, $ALA=58^\circ$ et $d^*=100$.

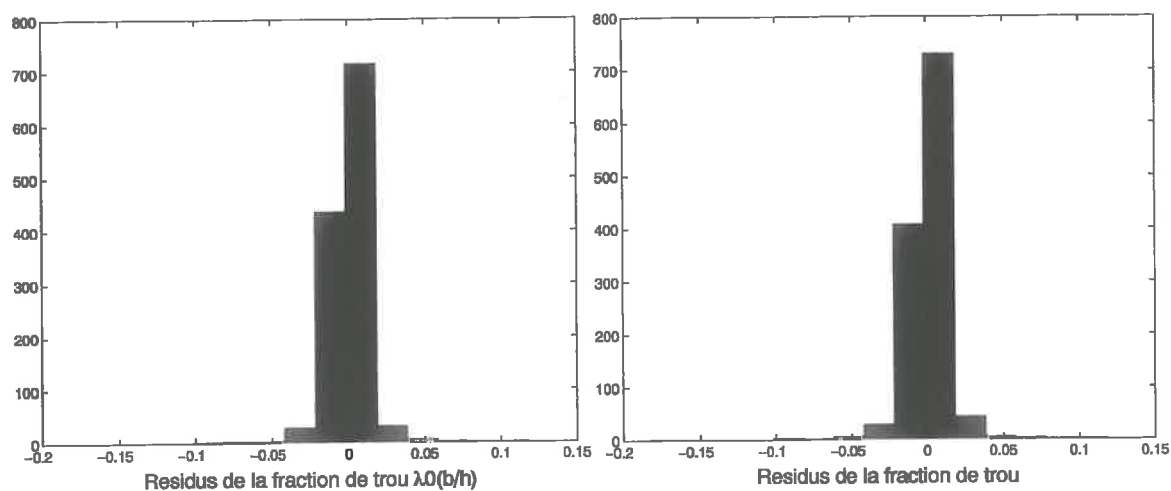


Figure 17. Comparaison des distributions des résidus de la fraction obtenue par deux méthodes d'ajustement. La première considère que le paramètre d'agrégation dépend de la forme de la feuille et la deuxième le considère indépendant. Les maquettes représentées sont décrites par $d^*=100$, $ALA=58^\circ$, $LAI=[0.5\ 1\ 3\ 5]$, $S^*=[0.025\ 0.05\ 0.1]$, $\chi=[0\ 0.25\ 0.5\ 0.75\ 1]$ et $b/h=[0.25\ 1]$.

4.4.4.2.2 Inclinaison des feuilles

La distribution des inclinaisons foliaires est prise en compte explicitement dans le modèle de Markov à travers la fonction de projection $G(\theta, \phi)$. Cependant, il est possible que l'agrégation induise une dépendance additionnelle à l'inclinaison foliaire, les couverts ayant des distributions extrêmes pouvant favoriser une agrégation des feuilles supplémentaire. L'impact de l'inclinaison foliaire sur l'agrégation et

vue au travers du modèles de Markov et de son paramètre λ_0 reste donc à déterminer. Nous avons donc testé l'hypothèse d'indépendance du λ_0 à l'inclinaison foliaire. Pour ce faire, nous avons analysé les résidus d'ajustement de la fraction de trous au modèle de Markov pour les deux hypothèses en considérant en plus de la distribution sphérique (ALA=58°), des distributions planophiles (ALA=30°) et erectophiles (ALA=70°):

- L'agrégation dépend de l'inclinaison foliaire : le paramètre λ_0 est ajusté individuellement pour chacune des 3 distributions d'inclinaison foliaire.
- L'agrégation ne dépend pas de l'inclinaison foliaire : un paramètre λ_0 unique est ajusté pour les 3 distributions d'inclinaison foliaire.

De manière à limiter les temps de calcul, l'évaluation a été effectuée sur un sous ensemble de maquettes dont les caractéristiques sont $d^*=100$, $b/h=0.25$, $LAI=[0.5 \ 1 \ 3 \ 5]$, $S^*=[0.025, 0.05, 1]$ et $\chi=[0 \ 0.5 \ 1]$.

Les résultats montrent là encore des résidus très faibles pour les deux hypothèses (Figure 18). Les moyennes et écart type des deux distributions sont très proches, indiquant que l'agrégation semble ne pas dépendre de l'inclinaison foliaire.

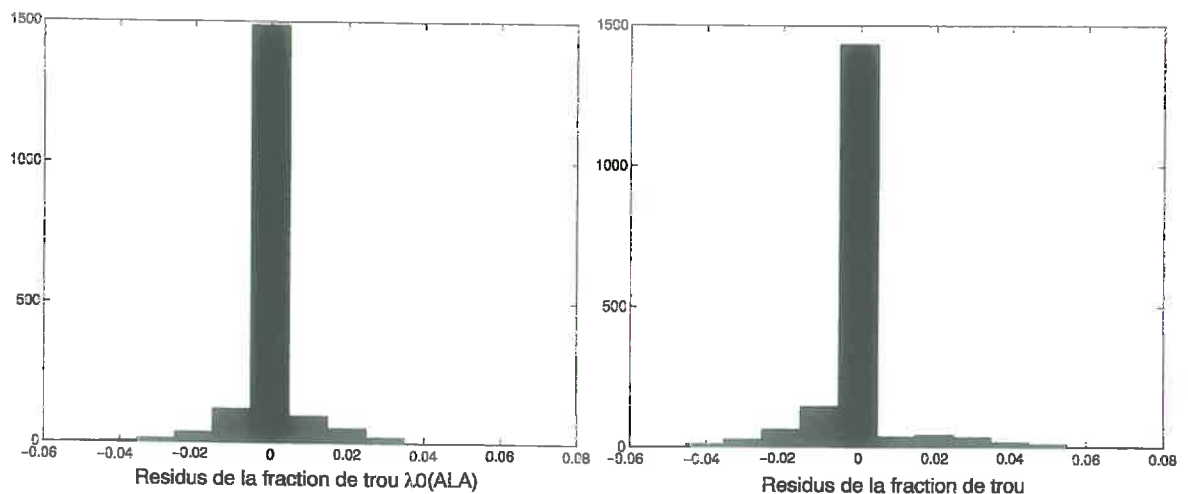


Figure 18. Comparaison des distributions des résidus de la fraction de trous obtenues par deux méthodes d'ajustement. La première considère que le paramètre d'agrégation dépend de la forme de la feuille et la deuxième le considère indépendant. Les maquettes représentées sont décrites par $d^*=100$, ALA=58°, $b/h=0.25$, $S^*=[0.025 \ 0.05 \ 0.1]$ et $\chi=[0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1]$, $LAI=[0.5 \ 1 \ 3 \ 5]$ et ALA=[30°, 58°, 75°].

Cette analyse de dépendance du paramètre d'agrégation du modèle de Markov confirme bien entendu les résultats observés précédemment (§4.3) directement sur la fraction de trous. Elle montre que les variables les plus importantes jouant sur l'agrégation sont :

- La distance feuille-tige

- Le nombre de feuilles par plante qui est une combinaison de l'indice foliaire, de la densité de plante et de la taille des feuilles.

Par contre, la forme des feuilles (tout au moins dans la limite $0.25 < b/h < 1.0$) et l'inclinaison des feuilles ne semblent pas avoir d'effet direct sur l'agrégation du couvert. Les directions de visée proches de la verticale sont également les plus sensibles.

Cette analyse de sensibilité prépare donc l'étape suivante qui va consister à proposer une modélisation du paramètre λ_0 en fonction des variables du couvert 'sensibles'.

4.5 Modélisation du paramètre λ_0 en fonction des variables du couvert.

A partir du modèle d'agrégation des feuilles 3D, nous avons mis en évidence la sensibilité de la fraction de trou à la taille de la feuille, la distance relative feuille-tige, la densité relative des plantes, l'indice de surface foliaire et l'angle de visée. En se basant sur les fractions de trous calculées par Z-buffer, nous avons fait le choix d'explicitier le modèle de Markov en fonction de ces variables. Le LAI étant déjà pris en compte dans le formalisme du modèle, une paramétrisation du paramètre d'agrégation en fonction du reste des variables d'intérêts a été entreprise.

4.5.1 Approche

L'étude de sensibilité du paramètre d'agrégation présentée précédemment a bien montré la sensibilité de ce dernier à l'angle zénithal de visée, la distance feuille-tige, la taille relative de la feuille et la densité relative des plantes. La procédure de paramétrisation a consisté d'abord à exprimer la variation angulaire du λ_0 . On a bien vu que l'agrégation est d'autant plus forte que l'angle de visée est proche du nadir. Celle-ci a tendance à diminuer en s'en éloignant jusqu'à atteindre un palier qui est déterminé par la taille de la feuille S^* et la densité des plantes d^* . On a noté aussi que parfois pour des valeurs de θ supérieure à 70° le comportement devient irrégulier ce qui pourrait être dû à des artefacts de calcul. Nous avons donc effectué l'ajustement entre 0 et 70° . Dans notre paramétrisation nous avons imposés deux conditions :

- La première est la continuité du palier ou de l'évolution croissante du paramètre d'agrégation en fonction de l'angle de visée.
- La deuxième est plutôt de contraindre le λ_0 à rester inférieur ou égal à 1 puisque nos maquettes affichent globalement un caractère aléatoire ou agrégé.

Ensuite, les paramètres découlant du modèle qui décrit la variation angulaire seront exprimés en fonction des variables d'intérêts (χ , S^* , d^*) pour obtenir enfin un formalisme explicite du paramètre d'agrégation qui pourra enfin être intégré dans le modèle de Markov de fraction de trou.

4.5.2 Modélisation du paramètre d'agrégation

Nous proposons de paramétrer la dépendance de λ_0 en fonction de l'angle zénithal et des variables d'architecture du modèle CLAMP en deux étapes successives :

- D'abord paramétrer la dépendance à l'angle zénithal,
- Ensuite proposer une paramétrisation de deuxième niveau pour prendre en compte les autres variables d'architecture.

Nous avons donc ajusté λ_0 en fonction de l'angle θ , pour toutes les valeurs des variables du modèle d'agrégation suivantes : $S^*=[0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.4, 1]$, $d^*=[1, 10, 100, 1000]$, $LAI=[0.5, 1, 3, 5]$, $\chi=[0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$, $ALA=58^\circ$ et $b/h=0.25$.

La variation angulaire est exprimée par la fonction suivante :

$$\lambda_0(\theta) = a(\chi, d^*, S^*) + b(\chi, d^*, S^*) \cdot e^{[-c(\chi, d^*, S^*) \times \tan(\theta)]}$$

Où a , b et c sont des facteurs qui dépendent de la taille de la feuille ; la distance feuille-tige et de la densité relative. Ces facteurs ont été ensuite respectivement ajustés en fonction de la distance relative χ par les expressions suivantes :

1. $a(\chi) = a_1(S^*, d^*) + a_2(S^*, d^*) \cdot e^{-a_3(S^*, d^*) \times \chi} - a_4(S^*, d^*) \cdot e^{-a_5(S^*, d^*) \times \chi}$
2. $b(\chi) = b_1(S^*, d^*) \cdot e^{-b_2(S^*, d^*) \times \chi} - b_3(S^*, d^*) \cdot e^{-b_4(S^*, d^*) \times \chi}$
3. $c(\chi) = c_1(S^*, d^*) \cdot \chi^3 + c_2(S^*, d^*) \cdot \chi^2 + c_3(S^*, d^*) \cdot \chi + c_4(S^*, d^*)$

L'ajustement du modèle de Markov en intégrant la combinaison des formules précédentes a été effectué en considérant une épaisseur de couche $\Delta L=0.01$. Les résultats de cet ajustement sont illustrés par les Figure 19, 20. La comparaison du paramètre d'agrégation obtenu suite à l'ajustement du modèle de Markov sur la fraction de trou Z-buffer à celui paramétré par le formalisme ci-dessus montre que le modèle paramétrique proposé a tendance à approcher d'une manière assez satisfaisante les valeurs ajustées Figure 19, 20. Néanmoins une nette dégradation est observée pour des densités égales à 1000 où une décroissance est observée autour du nadir. En effet, dans ce cas les valeurs de référence sont dégradées ce qui affecte la qualité de l'ajustement. Les bonnes performances de cette paramétrisation sont bien illustrées par la comparaison de la fraction de trou simulée par le modèle de Markov ainsi paramétré à celle mesurée par Z-buffer (Figure 21) puisque l'erreur quadratique moyenne obtenue reste néanmoins faible RMSE=0.0232.

Dans ce travail nous nous sommes limités à la paramétrisation en fonction de l'angle zénithal θ et la distance relative feuille-tige ' χ '. En effet, en raison des faibles points d'échantillonnage de la taille

relative de la feuille et de la densité relative des plantes, il ne nous a pas été possible d'ajuster les paramètres $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4)$ en fonction des variables additionnelles que sont S^* et d^* . Il est ainsi nécessaire de générer d'autres types de maquettes pour compléter cette étude.

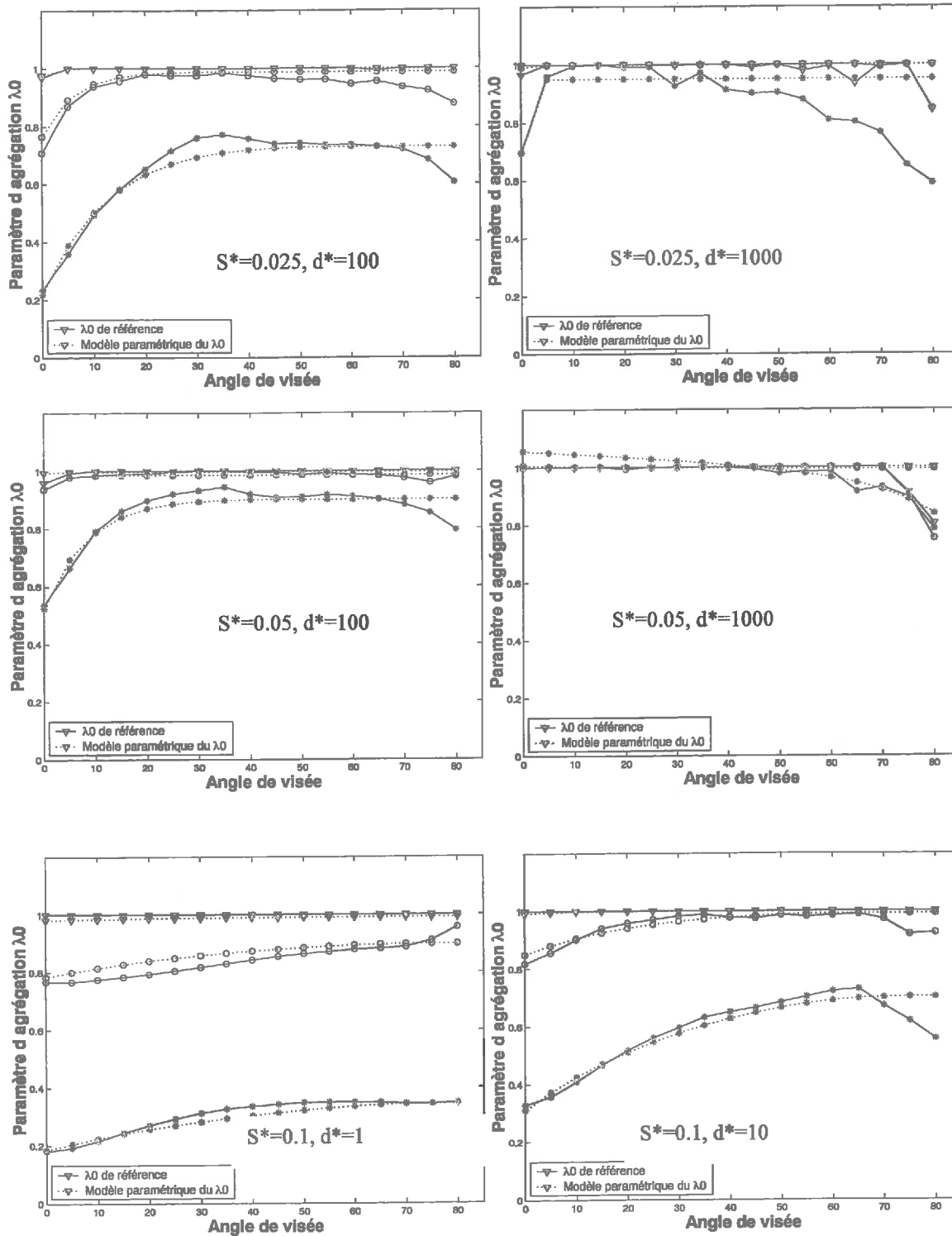


Figure 19 : Comparaison du modèle paramétrique du paramètre d'agrégation en fonction de l'angle zénithal pour trois distances feuille tige [1 (V), 0.5(o), 0(*)] aux valeurs du λ_0 ajustées avec le modèle de Markov sur la fraction de trou Z-buffer. ALA=58°, b/h=0.25.

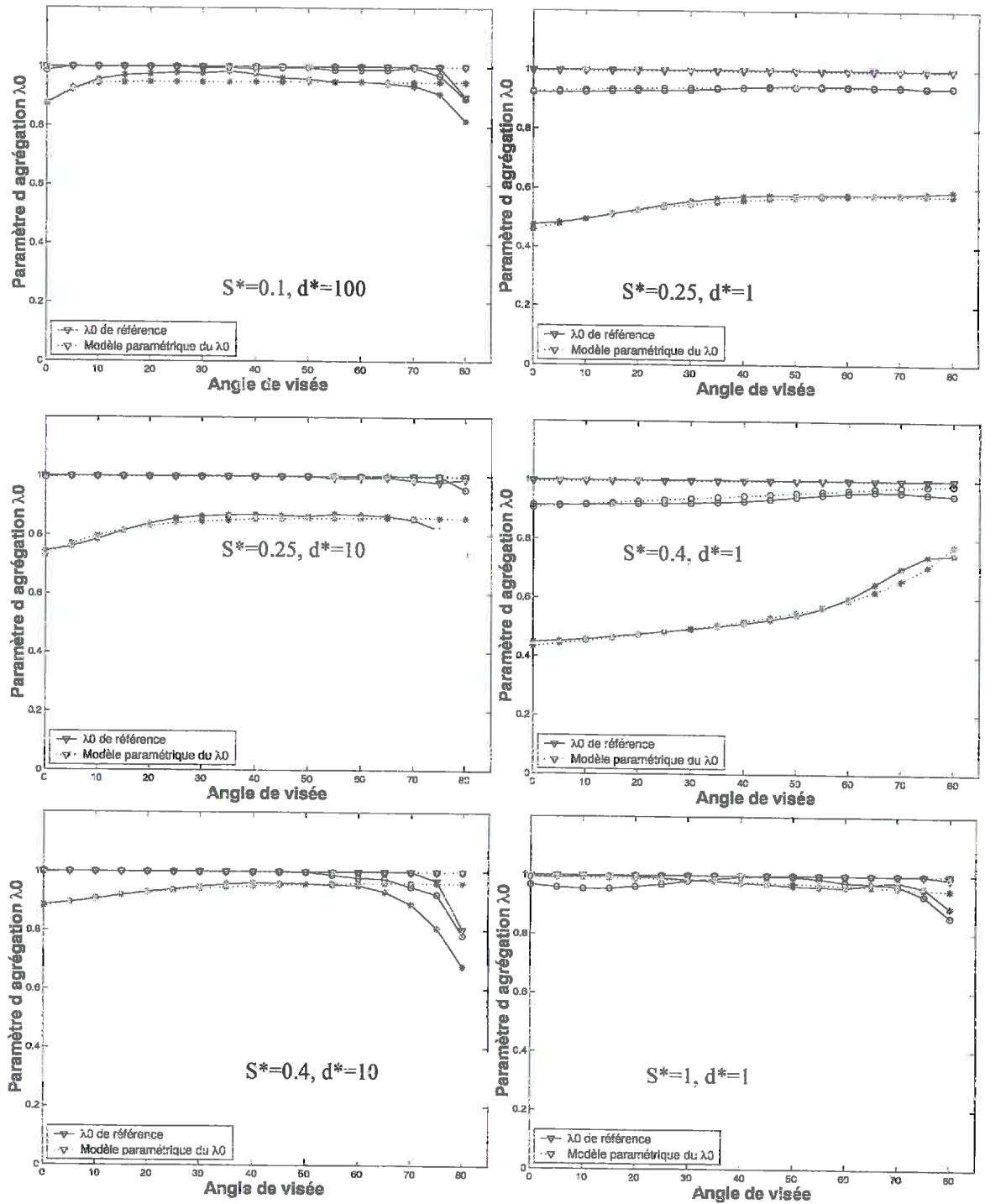


Figure 20 : Comparaison du modèle paramétrique du paramètre d'agrégation en fonction de l'angle zénithal pour trois distances feuille tige [1 (▽), 0.5(o), 0(*)] aux valeurs du λ_0 ajustées avec le modèle de Markov sur la fraction de trou Z-buffer. $ALA=58^\circ$, $b/h=0.25$.

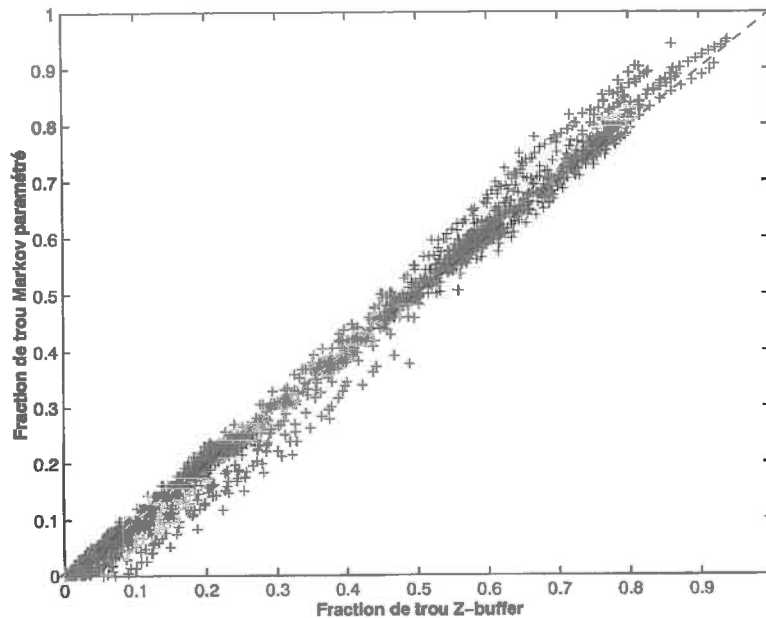


Figure 21 : Comparaison des fractions calculées par le modèle de Markov avec le modèle paramétrique de λ_0 à celles calculées par la méthode du Z-buffer

4.6 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a pour but de montrer et comprendre l'effet de l'agrégation des feuilles sur la fraction de trou dans le couvert. Le modèle d'agrégation dans le couvert CLAMP 'Clumped Architecture Model of Plant' a été développé afin de générer des maquettes numériques 3D de diverses architectures. Ainsi, en considérant les ordres de grandeur de quelques couverts réels, les maquettes 3D générées sont caractérisées par un schéma de semis aléatoire et différentes caractéristiques du couvert. La fraction de trou de ces maquettes a été ensuite calculée par la technique du Z-buffer pour plusieurs directions de visée.

La bonne cohérence observée, entre les fractions de trou Z-buffer de toutes les maquettes 3D représentant un milieu aléatoire et celles simulées par le modèle de Poisson valide d'une part la conception du modèle d'agrégation et d'autre part la technique de mesure de calcul de trou Z-buffer. Pour les maquettes simulant un milieu agrégé, le modèle de Poisson ne permet pas de décrire précisément la fraction de trou observée. Au contraire, pour de tels milieux, le modèle de Markov représente la fraction de trou beaucoup plus précisément. Celle-ci a été décrite d'une manière plutôt satisfaisante pour une épaisseur de couche assez fine égale à $\Delta L = 0.01$ qui peut éventuellement tendre vers une valeur infinitésimalement petite correspondant au modèle de Poisson 'étendu'. L'hypothèse de proportionnalité de l'épaisseur de la couche élémentaire avec la taille des feuilles ne s'est pas révélée intéressante par rapport au cas des petites épaisseurs ($\Delta L < 0.01$).

L'ajustement du modèle de Markov sur toutes les maquettes 3D générées a permis d'analyser la sensibilité du paramètre d'agrégation aux caractéristiques architecturales du modèle CLAMP. Ainsi, λ_0 affiche une grande variabilité en fonction de l'angle zénithal, la taille relative de la feuille, la densité relative des plantes et la distance feuille-tige. La sensibilité du paramètre d'agrégation à la distance feuille-tige est d'autant plus élevée que la taille des feuilles est petite et la densité des plantes est faible. Inversement, plus les feuilles sont grandes et le couvert dense, plus le paramètre d'agrégation tend vers la valeur de 1 caractéristique des milieux turbides. Sur la base de ces résultats une cartographie de la sensibilité de l'agrégation à la taille de la feuille et la densité des plantes est proposée sur la figure 7 du chapitre3. Ainsi, les forêts de pin se situent dans une zone à forte agrégation à cause de la taille réduite des aiguilles et de la faible densité de plantations. Des cultures comme le maïs et le blé présentent une faible agrégation pour des stades avancés de développement. Cependant, en début de cycle celles-ci affichent une agrégation moyenne. Contrairement, la luzerne est située dans une zone à moyenne agrégation tout au long de son cycle cultural.

La sensibilité de l'agrégation des feuilles à ces caractéristiques du couvert est plus marquée pour les visées au nadir. En effet, le paramètre d'agrégation a tendance à augmenter lorsqu'on s'éloigne de cette direction jusqu'à atteindre un palier. La valeur de l'angle zénithal qui correspond au début de ce palier tend à augmenter lorsqu'on réduit la densité relative des plantes. Cette sensibilité marquée pour les directions proches du nadir est importante dans le contexte de l'observation satellitaire, bien souvent réalisée dans cette configuration géométrique. Cette remarque confirme l'importance de la description de l'agrégation dans le transfert radiatif pour interpréter les données de télédétection. Nous avons observé aussi que l'effet de la forme et de l'inclinaison de la feuille sur l'agrégation des feuilles et notamment sur la fraction de trou n'a pas été significatif pour toutes les caractéristiques du couvert considérées.

Cette caractérisation qualitative de l'effet des caractéristiques du couvert sur le paramètre d'agrégation a permis de proposer une paramétrisation de ce facteur en fonction de l'angle zénithal de visée. Celle-ci, permettra de contribuer à une meilleure utilisation du modèle de Markov d'une part dans le processus d'inversion pour déduire le LAI à partir des mesures de fraction de trou [weiss2003] et d'autre part dans les modèles de transfert radiatif pour déterminer les variables biophysiques du couvert à partir des mesures satellitaires.

Dans la suite du manuscrit nous allons poursuivre notre étude sur l'agrégation des feuilles et ce en nous intéressant à son effet sur le transfert radiatif. Les flux de diffusions au sein du couvert contribuant à la formation de la réflectance du couvert seront examinés en fonction du coefficient de réflectance et de transmittance de la feuille et des caractéristiques du couvert.

CHAPITRE V

5 Validation de l'approche de modélisation de la fraction de trou

L'objectif de ce chapitre, est de tester le modèle paramétrique de Markov dont nous avons formulé le paramètre d'agrégation en fonction de l'angle de visée et de la distance relative tige-feuille. Nous allons utiliser des mesures de terrain de fraction de trou mesurées à partir de photos hémisphériques sur plusieurs types de couvert dans le cadre du projet VALERI (Validation of Land European Remote sensing Instrument).

Nous présenterons dans un premier temps le protocole de la mesure et la méthode de traitement des photos qui a été développée à l'INRA d'Avignon pour extraire la fraction de trou. Ensuite, nous présenterons l'ajustement du modèle de Poisson et du modèle paramétrique de Markov, et les résultats obtenus.

5.1 Méthodes et mesures de fraction de trous

5.1.1 Mesure de la fraction de trous par photographie hémisphérique

La photographie hémisphérique a été utilisée depuis de nombreuses années pour mesurer la fraction de trous. Elle a toutefois longtemps été limitée par la lourdeur de l'exploitation tant que le support argentique était utilisé. Avec l'avènement de la photographie numérique à haute résolution, cette technique connaît un regain d'intérêt pour caractériser la structure des couverts végétaux. On pourra trouver une synthèse bibliographique détaillée dans (Weiss, Baret et al. 2003) et (Jonckheere, Fleck et al. 2003). La photographie hémisphérique offre en effet l'avantage de mesurer simplement la fraction de trous avec un échantillonnage directionnel bien supérieur à celui associé aux capteurs monodirectionnels (TRAC, ...) ou même multidirectionnels (LAI2000). De plus, il permet de caractériser les couverts peu développés en réalisant les images par-dessus les couverts et en séparant le sol des parties vertes grâce à l'utilisation de la couleur. La difficulté majeure dans l'interprétation de la photographie hémisphérique réside dans la phase de classification à l'issue de laquelle la fraction de trou est calculée pour chaque pixel de manière binaire (trou ou végétation) ou continue (fraction de trou).

Nous avons utilisé le logiciel CAN-EYE développé par l'INRA d'Avignon et qui est basé sur des principes spécifiques. Le traitement est réalisé simultanément pour un ensemble d'images (jusqu'à 16) prises dans les mêmes conditions d'éclairage et sur le même type de couvert Figure 1. Ceci permet de réaliser la classification une seule fois au lieu de répéter l'opération pour chaque photographie individuelle. Après chargement des photographies, un masquage permet de ne pas prendre en compte des parties indésirables telles que les pieds du manipulateur, des taches de soleil difficiles à classer. Ensuite, le manipulateur classe de manière interactive les couleurs en les affectant dans la classe 'végétation' ou 'trou' (ciel ou sol suivant que les photographies sont prises par-dessous ou par dessus). L'opérateur peut également décider de ne pas classer des couleurs 'mixtes' pour lesquelles la fraction de trous sera déterminée automatiquement à partir de la distance dans l'espace des couleurs aux enveloppes des deux classes pures Figure 2. Quand la classification est terminée, le logiciel comptabilise la fraction de trous par secteur d'azimut et de zénith défini par l'utilisateur Figure 3.

