

UNIVERSITÉ DE MARNE-LA-VALLÉE



THÈSE



présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR
de l'Université de Marne-la-Vallée
Spécialité : Sciences de l'information géographique

Simulation de la variation temporelle, directionnelle et spectrale
de la réflectance de cultures de maïs à partir d'un modèle
dynamique de la structure 3D du couvert

par :

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I.N.R.A. - Site AGROPARC
Unité de Bioclimatologie
Domaine Saint-Paul
84914 AVIGNON CEDEX 9
FRANCE

María Luisa ESPAÑA BOQUERA

AH TH 49
BIBLIOTHÈQUE

5 FEV. 1998

Soutenue le 9 Décembre 1997 devant le jury composé de :

Bernard Cervellie
Marc Leroy
Marcel Raffy
Bruno Andrieu
Frédéric Baret

UMLV
CESBIO
GRTS
INRA
INRA

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

Remerciements

À la fin de cette thèse je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Je remercie d'abord Bernard Cervelle, de m'avoir acceptée dans sa formation doctorale, de diriger cette thèse, ainsi que de présider le jury. Agradezco sobretodo su amabilidad y el afecto que siempre me ha dispensado.

Je remercie également Bernard Seguin de m'avoir accueilli dans son laboratoire, pour sa compression et sa cordialité. Ma plus grande gratitude est pour Frédéric Baret, qui m'a donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Sa sympathie et son optimisme ont été indispensables pour qu'elle arrive a bon terme.

Je remercie également Marc Leroy et Marcel Raffy d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Ses remarques ont été très intéressantes et constructives. Mon sincère remerciement aussi à Bruno Andrieu, pour ses conseils et pour faire partie du jury.

Un grand merci à tous les gens de la station de Bioclimatologie d'Avignon, les permanents et les gens de passage, qui ont contribué à faire de mon séjour à Avignon une expérience très enrichissant, autant du point de vue professionnel que personnel. Je voudrais remercier très particulièrement Nadine Bruguier, Jacqueline Saumade et Roseline Olivier pour leur aide toujours efficace, ainsi que Gérard Guyot, Michel Verbrouge et Laurent Prévot pour l'intérêt qu'ils ont porté sur mon travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tous les membres de l'équipe de Biométrie d'Avignon, pour leur accueil toujours sympathique et chaleureux, en particulier à Franck Aries avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Je tiens finalement à remercier la Commission Européenne pour le financement de ce travail.

Résumé

La télédétection constitue un outil privilégié pour suivre l'évolution de la végétation. L'interprétation des données doit pouvoir bénéficier des connaissances acquises sur la physique du transfert radiatif et sur la dynamique de mise en place de la structure du couvert. L'objectif de ce travail est le développement d'un modèle de transfert radiatif pour la simulation de la variation directionnelle, spectrale et temporelle de la réflectance, s'appuyant sur une description réaliste de la structure du couvert. Cela suppose le développement d'un modèle de description de la plante et d'un outil adapté pour la simulation précise et rapide de la réflectance.

Un modèle de description de la plante de maïs est développé pour décrire la forme des feuilles, leur dimension et leur hauteur d'insertion, tout le long d'un cycle cultural. Les surfaces paramétriques issues de ce modèle sont approchées par des triangles, ce qui permet la construction de maquettes informatiques. Des études de sensibilité indiquent qu'il est possible de travailler avec des maquettes simplifiées, sans renoncer à une bonne précision des estimations de la réflectance.

Un modèle de transfert radiatif est proposé. Il consiste à estimer la réflectance simple par double projection et la réflectance multiple par un modèle de milieu turbide (*SAIL*), à partir d'un indice foliaire effectif, estimé sur la maquette, qui permet de prendre en compte le caractère agrégé du couvert.

Des mesures de réflectance, sur un ensemble représentatif de parcelles, sont comparées aux estimations du modèle proposé. Les maquettes sont tout d'abord ajustées sur les observations. Le modèle de structure semble suffisamment souple pour représenter les différentes situations testées. Les résultats montrent une bonne adéquation entre mesures et simulations, malgré les imprécisions associées aux mesures expérimentales. Par comparaison, le modèle *SAIL* fournit également de relativement bonnes estimations de la réflectance du couvert. Les améliorations possibles sont discutées, ainsi que ses applications.

Abstract

Remote sensing techniques offer a very efficient way to monitor vegetation dynamics. The interpretation of data benefits from our knowledge accumulated on the physics of radiative transfer and on the dynamics of canopy architecture set up. The objective of this study is to develop a radiative transfer model for the simulation of the directional, spectral and temporal variation of canopy reflectance based on a realistic description of canopy architecture. This requires obviously a model that describes the 4D (3D+time) model of canopy structure, coupled with a model capable of fast and accurate simulations of the corresponding reflectance.

A model of maize canopy structure is developed that describes the shape, curvature, dimension, height of leaves all along the growth cycle. The parametric surfaces generated by this model are approximated by triangles, allowing the rendering of plants and canopies. Sensitivity analyses indicated that it is possible to use a degraded description of the canopy while keeping accurate reflectance simulations.

A radiative transfer model is proposed. It consists in deriving the simple scattering from a double projection technique, and in approximating the multiple scattering by a classical turbid medium model using an effective leaf area