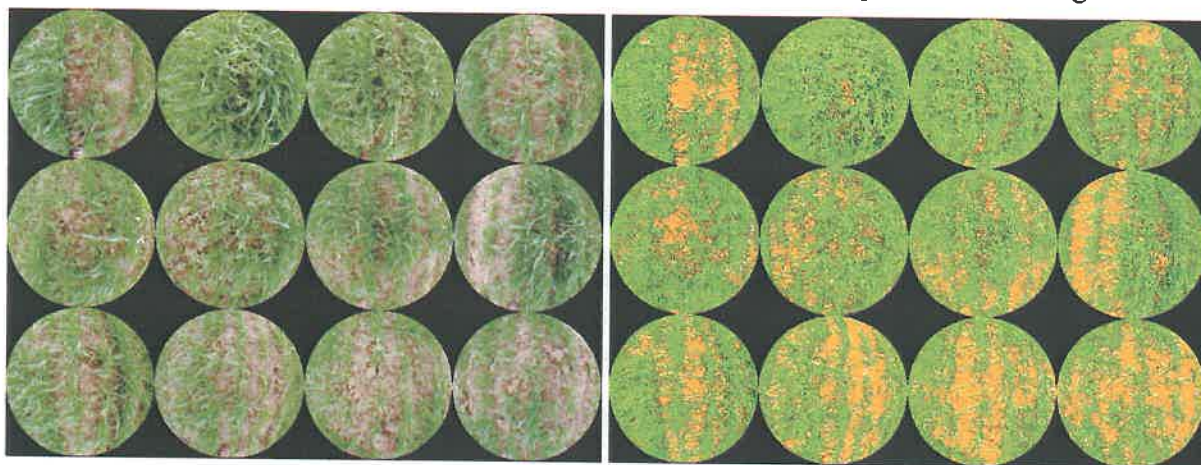


Figure 1. Images initiales (à gauche) et images classées en végétation (vert), sol (marron) et en gris les pixels 'mixtes'. Cas d'une parcelle de blé à Funduléa. Seuls les angles zénithaux inférieurs à 60° sont représentés.

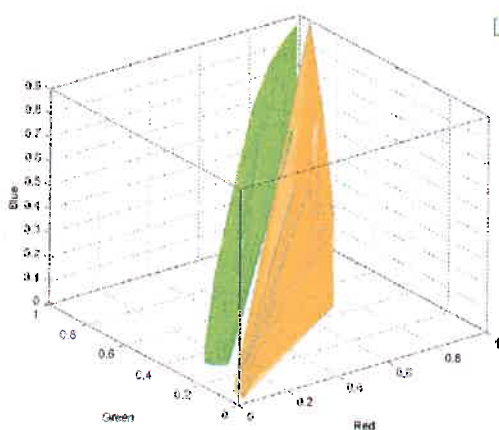


Figure 2. Les enveloppes convexes des couleurs correspondant à chaque classe (vert : végétation, marron sol). Les couleurs 'mixtes' sont associées à une fraction de trous proportionnelle à l'inverse de la distance entre la classe 'trou' (sol ou ciel) normalisée par la distance locale entre les deux enveloppes.

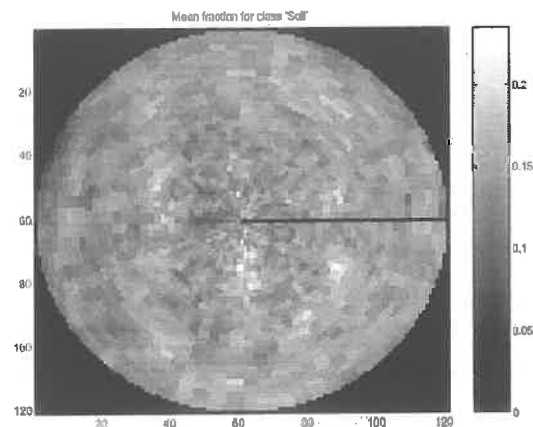


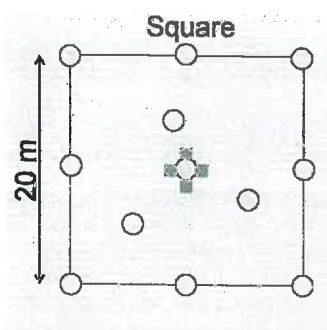
Figure 3. Exemple de distribution directionnelle de la fraction de trous. Représentation polaire pour le cas de la parcelle de blé de Funduléa représentée en Figure 1. Seuls les angles zénithaux inférieurs à 60° sont représentés.

Nous avons utilisé des images ayant des résolutions fortes (1536×2048), et limité la zone utile à des zéniths inférieurs à 60°. Au-delà de cette limite, la proportion de pixels ‘mixtes’ est trop importante pour pouvoir être réellement utilisée. Quand les photographies sont prises au dessus du couvert, la distance au couvert est ajustée en fonction de la taille des éléments : de 20 à 30 cm pour les couverts ayant les feuilles les plus petites, à 0.5-1.0 m pour les couverts ayant les feuilles les plus grandes. Pour les photographies prises par-dessous, la distance au sol est en général minimale. Dans le cas des forêts avec sous-bois, nous prenons systématiquement des photographies par-dessus pour caractériser le sous-bois, et des photographies prises par-dessous pour caractériser la strate arborée.

Les limites de la méthode résident dans la capacité à réaliser une bonne classification. La qualité de la photographie en termes de résolution et d'exposition est donc essentielle. En cas de photographies prises en conditions ensoleillée, la classification peut s'avérer délicate dans les ombres quand les photographies sont prises par-dessus. Dans ces mêmes conditions, la classification peut également être difficile dans la direction du soleil pour les photographies prises par-dessous.

5.1.2 Echantillonnage spatial

La surface que nous cherchons à décrire correspond à une surface d'environ 20×20m² correspondant à une zone relativement homogène. Pour ce faire, nous réalisons une douzaine de photographies hémisphériques selon le schéma présenté à la Figure 4. Cette méthodologie est le fruit d'une étude détaillée qui est décrite dans (Weiss, Baret et al. 2003) et (Baret, Weiss et al. 2003).

Figure 4. Echantillonnage spatial utilisé avec 12 photos pour représenter une surface de 20x20m²

		LAI estimé par CAN-EYE	hauteur (m)	distance entre rang (m)	distance entre plantes sur rang	distance entre plantes (m)	longueur feuille (m)	largeur feuille(m)	taille feuille	Densité relative (d*)	Taille relative (S*)
1	colza	2.1	0.3	0.3	0.05	0.12	0.12	0.12	0.14	6.00	0.45
2	chaumes	0.1	0.1	1	1	1	0.1	0.01	0.04	0.01	0.36
3	chaumes	0.2	0.1	1	1	1	0.1	0.01	0.04	0.01	0.36
4	tomates	1.7	0.4	1	0.25	0.5	0.07	0.04	0.06	0.64	0.15
5	luzerne	0.5	0.15	0.2	0.05	0.1	0.03	0.02	0.03	2.25	0.18
6	prairie	2	0.15	0.02	0.02	0.02	0.1	0.01	0.04	56.25	0.24
7	friche	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.01	0.04	2.25	0.12
8	toumesol	1.5	1	0.5	0.15	0.27	0.15	0.1	0.14	13.33	0.14
9	verger	1	3	4	4	4	0.1	0.1	0.11	0.56	0.04
10	toumesol	2.3	1	0.5	0.15	0.27	0.15	0.1	0.14	13.33	0.14
11	toumesol	2.7	1	0.5	0.15	0.27	0.15	0.1	0.14	13.33	0.14
12	luzerne	2.8	0.4	0.2	0.05	0.1	0.03	0.02	0.03	16.00	0.07
13	prairie	3.7	0.15	0.02	0.02	0.02	0.1	0.01	0.04	56.25	0.24
14	troncs	1.2	20	5	5	5	10	0.1	1.13	16.00	0.06
15	pois	2	0.15	0.15	0.05	0.09	0.03	0.02	0.03	3.00	0.18
16	blé	2.3	0.3	0.15	0.04	0.08	0.1	0.02	0.05	15.00	0.17
17	mais	0.1	0.1	0.75	0.2	0.39	0.1	0.03	0.06	0.07	0.62
18	mais	3.1	2	0.75	0.15	0.34	0.4	0.1	0.23	35.56	0.11
19	ble	1.4	0.3	0.15	0.04	0.08	0.1	0.02	0.05	15.00	0.17
20	soja	0.2	0.05	0.5	0.2	0.32	0.05	0.03	0.04	0.03	0.87

Tableau 1. Caractéristiques principales des couverts considérés pour la validation

5.1.3 Les couverts considérés

Afin d'obtenir une gamme suffisamment large de types de couvert représentant une large variabilité de types de structure, nous avons extrait de la bases de données VALERI (www.avignon.inra.fr/valeri) un échantillon représentatif. Le Tableau 1 et la Figure 5 montre les principales caractéristiques architecturales telles qu'elles ont été appréciées visuellement lors de la prise de photographies hémisphériques. La Figure 6 montre la distribution des densités relatives et taille de feuilles des couverts considérés. Notons que nous n'avons que très peu de couverts s'écartant notablement de la zone 'milieu homogène' les couverts considérés étant principalement des cultures.

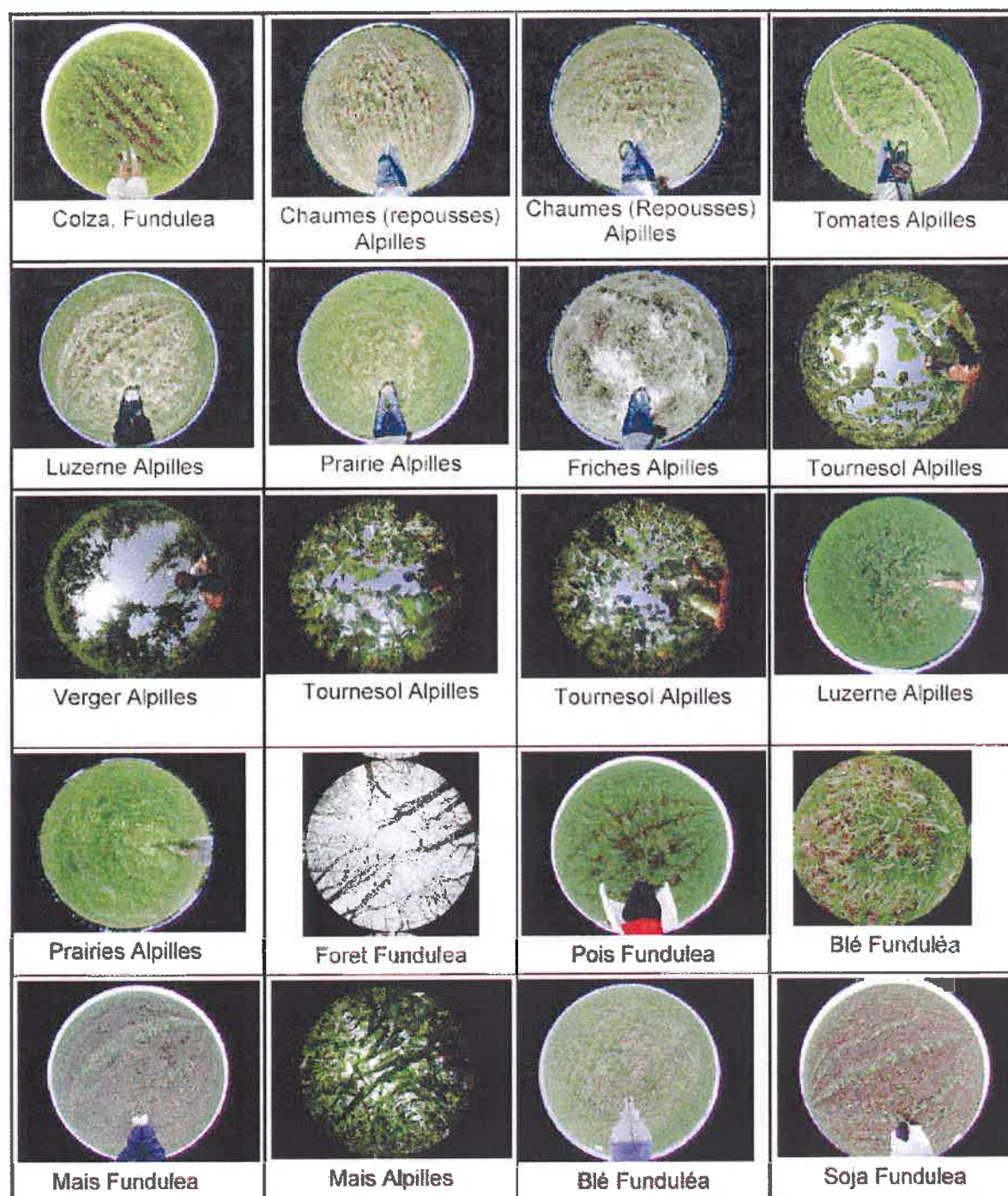


Figure 5 : Les 20 types de couverts considérés dans cette phase de validation

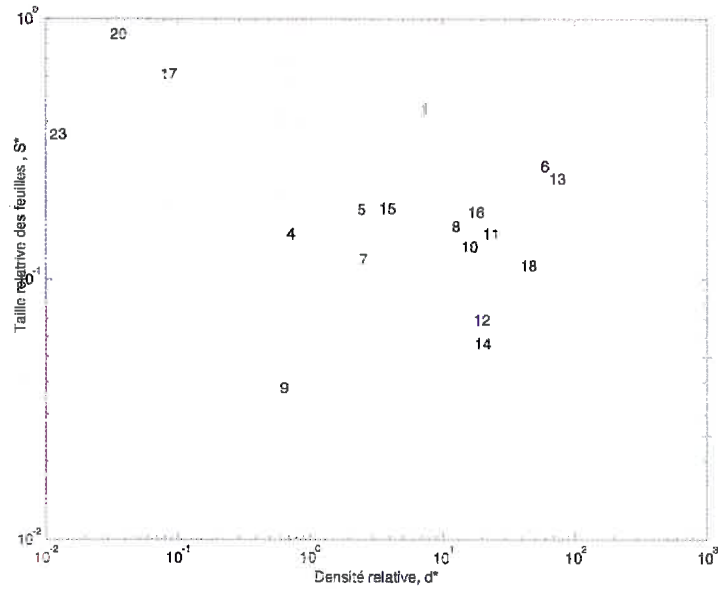


Figure 6. Distribution des densité relatives et taille relative des feuilles des couverts considérés pour la validation. Les numéros correspondent à ceux du Tableau 1.

5.2 Résultats

Nous allons dans un premier temps ajuster le modèle de poisson sur les 20 couverts considérés. Nous ajusterons ensuite le modèle de Markov et comparerons les performances respectives de ces deux modèles en terme de précision de la fraction de trous. Enfin, nous discuterons des résultats à la lumière de la sensibilité de l'ajustement à la variable principale d'agrégation : χ .

5.2.1 Ajustement du modèle de Poisson

Pour commencer nous avons procédé à un ajustement des variables d'entrée (LAI, ALA) du modèle de Poisson. Ainsi, nous nous sommes basés sur les mesures de fraction de trous effectuées par les photos hémisphériques et traitées par le logiciel CAN-EYE présenté précédemment. Une technique d'optimisation non linéaire basée sur un algorithme de simplex et sur la fonction de mérite $F_{m,t}$ (ci-dessous) a été utilisée pour ajuster les variables du couvert. Celle-ci a été pondérée par l'erreur sur la mesure de la fraction de trou et une information *a priori* a été introduite afin de borner les variations du ALA.

$$F_{m,t} = \sum_{t=1}^N \left[\frac{P_0^{Poisson}(\theta) - P_0^{Photos}(\theta)}{\sigma_{P_0}} \right]^2 + \left(\frac{ALA - 60}{15} \right)^2$$

Le critère d'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) a été utilisé pour évaluer les performances de ces ajustements:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [P_0^{Poisson}(\theta) - P_0^{Photos}(\theta)]^2}$$

Les résultats de l'ajustement du modèle de Poisson sont illustrées sur les Figure 7, Figure 8, et Figure 9 pour tous les types de couvert considérés. Les fractions de trous déduites des mesures par

photos hémisphériques qui correspondent à la moyenne effectuée sur le nombre d'images sont illustrées avec des barres d'erreur qui représentent leurs écart types calculées sur les moyennes azimutales entre les 12 photos. Globalement on note que les fractions de trou estimées par le modèle Poisson après ajustement du LAI et ALA se rapprochent d'une manière satisfaisante des mesures avec des erreurs quadratiques moyennes qui varient entre 0.0025 et 0.08. La gamme de variation des indices foliaires et de l'angles d'inclinaison moyen sont respectivement de [0.09-4] et [20-77]

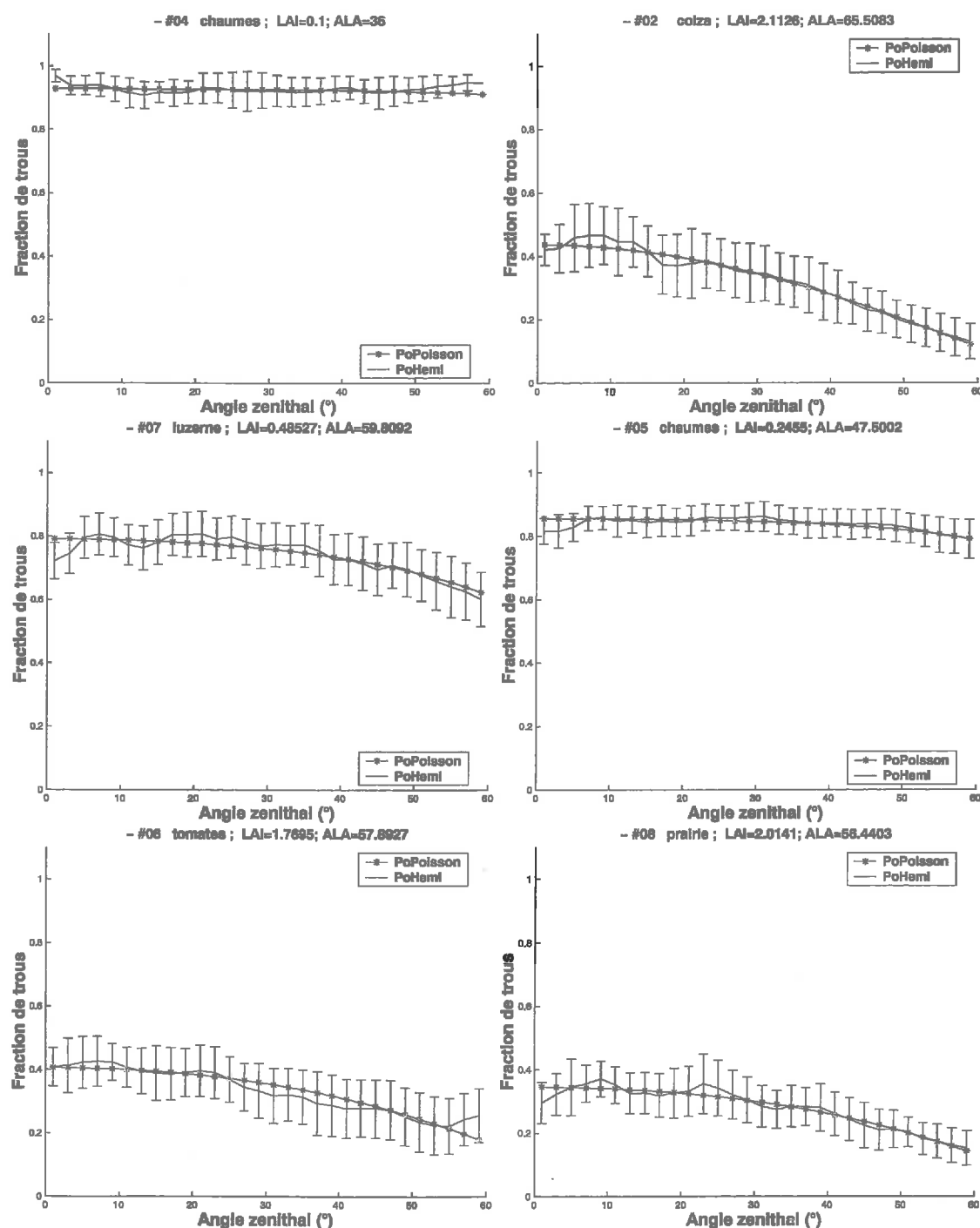


Figure 7 : variation directionnelle de la fraction de trou déduite à partir des mesures par photos hémisphériques et de celles estimées par le modèle de Poisson après ajustement

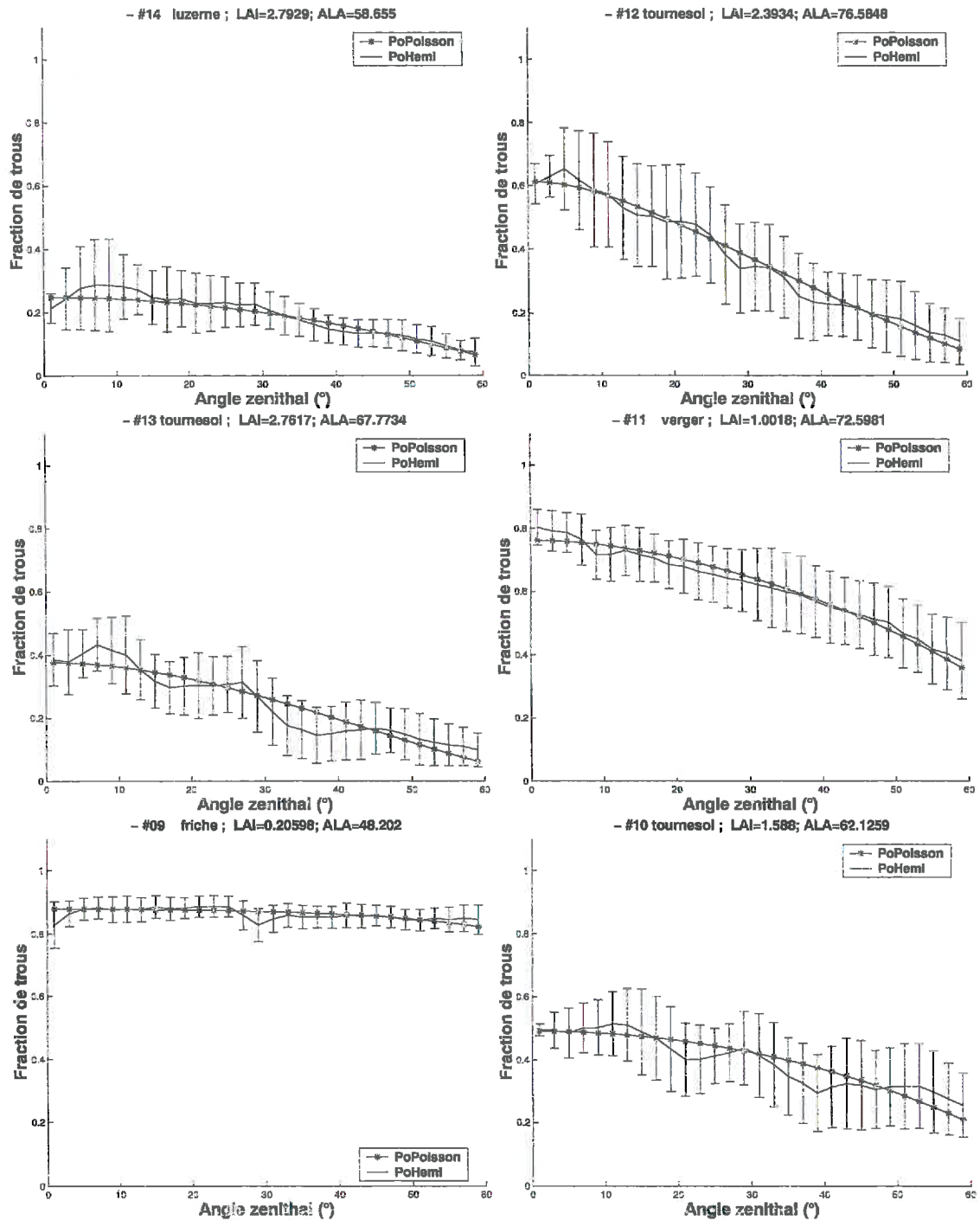


Figure 8 : variation directionnelle de la fraction de trou déduite à partir des mesures par photos hémisphériques et de celles estimées par le modèle de Poisson après ajustement

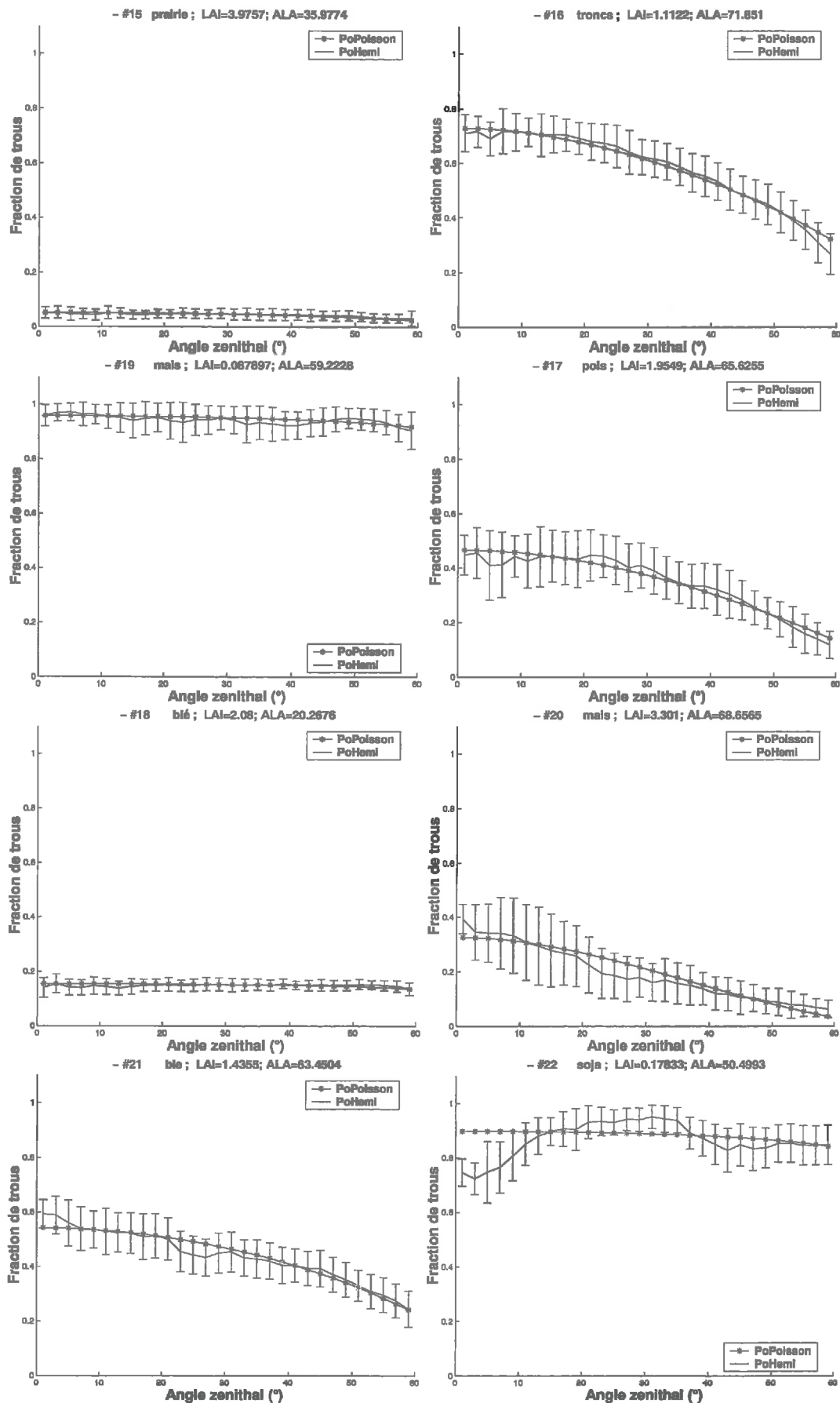


Figure 9 : variation directionnelle de la fraction de trou déduite à partir des mesures par photos hémisphériques et de celles estimées par le modèle de Poisson après ajustement

5.2.2 Ajustement du modèle paramétrique de Markov

Le modèle de Markov comporte le paramètre d'agrégation λ_0 en plus des variables LAI et ALA. Nous avons proposé au chapitre 4 une paramétrisation de la variation directionnelle de λ_0 en fonction de la distance relative tige-feuille χ , les autres variables de structure étant fixées (d^* , S^*) ou négligées (b/h). L'ajustement du modèle de Markov sera réalisé sous condition de connaissance des variables (d^* , S^*), en estimant simultanément le LAI, ALA et χ . Nous nous sommes donc servi des valeurs de (d^* , S^*) pour chaque type de couvert tels que présenté au Tableau 1. Toutefois, notre modèle paramétrique $\lambda_0(\chi, \theta)$ n'a été ajusté que sur des valeurs particulières de d^* et S^* utilisées pour générer les maquettes 3D 'CLAMP'. Nous avons donc affecté à chacun des 20 couverts les valeurs de (d^* , S^*) les plus proches des valeurs utilisées pour ajuster le modèle paramétriques $\lambda_0(\chi, \theta)$. La Figure 10 montre les valeurs utilisées dans l'ajustement du modèle de Markov pour chaque couvert.

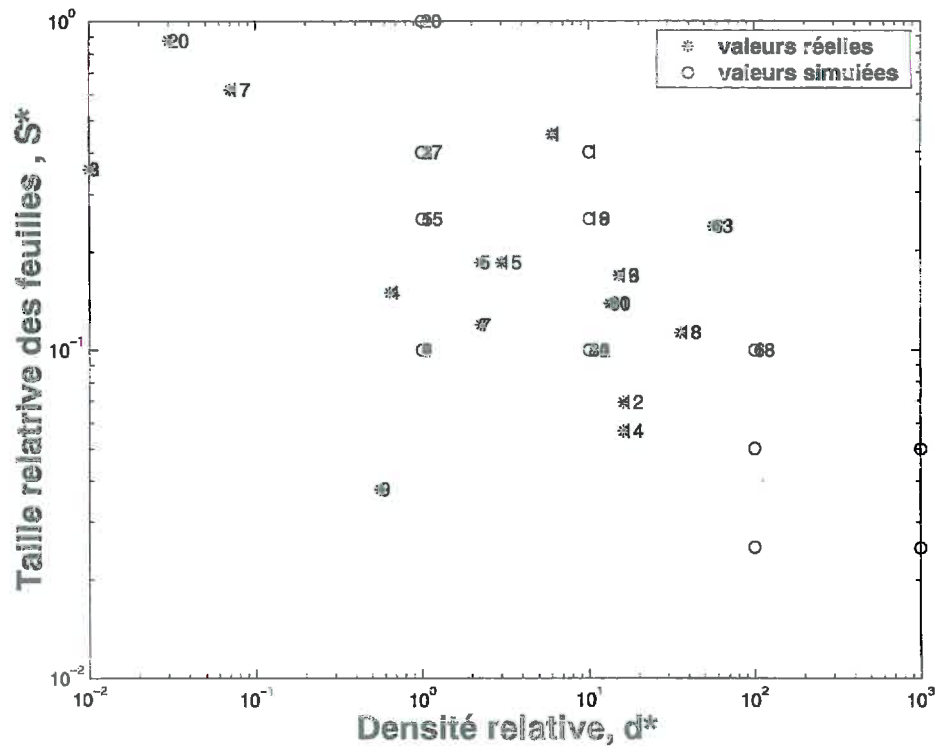


Figure 10. affectation des valeurs des caractéristiques (d^* , S^*) des couverts considérés aux valeurs les plus proches utilisées pour ajuster le modèle paramétrique $\lambda_0(\chi, \theta)$.

Nous avons utilisé la même technique d'optimisation non linéaire que précédemment, mais en considérant la fonction de mérite F_{m2} dans laquelle nous avons introduit des contraintes afin de limiter les variations du ALA et χ autour de valeurs probables. De plus, le paramètre χ a subi une transformation de variable pour le forcer à rester dans l'intervalle [0 1].

$$F_{m2} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{\theta}^{Markov}(\theta) - P_{\theta}^{photos}(\theta)}{\sigma_{P_{\theta}}} \right]^2 + \left(\frac{ALA - 60}{15} \right)^2 + \left(\frac{\chi - 1}{0.5} \right)^2$$

La Figure 11 présente quelques exemples des résultats d'ajustement obtenus à partir des mesures des fractions de trou des couverts listés précédemment. Dans la majorité des cas la distance relative

feuille-tige χ ajustée s'approche de la valeur 1. Ceci indiquerait que les couverts étudiés seraient plutôt de type milieu homogène.

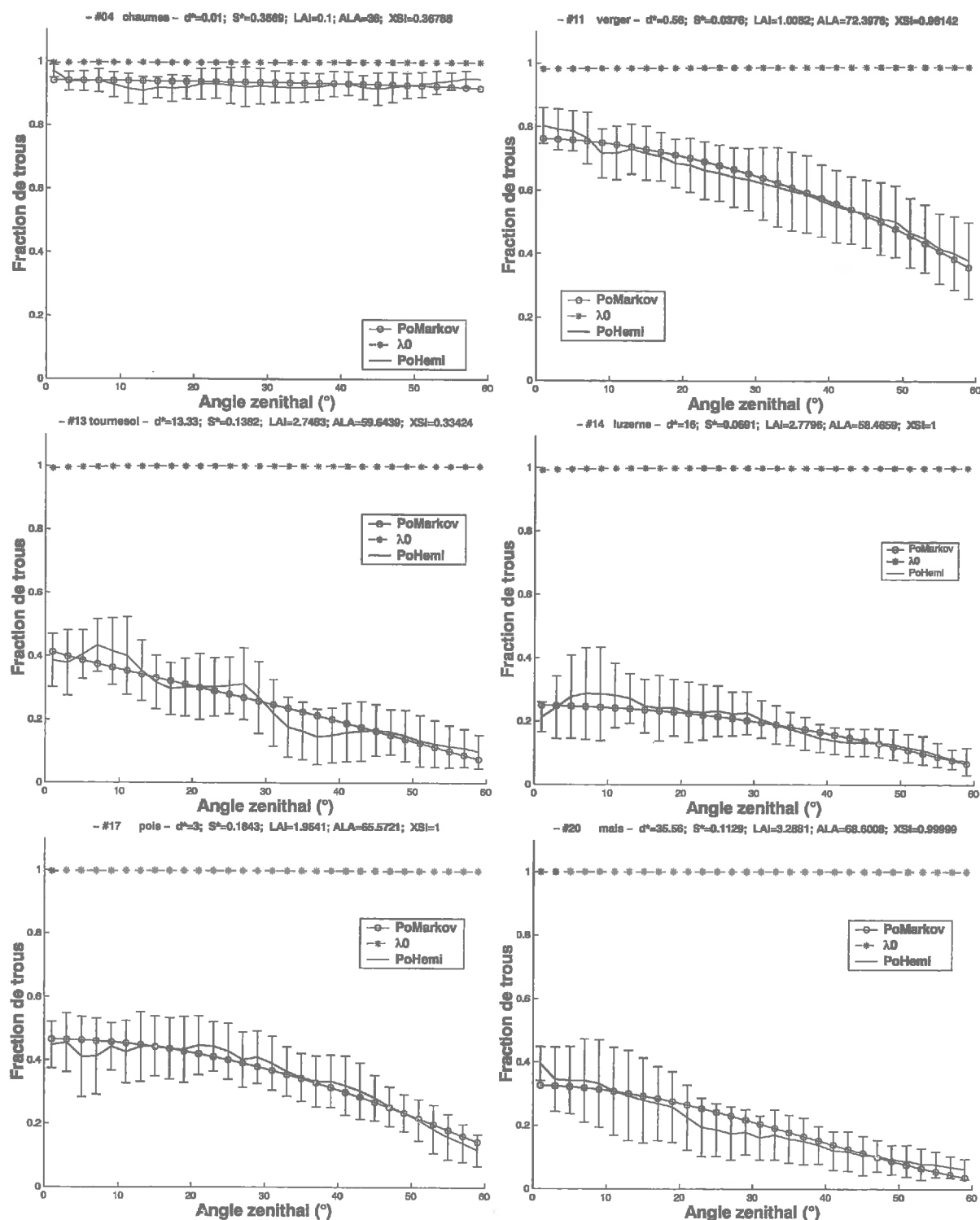


Figure 11 : variations directionnelles du paramètre d'agrégation et des fractions de trou déduites après ajustement du modèle de Markov à partir des mesures par photos hémisphériques.

Des valeurs du χ plus faibles ont été néanmoins obtenues pour le chaume (#04) et le tournesol (#13). Notons que le changement de la fonction de mérite en imposant une valeur a priori différente de 1.0 fournit des résultats relativement proches de ceux que nous présentons. Cette contrainte n'explique donc pas les comportements obtenus. La comparaison des indices foliaires ajustés par le modèle paramétrique à ceux estimés à partir de l'ajustement du modèle de Poisson montre des résultats similaires. Toutefois, une légère différence sur les estimations de l'angle d'inclinaison moyen est notée pour certains couverts (cas du tournesol #13). Il y a donc des possibilités de compensation entre le paramètre χ et l'angle d'inclinaison des feuilles. La Figure 12 confirme la similitude des deux modèles sur l'ensemble des ajustements réalisés sur les 20 couverts.

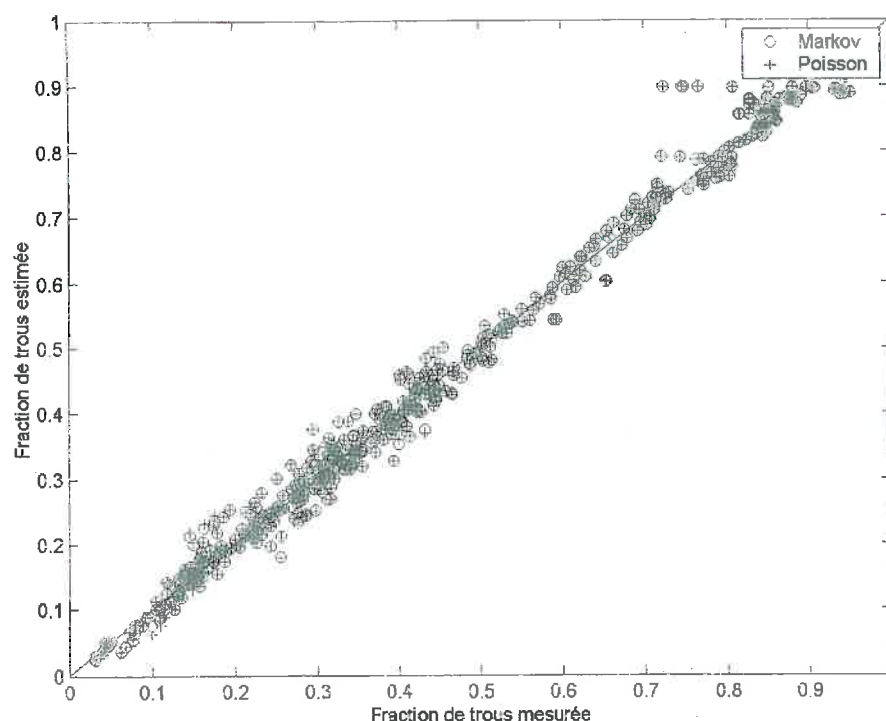


Figure 12 : comparaison des fractions de trous estimées par les deux modèles (Poisson et Markov) après ajustement et des fractions de trous mesurées à partir des photos hémisphériques.

5.2.3 Sensibilité des couverts à la distance relative feuille-tige

Nous avons évalué l'effet de la distance relative feuille-tige sur le calcul de la fraction de trou de tous les couverts étudiés pour les valeurs précédemment ajustées de LAI et de ALA, en faisant varier $\chi=[0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1]$. Parmi les couverts considérés, une bonne proportion montre une faible sensibilité à l'agrégation au travers de la variation de la distance relative tige-feuille : la prairie, le blé à un stade moyen de développement, le maïs, le colza, le chaume, la luzerne jeune et la friche. À l'inverse, des couverts comme la tomate, le tournesol, le pois, le verger, la forêt et la luzerne adulte, augmenteraient leurs fractions de trou dans des directions autour du nadir d'environ 30% au minimum

s'ils étaient fortement agrégés ($\chi=0$) (Figure 13). Ces couverts correspondent à des indices foliaires toujours supérieurs à 1.0 et à un nombre de feuilles par plantes supérieur à 10.

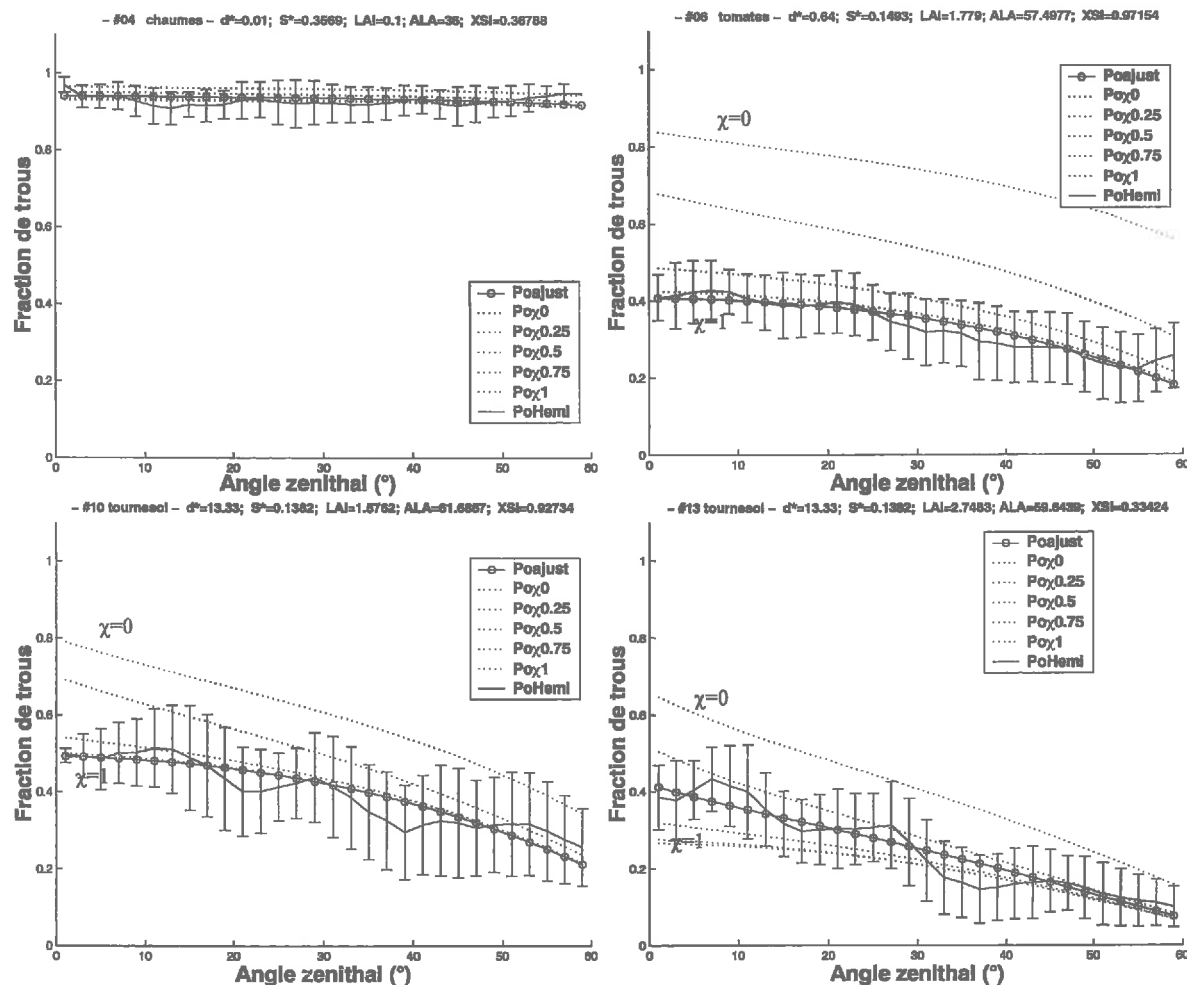


Figure 13 : Exemple de sensibilité de la fraction de trou des couverts étudiées à la distance relative feuille tige pour des valeurs de LAI et ALA identiques à celles estimées par le modèle paramétrique Markov.

5.3 Conclusion

Cette étude montre que pour de très nombreuses cultures, le modèle de Poisson permet de bien représenter la variation directionnelle de la fraction de trous mesurée avec des photographies hémisphériques. Le modèle de Markov appliqué aux mêmes couverts fournit généralement une valeur du paramètre d'agrégation très proche de l'unité, conforme avec l'hypothèse de milieu homogène. Ces résultats quelque peu décevants mériteraient sans doute d'être confortés par des mesures sur d'autres couverts présentant un caractère plus agrégé, que nous n'avons pu réaliser. L'étude de sensibilité réalisée à partir des photographies hémisphériques montre que les conditions à réunir pour avoir une sensibilité suffisante à l'agrégation correspondent à des LAI supérieurs à 1 et à un nombre de feuille par plante supérieur à 10.

Toutefois, nous devons reconnaître que nos estimations de LAI et autres caractéristiques de structure n'ont pas été comparées à des mesures directes de LAI. Il est en effet possible que pour les couverts 'sensibles' à l'agrégation, le jeu de paramètres estimés par inversion du modèle de Markov ne corresponde pas forcément à la vraie solution compte tenu des possibles compensations entre paramètres, par exemple le ALA et le paramètre χ . L'utilisation d'autres caractéristiques que la moyenne des fractions de trous mériterait d'être analysée plus profondément. En particulier, l'exploitation de l'information sur la distribution de la taille des trous permettrait de dissocier de manière plus sûre les variables associées à l'agrégation telles que (χ, S^*, d^*) . Les photographies hémisphériques doivent permettre de fournir cette information moyennant un traitement spécifique.

CHAPITRE VI

6 Vers le calcul du transfert radiatif

Dans ce chapitre nous proposons d'adapter une méthode spécifique de calcul du transfert radiatif à nos maquettes. Rappelons que le modèle final devra être relativement peu gourmand en temps et ressources informatiques pour pouvoir être utilisé de manière opérationnelle.

L'approche adoptée dans ce travail sera d'abord présentée. Nous appliquerons dans un premier temps l'approche dans le cas simple du milieu turbide pour lequel nous disposons d'un modèle de transfert radiatif. Nous décrirons ensuite, la manière dont nous avons transposé la méthode précédente au modèle de lancer de rayons PARCINOPY qui sera utilisé pour calculer les différents termes de diffusion sur nos maquettes de couvert agrégés. Enfin, une analyse de sensibilité des composantes de diffusions aux propriétés optiques des feuilles et des variables de structure du couvert sera réalisée et un modèle paramétrique de la réflectance bidirectionnelle du couvert en fonction des coefficients de réflectance et de transmittance des feuilles ébauché.

6.1 Approche

Notre objectif est de déterminer la réflectance bidirectionnelle $R(\Omega_s, \Omega_v)$ de nos couverts génériques agrégés en fonction de leurs caractéristiques structurales et de leurs propriétés optiques considérées. Pour cela, nous proposons de développer un modèle paramétrique qui, en plus des variables utilisées classiquement pour les milieux homogènes (LAI , ALA , S^* , ρ_s , ρ_f , τ_f), intègre les variables de structure supplémentaires considérées dans notre modèle d'agrégation (d^* , χ , b/h). Dans cette approche, nous allons tenter de découpler l'effet de la structure proprement dite, de l'effet des propriétés optiques du sol ou des feuilles. De cette manière, il sera plus facile de calculer la réflectance du couvert pour différentes longueurs d'ondes ou différents jeux de propriétés optiques des feuilles pour une même structure du couvert. Cette approche a déjà été suggérée par (Baret, Vanderbilt et al. 1994) sur des bases expérimentales. L'auteur a relié par un modèle empirique, la sensibilité de la réflectance du couvert à la réflectance des feuilles. Toutefois, les hypothèses utilisées, en particulier celles sur la constance de la réflectance du sol avec la longueur d'onde ne sont vérifiées que dans des cas bien particuliers.

(Panverof, Knyazikhin et al. 2000), s'est appuyé sur des analyses empiriques et théoriques pour exprimer dans le cas d'un sol sous jacent noir, l'absorptance et la transmittance hémisphériques du couvert

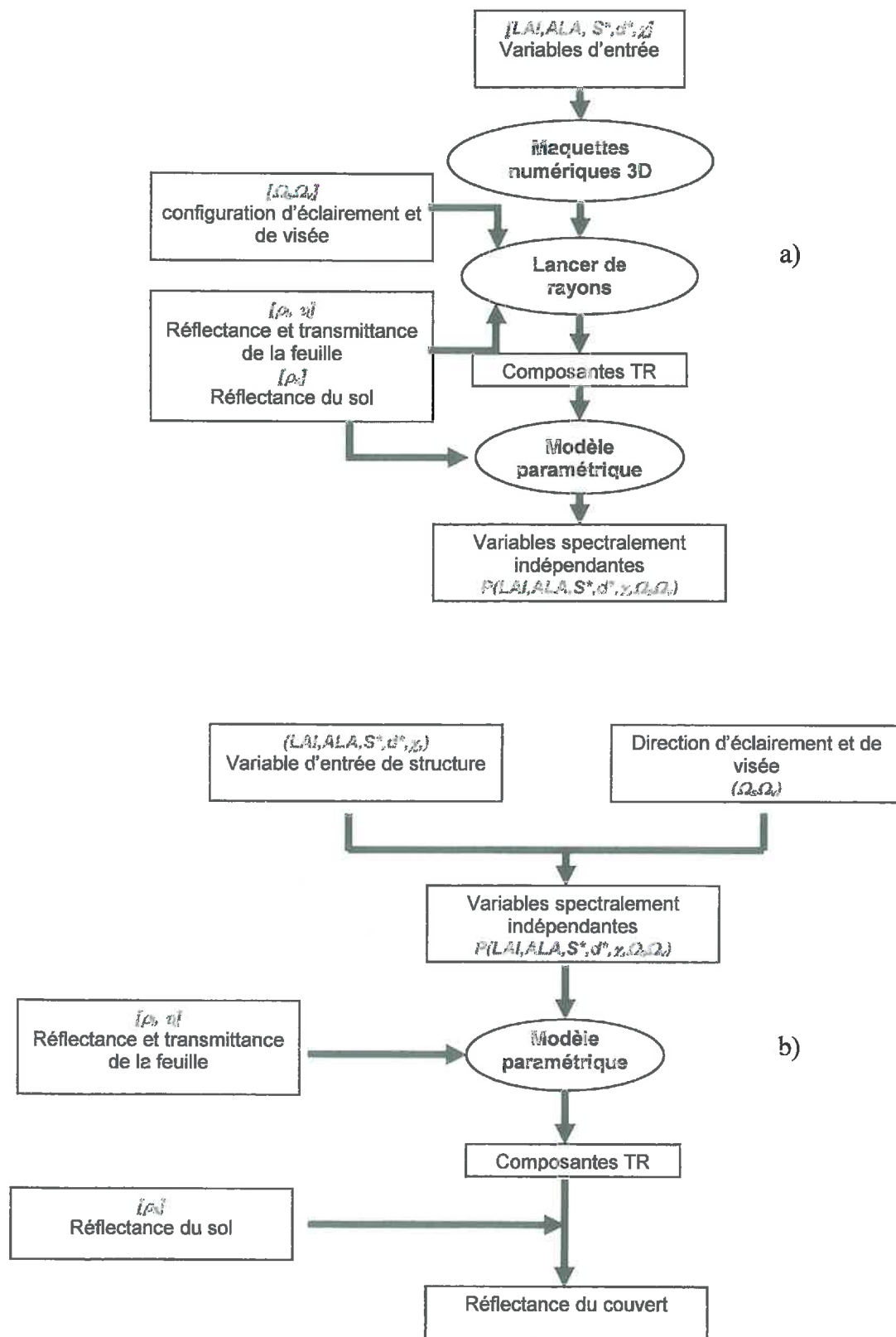


Figure 1 : Schéma illustrant l'approche utilisée pour prendre en compte de l'agrégation des feuilles dans le transfert radiatif ; Les étapes a et b sont explicitées dans le texte.

en fonction des propriétés optiques des feuilles et deux variables de structure spectralement indépendantes. Pour l'absorptance (transmittance) du couvert la variable de structure est déterminée par la capacité du couvert à intercepter (transmettre) le rayonnement incident sous deux situations extrêmes :

- les feuilles absorbent tout le rayonnement (cas du visible) ;
- les feuilles réfléchissent ou transmettent tout le rayonnement incident (cas du PIR).

La capacité d'interception (transmission) est déterminée par le rapport des interactions subies par les feuilles complètement absorbantes sur celles subies par les feuilles diffusantes. (Wang Y, Buermann W et al. 2003) a utilisé ensuite cette approche pour paramétrer la réponse spectrale du couvert. Dans sa paramétrisation il a exprimé les réflectance et transmittance hémisphériques du couvert en prenant en compte en plus l'interaction entre la végétation et le sol sous jacent. Cette approche nous apparaît très intéressante, bien que théoriquement limitée au cas des flux hémisphériques. Nous proposons de l'adapter au cas bidirectionnel en nous basant sur une description tout de même simplifiée du transfert radiatif : l'approche à 4 flux. Elle permet d'identifier un nombre réduit de termes d'extinction (fraction de trous) et de diffusion décrivant le devenir de flux directionnels ou hémisphériques. Il est ainsi aisé, comme nous le verrons de décrire analytiquement les interactions entre la végétation et le sol. Les termes de diffusion dépendront donc uniquement des caractéristiques de structure du couvert, de la géométrie des flux considérés, ainsi que des propriétés optiques des feuilles. Les termes de diffusion peuvent être quantifiés à partir de simulations des flux réalisés sur nos maquettes avec un modèle de lancer de rayons. Nous proposons donc de paramétrer la variation spectrale de ces termes à partir de la variation spectrale des propriétés optiques des feuilles. Un deuxième niveau de paramétrisation devrait permettre de décrire la variation avec les caractéristiques structurales du couvert et les directions des flux. La Figure 1 présente l'approche que nous avons adoptée qui consiste donc en deux étapes :

- Calcul des termes d'extinction et de diffusion à partir de simulations réalisées par le modèle de lancer de rayon PARCINOPY. (a).
- Paramétrisation de ces termes en fonction des propriétés spectrales des feuilles. Les paramètres ainsi obtenus sont donc des grandeurs spectralement invariantes qui ne dépendront que de la structure du couvert et de la géométrie d'éclairement et de visée (b). Nous n'avons malheureusement pas eu les moyens de réaliser la paramétrisation de deuxième niveau pour décrire la variation avec la structure du couvert et les directions considérées.

De cette manière, il sera possible de calculer la réflectance bidirectionnelle de couverts correspondant à notre description générique de l'agrégation d'une manière très rapide.

6.2 Termes d'extinctions et de diffusions dans l'approche à 4 flux

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, le transfert radiatif dans le cas où l'on considère 4 flux peut être calculé analytiquement à partir du système d'équations différentielles suivant (Verhoef 1984):

$$\begin{aligned}\frac{dE_-}{dz} &= aE_- - \sigma \cdot E_+ - s \cdot E_s \\ \frac{dE_+}{dz} &= -a \cdot E_+ + \sigma \cdot E_- + s' \cdot E_s \\ \frac{dE_s}{dz} &= k \cdot E_s \\ \frac{dE_o}{dz} &= uE_+ + vE_- + wE_s - KE_o\end{aligned}$$

où :

- z est la profondeur au sein du couvert
- E_- et E_+ sont respectivement les flux diffus descendant et ascendant
- E_s et E_o sont respectivement le flux incident direct et le flux ascendant selon la direction de visée
- a est le coefficient d'extinction (absorption et diffusion en arrière) des flux diffus.
- σ est le coefficient de diffusion arrière des flux diffus,
- s, s' sont les coefficients de diffusions du flux incident respectivement vers l'avant et vers l'arrière
- k, K sont respectivement les coefficients d'extinction des flux E_s et E_o .
- u, v, w , sont respectivement les coefficients de diffusion des flux E_+ (en avant), E_- (en arrière) et E_s (en arrière) selon la direction de visée.

La résolution du système d'équations différentielles présenté ci-dessus a permis d'exprimer les flux sortant E_{out} d'une couche de végétation homogène en fonction des flux entrants E_{in} , en haut (h) et en bas (b) du couvert, au moyen de la matrice de diffusions de la couche Z (Verhoef 1985).

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} E_s(b) \\ E_-(b) \\ E_+(h) \\ E_o(h) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tau_{ss} & 0 & 0 & 0 \\ \tau_{sd} & \tau_{dd} & \rho_{dd} & 0 \\ \rho_{sd} & \rho_{dd} & \tau_{dd} & 0 \\ \rho_{so} & \rho_{do} & \tau_{do} & \tau_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s(h) \\ E_-(h) \\ E_+(b) \\ E_o(b) \end{bmatrix} \\ E_{out} & \quad Z \quad E_{in}\end{aligned}$$

La Figure 2 illustre les interactions subies par les flux entrant et quittant une couche homogène de végétation située au dessus d'une surface non lambertienne qui représente le sol. Les termes de la matrice de diffusion Z sont les réflectances et les transmittances au sein de la couche. Les indices s, d et o font référence aux types de flux mis en jeu :

- s pour le flux solaire E_s ,
- d pour les flux diffus E_+ et E_- , et
- o pour le flux dans la direction d'observation E_o .

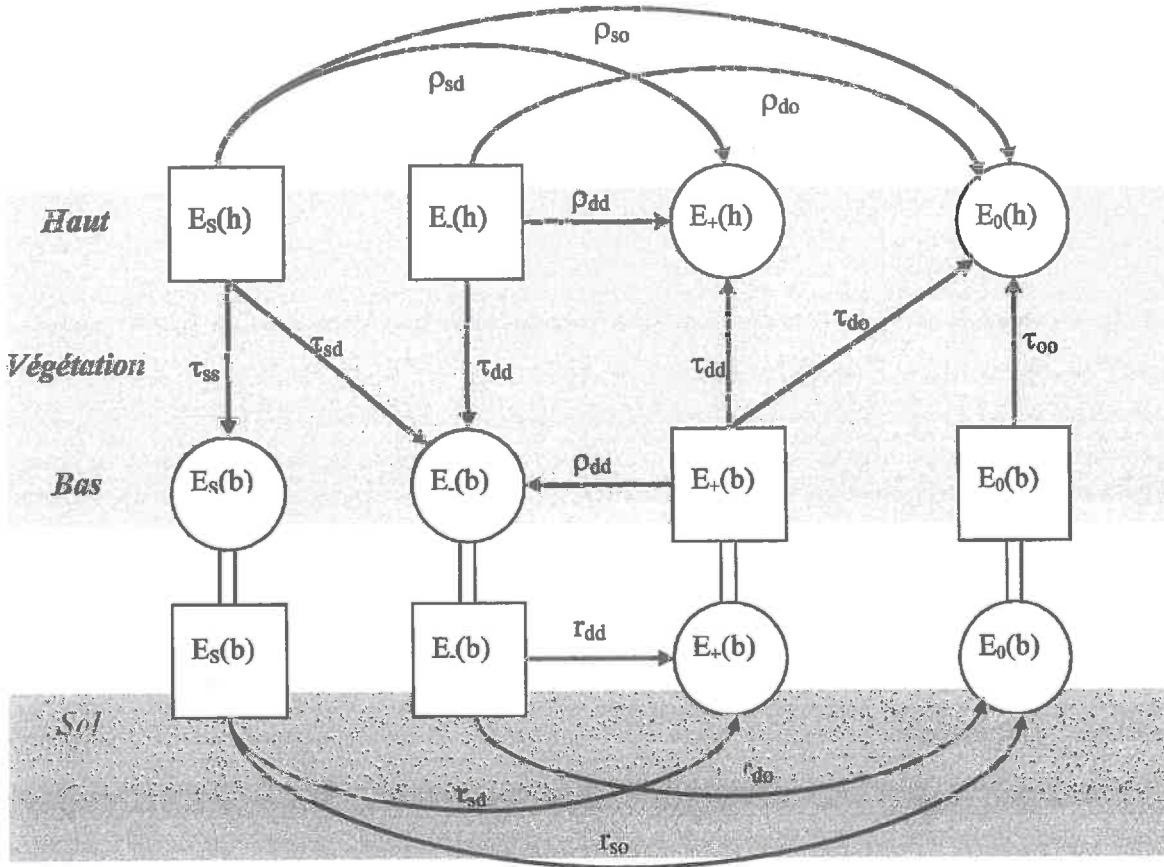


Figure 2 Interactions des différents flux ascendants et descendants, direct et diffus au sein d'une couche foliaire homogène au dessus d'un sol non lambertien.

La prise en compte de l'interaction avec le sol est réalisée par l'intermédiaire de sa matrice de réflectance R_s qui relie les flux ascendants E^u et descendants E^d en bas du couvert.

$$\begin{bmatrix} E_+(b) \\ E_o(b) \\ \mathbf{E}^u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{sd} & r_{dd} \\ r_{so} & r_{do} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s(b) \\ E_-(b) \\ \mathbf{E}^d \end{bmatrix}$$

La réflectance du couvert défini par le système composé d'une couche de végétation et du sol sous-jacent est calculée en divisant les flux ascendants du couvert par les flux descendants incidents en haut du couvert. On la calcule en combinant les deux équations précédentes, et la matrice de réflectance du système peut donc s'exprimer par:

$$R_t^* = \begin{bmatrix} r_{sd}^* & r_{dd}^* \\ r_{so}^* & r_{do}^* \end{bmatrix}$$

où r_{dd}^* est la réflectance hémisphérique pour un flux hémisphérique incident, r_{sd}^* la réflectance hémisphérique pour un flux directionnel incident, r_{do}^* la réflectance directe pour un flux hémisphérique incident et r_{so}^* est la réflectance bidirectionnelle.

Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur la réflectance bidirectionnelle. En effet, les autres termes peuvent se déduire par intégration des directions d'incidence ou de visée. De plus, la réflectance bidirectionnelle est celle à laquelle nous avons généralement accès par télédétection après correction atmosphérique. L'application des formes matricielles précédentes au calcul de ce terme bidirectionnel donne son expression analytique complète :

$$r_{so}^* = \rho_{so} + \tau_{ss} r_{so} \tau_{oo} + \frac{(\tau_{ss} r_{sd} + \tau_{sd} r_{dd}) \tau_{do} + (\tau_{sd} + \tau_{ss} r_{sd} \rho_{dd}) r_{do} \tau_{oo}}{1 - r_{dd} \rho_{dd}}$$

Notons que les termes d'extinction (τ_{ss} , τ_{oo}) correspondent respectivement aux fractions de trous suivant les directions d'éclairement et de visée que nous avons étudiées précédemment. L'étude menée dans ce chapitre ne portera que sur les termes de diffusions τ_{sd} , τ_{do} , ρ_{so} , ρ_{dd} .

6.3 Sensibilité des termes de diffusion aux propriétés optiques et à l'architecture

Les termes d'extinction et de diffusion figurant dans l'expression de la réflectance bidirectionnelle seront calculés pour l'ensemble des maquettes 3D générées précédemment. Ce calcul permettra ainsi d'évaluer la sensibilité de ces termes aux variables considérées dans le modèle d'agrégation : l'indice foliaire 'LAI', la taille de la feuille 'S*', la forme de la feuille 'b/h', la densité relative 'd*', l'angle moyen d'inclinaison des feuilles 'ALA' et la distance feuille-tige ' χ '.

Une étape préliminaire permettra d'évaluer la dépendance des termes de diffusions aux propriétés optiques des feuilles dans le cas d'un modèle turbide, basé sur l'approche à 4 flux. Le modèle SAIL sera alors utilisé et permettra aussi d'évaluer l'effet de ses variables d'entrée décrivant la structure du couvert (S*, LAI, ALA). L'utilisation d'un tel modèle permettra d'explorer une base d'échantillonnage assez large.

La sensibilité des termes de diffusions sera enfin examinée dans le cas de notre modèle d'agrégation. Le calcul des termes de diffusion à partir des maquettes 3D sera effectué à l'aide d'un modèle de lancer de rayon 'PARCINOPY' développé par Michael Chelle à l'INRA de Grignon. En raison des lourdeurs des calculs associés au lancer de rayon on a été amené à considérer un espace d'échantillonnage réduit.

6.3.1 Etude dans le cas turbide approximé par l'approche à 4 flux.

Une base de simulation des réflectances et des transmittances des feuilles a été générée à l'aide du modèle des propriétés spectrales PROSPECT (Jacquemoud and Baret 1990). L'indice de réfraction a été supposé spectralement indépendant et a été fixé à une valeur moyenne égale à 1.43. Le coefficient d'absorption K de la feuille a été échantillonné entre 0 et 10 et l'indice N décrivant la structure du mésophylle de la feuille entre 1 et 4. Ces valeurs correspondent à la gamme de variation maximale rencontrée. Les propriétés spectrales simulées sont illustrées sur la Figure 3. Ainsi, nous nous servirons de deux variables importantes caractérisant les propriétés des feuilles :

- l'albédo de simple diffusion qui est la somme de la réflectance et de la transmittance de la feuille
- la différence entre la réflectance et la transmittance qui permet, pour un albédo de simple diffusion donné d'exprimer les variations dépendant de la structure et de l'absorption dans la feuille.

Ces propriétés ont été ensuite utilisées pour calculer la réflectance bidirectionnelle et les termes de diffusion et d'interception à l'aide du modèle SAIL. Le sol a été considéré complètement réfléchissant et son coefficient de réflectance a été ainsi fixé à 1. Ces simulations ont été effectuées en ne considérant que l'éclairement direct, la fraction diffuse étant supposée nulle. Les valeurs des variables d'entrée du modèle SAIL ont été définies comme suit : $LAI=[0.5 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7]$; $ALA=[30^\circ, 58^\circ, 70^\circ]$ et $S^*=[0.025 ; 0.05 ; 0.1 ; 0.25 ; 0.4 ; 1]$. La sensibilité aux variables d'entrées du modèle SAIL sera examinée que pour les termes suivant τ_{sd} , τ_{do} , ρ_{so} , ρ_{dd} . En effet pour les termes τ_{ss} , τ_{oo} qui correspondent respectivement aux fractions de trou suivant la direction d'éclairement et de visée cette étude a été effectuée dans le chapitre 4.

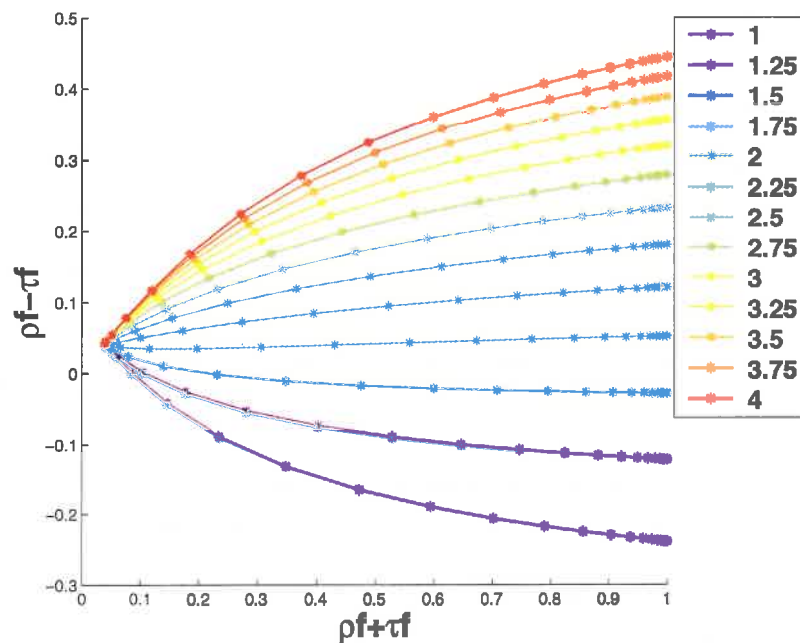


Figure 3 : les réflectance et transmittance des feuilles générées pour plusieurs coefficients d'absorption et d'indices de structure de la feuille (N).

6.3.2 Application au modèle de structure agrégé générique

Dans cette partie nous allons d'abord présenter une description du modèle de lancer de rayons utilisé pour déterminer les termes de diffusions et d'extinction sur nos maquettes 3D, suivie de la méthode de calcul de ces termes et du plan d'échantillonnage considéré. Enfin une analyse de dépendance de ces termes aux

propriétés spectrales des feuilles et aux caractéristiques du couvert définies dans le modèle CLAMP sera donnée.

6.3.2.1 Le modèle de lancer de rayon : PARCINOPY

Le modèle PARCINOPY 'PARTicle traCINg in the canOPY' (Chelle 1996; Chelle 1997) est un modèle mono spectral basé sur la méthode de lancer de rayons dans une scène tridimensionnelle. Les entrées de ce modèle sont :

- le couvert composé d'un sol, de tiges et de feuilles qui sont représentées par un ensemble de triangles
- Les propriétés optiques des composantes du couvert pour une longueur d'onde donnée
- Les caractéristiques des sources lumineuses : rapport direct-diffus et la configuration d'éclairement.
- Les bornes du motif périodique nécessaires à la simulation d'un couvert infini.

En sortie, le modèle fournit la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle BRDF, les flux distribués par triangle et les flux moyens pour une hauteur donnée au sein du couvert. La simulation est basée sur la méthode de Monte Carlo. Elle génère aléatoirement les caractéristiques d'un photon incident (direct ou diffus) définies par son poids, son origine et sa direction. Le tirage de l'origine du photon se fait dans chaque pixel d'un plan horizontal situé au dessus de la scène et discrétisé en une grille régulière. Afin d'optimiser le tracé de rayons, la scène 3D est subdivisée en un ensemble de cellules 'voxels'. Le test intersection rayon-polygone à un point donné du couvert se fait d'abord dans la cellule englobant ce point. Ensuite, en cas de non intersection avec les polygones présents dans cette cellule, le test est poursuivi pour la cellule voisine située dans la direction de propagation du rayon.

Afin de simuler la propagation du rayon dans un milieu infini, lorsque le rayon sort d'une face latérale de la scène 3D celui ci est réinjectée dans la scène avec la même direction et à la même hauteur à partir de la face latérale opposée. Une fois que la primitive intersectée est identifiée, les flux absorbés, réfléchis et transmis sont mis à jour et les nouvelles caractéristiques (origine, poids et direction) du rayon sont calculées. Le type (réflexion et transmission) et la direction de rediffusion se font par tirage aléatoire. Cette dernière est échantillonnée selon une loi de probabilité issue de la BRDF ou de la BTDF (fonction de distribution de la transmittance bidirectionnelle). Dans le cas d'une surface lambertienne caractérisée par une densité de probabilité de rediffusions $f(\theta, \varphi) = \frac{\cos(\theta)}{\pi}$ indépendante de la direction azimutale, l'azimut est tiré aléatoirement suivant une loi uniforme entre 0 et 2π . Le tirage aléatoire de la direction zénithale θ se fait par l'intermédiaire de l'inverse de la fonction de répartition F de $f(\theta)$:

$$F(x) = \int_0^x f(\theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{1 - \cos 2x}{2}$$

$$\text{D'où } F^{-1}(x) = \frac{\arccos(1-2x)}{2}$$

Il suffit alors de tirer un nombre β selon une loi uniforme entre 0 et 1 et d'en déduire l'angle θ à partir de la relation $\theta = F^{-1}(\beta)$. Lorsque la BRDF réelle du sol et des feuilles sont à considérer, le tirage aléatoire par la méthode de l'inverse de la fonction de répartition n'est plus utilisé. Dans PARCINOPY la BRDF est décrite par un modèle qui décompose celle-ci en une partie diffuse et une partie directionnelle composée d'un lobe centré sur la direction spéculaire pour les feuilles et la direction du hot spot pour les sols. La composante spéculaire considérée est inspirée de l'approche de (Ross and Marshak 1989). Les paramètres du modèle de la BRDF dans PARCINOPY sont alors la réflectance hémisphérique diffuse ρ_d , un paramètre modulant l'ouverture du lobe et enfin la réflectance hémisphérique du lobe ρ_l . Cette dernière est décrite pour les feuilles à l'aide des lois de Fresnel pondérées par un facteur d'atténuation de (Nilson and Kuusk 1989). Pour le sol celle-ci est calculée par l'intermédiaire du modèle de réflectance de sol de (Jacquemoud, Baret et al. 1992). L'échantillonnage de la BRDF se fait ensuite par tirage aléatoire admettant que pour un nombre aléatoire tiré entre 0 et 1 et inférieure à la proportion $\frac{\rho_d}{\rho_d + \rho_l}$ le rayon est diffusé isotropiquement sinon il est tiré dans le lobe. Enfin le rayon est arrêté quand son poids devient inférieur à un certain seuil de manière à limiter les temps de calcul.

Dans ce travail le modèle PARCINOPY nous a permis de calculer les flux moyens directs et diffus au sein du couvert et la réflectance bidirectionnelle sur nos maquettes 3D simulant des couverts agrégés. Ce calcul suppose un plan horizontal virtuel situé à une hauteur donnée. Le flux est ensuite déduit à partir du cumul des poids des rayons qui traverse ce plan. Le poids des rayons est ensuite converti en densité surfacique de flux relative à l'éclairement par le plan horizontal (point de départ des rayons) surplombant la scène.

Pour calculer la réflectance bidirectionnelle, l'hémisphère est échantillonné en une série d'angles solides de 5° . Les poids des rayons quittant le couvert sont ensuite cumulés en fonction de leur direction de propagation. Enfin les poids sont convertis en coefficient de réflectance défini comme le rapport de la réflectance d'une surface sur la réflectance d'une surface lambertienne idéale. Le facteur de réflectance du couvert pour un angle solide donne ω_i s'exprime alors comme :

$$R_{\omega_i} = \frac{P_{\omega_i}}{n \cdot \Omega_i / \pi}$$

où P_{ω_i} est le flux en poids réfléchi par le couvert dans ω_i , Ω_i est l'angle solide projeté de ω_i et n est le nombre de rayons lancés.

6.3.2.2 Calcul des termes de diffusion

Nous avons considéré deux plans horizontaux pour lesquels nous avons comptabilisé les flux provenant de différentes directions, et le cas échéant l'ordre d'interaction des photons avec le sol ou la végétation. Ces flux, notés 'n' sont calculés à partir de la somme des poids des photons ayant les caractéristiques considérées : n (niveau, sens, direction, interaction sol, interaction végétation),

- niveau : niveau du plan horizontal où sont comptabilisés les flux : h pour haut, b pour bas
- sens : descendant (-) ou ascendant (+)
- direction : directionnel (θ_s ou θ_o) ou hémisphérique (d)
- interaction sol : pas d'interaction (0), une interaction (1)
- interaction végétation : pas d'interactions (0), toutes les interactions (≥ 0), toutes les interactions (≥ 1) d'ordre supérieur ou égal à 1.

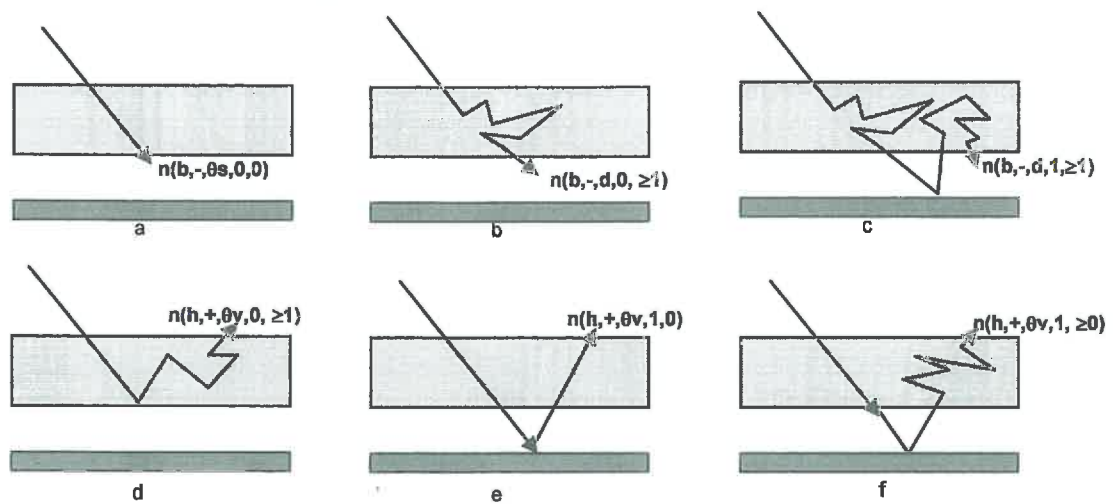


Figure 4 : schéma résumant les flux de diffusions calculés par le modèle de lancer de rayons PARCINOPY

La Figure 4 représente les différents flux auxquels nous nous sommes intéressés:

- $n(b, -, \theta_s, 0, 0)$: le flux descendant directionnel qui arrive en bas du couvert associé aux photons qui n'ont pas été interceptés par les feuilles. Ce flux correspond en fait à la fraction de trou dans la direction d'incidence.
- $n(b, -, d, 0, \geq 1)$: le flux descendant diffus qui arrive en bas du couvert associé aux photons qui ont été diffusés uniquement par les feuilles (pas d'interaction avec le sol).
- $n(b, -, d, 1, \geq 1)$: le flux descendant diffus qui arrive en bas du couvert et qui a subi une seule interaction avec le sol avant de rebondir et subir des diffusions avec les feuilles.
- $n(h, +, \theta_v, 0, \geq 1)$: le flux ascendant directionnel qui arrive en haut du couvert et qui a subi plus d'une diffusion par les feuilles sans avoir interagi avec le sol.

- e. $n(h, +, \theta_v, 1, 0)$: le flux ascendant directionnel qui arrive en haut du couvert associé aux photons qui n'ont pas subi d'interaction avec les feuilles et sont diffusés une seule fois par le sol.
- f. $n(h, +, \theta_v, 1, \geq 0)$: le flux ascendant directionnel qui arrive en haut du couvert associé aux photons qui ont été diffusés ou non par les feuilles et qui ont interagi une seule fois avec le sol avant d'être diffusé de nouveau par les feuilles.

Ces flux sont reliés aux termes de diffusion de la manière suivante :

$$\begin{cases} \tau_{ss} = a \\ \tau_{ss} \cdot \tau_{oo} \cdot r_{so} = e \\ \rho_{so} = d \\ \rho_{dd} = c / (a \cdot r_{sd} + b \cdot r_{dd}) \\ \tau_{sd} = b \\ \tau_{do} = f / (a \cdot r_{sd} + b \cdot r_{dd}) \end{cases}$$

Ce système d'équation permet donc de calculer les termes de diffusion qui interviennent dans l'expression de la réflectance bidirectionnelle r_{so}^* comme suit :

$$r_{so}^* = \rho_{so} + e + \frac{f + (b + a \cdot r_{sd} \cdot (c / (a \cdot r_{sd} + b \cdot r_{dd}))) r_{do} \left(\frac{e}{a r_{so}} \right)}{1 - r_{dd} \cdot (c / (a \cdot r_{sd} + b \cdot r_{dd}))}$$

Ces termes ont été calculés sur un ensemble de simulations que nous allons détailler dans ce qui suit.

6.3.2.3 Plan d'échantillonnage

En raison de la lourdeur des simulations par le modèle de lancer de rayons, notre étude s'est restreinte à un échantillonnage particulier de l'ensemble des maquettes 3D construites auparavant et des propriétés optiques.

6.3.2.3.1 Structures et géométries d'éclairement et de visée considérées

Nous avons essayé de représenter une variété de structures en considérant des valeurs d'indices foliaires et de distance relative feuille-tige assez contrastées : $\chi = [0 \ 0.5 \ 1]$; $LAI = [0.5 \ 1 \ 5]$. Les variations des autres caractéristiques (d^* , S^* , b/h , ALA) du modèle d'agrégation considérées dans cette partie sont résumées dans le Tableau 1. L'éclairement a été considéré directionnel et seule une direction d'incidence avec un angle zénithal égal à 45° a été utilisée dans un premier temps. La configuration de visée a été échantillonnée dans le plan principal (plan d'incidence) entre -80 et 80° avec un pas de 5° .

densité relative des plantes 'd*'	taille relative des feuilles 'S*'	indice de surface foliaire 'LAI'	angle d'inclinaison moyen des feuilles 'ALA'	Forme de la feuille 'b/h'
1	0.1;0.25;0.4	1	58°	0.25
10	0.1;0.25	1; 5	58°	0.25
10	0.4	5	58°	0.25
100	0.025;0.05;0.1	0.5; 1; 5	58°	0.25
100	0.025	0.5 ; 1; 5	30° ;70°	0.25
100	0.025	0.5 ; 1; 5	58°	1
1000	0.025;0.05	5	58°	0.25

Tableau 1 : les caractéristiques des maquettes 3 D utilisées pour calculer les termes de diffusion

6.3.2.3.2 Propriétés optiques des feuilles et du sol

Les propriétés optiques des feuilles et du sol ont été supposées lambertiennes. Dans le choix de ces propriétés nous avons cherché à représenter la variabilité spectrale en plus de la structure de mésophylle de la feuille. Néanmoins, étant donné la lourdeur du calcul imposée par le modèle de lancer de rayons nous avons été contraint à choisir un minimum de valeurs. Ainsi, l'indice de structure du mésophylle N a été fixé à deux valeurs [1.5, 3]. Trois longueurs d'onde ont été considérées pour la première valeur (1 rouge et 2 PIR) et une seule longueur (PIR) pour la deuxième. Ce choix est motivé par le fait que l'influence du paramètre de structure N est marginale dans le visible, alors qu'il peut être très important dans le domaine du proche infrarouge. Pour des raisons de simplicité l'indice de réfraction de la feuille a été supposé spectralement indépendant et fixé à 1.43. En effet, (Jacquemoud and Baret 1990) ont trouvé qu'une petite variation de cet indice n'affecte que peu les propriétés optiques de la feuille. Enfin la réflectance du sol a été fixée à 1 de manière à augmenter le nombre de photons éclairant le dessous du couvert et améliorer ainsi la précision des calculs.

Réflectance des feuilles ' ρ_f '	Transmittance des feuilles ' τ_f '	Indice de structure des feuilles ' N '	Indice de réfraction	Réflectance du sol ' ρ_s '
0.6589	0.3411	3	1.43	1
0.4856	0.5144	1.5	1.43	1
0.3851	0.4111	1.5	1.43	1
0.0398	0	1.5	1.43	1

Tableau 2. Propriétés optiques des feuilles et du sol utilisées dans les simulations de PARCINOPY.

6.3.2.4 Précision des simulations

Afin de minimiser l'incertitude sur les sorties du modèle de lancer de rayons, il est nécessaire de lancer un grand nombre de rayons dans la scène. Plus particulièrement pour des scène composées de beaucoup de primitives. Ainsi, dans nos simulations nous avons fixé le nombre de rayons à 21.000.000 lancés en 21 itérations de un million de photons. En effet, l'écart type associé aux flux simulés est d'autant plus faible que le nombre de rayons est élevé. Ceci est bien illustré sur la Figure 5 qui présente le flux de photons ayant quitté la maquette après avoir été diffusé une seule fois par le sol. Les nombre de rayons

lancés dans chaque itération et répétés 21 fois sont respectivement : 10^4 , 10^5 , $5 \cdot 10^5$ et 10^6 . Un fort écart type est marqué au nadir du fait que les propriétés optiques des feuilles (≈ 0) et du sol (≈ 1) sont très contrastées et que c'est dans cette direction que la contribution du sol est plus forte. Globalement, l'écart type a tendance à diminuer au fur et à mesure que le nombre de rayons lancés augmente.

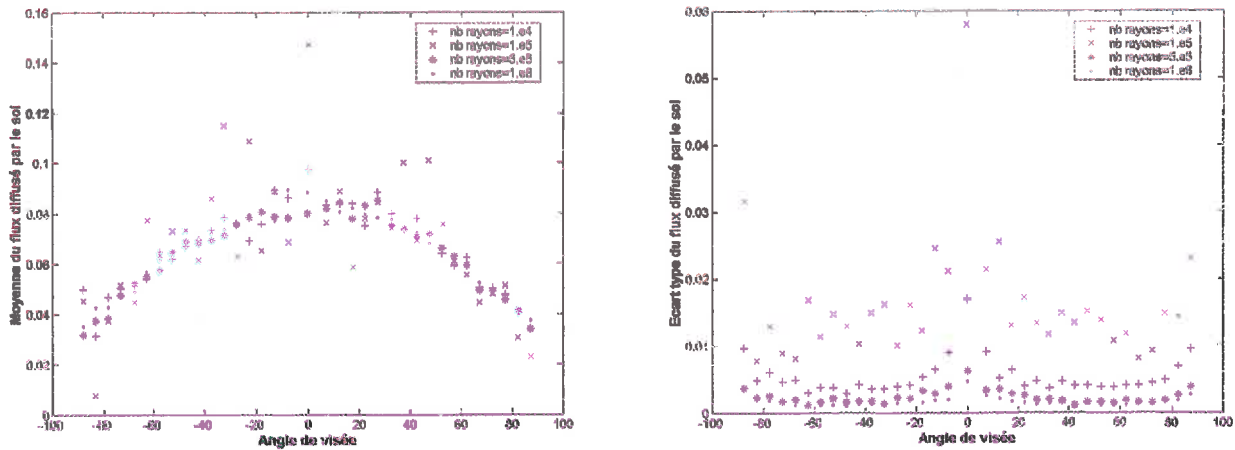


Figure 5 : Variation directionnelle de la moyenne et écart type des flux ayant subi tous les types d'interactions (≥ 0) et une seule diffusion par le sol en fonction du nombre de rayons lancés par itération. Les caractéristiques de la maquette considérée sont : LAI=5, $S^*=0.025$, $b/h=0.25$, $d^*=100$ et $ALA=58^\circ$. Nb rayons : [e^4 (x), e^5 (+), $5 \cdot e^5$ (*), e^6 (.)]

6.4 Résultats de l'étude dans le cas d'un modèle turbide

La dépendance des termes de diffusion à la somme et la différence de la réflectance et la transmittance de la feuille dans le cas du modèle turbide approximé par l'approche 4 flux sera présentée dans cette partie. L'effet des variables de structure définies dans les milieux homogènes (LAI, S^* , ALA) sera aussi illustré.

6.4.1 La transmittance directionnelle-diffuse de la végétation τ_{sd}

La transmittance directionnelle diffuse résulte de l'interaction du flux directionnel incident avec les éléments du couvert pour former un flux diffus descendant. La variation de la transmittance directionnelle-diffuse du couvert en fonction des propriétés optiques des feuilles est illustrée sur la Figure 6. On observe que globalement la transmittance du couvert augmente au fur et à mesure que l'albédo de simple diffusion de la feuille est élevé. L'effet de la différence entre réflectance et transmittance est relativement peu important, tendant à augmenter τ_{sd} quand la transmittance de la feuille est supérieure à sa réflectance.

La transmittance directionnelle-diffuse, τ_{sd} , augmente avec l'indice foliaire pour des valeurs de LAI inférieures à 2 ou 3. Ceci est lié à l'augmentation des interactions rayonnement-feuille quand le LAI

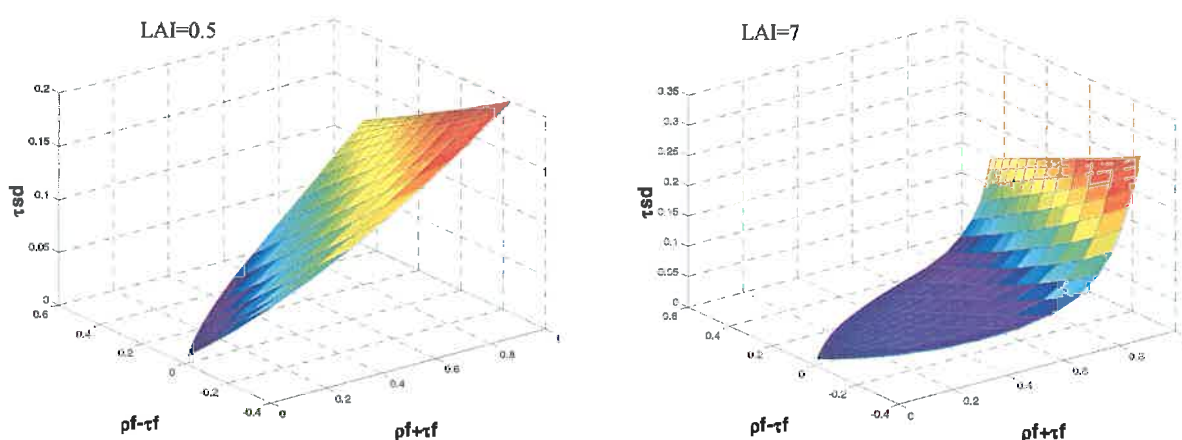


Figure 6 : Variation de la transmittance directionnelle-diffuse en fonction de l'albédo de simple diffusion de la feuille et de la différence entre réflectance et transmittance de la feuille pour plusieurs LAI [0.5 7] et ALA=30°.

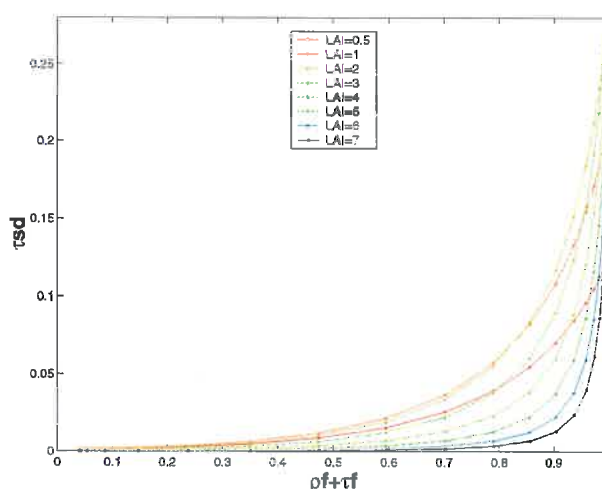


Figure 7 Evolution de la transmittance directionnelle-diffuse du couvert en fonction des propriétés optiques des feuilles et de l'indice de surface foliaire. $S^*=0.025$, ALA=30°

augmente (figure 7). Pour une valeur d'indice foliaire nulle, le terme τ_{sd} doit également être nul, du fait de l'absence de possibles interactions avec des feuilles pour produire un flux diffus. Pour les plus fortes valeurs de LAI correspondant à une couverture quasi complète du sol, τ_{sd} tend à diminuer avec l'indice foliaire. Cette diminution est d'autant plus accentuée que la transmittance des feuilles est faible. L'effet de l'inclinaison foliaire sur la transmittance directionnelle-diffuse du couvert, τ_{sd} a également été analysé (Figure 8). Cet effet apparaît relativement modéré. Pour les faibles indices foliaires ($LAI < 3$), τ_{sd} diminue quand les feuilles se redressent (ALA plus forts) du fait de l'augmentation de chemins libres laissant pénétrer le rayonnement directement au sein du couvert sans interactions avec les feuilles source de rayonnement diffus. Au contraire, pour les fortes valeurs d'indice foliaire, τ_{sd} augmente quand les feuilles se redressent du fait de l'augmentation des interactions plus profondes ainsi autorisées. L'effet des propriétés optiques des

feuilles est similaire à ce qui a été décrit précédemment, montrant le rôle dominant de l'albédo de simple diffusion.

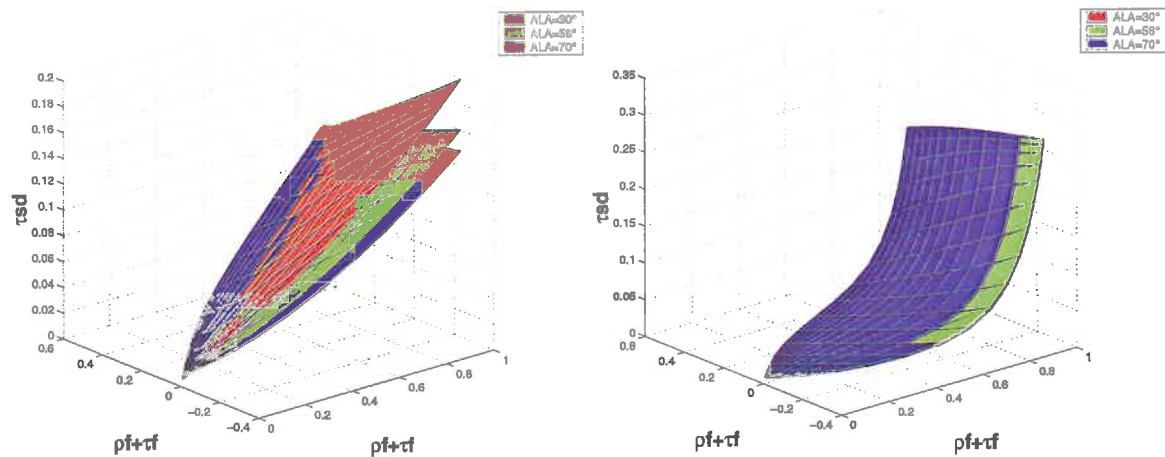


Figure 8 : idem Figure 6 mais pour différents angles moyens d'inclinaisons. $ALA=[30^\circ, 58^\circ, 70^\circ]$ et $LAI=0.5$ (à gauche) ou 7 (à droite).

6.4.2 La réflectance diffuse-diffuse de la végétation ρ_{dd}

La réflectance diffuse-diffuse (ρ_{dd}) résulte des interactions d'un flux diffus descendant (ou montant) avec la végétation, produisant un flux montant (ou descendant).

Le terme pdd tend vers 0.0 pour des valeurs d'albédo de la feuille égales à 0 puisque les feuilles sont complètement absorbantes Figure 9. Au fur et à mesure que l'albédo de simple diffusion augmente la réflectance diffuse-diffuse croît jusqu'à atteindre des valeurs maximales pour des valeurs d'albédo voisines de 1.0. Toutefois, un effet résiduel dépendant de la différence entre réflectance et transmittance foliaire est observé. A même albédo de simple diffusion, une plus forte réflectance des feuilles induit une augmentation du terme pdd.

Une augmentation de l'indice foliaire se traduit par une élévation progressive de pdd liée à l'augmentation du nombre d'interactions avec le rayonnement (figure 10).

La Figure 11 illustre la variation du terme pdd en fonction de l'inclinaison foliaire pour des niveaux de LAI contrastés. Cet effet est relativement modéré, en particulier pour les plus forts indices foliaires. Toutefois, à même albédo de simple diffusion, pour les plus faibles indices foliaires ($LAI=0.5$) et des ports foliaires planophiles ($ALA=30^\circ$), pdd augmente significativement quand la réflectance des feuilles augmente.

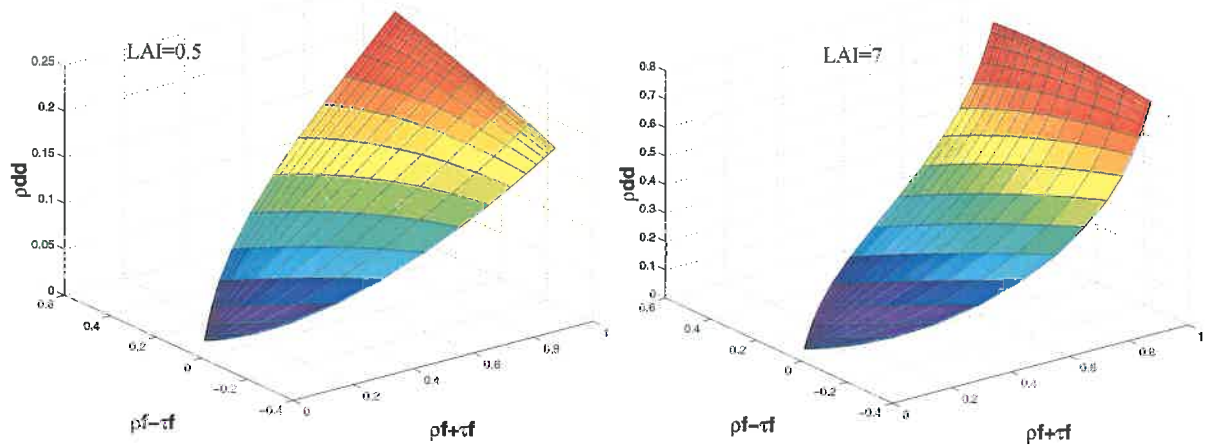


Figure 9 Variation de la réflectance diffuse-diffuse en fonction de l'albédo de simple diffusion et de la différence entre la réflectance et la transmittance de la feuille pour plusieurs LAI [0.5 7] et ALA=30°.

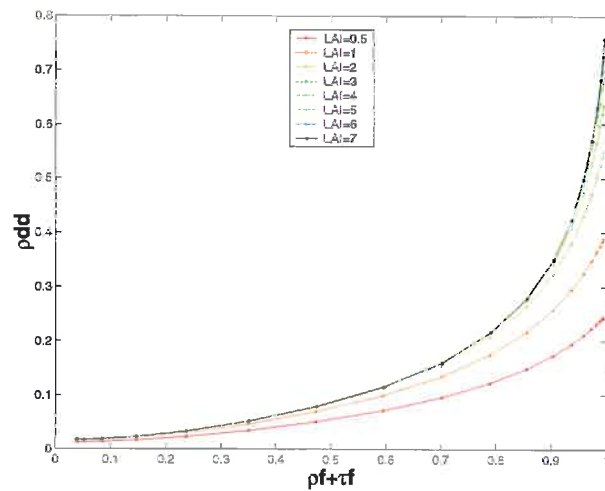


Figure 10 : Evolution de la réflectance diffuse-diffuse du couvert en fonction des propriétés optiques des feuilles et de l'indice de surface foliaire. $S^*=0.025$, ALA=30°

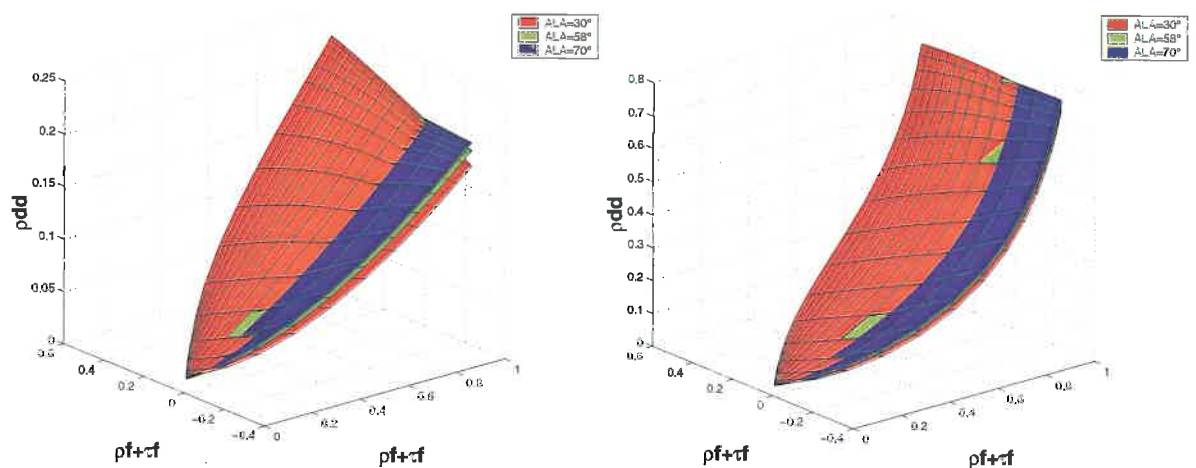


Figure 11 : idem Figure 9 mais ALA=[30°, 58°, 70°] et LAI=0.5 (à gauche) et 7 (à droite).

6.4.3 La transmittance diffuse-directionnelle de la végétation τ_{do}

La sensibilité de la transmittance diffuse directionnelle dépend de la direction de visée considérée. Ce terme résulte de l'interaction d'un flux diffus montant (ou descendant) avec le couvert pour produire un flux directionnel dans la direction de visée (ou d'incidence). Le terme τ_{do} augmente au fur et mesure que l'albédo de simple diffusion de la feuille croît Figure 12. A même niveau d'albédo de simple diffusion, ce terme croît avec la transmittance des feuilles (indice de structure de la feuille, N , plus petit).

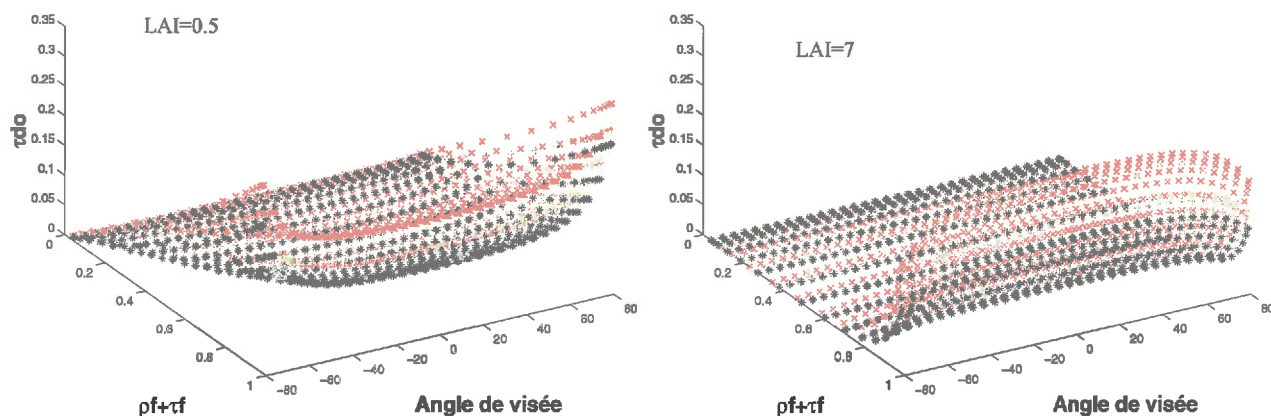


Figure 12 variation directionnelle dans le plan principal de la transmittance diffuse-directionnelle en fonction de l'albédo de simple diffusion de la feuille pour trois indices de structure $N=[1(\text{rouge}), 2(\text{vert}), 4(\text{noir})]$ et pour différents $\text{LAI}=[0.5, 7]$. $\text{ALA}=30^\circ$.

Pour les faibles LAI (0.5, 1), la variation de τ_{do} affiche un profil concave avec des valeurs maximales pour les forts angles de visée. En effet, pour ces angles, le trajet optique est plus long que pour des directions voisines du nadir et les diffusions avec les feuilles sont alors plus élevées. Une augmentation de l'indice foliaire se traduit par une augmentation de τ_{do} pour des valeurs de $\text{LAI} < 2$ correspondant à une couverture importante du sol. Au-delà, le terme τ_{do} diminue jusqu'à s'annuler pour les LAI plus forts : la surface des feuilles augmentant l'absorption du rayonnement la probabilité pour qu'un photon traverse le couvert diminue fortement. Ceci explique aussi l'évolution de la variation angulaire vers un profil convexe lorsqu'on augmente le LAI : on note alors la baisse de la transmittance diffuse-directionnelle pour les forts angles zénithaux associés à un trajet optique plus long avec beaucoup plus de feuilles que pour les directions proches du nadir.

Le terme τ_{do} augmente quand les feuilles se redressent pour les faibles niveaux de LAI pour des angles de visées $> 60^\circ$ et à la baisser lorsqu'on s'approche du nadir Figure 13. Pour les LAI les plus forts, ce comportement s'inverse : on observe une baisse de τ_{do} pour les forts angles de visée et une augmentation

pour des directions voisines du nadir. En effet, pour des faibles LAI le redressement des feuilles favorise la sortie du rayonnement sans subir d'interception pour des directions voisines du nadir tandis que pour les forts angles il serait plutôt un obstacle et augmentera alors les diffusions et par la même façon la transmittance diffuse-directionnelle. Une augmentation de l'indice foliaire impliquera plus d'interactions associées à un nombre de feuilles plus grand et donc une augmentation de l'absorption du couvert. Celle-ci sera plus forte pour les forts angles de visée dans le cas des feuilles erectophiles et pour les directions proches du nadir pour les feuilles planophiles.

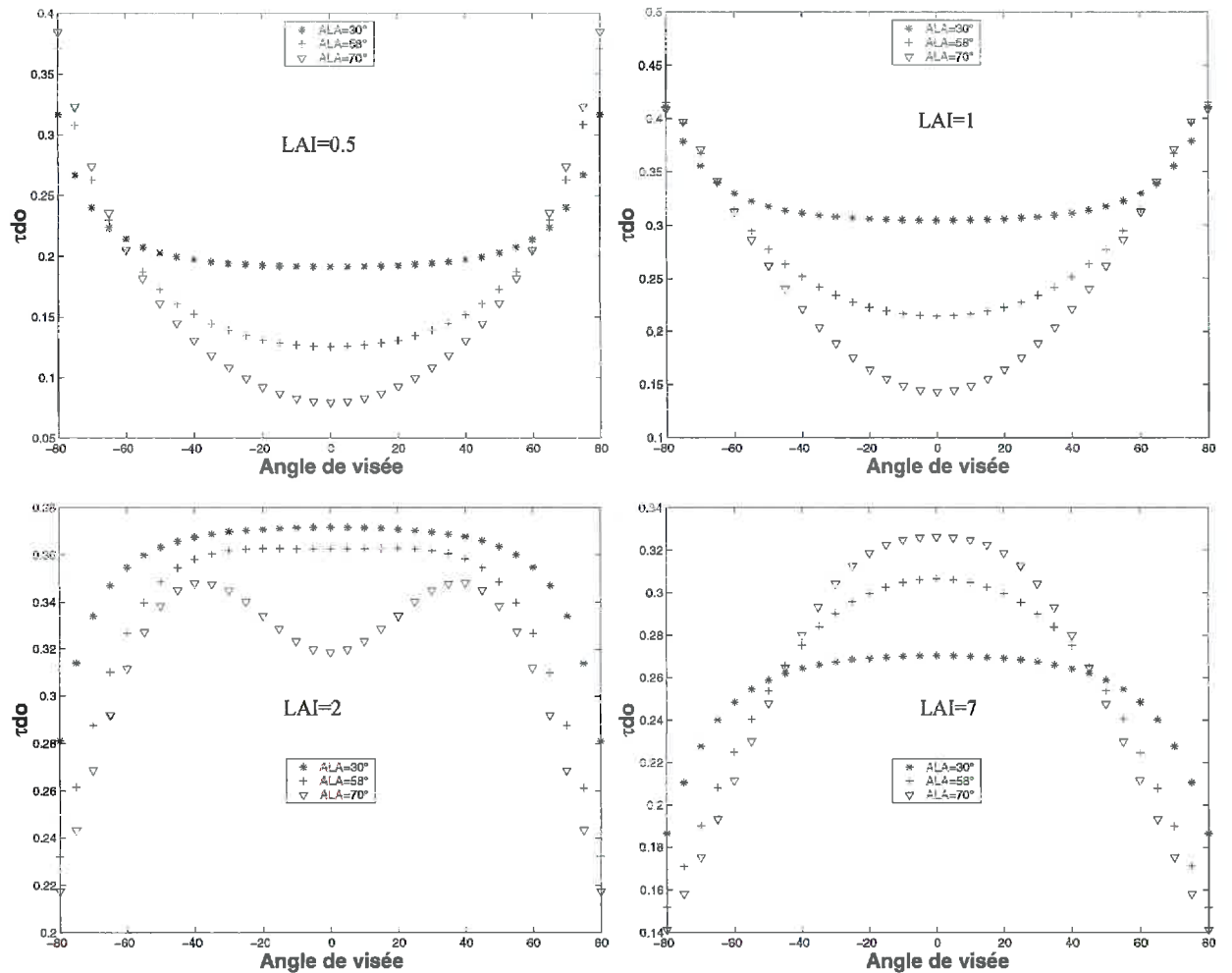


Figure 13 : Variation directionnelle dans le plan principal de la transmittance diffuse-directionnelle en fonction de l'angle moyen d'inclinaison $ALA=[30^\circ, 58^\circ, 70^\circ]$ et du LAI [0.5 1 2 7]. $\rho_i=0.38$ $\tau_i=0.62$

6.4.4 La réflectance directionnelle-directionnelle de la végétation ρ_{so}

La réflectance directionnelle-directionnelle est plus complexe à analyser du fait de sa dépendance aux directions de visée et d'incidence. Pour simplifier la procédure d'analyse, nous nous sommes placés dans le plan principal en fixant le soleil à 45° de zénith.

Le terme ρ_{so} augmente avec l'albédo de simple diffusion de la feuille (Figure 14). A même valeur d'albédo de simple diffusion, ρ_{so} augmente avec la réflectance de la feuille (N plus important). L'indice foliaire induit une forte augmentation du terme ρ_{so} pour toutes les directions, et particulièrement dans le hot spot, autour de 45° d'angle de visée. On note également une tendance à l'augmentation de ρ_{so} pour les plus forts angles, qui est due d'une part à une augmentation de l'épaisseur optique et d'autre part au fait que la partie observée du couvert correspond à celle la mieux éclairée (visée rasante : la couche supérieure du couvert est majoritairement observée)

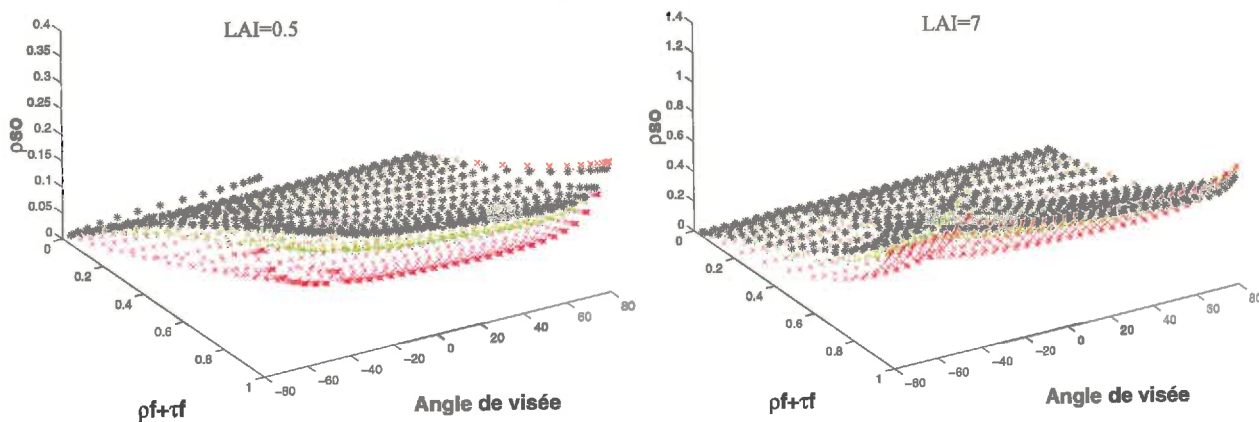


Figure 14 variation directionnelle dans le plan principal de la réflectance directionnelle-directionnelle en fonction de l'albédo de simple diffusion et de trois indices de structure $N=[1(\text{rouge}), 2(\text{vert}), 4(\text{noir})]$ et $\text{LAI}=[0.5, 7]$, $\text{ALA}=30^\circ$ et $S^*=0.025$.

Le redressement des feuilles s'accompagne (Figure 15) d'une diminution de ρ_{so} pour toutes les directions autour du nadir. Cette baisse de réflectance est associée à l'apparition de trous baissant ainsi la fraction du rayonnement interceptée par les feuilles. Au contraire, pour les plus forts angles de visée, la réflectance tend à augmenter quand les feuilles se dressent : le nombre de diffusions par les feuilles erectophiles est alors plus important que dans le cas des feuilles planophiles.

L'effet de la taille de la feuille se manifeste plus particulièrement dans la direction d'éclairement par un élargissement du pic du hot spot Figure 16 et une augmentation de la réflectance dans les autres directions.

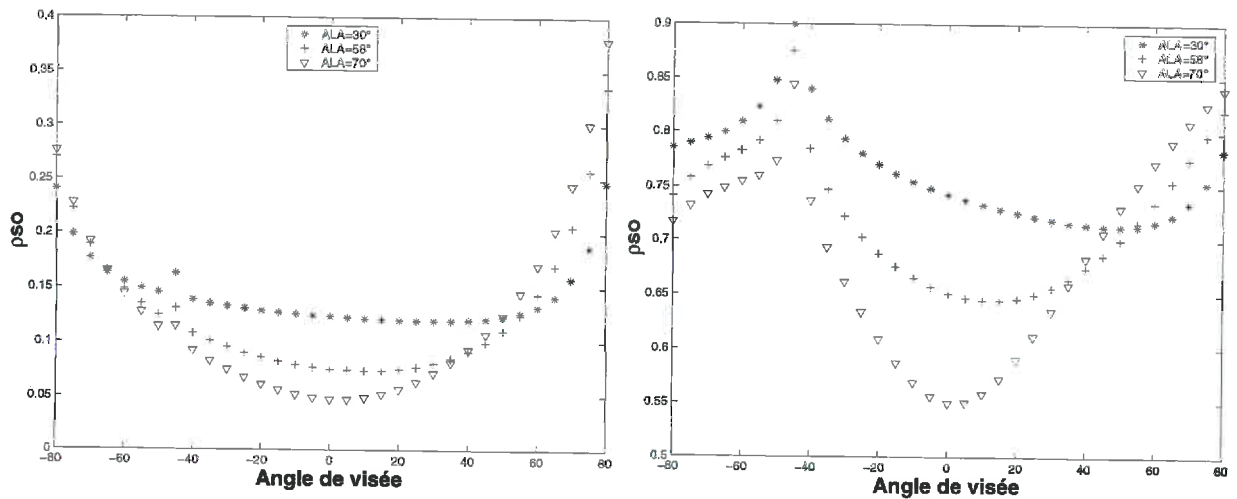


Figure 15 : variation directionnelle dans le plan principal de la réflectance directionnelle-directionnelle en fonction des angles moyens d'inclinaisons $ALA=[30^\circ, 58^\circ, 70^\circ]$ et du $LAI=0.5$ (à gauche) et 7 (à droite) $S^*=0.025$ et $\rho_f=0.38$ $\tau_f=0.62$.

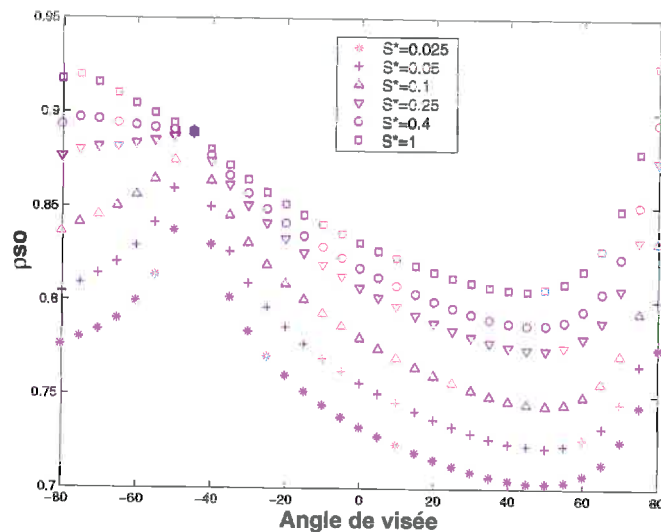


Figure 16 : variation directionnelle dans le plan principal de la réflectance directionnelle-directionnelle en fonction de la taille de la feuille. $LAI=7$; $ALA=30^\circ$; $\rho_f=0.38$ $\tau_f=0.62$.

L'analyse de dépendance présentée précédemment montre la complexité de la variation de la réflectance du couvert, celle-ci étant sous la dépendance de nombreux facteurs en interaction. La modélisation est donc la seule approche qui puisse aboutir à un résultat utilisable pour nos objectifs. Il nous faut donc développer un modèle de transfert radiatif applicable à l'architecture des couverts agrégés génériques telle que nous l'avons présentée au chapitre 3. Rappelons que la démarche que nous avons proposée en préambule de ce chapitre repose sur la paramétrisation des différents termes du transfert radiatif. Nous nous sommes ici principalement focalisé sur la prise en compte des propriétés optiques des feuilles dans le calcul de ces différents termes.

6.4.5 Paramétrisation des termes de diffusion en fonction des propriétés optiques des feuilles.

L'objectif est donc ici de proposer un modèle qui décrit la réflectance du couvert à partir de la réflectance et de la transmittance de la feuille, de la réflectance du sol et des caractéristiques architecturales du couvert.

6.4.5.1 Approche

L'approche est basée sur une paramétrisation des termes du transfert radiatif en fonction des propriétés optiques des feuilles puis des caractéristiques architecturales des couverts :

- La paramétrisation des termes τ_{ss} et τ_{oo} a été abordée au chapitre 4. Ces termes ne dépendant pas des propriétés optiques des feuilles, nous n'irons pas plus loin ici.
- Les termes de diffusion ($\tau_{sd}, \rho_{dd}, \tau_{do}, \rho_{so}$) seront d'abord paramétrés en fonction de la réflectance et la transmittance de la feuille. Les paramètres ajustés pourront ensuite être formulés en fonction des caractéristiques du couvert définies dans notre modèle d'agrégation : LAI, S^* , ALA, b/h , d^* et χ .

Avant de nous atteler à la réalisation de cette tâche importante, nous avons essayé d'appliquer la démarche au cas turbide en utilisant le modèle SAIL. Ceci nous permet d'explorer une base d'échantillonnage assez large contrairement au modèle de lancer rayons où le temps de calcul est un facteur très limitant et nous permettra de mieux définir les besoins nécessaires en terme d'échantillonnage de l'espace des possibles dans le cas d'architectures agrégées.

6.4.5.2 Le modèle paramétrique de la réflectance bidirectionnelle

L'étude de sensibilité nous avait montré l'importance de l'albédo de simple ($\rho_f + \tau_f$) diffusion dans le déterminisme des différents termes de diffusion du transfert radiatif. De même, nous avons observé toutefois que l'albédo de simple diffusion était insuffisant pour expliquer toute la variation, et avons utilisé la différence entre réflectance et transmittance ($\rho_f - \tau_f$) pour décrire simplement les effets résiduels. C'est donc au travers de ces deux variables, ($\rho_f + \tau_f$) et ($\rho_f - \tau_f$) que nous allons paramétrer la variation des 4 termes de diffusion pour une architecture et une configuration géométrique donnée. Les Figure 6 à Figure 11 montrent les exemples de forme du modèle paramétrique que nous voulons utiliser. Les formes semblent relativement simples, avec un effet quasi linéaire de ($\rho_f - \tau_f$) et un effet non linéaire avec ($\rho_f + \tau_f$). Après différentes tentatives visant à limiter le nombre de paramètres à ajuster tout en assurant les meilleures performances d'ajustement, nous avons aboutis aux formalismes suivants :

$$\{\tau_{sd}, \tau_{do}\} = (\rho_f - \tau_f) \cdot \sum_{i=0}^3 a_i (\rho_f + \tau_f)^i + \sum_{i=0}^6 b_i (\rho_f + \tau_f)^i$$

$$\{\rho_{do}, \rho_{so}\} = (\rho_f - \tau_f) \cdot \sum_{i=0}^3 c_i (\rho_f + \tau_f)^i + \sum_{i=0}^5 d_i (\rho_f + \tau_f)^i$$

Il faut donc 9 coefficients pour ajuster les termes de transmittance et 8 pour les termes de réflectance. Notons que nous avons introduit explicitement des contraintes sur l'ajustement, en particulier permettant de réduire le nombre de paramètres:

$$(\rho_f + \tau_f) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \tau_{sd} = 0 \\ \tau_{do} = 0 \\ \rho_{dd} = 0 \\ \rho_{so} = 0 \end{cases}$$

La procédure d'ajustement des coefficients a_i , b_i , c_i et d_i a été réalisée à partir de :

- Un maillage régulier de l'espace $\{(\rho_f + \tau_f) (\rho_f - \tau_f)\}$
- L'application
 - à l'ensemble des structures suivantes
 - LAI=[0.5 1 2 3 4 5 6 7],
 - ALA=[30°, 58°, 70°].
 - et S*=[0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.4 1], pour le terme ρ_{so}
 - aux directions de visée et d'éclairement suivantes :
 - $\theta_o = [-60^\circ -45^\circ 0^\circ 45^\circ 60^\circ]$
 - $\theta_s = 45^\circ$
- L'algorithme utilisé consiste à inverser le système d'équations décrit plus haut à partir d'un critère des moindres carrés.

La Figure 17 illustre la distribution des résidus des coefficients de diffusions (τ_{sd} , ρ_{dd} , τ_{do} , ρ_{so}) obtenue à partir de l'ajustement des modèles paramétriques (fonction de ρ_f et τ_f) cités ci-dessus pour les caractéristiques du couvert suivantes : LAI=[0.5, 1 2 3 4 5 6 7], S*=0.025 et ALA=58°. Les faibles résidus obtenus confirment les bonnes performances des ajustements.

Les coefficients a_i , b_i , c_i et d_i dépendent des caractéristiques du couvert suivantes : LAI, S*, ALA. L'application de cette paramétrisation aux simulations effectuées par PARCINOPY permettra d'explicitier ces coefficients en fonction des caractéristiques supplémentaires du couvert considérées dans CLAMP (b/h , d^* , χ). La partie qui va suivre aura pour objectif d'analyser la dépendance des termes du transfert radiatif à ces différentes caractéristiques architecturales supplémentaires, aidant ainsi à définir une stratégie pour la paramétrisation.

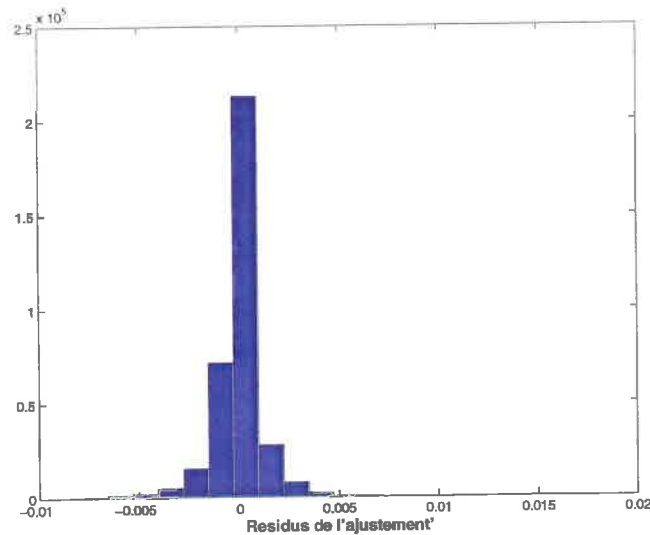


Figure 17 : Distribution des résidus des quatre termes (τ_{sd} , ρ_{dd} , τ_{do} , ρ_{so}) obtenus par l'ajustement des formalismes ci dessus LAI=[0.5 1 2 3 4 5 6 7], ALA=30° S*=0.025.

6.5 Résultats de l'application au modèle de structure agrégé générique.

Une comparaison des réflectances simulées par le modèle à quatre flux à celles simulées par le modèle de lancer de rayon PARCINOPY sera d'abord présentée. Les termes de diffusions et d'interception calculés sur les maquettes 3D avec le modèle de lancer de rayons seront ensuite examinés en fonction des propriétés optiques de la feuille et des caractéristiques architecturales du couvert considérées dans notre modèle d'agrégation.

6.5.1 Comparaison du modèle à quatre flux et de PARCINOPY.

Les réflectances simulées par le modèle de lancer de rayons PARCINOPY ont été d'abord comparées à celles simulées par le modèle de milieu turbide SAIL. Pour les maquettes 3D décrivant des milieux homogènes les réflectances simulées par PARCINOPY s'approchent d'une manière satisfaisante des réflectances obtenus par le modèle SAIL. La Figure 18 illustre un exemple de cette comparaison montrant la bonne adéquation entre les réflectances simulées pour un milieu aléatoire par les deux modèles. Toutefois, on observe qu'à l'inverse du modèle SAIL, le pic du hot spot n'est pas très marqué dans le cas de PARCINOPY. En effet, pour représenter cet effet, il est nécessaire de considérer un échantillonnage angulaire plus fin autour de cette direction, ce qui n'est pas vérifié dans cet exemple. La réflectance est plus élevée pour le LAI=0.5 à cause de la forte contribution du sol qui est considéré complètement réfléchissant. Le passage d'un milieu homogène ($\chi=1$) vers un milieu très agrégé ($\chi=0$) s'accompagne globalement d'une augmentation de la réflectance pour toutes les directions et principalement au nadir dû à l'augmentation de l'agrégation des feuilles qui découvre de plus en plus le sol.

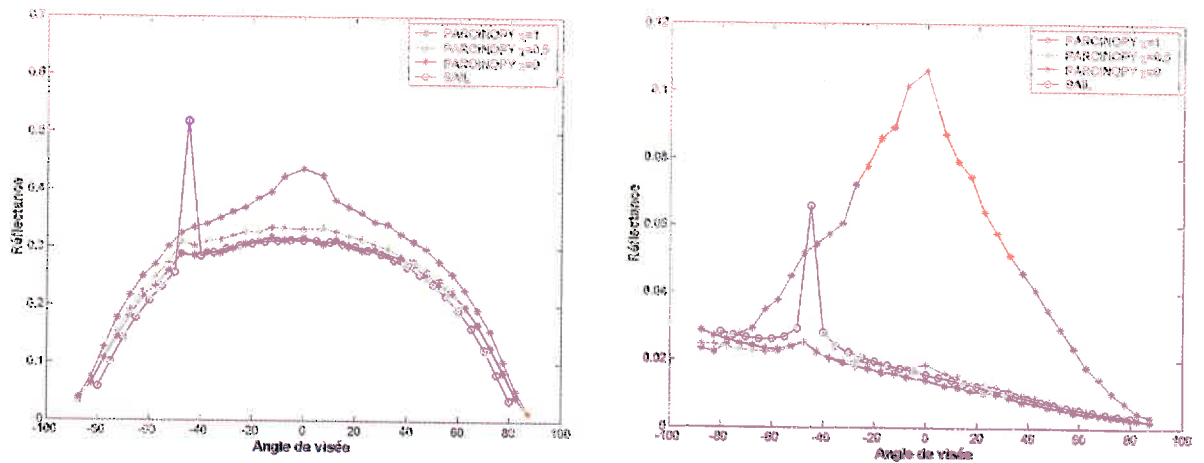


Figure 18 : Comparaison des réflectances simulées par le modèle SAIL et PARCINOPY sur les maquettes 3D. Les caractéristiques des couverts considérées sont : LAI=1 (à droite) 5 (à gauche), $\chi=[0 \ 0.5 \ 1]$, ALA=58°, b/h=0.25 et d*=100. Les propriétés optiques des feuilles et du sol sont respectivement : $\rho_f=0.0398$, $\tau_f=0$, $\rho_s=1$; La variation directionnelle est présentée dans le plan principal pour un angle zénithal solaire de -45°.

Afin de caractériser l'effet de l'agrégation des feuilles sur la réponse radiométrique du couvert nous allons examiner dans ce qui va suivre la sensibilité des différents termes du transfert radiatif aux caractéristiques du couvert considérées dans notre modèle d'agrégation des feuilles.

6.5.2 Transmittance directionnelle-diffuse de la végétation τ_{sd} .

La sensibilité de la transmittance directionnelle-diffuse de la végétation à l'indice de surface foliaire, les propriétés optiques des feuilles, la taille de la feuille et la distance feuille-tige est illustrée sur la Figure 19. Comme noté précédemment, τ_{sd} augmente en fonction de l'albédo de simple diffusion de la feuille. A même valeur d'albédo de simple diffusion τ_{sd} décroît lorsque la transmittance de la feuille diminue. L'augmentation du LAI s'accompagne d'une augmentation de la transmittance directionnelle diffuse de la végétation jusqu'à atteindre une certaine valeur critique pour rebaisser à cause de l'augmentation de l'absorption du couvert dû au nombre élevé des feuilles. Ce comportement avait déjà été noté sur les simulations du modèle SAIL. Enfin, la valeur du LAI associée à partir de laquelle cette baisse est notée est conditionnée par les propriétés optiques des feuilles.

La diminution de la distance relative feuille-tige ' χ ' se traduit par une baisse de τ_{sd} pour les faibles LAI (0.5, 1) et une augmentation pour les plus fortes valeurs (LAI=5). En effet, une diminution de χ se traduit par un recouvrement des feuilles et une augmentation de la pénétration du rayonnement dans le couvert entre les plantes. Pour de faibles LAI la diffusion par les feuilles baisse quand l'agrégation augmente, tandis que pour les forts LAI elle favorisera la diffusion par les feuilles situées en bas du couvert, contribuant à augmenter τ_{sd} . Cependant, une augmentation de la taille de la feuille pour un couvert agrégé implique une augmentation de la transmittance directionnelle-diffuse. En effet, une telle augmentation se traduit par une évolution d'un milieu agrégé vers un milieu aléatoire.

L'effet de la forme de la feuille 'b/h' a été aussi mis en évidence (Figure 20) puisqu'on observe une augmentation de τ_{sd} lorsque les feuilles tendent vers des formes plutôt compactes.

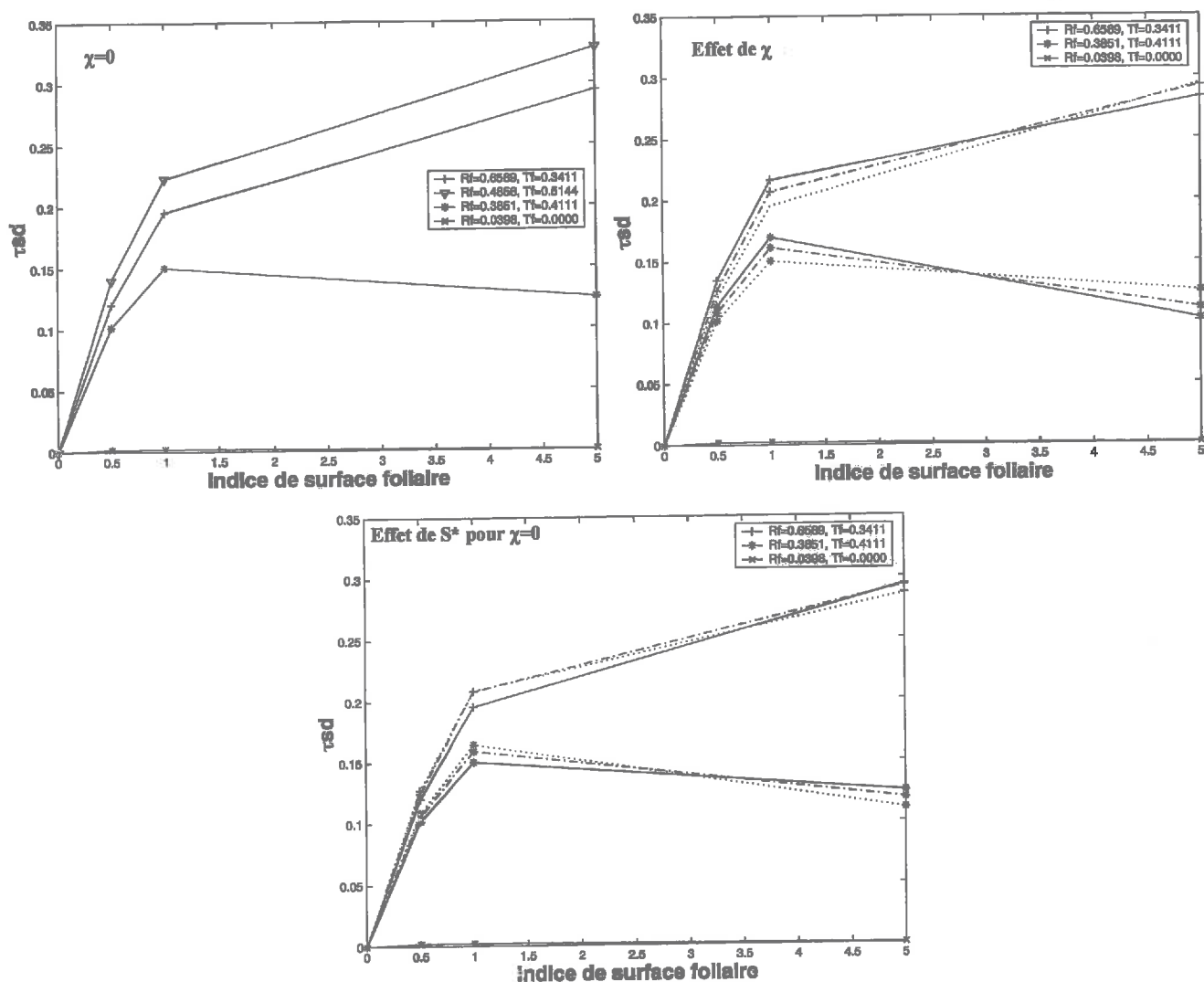


Figure 19 : variation du terme τ_{sd} en fonction du LAI [0.5 1 5], $S^*=[0.025 (-), 0.05(-), 0.1(...)]$, et $\chi=[0(...), 0.5(-) 1(-)]$. Les autres variables sont $d^*=100$, $ALA=58^\circ$, $b/h=0.25$, les propriétés optiques des feuilles sont indiquées sur la figure. Le soleil est à 45° d'angle zénithal.

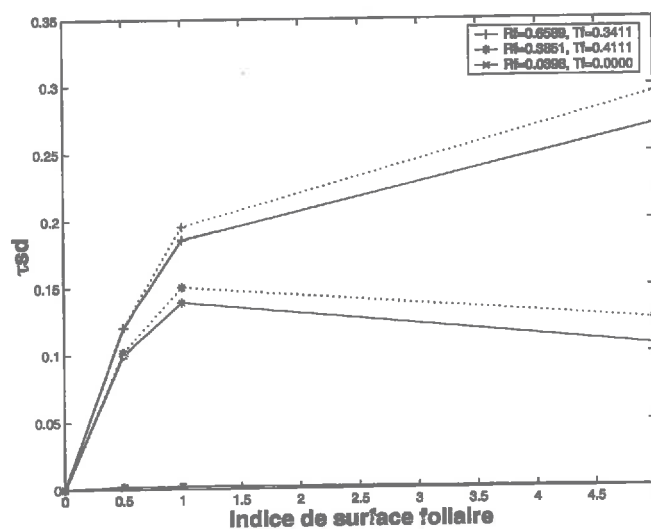


Figure 20 : variation du terme τ_{sd} en fonction du LAI [0.5 1 5], $b/h [0.25 (-), 1(-)]$, et $\chi=0$. Les autres caractéristiques sont celles de la figure précédente.

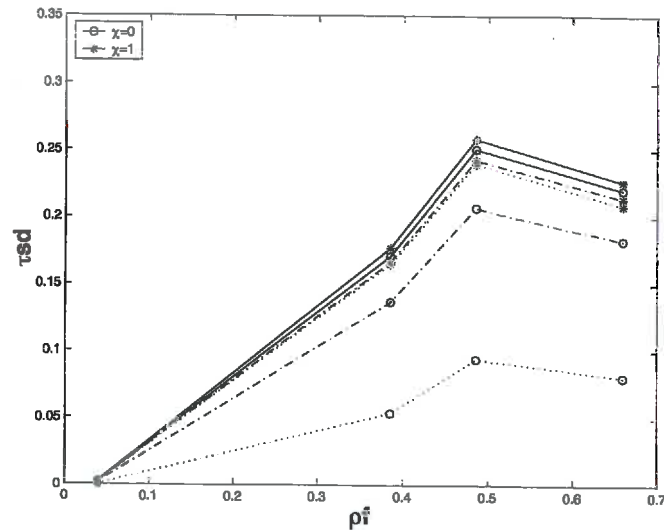


Figure 21 : variation du coefficient τ_{sd} en fonction de la densité des plantes, d^* [1(...), 10(--), 100(-)], et la réflectance des feuilles : LAI=1, $S^*=0.1$, ALA=58°. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

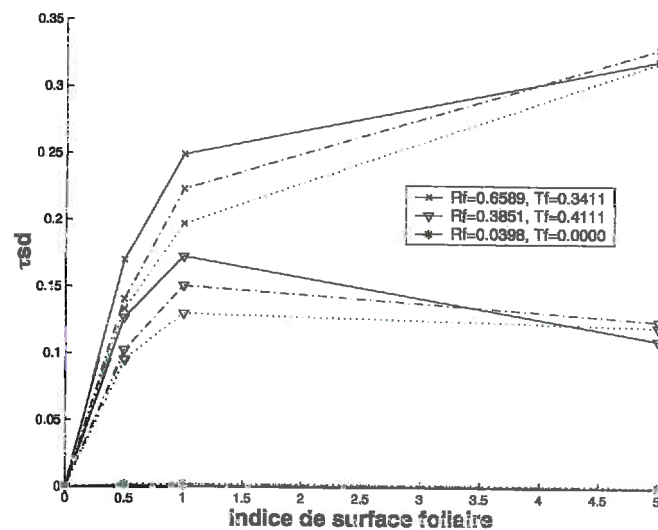


Figure 22 : variation du terme τ_{sd} , pour $\chi=0$, en fonction du LAI [0.5 à 5], ALA [30° (-), 58° (--), 70° (....)] et les propriétés optiques des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

L'effet de la densité relative des plantes sur le terme τ_{sd} est très important (Figure 21) pour les faibles valeurs de la distance relative feuille-tige. Dans ce cas, une diminution de la densité relative diminue la transmittance directionnelle-diffuse du fait de l'apparition de trous dans le couvert qui augmente la transmission directe, sans interactions avec les feuilles. Au contraire, pour un milieu aléatoire, τ_{sd} est quasi insensible à la densité relative de plantes.

La Figure 22 montre que le terme τ_{sd} est relativement sensible à l'inclinaison foliaire pour des feuilles ayant un albédo de simple diffusion non nul. Un redressement des feuilles entraîne une baisse de τ_{sd} pour les faibles LAI=[0.5 1] et une augmentation pour les plus fortes valeurs (LAI=5). Ceci s'explique par :

- pour les faibles LAI, l'augmentation des fractions de trous dans le couvert favorise la transmission directe sans interactions avec les feuilles
- pour les forts LAI, le redressement des feuilles favorise l'éclairement des feuilles en profondeur, augmentant ainsi leur contribution au flux diffus.

6.5.3 Réflectance diffuse-diffuse de la végétation ρ_{dd} .

La Figure 23 montre que le terme ρ_{dd} augmente avec l'albédo de simple diffusion des feuilles comme précédemment vu avec le modèle SAIL. Lorsque la distance feuille-tige diminue ρ_{dd} baisse progressivement pour tous les LAI et toutes les propriétés optiques des feuilles. En effet, l'apparition des trous favorise la transmission du rayonnement pour les faibles indices foliaires, et le piégeage de celui-ci dans les couches plus profondes pour les fortes valeurs d'indice foliaire. A l'inverse une augmentation de la taille de la feuille induit une augmentation très marquée du terme ρ_{dd} dans les cas très agrégés. En effet, pour les grandes feuilles, l'effet d'agrégation est plus faible.

Comme pour le terme de transmittance, directionnel-diffus analysé précédemment, la forme de la feuille affecte le terme ρ_{dd} pour des couverts très agrégés ayant un fort LAI (Figure 24).

L'effet de la densité relative des plantes sur le terme ρ_{dd} est nul à marginal pour les milieux homogènes (Figure 25). Pour des couverts plus agrégés la sensibilité de ρ_{dd} à la densité des plantes augmente et devient maximale pour $\chi=0$. Comme on l'a noté dans le chapitre 4, l'agrégation est d'autant plus forte que la densité relative de plantes est faible : le nombre élevé de feuilles/tige implique une forte superposition des feuilles et des trous entre plantes plus grands. Une décroissance de ρ_{dd} lorsque la densité d^* baisse est alors observée.

Enfin l'effet d'inclinaison montre une baisse de la réflectance diffuse-diffuse lorsque les feuilles se redressent, tendance qui s'accroît lorsque la distance feuille-tige diminue. En effet, le redressement des feuilles provoque une augmentation des proportions des trous et réduit alors les diffusions vers le bas du couvert.

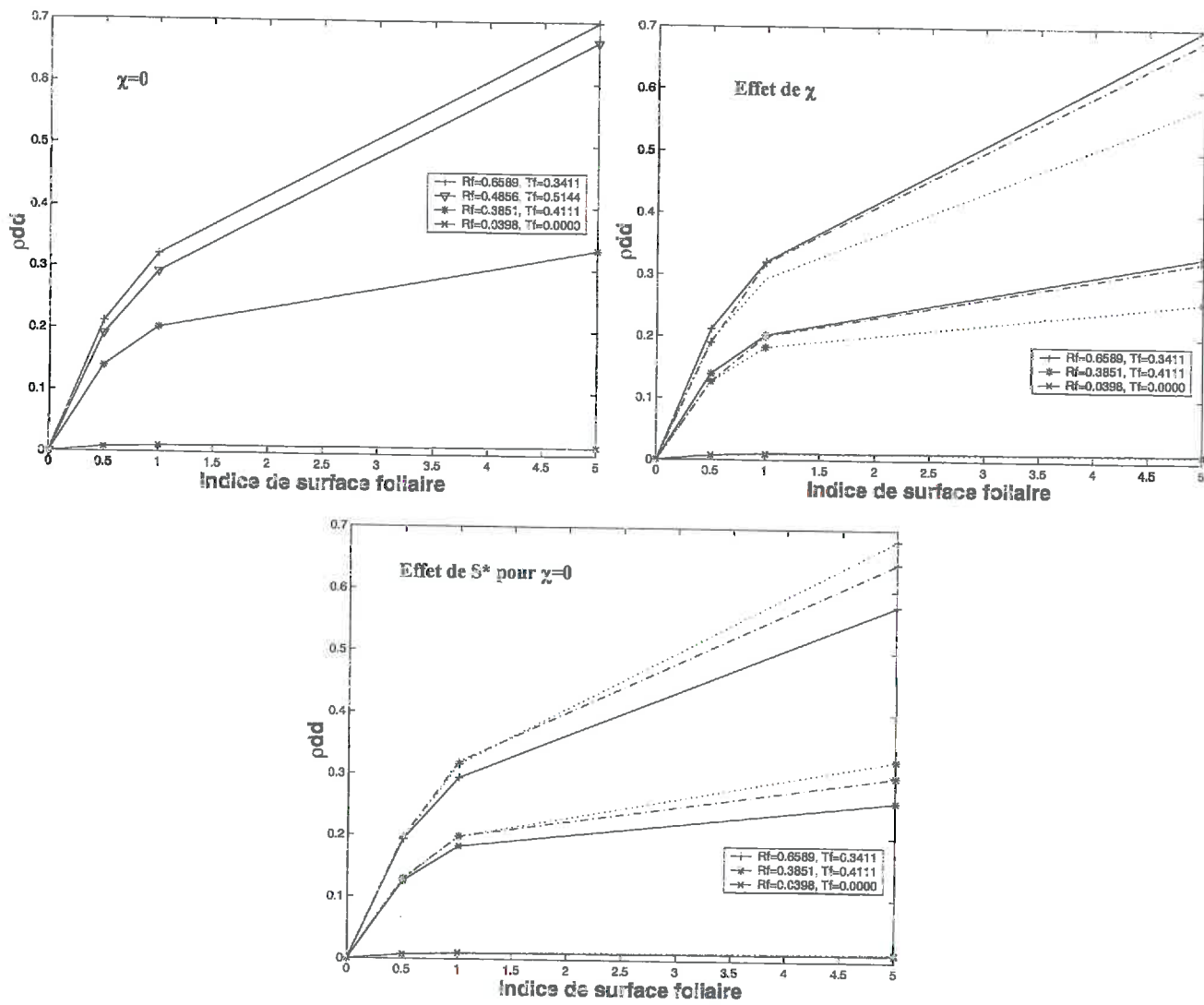


Figure 23 : variation du terme ρ_{dd} en fonction du LAI [0.5 1 5], S^* [0.025 (-), 0.05(-), 0.1(...)], χ =[0(...), 0.5(--), 1(-)], et les propriétés optiques des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19

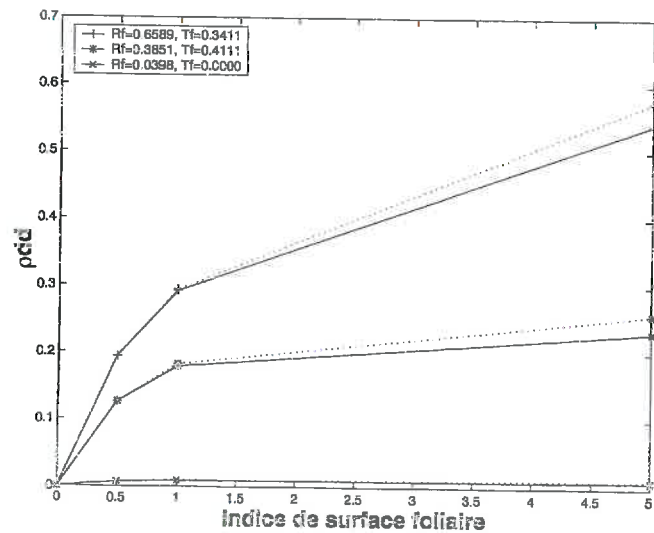


Figure 24 : variation du terme ρ_{dd} en fonction du LAI [0.5 1 5], b/h [0.25 (-), 1(--)], $\chi=0$, et les propriétés optiques des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19

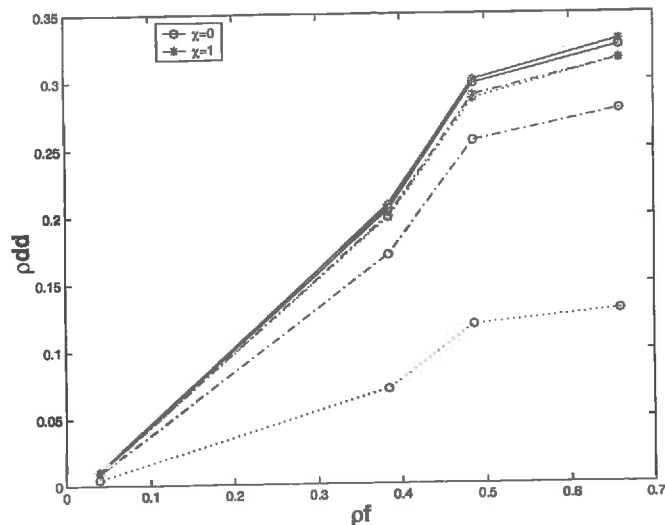


Figure 25 : variation du terme ρ_{dd} en fonction de la densité des plantes, d^* [1(...) 10(—) 100(-)], et la réflectance des feuilles. LAI=1, $S^*=0.1$, ALA=58°. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19

6.5.4 Transmittance diffuse-directionnelle de la végétation τ_{do} .

Par définition, le terme τ_{do} dépendra de la direction d'observation considérée, rendant l'analyse de sensibilité plus complexe. Lorsque le LAI augmente, l'évolution de la variation directionnelle passe d'une forme concave à une forme convexe de manière similaire à ce que nous avons observé précédemment pour le modèle à 4 flux.

La figure 26 illustre la dépendance de τ_{do} en fonction de τ_f , ρ_f , χ et S^* . L'augmentation de l'albédo de simple diffusion induit une augmentation évidente de la transmittance diffuse-directionnelle. A même niveau d'albédo de simple diffusion, le terme τ_{do} baisse toutefois lorsque la transmittance de la feuille diminue.

Une diminution de la distance tige-feuille se traduit par une baisse du terme τ_{do} dans la direction du nadir pour un LAI=0.5. Cette diminution s'étend aux autres directions voisines du nadir pour les forts LAI. Pour un LAI=5 on observe une augmentation de la transmittance diffuse-directionnelle pour les forts angles de visée autour de 60°. Dans ce cas, l'augmentation des trous dans le couvert favorise la sortie du rayonnement sans diffusions pour des directions autour du nadir et défavorise l'absorption par la végétation pour les forts angles de visée.

L'effet de la taille de la feuille sur le coefficient τ_{do} semble négligeable pour les milieux homogènes ($\chi=1$). Néanmoins pour les maquettes très agrégées, une augmentation de la taille de la feuille augmente τ_{do} pour les directions voisines du nadir et baisse τ_{do} pour les forts angles d'observation dans le cas d'un fort LAI. En effet, l'augmentation de la taille de la feuille réduit l'agrégation apparente.

La figure 27 illustre l'effet de la forme de la feuille sur la transmittance diffuse directionnelle. Il se manifeste pour les milieux agrégés par une augmentation du ρ_{dd} , pour des directions autour du nadir, lorsque

b/h augmente. Il est négligeable pour un faible LAI et devient très marqué jusqu'à un angle de visée de 60° pour un LAI=5.

L'effet de la densité relative des plantes est négligeable en milieu homogène comme nous l'avons vu précédemment. Au fur et à mesure que la distance relative tige-feuille diminue, la sensibilité de la transmittance diffuse-directionnelle à la densité des plantes devient élevée (figure 28). On note une augmentation de τ_{do} dans toutes les directions lorsque la densité croît.

Pour les milieux homogènes, la variation de τ_{do} en fonction de l'inclinaison foliaire est similaire à ce qui a été obtenu pour le modèle à quatre flux. La prise en compte de l'agrégation en réduisant la distance feuille-tige n'affecte que peu la sensibilité de τ_{do} à l'inclinaison foliaire (figure 29). On note toutefois un basculement lorsque ALA augmente pour un LAI=5 où contrairement au milieu homogène τ_{do} baisse pour des directions autour du nadir et augmente pour les forts angles de visée.

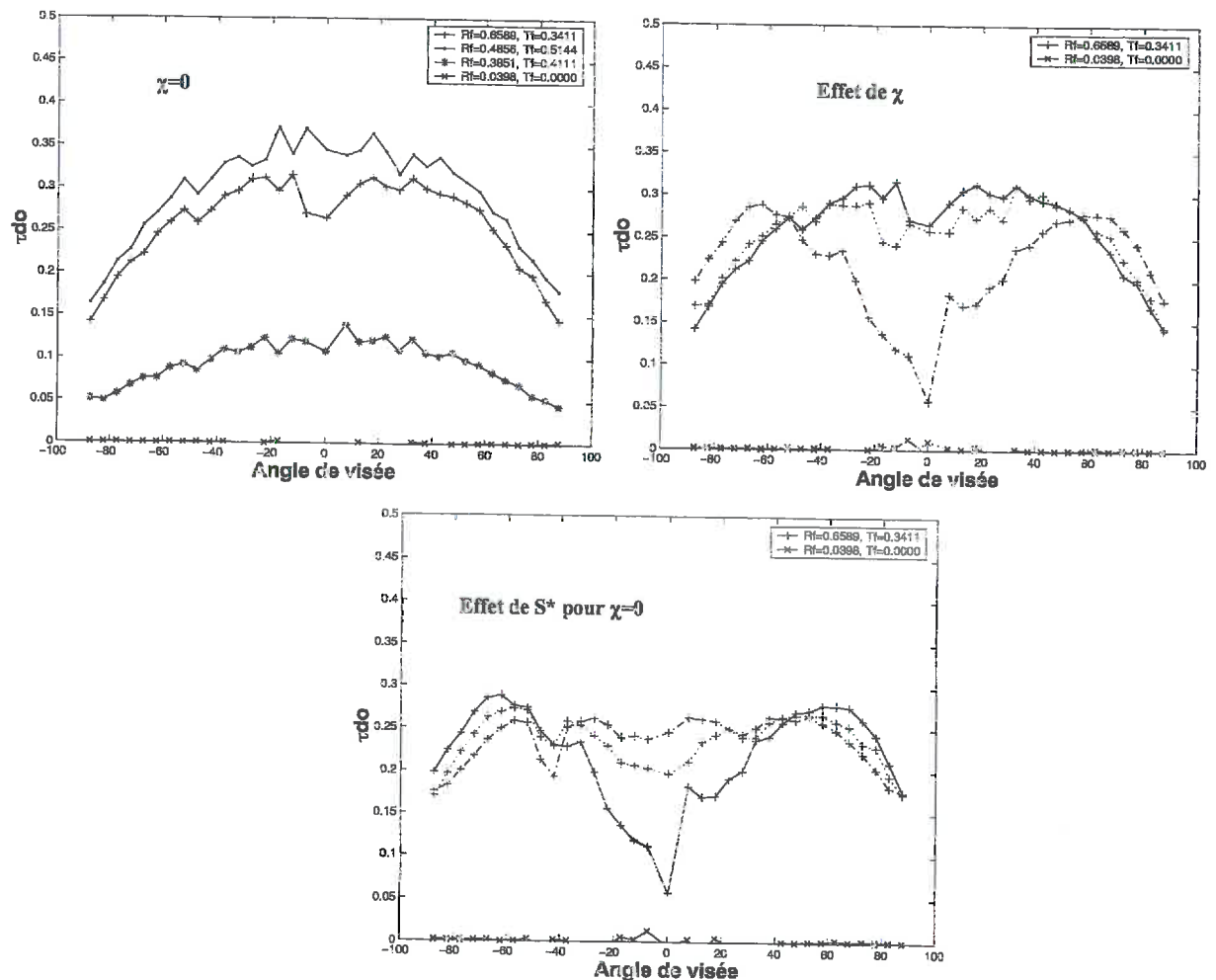


Figure 26 : variation du terme τ_{do} pour LAI=5, en fonction de l'angle de visée dans le plan perpendiculaire, S^* [0.025 (-), 0.05(...), 0.1(-.-)], χ =[0(-.-), 0.5(...), 1(-)], et propriétés optiques des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

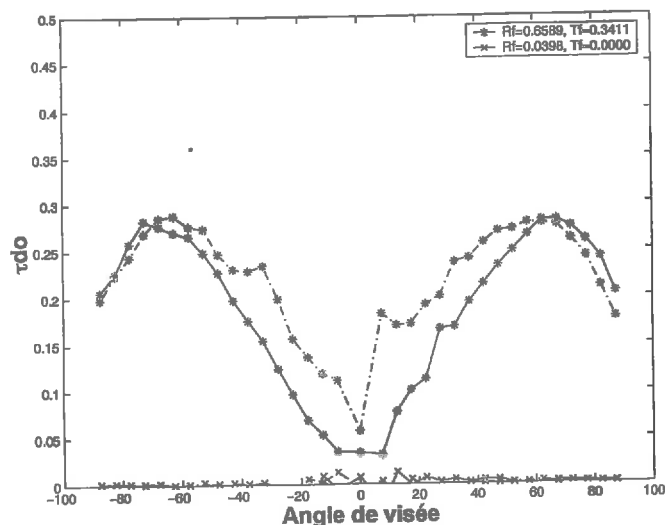


Figure 27 variation du terme τ_{do} pour un LAI=5 en fonction de l'angle de visée dans le plan principal, b/h [0.25 (-), 1(-.-)], $\chi=0$, et propriétés optique des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

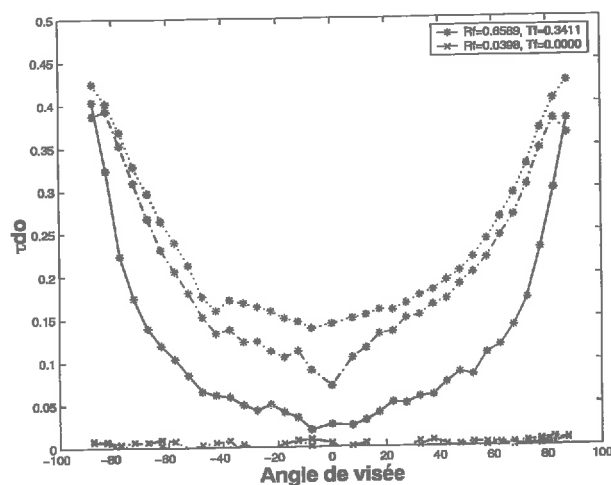


Figure 28 : variation du terme τ_{do} en fonction de l'angle de visée dans le plan principal, d^* [1(-) 10(-) 100(...)], $\chi=0$, et propriétés optique des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

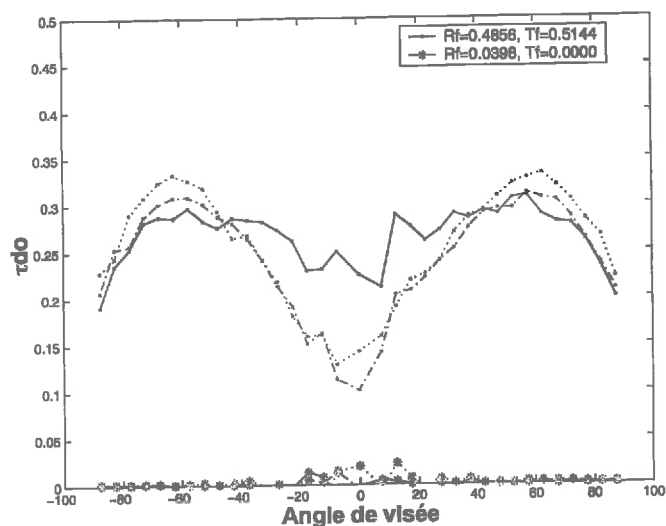


Figure 29 : variation du terme τ_{do} en fonction de l'angle de visée dans le plan principal, LAI=5, $\chi=0$, ALA=[30°(-) 58°(...) 70°(-.-)], et propriétés optique des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

6.5.5 Réflectance directionnelle-directionnelle de la végétation ρ_{so} .

Le terme ρ_{so} est sans doute le plus complexe à analyser du fait de sa double dépendance directionnelle. Par soucis de simplification, nous ne considérerons que la variation directionnelle de l'observation dans le plan principal en fixant la direction d'incidence à 45° .

De manière similaire à tous les termes de réflectance, ρ_{so} augmente avec l'albédo de simple diffusion des feuilles Figure 30. L'augmentation de l'indice de structure des feuilles se manifeste par une baisse des diffusions 'avant' pour des angles de visées supérieurs à environ 45° et augmente pour le reste des directions. En effet, ceci pourrait être expliqué par le fait que ces directions ($>45^\circ$) favorisent la contribution de la transmittance directe des feuilles qui baisse lorsque l'indice de structure augmente. De la même manière, la diffusion 'arrière' est contrôlée par la réflectance des feuilles qui est plus grande pour les indices N élevés.

La diminution de la distance tige-feuille χ se traduit par une légère baisse de la réflectance autour du nadir pour les faibles LAI et qui devient plus importante pour un $LAI=5$ et ce pour toutes les directions de visée.

L'augmentation de la taille de la feuille S^* induit une augmentation de la réflectance autour de la direction du hot spot plus marquée pour un $LAI=5$. Cette sensibilité à la taille de la feuille devient plus importante pour les couverts très agrégés.

L'effet de la forme de la feuille 'b/h' se manifeste dans les couverts très agrégés Figure 31. Celui-ci dépend du LAI et ainsi pour un $LAI=5$ on observe une augmentation du coefficient ρ_{so} pour toutes les directions lorsqu'on augmente le rapport b/h.

La sensibilité de ρ_{so} à la densité relative des plantes est illustrée sur la Figure 32. Pour un milieu homogène l'effet de la densité est très faible. Au fur et à mesure que la distance relative tige-feuille diminue, la sensibilité de la réflectance directionnelle-directionnelle à la densité des plantes devient élevée pour toutes les directions de visée. Lorsque la densité relative de plantes augmente, l'agrégation apparente diminue et le terme ρ_{so} augmente.

Enfin, La diminution de la distance relative feuille-tige augmente l'agrégation des feuilles dans le couvert et la sensibilité de ρ_{so} à l'inclinaison foliaire. Celle-ci est plus élevée pour les forts LAI.

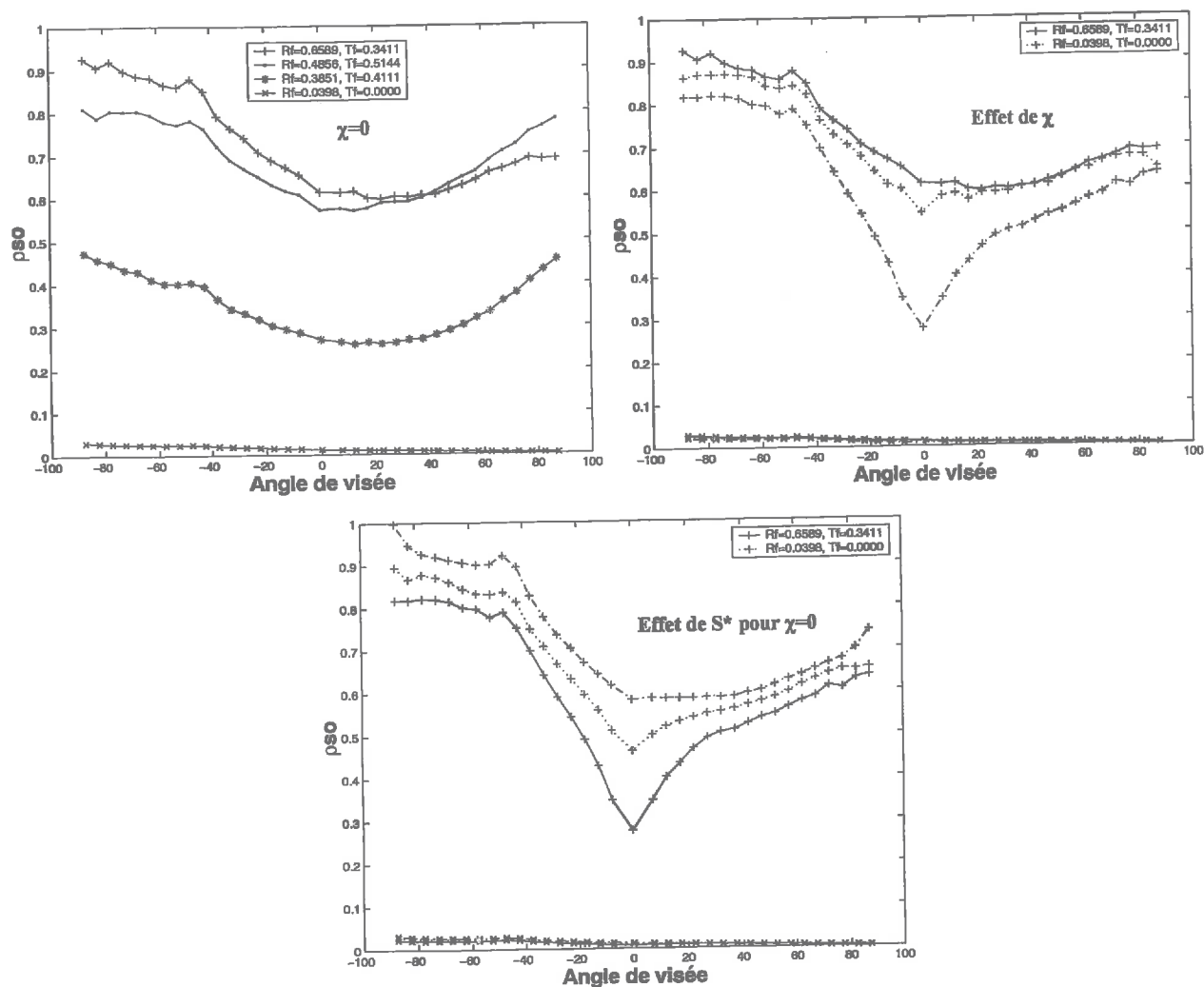


Figure 30 variation du terme ρ_{so} pour LAI=5, en fonction de l'angle de visée dans le plan perpendiculaire, S^* [0.025 (-), 0.05(...), 0.1(-.-)], χ =[0(-.-), 0.5(...), 1(-)], et propriétés optique des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

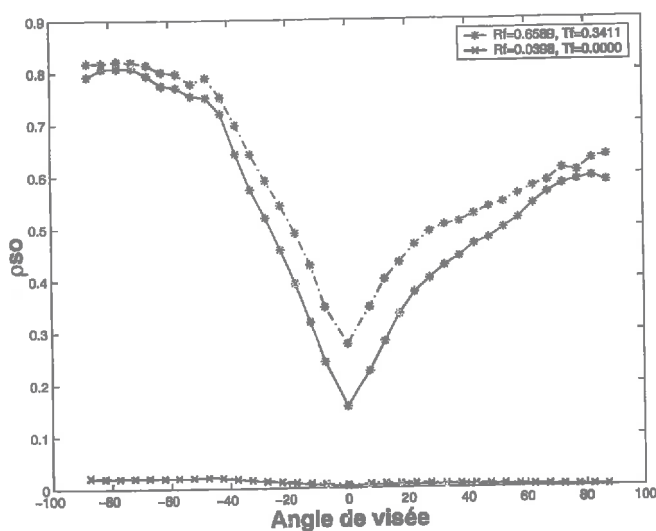


Figure 31 variation du terme ρ_{so} pour un LAI=5 en fonction de l'angle de visée dans le plan principal, b/h [0.25 (-), 1(-.-)], χ =0, et propriétés optique des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

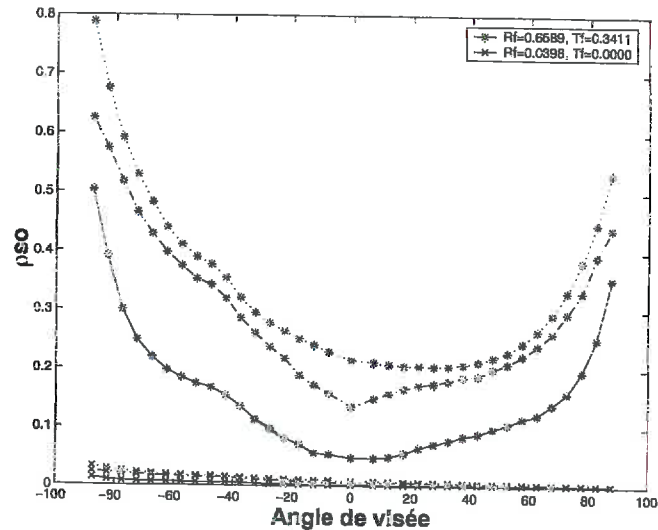


Figure 32 variation du terme ρ_{so} en fonction de l'angle de visée dans le plan principal, d^* [1(-) 10(--) 100(...)], $\chi=0$, et propriétés optiques des feuilles. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la Figure 19.

6.6 Conclusion

Des études de sensibilité ont été effectuées et ont montré l'effet de l'agrégation sur la réflectance du couvert au travers des variables supplémentaires introduites : densité de plantes, taille des feuilles, distance relative des feuilles à la tige, et dans une moindre mesure, la forme des feuilles. Si l'importance de l'agrégation est ainsi démontrée, l'objectif à terme est de disposer d'un modèle de réflectance qui tienne compte de l'agrégation des feuilles et nécessite un minimum de temps de calcul.

L'approche proposée consiste à approximer le transfert radiatif par un formalisme à 4 flux, pour lequel, les différents termes d'extinction et de diffusion sont adaptés à notre description générique d'architecture agrégée de couverts. Cette approche permet de prendre en compte analytiquement des variations de propriétés optiques du sol. La description de la variation spectrale des différents termes du transfert radiatif constitue le deuxième problème que nous avons cherché à résoudre. Une analyse de sensibilité réalisée à partir d'un modèle milieu turbide, le modèle SAIL a permis de montrer que les propriétés optiques des feuilles ne pouvaient pas être simplement réduites à l'albédo de simple diffusion comme le suggère quelques auteurs. Il est également important de prendre en compte pour un même albédo de simple diffusion, le rapport (ou la différence) entre réflectance et transmittance des feuilles. Cette analyse a été confirmée à partir de simulations de nos maquettes d'architecture agrégée générique. Nous avons donc proposé de décrire la dépendance spectrale des termes du transfert radiatif au travers d'ajustements polynomiaux appliqués à des simulations de modèles physiques de transfert radiatif. Cette approche a été testée dans le cas du modèle turbide SAIL et fournit une très bonne estimation des termes du transfert radiatif. Cette démarche nous permet donc de simuler les 4 termes de diffusion identifiés à partir d'un jeu d'une trentaine de coefficients qui dépendent de la géométrie d'observation et d'éclairement, ainsi que de

l'architecture du couvert. Cette démarche peut être ensuite étendue aux autres caractéristiques du couvert, en ajustant des modèles paramétriques pour chaque coefficient polynomial, en fonction la géométrie d'observation et d'éclairement, ainsi que de l'architecture du couvert. L'alternative consisterait à décrire la dépendance de ces coefficients polynomiaux de manière discrète, en échantillonnant l'ensemble des situations possibles et en se dotant de règles d'interpolation. L'utilisation de réseaux de neurones pourrait peut être offrir également une alternative intéressante pour réaliser ces interpolations.

L'application de cette démarche à partir de simulations des termes du transfert radiatif réalisées avec le modèle de lancer de rayons PARCINOPY appliqué à nos maquettes génériques agrégées pose toutefois quelques problèmes logistiques que nous n'avons pu résoudre dans le temps de ce travail de thèse. En effet, pour arriver à ajuster les modèles paramétriques proposés, il nous faut réaliser un grand nombre de simulations ce qui est très gourmand en temps et ressources informatiques, même si ce processus ne doit pas être répété. Il appartiendra donc de définir l'échantillonnage optimal des cas à simuler, trouver les ressources informatiques et les optimisations nécessaires pour atteindre notre objectif final : simuler la réflectance bidirectionnelle rapidement et pour n'importe quelle combinaison des caractéristiques de structure du couvert, des propriétés optiques des feuilles et du sol et de la géométrie d'observation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

1. Objectif et démarche

Ce travail s'inscrit dans la thématique de l'exploitation des données satellitaires en vue d'une caractérisation de la végétation aux échelles intra-parcellaire à globale. L'utilisation de modèles de transfert radiatif apparaît comme une voie intéressante pour estimer les caractéristiques biophysiques principales du couvert à partir des observations satellitaires. Les modèles de transfert radiatif actuellement disponibles sont soit trop simplistes mais 'opérationnels', soit très réalistes, mais difficiles à utiliser de manière opérationnelle. Il nous faudrait donc idéalement disposer d'un modèle réalisant un compromis entre ces deux grands types de modèles. L'objectif final de ce travail est de développer un modèle de transfert radiatif qui combine une description satisfaisante de l'architecture du couvert avec un nombre minimal de variables et ne nécessitant que de faibles ressources informatiques. Ce modèle devra être capable également de s'appliquer à une grande variabilité de types de couverts pour répondre à la large gamme d'échelles que nous nous proposons de couvrir. Nous avons cherché alors à décrire l'agrégation des feuilles dans le couvert et caractériser son effet sur le transfert radiatif.

La description de l'architecture des couverts est complexe, et régie par de nombreux processus qui permettent aux plantes de s'adapter à leur milieu, voire de le coloniser. Une des constantes de tout couvert végétal est d'avoir les feuilles organisées à partir de plantes, branches ou rameaux. Cette particularité introduit une irrégularité dans la distribution spatiale des feuilles, celles-ci étant préférentiellement agrégées. L'agrégation des feuilles apparaît donc comme la caractéristique architecturale essentielle à prendre en compte pour fournir une description satisfaisante du transfert radiatif. L'objectif du travail est donc de proposer à terme un modèle de transfert radiatif ayant les qualités citées précédemment et prenant en compte l'agrégation des feuilles. Pour cela nous avons adopté une démarche qui est organisée en quatre parties :

1. Développement d'un modèle d'architecture du couvert basée principalement sur une représentation effective de l'agrégation des feuilles dans le couvert.
2. Caractérisation de la fraction de trou qui représente une variable clé de l'architecture du couvert. Celle-ci constitue une composante importante dans la modélisation du transfert radiatif dans le couvert. Une étude de sensibilité qualitative de cette variable aux caractéristiques du couvert a permis de mettre en avant les caractéristiques ayant un poids sur cette dernière.
3. Développement d'un modèle paramétrique de la fraction de trou qui intègre l'effet de ces caractéristiques 'sensibles'. Ce modèle a été validé à partir de mesures de fractions de trous réalisées avec des photographies hémisphériques.

4. Proposition d'une approche pour inclure l'effet de l'agrégation des feuilles dans la définition de la réflectance bidirectionnelle du couvert.

2. Travaux effectués et principaux résultats.

2.1 Modèle d'agrégation des feuilles CLAMP

La première étape de ce travail consistait au développement d'un **modèle architectural** qui vise principalement à représenter d'une manière approchée l'agrégation des feuilles dans le couvert. Dans la conception de ce modèle, nous nous sommes imposés certaines conditions telles :

- La **généricité** du modèle de sorte à décrire, par l'intermédiaire d'un formalisme unique, plusieurs types de couvert à partir d'un certain nombre de variables qui caractérisent la feuille, la plante et enfin l'ensemble du couvert.
- La **continuité avec le milieu homogène** de manière à évoluer progressivement d'un milieu homogène vers un autre de plus en plus agrégé. Le cas 'homogène' semble en effet s'appliquer relativement bien à un certain nombre de types de couvert.
- La **faible dimensionnalité** du modèle. En effet celle-ci représente une condition nécessaire à la mise en œuvre des processus d'inversion des données de télédétection.

Ces conditions imposées, plus particulièrement la généralité et la faible dimensionnalité ont certainement un effet sur les performances. On cherche une description effective du couvert qui permette de représenter d'une façon assez précise le transfert radiatif pour une large gamme de types de couverts. Cette approche est donc très différente de celle qui aurait consisté à réaliser une collection de modèles adaptés à chaque particulier.

Le modèle d'agrégation proposé décrit l'architecture du couvert en considérant les échelles de la feuille (taille, forme, inclinaison), la plante (arrangement relatif des feuilles en faisant varier la distance relative feuille-tige) et le couvert (hauteur, schéma de semis, densité des plantes). Les variables densité relative des plantes et distance relative feuille-tige correspondent respectivement à la distance inter plante et à la taille de la couronne de la plante ramenée à la distance inter-plante. Une base de maquettes numériques 3D a été ensuite générée. L'échantillonnage des variables d'entrée du modèle a été effectué en tenant compte de la distribution des valeurs observées sur des couverts réels. Nous avons appelé ce modèle d'architecture générique CLAMP : Clumped Architecture Model of Plants. Le modèle CLAMP nécessite donc 3 variables supplémentaires par rapport à celles utilisées dans les milieux homogènes : la densité de plante, la taille des feuilles et la distance entre les feuilles et les tiges.

2.2 Agrégation des feuilles et modélisation de la fraction de trous.

Les maquettes 3D générées par le modèle CLAMP ont servi à calculer la fraction du trou pour évaluer sa dépendance aux caractéristiques architecturales. La fraction de trou est quantifiée en appliquant la technique du Z-buffer.

Nous avons évalué deux modèles de fraction de trou : Poisson et Markov. Le modèle de Poisson est basé sur l'analogie du milieu turbide qui est utilisée dans de nombreux modèles de transfert radiatif. Il tient compte des variables : indice de surface foliaire, inclinaison des feuilles et angle zénithal. Le modèle de Markov prend en compte la dépendance verticale entre les fractions de trous de chaque couche élémentaire. Il nécessite un paramètre supplémentaire, λ_0 dont la dépendance directionnelle n'est pas bien connue, ainsi que la variable ΔL qui définit l'épaisseur de la couche élémentaire. Pour le cas 'homogène', nous avons observé une très bonne cohérence entre les simulations de ces modèles et les valeurs de fraction de trous calculées sur des maquettes 'homogènes' par la technique du Z-buffer. Ceci a permis de valider notre chaîne de construction de maquettes et de calcul de la fraction de trous. Dans les cas de couverts agrégés, le modèle de Markov montre de bien meilleures performances que le modèle de Poisson. Nous avons également montré qu'il était nécessaire de fixer ΔL à une valeur inférieure à 0.01 pour obtenir une bonne description de la fraction de trous. L'hypothèse selon laquelle l'épaisseur de la couche élémentaire serait proportionnelle à la taille des feuilles n'a pas été retenue après l'avoir testée. Dans ces conditions, le modèle de Markov ne comporte plus que 3 variables d'entrée : LAI, ALA et λ_0 . Le paramètre λ_0 dépend donc implicitement des variables architecturales supplémentaires que nous avons introduites pour décrire l'agrégation en plus de l'angle zénithal. En conséquence nous avons cherché à expliciter le déterminisme de λ_0 .

Une analyse de sensibilité a montré que λ_0 peut être considéré comme indépendant de la forme de la feuille. De même, nous avons vérifié que λ_0 est indépendant de ALA comme la théorie le laissait penser. Par contre, λ_0 diminue lorsque la distance relative tige feuille diminue, et ce surtout quand les couverts sont caractérisés par un nombre de feuilles par plante significatif correspondant à de faibles densités de plantes et des feuilles relativement petites. Enfin, la variabilité directionnelle de λ_0 apparaît très importante, particulièrement pour les directions proches du nadir pour les plus forts niveaux d'agrégation.

Suite à cette étude de sensibilité, un modèle paramétrique de λ_0 a été ajusté en fonction de l'angle zénithal et de la distance relative tige-feuille. Malheureusement, nous n'avons pu étendre cette paramétrisation aux autres variables architecturales du fait d'un échantillonnage insuffisant de leurs combinaisons. Notre modèle de fraction de trous a été comparé à des mesures réalisées sur une large variété de types de couverts. Les résultats montrent toutefois que la distance relative tige-feuille ajustée sur ces observations de fraction de trous tend très fréquemment vers l'unité, situation correspondant à un milieu homogène pour lequel le modèle de Poisson montre des performances équivalentes. Une analyse de sensibilité supplémentaire confirme le fait que seuls les couverts ayant

un indice foliaire supérieur à 1.0 et plus de 10 feuilles par plante sont susceptibles d'exprimer un caractère agrégé.

Cette modélisation de la fraction de trous représente ainsi un préalable à la prise en compte de l'agrégation des feuilles dans la modélisation du transfert radiatif dans le couvert, la fraction de trou intervenant explicitement dans l'expression de la réflectance.

2.3. Agrégation des feuilles et modélisation du transfert radiatif

Cette troisième étape a pour but de proposer une modélisation du transfert radiatif appliquée au modèle d'agrégation CLAMP et de montrer sa faisabilité. L'approche proposée repose sur l'utilisation de l'approximation du transfert radiatif au travers de 4 flux. Il est ainsi possible d'identifier 6 termes du transfert radiatif qui permettent de décrire les interactions entre la végétation et le sol. Les deux premiers termes correspondent aux fractions de trous dans les directions de visée et d'incidence. Les 4 termes suivants correspondent à la diffusion d'un flux directionnel ou hémisphérique vers un autre flux.

Nous avons montré comment estimer ces termes du transfert radiatif à partir de lancer de rayons appliqué à nos maquettes génériques agrégées. Une étude de sensibilité des termes du transfert radiatif a montré leur sensibilité à l'albédo de simple diffusion de la feuille, mais aussi, à même albédo de simple diffusion, à la différence entre la réflectance et la transmittance des feuilles. Nous avons proposé une paramétrisation de ces termes en fonction de l'albédo de simple diffusion et de la différence entre réflectance et transmittance des feuilles. Les simulations PARCINOPY ont également mis en évidence l'influence de la forme et la taille des feuilles, la distance relative feuille-tige et la densité relative des plantes. Malheureusement, du fait des temps de calcul nécessaires pour réaliser les simulations de PARCINOPY, nous n'avons pu obtenir un échantillonnage suffisant des combinaisons des différentes caractéristiques du couvert pour fournir un modèle de réflectance complet.

3 Limites rencontrées et améliorations proposées.

Notre approche est basée sur des hypothèses simplificatrices dans la conception du modèle d'agrégation. En effet, le modèle CLAMP se base une description effective de l'architecture du couvert qui n'est pas exactement conforme à la réalité. Les organes du couvert comme le tronc, les branches, les fleurs ou les éléments sénescents n'ont pas été considérés et la distribution des feuilles est considérée uniforme verticalement. L'agrégation des feuilles a été définie principalement autour de la verticale en modulant la densité d'indice foliaire dans la dimension horizontale. Ainsi, nous ne représentons pas l'agrégation autour des branches ou des pousses comme dans le cas des conifères. La distribution des plantes a été supposée aléatoire ce qui n'est pas vraiment vérifié pour de nombreuses cultures ou certains types de forêts qui sont souvent distribuées suivant des lois données. Il serait donc nécessaire d'évaluer l'importance de ces hypothèses à partir de simulations sur des maquettes réalistes

telles que celles développées au CIRAD avec le logiciel AMAP ou celles basées sur le L-système ou l'approche mécanistes développées à l'INRA-Grignon.

Le principal facteur limitant rencontré dans la mise en œuvre de ce travail est le temps de calcul que nécessite d'une part la génération des maquettes 3D CLAMP et d'autre part les simulations du modèle de transfert radiatif à lancer de rayons PARCINOPY.

La génération des maquettes 3D CLAMP a été codée en langage matlab et sa structure n'est pas forcément optimale et adaptée à ce langage. Ainsi, dans le cas des maquettes de pins qui peut contenir jusqu'à $3.6 \cdot 10^6$ aiguilles, la génération de la maquette est devenue quasiment impossible. Afin de contourner ces problèmes nous proposons une réécriture du code de génération des maquettes en optimisant sa structure et/ou sa conversion en un langage type C ou fortran qui devrait être plus efficace. Ceci permettra de générer une plus grande quantité de types de couvert et d'échantillonner plus finement les variables d'entrée du modèle.

Concernant le modèle de lancer de rayons, les améliorations possibles concerneraient principalement le passage de son mode natif mono-spectral à un mode multispectral où un ensemble de longueurs d'onde (ou de propriétés spectrales) peuvent être gérées simultanément. En complément, il serait également possible d'adapter PARCINOPY pour en faire un outil dédié à la simulation de la réflectance dans des couverts complexes. Il faudrait alors reprendre la description à 4 flux (éventuellement étendue à un nombre plus important) et calculer les différents termes du transfert radiatif par une série de simulations dédiées.

Enfin, l'utilisation de gros calculateurs, ou de réseaux de calculateurs devrait permettre également de réduire considérablement les temps de calcul.

4 Perspectives.

Ce travail a constitué une étape initiale dans le développement d'un modèle de transfert radiatif utilisable à des fins d'inversion pour estimer les caractéristiques de la surface à partir de capteurs de télédétection. Il faut noter que la télédétection n'est pas forcément restreinte à l'utilisation de capteurs sur des plateformes spatiales. Une des applications de ce travail est aussi l'estimation des caractéristiques de structure des couverts à partir de mesures réalisées au sol, en particulier les photographies hémisphériques. Nous nous sommes concentrés jusqu'à présent sur l'utilisation de la valeur moyenne de la fraction de trous. Mais cette approche permet également de prendre en compte d'autres caractéristiques statistiques des distributions de trous qui devraient permettre d'accéder de manière plus spécifique à certaines caractéristiques structurales. Il serait donc intéressant de poursuivre les investigations dans cette direction.

Si ce travail a permis d'avancer sur un certain nombre de questions, en particulier sur la faisabilité de l'approche, sur la dépendance directionnelle du paramètre d'agrégation λ_0 , sur la formalisation de la dépendance spectrale des termes du transfert radiatif, l'objectif initial consistant à disposer d'un modèle de transfert radiatif opérationnel n'est pas encore atteint. Il faudra donc

poursuivre dans la voie tracée par ce travail, en définissant une base d'échantillonnage suffisamment vaste pour permettre l'apprentissage du modèle paramétrique en fonction de toutes les caractéristiques architecturales du couvert. C'est à ce prix que nous pourrions améliorer la précision des estimations des caractéristiques du couvert par télédétection. Toutefois, si l'amélioration du modèle de transfert radiatif est essentielle, il nous faudra également fournir des distributions a priori des variables correspondant pour rendre l'estimation plus robuste. C'est ainsi que notre modèle CLAMP pourrait être utilisé pour décrire les principales caractéristiques structurales à partir de photographies hémisphériques réalisées au sol sur un ensemble assez vaste de types de couverts tels que ceux échantillonnés dans le cadre du projet VALERI. Nous accèderions alors les distributions a priori des variables de modèle de transfert radiatif que nous pourrions exploiter dans la phase d'inversion et assurer ainsi à l'ensemble une très forte cohérence.

REFERENCES

Références

- Ahmad, S. P. and D. W. Deering (1992). "A simple analytical function for bidirectional reflectance." *Journal of geophysical research* 97(D17): 18867-18886.
- Allen, W. A., H. W. Gausman, et al. (1970). "Mean effective optical constants of cotton leaves." *JOSA* 60(4): 542,547.
- Allen, W. A., H. W. Gausman, et al. (1969). "Interaction of isotropic light with a compact plant leaf." *J. Opt. Soc. Am.* 59(10): 1376-1379.
- Andrieu, B., F. Baret, et al. (1997). "Evaluation of an improved version of SAIL model to simulates bi-directional reflectance of sugar beet canopies." *Remote Sensing of Environment* 60: 247-257.
- Andrieu, B. and H. Sinoquet (1993). "Evaluation of structure description requirements for predicting gap fraction of vegetation canopies." *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 207-227.
- Andrieu, B. and P. Valéry (1992). "Transformation d'image en coordonnées angulaires pour l'analyse des fréquences de trous dans les couverts végétaux." *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 126: 43-47.
- Bach, H. and W. Mauser (1994). Modelling and model verification of the spectral reflectance of soils under varying moisture conditions. *IGARSS'94, Pasadena (USA), IEEE*.
- Bacour, C. (2001). Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance: analyse de sensibilité et configurations optimales. Méthodes physiques en télédétection. Paris (France), Université Paris 7 - Denis Diderot: 206.
- Baranovski, G. V. G. (1998). Biologically and Physically-based rendering of natural scenes. Computer science. Calgary (Alberta, Canada), University of Calgary: 241.
- Baret, F. and T. Fourty (1997). "Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements." *Agronomie* 17: 455-464.
- Baret, F., B. Andrieu, et al. (1993). "Gap frequency and canopy architecture of sugar-beet and wheat crops." *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 207-227.
- Begué, A. (1992). "Modeling hemispherical and directional radiative fluxes in regular clumped canopies." *Remote Sensing of Environment* 40: 219-230.

- Ben-Dor, E., Y. Inbar, et al. (1997). "The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short infrared region (400-2500nm) during a controlled decomposition process." *Remote Sensing of Environment* 61: 1-15.
- Bonhomme, R., C. Varlet Grancher, et al. (1974). "the use of hemispherical photographs for determining the LAI of young crops." *Photosynthetica* 8(3): 299,301.
- Campbell, G. S. (1986). "Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution." *Agric. For. Meteorol.* 36: 317-321.
- Campbell, G. S. (1996). "Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distribution." *Agric. For. Meteorol.* 49: 173-176.
- Chason, J. W., D. D. Baldocchi, et al. (1991). "A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area." *AFM* 107: 107-128.
- Chelle, M. (1996). *PARCINOPY PARTicle traCINg in the canoPY v. 0.9*. Grignon (France), INRA Bioclimatologie: 1-8.
- Chelle, M. (1997). *Développement d'un modèle de radiosité mixte pour simuler la distribution du rayonnement dans les couverts végétaux*. Institut de formation supérieure en informatique et télécommunication. Rennes, Université de Rennes: 161.
- Chelle, M., B. Andrieu, et al. (1997). "Nested radiosity for plant canopies." *The Visual Computer* Nov1997-Mar1998: 1-24.
- Chen, J. M. and S. G. Leblanc (1997). "A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35: 1316-1337.
- Chen, J. M. and S. G. Leblanc (2001). "Multiple scattering scheme useful for geometric optical modeling." *Transactions on Geoscience and remote sensing* 39(5): 1061-1071.
- Chen, J. M. (1996). "Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands." *Agricultural and Forest Meteorology* 80: 135-163.
- Chen, J. M. and T. A. Black (1991). "Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture." *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 1-12.
- Chen, J. M. and T. A. Black (1992). "Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions." *agricultural and Forest Meteorology* 60: 249-266.
- Chen, J. M. and J. Cihlar (1995). "Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size method analysis." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(3): 777-787.

- Cierniewski, J. (1987). "A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range." *Remote Sens. Environ.* 23: 98-115.
- Clark, R. N. and T. L. Roush (1984). "Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications." *Journal of Geophysical Research* 89(B7): 6329-6340.
- De Reffye P, Blaise F., et al. (1997). Un modèle écophysologique de la croissance et de l'architecture des arbres et de leurs interactions. Actes du séminaire sur la modélisation architecturale, INRA Grignon.
- De Wit C. T. (1965). Photosynthesis of leaf canopies, *Agric. Res. Rept*: 57.
- Deering, D. W., T. F. Eck, et al. (1990). "Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization." *Agric. For. Meteorol.* 52: 71-93.
- Disney, M. I., P. Lewis, et al. (2000). "Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling." *Remote Sensing Reviews* 18(2-4): 163-196.
- Drouet J. L. and Mouliat B. (1997). "Spatial re-orientation of maize leaves affected by initial plant orientation and density." *Agricultural and Forest meteorology* 88: 85-100.
- Dymond, J. R., J. D. Sheperd, et al. (1999). "A simple physical model of vegetation canopy reflectance." *Journal of Geophysical Research* in press.
- Engelsen, O., B. Pinty, et al. (1996). Parametric bidirectional reflectance factor models: evaluation, improvements and applications., European Commission, Joint Research Center, Space applications Institute.
- Escadafal, R. (1992). Soil spectral properties and their relationship with pedological parameters. Exemple for arid regions. *Imaging spectrometry as a tool for environmental observations.*, Kluwer.
- España, M., F. Baret, et al. (1999). "Sensitivity of radiative transfer variables calculation to the accuracy of canopy structure description. The case of maize canopy as described by a 3D architecture model." *Agronomie* 19: 241-254.
- España, M., F. Baret, et al. (1998). "A dynamic model of 3D architecture: application to the parameterisation of the clumpiness of the canopy." *Agronomie* 18: 609-626.
- España, M. L. (1997). Utilisation de maquettes dynamiques 3D pour suivre des cultures de maïs par télédétection. *Sciences de l'Information Géographique*. Marne la Vallée (France), Université de Marne la Vallée: 239.
- Fournier, C. and B. Andrieu (1998). "A 3D architecture and Process-based model of maize development." *Annals of Botany* 81: 233-250.

- Fourty, T. and F. Baret (1998). "Spectral estimates of fresh leaf biochemistry." *International Journal of Remote Sensing* 19(7): 1283-1297.
- Fourty, T., F. Baret, et al. (1996). "Leaf optical properties with explicite description of its biochemical composition: direct and inverse problems." *Remote sensing of Environment* 56: 104-117.
- Fukshansky, L. and A. M. Remisowsky (1992). "A theoretical study of the light microenvironment in a leaf in relation to photosynthesis." *Plant Science* 86: 167-182.
- Gastellu-Etchegorry, J. P., V. Demarez, et al. (1996). "Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies." *Remote Sensing of Environment* 58: 131-156.
- Gerstl, S. A. W. and C. C. Borel (1992). "Principles of the radiosity method versus radiative transfer for canopy reflectance modeling." *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 30(2): 271-275.
- Gerstl, S. A. W. and C. Simmer (1986). "Radiation physics and modelling for off-nadir satellite sensing of non-Lambertian surfaces." *Remote Sensing of Environment* 20: 1-29.
- Gobron, N., B. Pinty, et al. (1997). "A semi-discrete model for the scattering of light by vegetation." *Journal of Geophysical Research* in press.
- Godin C., Costes E., et al. (1999). "A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry." *Annals of Botany* 84: 343-357.
- Goel, N. S. and D. E. Strebel (1984). "Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies." *Agronomy Journal* 76: 800-802.
- Goel, N. S. and T. Grier (1987). "Estimation of canopy parameters of row planted vegetation canopies using reflectance data for only four view directions." *Remote Sensing of Environment* 21: 37-51.
- Goel, N. S. (1988). "Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data." *Remote Sensing Reviews* 4: 1-212.
- Goel, N. S., I. Rozehnal, et al. (1991). "A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region." *Remote Sens. Environ.* 36: 73-104.
- Govaerts, Y. M., S. Jacquemoud, et al. (1996). "Three-dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf." *Applied Optics* 35(33): 6585-6598.

- Govaerts, Y. M. and M. M. Verstraete (1998). "Raytran: a monte carlo ray tracing model to compute light scattering in three dimensional heterogeneous media." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(2): 493-505.
- Gower, S. T. and J. M. Norman (1991). "Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad leaf plantations." *Ecology* 72(5): 1896-1900.
- Guyot, G. (1995). "La réflectance des couverts végétaux." *Photo-Interprétation* 3: 157-180.
- Herbert, D. A. and J. H. Fownes (1997). "Effects of leaf aggregation in a broad leaf canopy on estimates of leaf area index by the gap-fraction method." *Forest Ecology and Management* 97: 277-282.
- Hapke, B. (1986). "Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extinction coefficient and the opposition effect." *Icarus* 67: 264-280.
- Iaquinta, J. and B. Pinty (1997). "Adaptation of a bidirectional reflectance model including the hot-spot to an optically thin canopy." *Remote Sensing Reviews* 15: 195-222.
- Ishida, T., H. Ando, et al. (1991). "Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties." *Remote Sens. Environ.* 38: 173-182.
- Ishida, T. and J. C. Price (1996). "A procedure to infer complex refractive index and mean particle radius of soils from visible to near infrared reflectance data." *International Journal of Remote Sensing* 17(11): 2145-2164.
- Ivanov N., Boissard P., et al. (1995). "Computer stereo plotting for 3D reconstruction of a maize canopy." *Agricultural and Forest Meteorology* 75: 85-102.
- Jacquemoud, S. (1988). *Modélisation des propriétés optiques des feuilles.*, INRA Bioclimatologie, BP 91, 84 143 Montfavet cedex (France): 1-39.
- Jacquemoud, S., C. Bacour, et al. (2000). "Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode." *Remote Sensing of Environment* 74: 471-481.
- Jacquemoud, S. and F. Baret (1990). "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra." *Remote Sensing of Environment* 34: 75-91.
- Jacquemoud, S., F. Baret, et al. (1992). "Modeling spectral and directional soil reflectance." *Remote sensing of the Environment* 41: 123-132.
- Jacquemoud, S., F. Baret, et al. (1995). "Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT+SAIL model on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors." *Remote Sensing of the Environment* 52: 163-172.

- Jacquemoud, S. and S. L. Ustin (2001). Leaf optical properties: a state of the art. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing., Aussois, France.
- Jacquemoud, S., S. L. Ustin, et al. (1996). "Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model." *Remote Sensing of Environment* 56: 194-202.
- Jones H.G. (1992). *Plants and microclimate . A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge.
- Jupp, L. (1998). A compendium of kernel and others (semi-) empirical BRDF models, CSIRO: 1-18.
- Kimes, D. S. and J. A. Kirchner (1982). "Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes." *Appl. Opt.* 21(22): 4119-4129.
- Knyazikhin, Y. V., A. L. Marshak, et al. (1992). "Interaction of Photons in a Canopy of Finite-Dimensional Leaves." *Remote Sensing of Environment*, 39: 61--74.
- Knyazikhin, Y. and A. Marshak (1991). *Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies, and iterative methods for their solution. Photon-vegetation interactions*. R. Myneni and J. Ross. New York (USA), Springer: 9-43.
- Kubelka, P. and F. Munk (1931). "Ein beitrag zur optik der farbanstriche." *Ann. Tech. Phys.* 11: 593-601.
- Kuusk, A. (1985). "The hot-spot effect of a uniform vegetative cover." *Sov. J. Remote Sensing* 3(4): 645-658.
- Kuusk, A. (1991). *The hot-spot effect in plant canopy reflectance*, Tartu University: 1-16.
- Kuusk, A. (1994). "A multispectral canopy reflectance model." *Remote sensing of the environment* 50: 75-82.
- Kuusk, A. (1995). "A fast invertible canopy reflectance model." *Remote sensing of the environment* 51: 342-350.
- Kuusk, A. and T. Nilson (2000). "A directional multispectral forest reflectance model." *Remote Sensing of Environment* 72: 244-252.
- Li, X. and A. H. Strahler (1985). "Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23: 705--721.
- Li, X. and A. H. Strahler (1988). "Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26(2): 161-170.
- Liang, S. and A. H. Strahler (1993). "An analytical BRDF model of canopy radiative transfer and its inversion." *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 31(5): 1081-1092.

- Liu, W., F. Baret, et al. (2002). "Relating soil surface moisture to reflectance." *Remote Sensing of Environment* 81: 238-246.
- Liu, W., F. Baret, et al. (2003). "Evaluation of methods for soil surface moisture estimation from reflectance data." *International Journal of Remote Sensing* 24(10): 2069-2083.
- Lucht, W. and J. L. Roujean (2001). "Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangular satellite sensor observations." *Remote Sensing Reviews* in press.
- Maier S W., Lüdeker W. , et al. (1999). "SLOP: A Revised Version of the Stochastic Model for Leaf Optical Properties,." *Remote Sensing of Environment* 68(3): 273-280.
- Monteith J.L. and M. H. Unsworth (1990). *Principles of Environmental Physics*. London.
- Myneni R B, Ross J., et al. (1989). "A review on the theory of photon transport in leaf canopies." *Agricultural and Forest Meteorology* 45: 1-153.
- Myneni, R. B., V. P. Gutschick, et al. (1988). "Photon transport in vegetation canopies with anisotropic scattering part II. Discrete-ordinates/exact-kernel technique for one-angle photon transport in slab geometry." *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 17-40.
- Myneni, R. B., A. Marshak, et al. (1991). *Discrete ordinates method for photon transport in leaf canopies. Photon-vegetation interactions*. R. Myneni and J. Ross. New York (USA), Springer: 45-109.
- Myneni, R. B., A. L. Marshak, et al. (1991). "Transport theory for a leaf canopy of finite-dimensional scattering centers." *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 46(4): 259-280.
- Neumann, H. H., G. Den Hartog, et al. (1989). "Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall." *Agricultural and Forest Meteorology* 45: 325-345.
- Nilson, T. (1971). "A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands." *Agricultural Meteorology* 8: 25-38.
- Nilson, T. and A. Kuusk (1989). "A reflectance model for homogeneous plant canopy and its inversion." *Remote Sensing of Environment* 27: 157-167.
- Nilson, T. (1999). "Inversion of Gap Frequency Data in Forest Stands." *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99: 437-448.
- North, P. R. J. (1996). "Three dimensional forest light interaction model using a monte carlo method." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(4): 946-956.

- Neuvelon, Y., S. Rambal, et al. (2000). "Modelling of daily fluxes of water and carbon from shortgrass steppes." *Agriculture and Forest Meteorology* 100: 137-153.
- Otterman, J. (1985). "Bidirectional and hemispheric reflectivities of a bright soil plane and a sparse dark canopy." *Int. J. Remote sensing* 6(6): 879-902.
- Otterman, J. and G. H. Weiss (1984). "Reflection from a field of randomly located vertical protusions." *Appl. Opt.* 23(12): 1931-1936.
- Pinty, B., N. Gobron, et al. (2001). "Radiation Transfer model intercomparison (RAMI) exercise." *Journal of Geophysical Research* 106(D11): 11937-11956.
- Pinty, B. and M. Verstraete (1991). Bidirectional reflectance and surface albedo: Physical modeling and inversion. 5th international colloquium physical measurements and signatures in remote sensing., Courchevel (France), ESA.
- Pinty, B., M. M. Verstraete, et al. (1989). "A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils." *Remote Sens. Environ.* 27: 273-288.
- Planchais I. and Sinoquet H. (1998). "Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of *Fagus sylvatica* (L.)." *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 241-253.
- Prévo, L., F. Aries, et al. (1991). "Modélisation de la structure géométrique du maïs." *Agronomie* 11: 491-503.
- Prusinkiewicz P. (1997). A look at the visual modeling of plant using L-systems. Actes du séminaire sur la modélisation architecturale, INRA Grignon.
- Prévo, L. (1985). Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application à la télédétection. Validation sur un couvert de Maïs., Université Paris VI, France: 1-110.
- Rahman H., Pinty B., et al. (1993). "Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model 2. Semiempirical Surface Model Usable with NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data." *Journal of Geophysical Research*, 98(D11): 20791-20801.
- Ross, J. (1981). *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Boston, W. Junk.
- Roujean, J. L., M. Leroy, et al. (1992). "A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data." *Journal of geophysical research* 97(D18): 20455-20468.
- Roujean, J. L., D. Tanré, et al. (1997). "Retrieval of land surface parameters from airborne POLDER bidirectional reflectance distribution function during HAPEX-Sahel." *Journal of Geophysical Research* 102(D10): 11201-11218.

- Shibayama, M. and C. L. Wiegand (1985). "View azimuth and zenith and solar angle effects on wheat canopy reflectance." *Remote Sensing of Environment* 18: 91-103.
- Shultis, J. K. and R. B. Myneni (1988). "Radiative Transfer in Vegetation Canopies With Anisotropic Scattering." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiation Transfer*, 39: 115--129.
- Sinoquet H., Rivet P., et al. (1997). Méthodes de digitalisation et de visualisation 3D de l'architecture des plantes. Actes du séminaire sur la modélisation architecturale, INRA Grignon.
- Smith, N. J., J. M. Chen, et al. (1993). "Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using LI-COR LAI-2000." *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1940-1943.
- Steven, M. D., C. S. T. Daughtry, et al. (1991). Modelling leaf angle distribution with non vertical symmetry. Crop structure and microclimate: characterizations and applications. C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet. Paris (France), INRA edition: 351-358.
- Strahler, A. H. and D. L. B. Jupp (1990). "Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using boolean models and geometric optics." *Remote Sensing of Environment* 34: 153-166.
- Strebel, D. E., N. S. Goel, et al. (1985). "Two-dimensional leaf orientation distributions." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-23(5): 640-647.
- Suits, G. H. (1972). "The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy." *Remote Sensing of Environment* 2: 117-125.
- Thanisawanyaangkura, S., H. Sinoquet, et al. (1997). "Leaf orientation and sunlit leaf area distribution in cotton." *Agricultural and Forest Meteorology* 86: 1-15.
- Tucker, C. J. and M. W. Garratt (1977). "Leaf optical system modeled as a stochastic process." *Appl. Opt.* 16(3): 635-642.
- Ustin, S. L., S. Jacquemoud, et al. (2001). "Simulation of photon transport in three dimensional leaf: implications for photosynthesis." *Plant, Cell and Environment* 24: 1095-1103.
- Van Gardinen, P. R., G. E. Jackson, et al. (1999). "Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography." *Agricultural and Forest Meteorology* 94: 243-257.
- Vanderbilt, V. C., L. Grant, et al. (1991). Polarization of light by vegetation. Photon vegetation interactions. R. Myneni and J. Ross. New York (USA), Springer: 191-228.

- Vanderbilt, V. C., G. Rondeaux, et al. (1993). Polarization of light by vegetation. Crop structure and microclimate: characterizations and applications. C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet. Paris (France), INRA edition: 63-76.
- Verhoef, W. (1984). "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model." Remote Sensing of Environment 16: 125-141.
- Verhoef, W. (1985). "Earth observation modeling based on layer scattering matrices." Remote Sensing of Environment 17: 165-178.
- Verhoef, W. (2003). "An improved version of the SAIL model for the multiple scattering." Remote Sensing of Environment submitted.
- Verhoef, W. and b. H. (2003). "Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models." Remote Sensing of Environment in press.
- Verstraete, M. M., B. Pinty, et al. (1990). "A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 1. Theory." J. Geophys. Res. 95(D8): 11755-11765.
- Walter-Shea, E. A., J. M. Norman, et al. (1989). "Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean." Remote Sens. Environ. 29: 161-174.
- Walthall, C. L. (1997). "A study of reflectance anisotropy and canopy structure using a simple empirical model." Remote Sensing of Environment 61: 118-128.
- Walthall, C. L., J. M. Norman, et al. (1985). "Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces." Appl. Opt. 24(3): 383-387.
- Wang, Y. P. and P. G. Jarvis (1988). "Mean Leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution." Agricultural and Forest Meteorology 43: 319-321.
- Wanner W., Strahler A. H., et al. (1997). "Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: theory and algorithm." Journal of Geophysical Research 102(D14): 17143-17161.
- Warren Wilson, J. (1960). "Inclined point quadrats." New Phytology 59: 1-8.
- Weiss, M., F. Baret, et al. (1999). "Hemispherical reflectance and albedo estimates from the accumulation of across track sun synchronous satellite data." Journal of Geophysical Research 104(D18): 22,221-22,232.
- Weiss, M., F. Baret, et al. (2003). "Review of methods and devices used to estimate LAI from gap fraction measurements." Agricultural and Forest Meteorology submitted (September 2002).

Weiss, M., F. Jacob, et al. (2002). "Evaluation of kernel-driven BRDF models for the normalization of Alpilles/ReSeDA POLDER data." *Agronomie* 22: 531-536.

Welles, J. M. and J. M. Norman (1991). "Instrument for indirect measurement of canopy architecture." *Agronomy Journal* 83(5): 818-825.

Yamada, N. and S. Fujimura (1988). A mathematical model of reflectance and transmittance of plant leaves as a function of chlorophyll pigment content. *Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'88)*, Edinburgh (Scotland).

Zarco-Tejada, P. J., J. R. Miller, et al. (2001). "Needle chlorophyll content estimation through model inversion using hyperspectral data from boreal conifer forest canopies." *Remote Sensing of Environment* submitted.

Abstract

Vegetation monitoring by remote sensing data provide considerable informations to manage the human activities. Many missions offer accurate follow-up of the vegetation. However, they remain still largely under exploited because of difficulties in deriving some canopy state variables like the leaf area index.

Inversion of radiative transfer model within canopies makes possible to estimate canopy biophysical variables. However, radiative transfer models used in inversion must have a realistic description of canopy architecture; low number of parameters and to be not consuming time.

For the moment, only models based on a homogeneous representation of canopy are used. However most actual canopies show variable and structured horizontal distribution of leaf area density. In particular, leaf (needles) clumping in the plant around stems or branches or trunks is not represented by these simple models and thus constitutes an important limit to estimate biophysical variables with satisfying accuracy.

In the same way, estimation of leaf area index using ground measurement of the directional variation of gap fraction can be biased if the leaves (needles) clumping is not taken into account.

The objective of this work is to develop a generic model of leaf clumping within canopies that allow to simulate gap fraction and reflectance of canopies. This work is then organised in five parts:

1- Bibliographical analysis summarizing the description of canopy architecture and difficulties in modelling leaf clumping within radiative transfer.

2- A model of architecture (CLAMP) developped to describe leaf clumping in a generic way is then proposed. It assumes that the most important scale of clumping is around stems, trunks or branches. This model allows to describe in a continuous way leaf clumping by introducing two additional variables compared to the models of homogeneous medium: the relative density of the plants d^* and the relative leaf stem distance χ .

3- Using CLAMP model, a modeling of gap fraction is proposed. Gap fraction is calculated by a 'z_buffer' method. Many gap fraction simulations corresponding to a wide range of variation of the CLAMP input variables were performed. Results show that Markov model is better than Poisson one to represent the clumped cases. Finally, we propose a parameterization that describes the variation of λ_0 as function of view direction and relative leaf-stem distance: χ .

4- The validation of CLAMP model for the gap fraction description is given. Hemispherical photographs carried out on various cultures are used to evaluate the outputs of our model. The results are discussed in relation with measurements accuracy and approximations of our model.

5 In the last part, we apply our description of architecture to calculate the radiative transfer within canopies. We propose to describe the radiative transfer based on extinction (gap fraction) and scattering flux in one vegetation layer. To calculate scattering terms, we considered 4 fluxes: incoming directional flow, outgoing directional flow, and two hemispherical flows, one going up, the other going down. In this manner, the effect of ground properties can be uncoupled from the vegetation ones. These fluxes were calculating, for whole structure canopies generated by CLAMP, using the ray tracing model PARCINOPY.

Finally general conclusion is given, summarizing the principal results and providing prospects.

Key words: Clumping, gap fraction, vegetation, radiative transfer modelling.

Résumé

L'observation de la terre à partir de l'espace devient une source d'information majeure pour la gestion des activités humaines ainsi que pour des problématiques environnementales aux échelles spatiales locale à globale. De nombreuses missions offrent un potentiel important de suivi précis de la végétation. Elles restent pourtant encore largement sous exploitées du fait de la difficulté d'accéder de manière précise et robuste aux variables d'état pertinentes du couvert, en particulier l'indice foliaire. En mettant à part les approches purement empiriques, l'inversion des modèles de transfert radiatif permet d'estimer les caractéristiques biophysiques du couvert dont l'indice foliaire. Toutefois, les modèles de transfert radiatif utilisables de manière opérationnelle en inversion doivent être suffisamment réalistes au niveau de la représentation de l'architecture du couvert tout en ayant un nombre relativement faible de variables d'entrée et en étant peu gourmand en ressources informatiques. Pour le moment, seuls les modèles basés sur une représentation homogène du milieu sont utilisés alors que la plupart montrent une distribution horizontale de la densité de surface foliaire très variable et structurée. En particulier, l'agrégation des feuilles dans la plante autour des tiges ou des branches ou troncs n'est pas représentée par ces modèles simples et constitue donc une limite importante à la précision de l'estimation de l'indice foliaire à partir des données de télédétection. De même, au niveau du sol, l'estimation de l'indice foliaire à partir de la mesure de la variation directionnelle de la fraction de trous peut être biaisée si l'agrégation des feuilles n'est pas prise en compte.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un modèle générique d'agrégation des feuilles dans un couvert végétal, et d'utiliser cette description de l'architecture pour simuler la fraction de trous et la réflectance du couvert. La thèse est ainsi décomposée en 5 grandes parties :

1- L'analyse bibliographique dresse l'état de l'art concernant la représentation de l'architecture des couverts, et montre la difficulté de modéliser l'agrégation des feuilles ce qui justifie le travail engagé.

2- Un modèle d'architecture (CLAMP) permettant de représenter l'agrégation des feuilles de manière générique est ensuite proposé. Il est basé sur l'hypothèse que l'échelle d'agrégation la plus importante est l'agrégation autour des tiges, troncs ou branches. Ce modèle permet donc de décrire d'une manière continue l'agrégation des feuilles en introduisant deux variables supplémentaires par rapport aux modèles de milieu homogène : la densité relative des plantes d^* et la distance relative feuille tige, χ .

3- A partir du modèle CLAMP précédent, une modélisation de la fraction de trous est proposée. Un ensemble de simulations de la fraction de trous représentant une large gamme de variation des variables d'entrée de CLAMP a été généré. Il a permis de montrer que le modèle de Markov est bien meilleur que le modèle de Poisson pour représenter les cas agrégés. Enfin, nous proposons une paramétrisation permettant de décrire la variation de λ_0 avec la direction et la distance relative feuille-tige : χ .

4- La validation du modèle CLAMP pour la description de la fraction de trous a été basée sur des photographies hémisphériques réalisées sur différentes cultures. Les résultats sont discutés en regard de la précision de la mesure et des hypothèses sous jacentes à notre modèle.

5- Dans cette dernière partie, nous appliquons notre description de l'architecture agrégée au calcul du transfert radiatif. Nous proposons de décrire le transfert radiatif à partir de coefficients de diffusion et d'extinction (fraction de trou) des flux dans la couche de végétation. Pour calculer les coefficients de diffusion, nous avons considéré 4 flux : le flux directionnel incident, le flux directionnel dans la direction de visée, et deux flux hémisphériques, l'un montant, l'autre descendant. De cette manière l'effet des propriétés du sol peut être découplé de celui propre de la végétation. Le modèle de lancer de rayons PARCINOPY a été appliqué à l'ensemble des maquettes de structure de couvert générées précédemment.

Enfin une conclusion générale est donnée, résumant les principaux résultats et dégageant des pistes de recherches futures.

Mots clés : Agrégation, fraction de trous, végétation, modélisation du transfert radiatif

Bibliothèque
I.N.R.A. - C.S.E.
Unité Climat Sol et Environnement
Bâtiment Climat
Site Agroparc
F. 84914 AVIGNON CEDEX 9
FRANCE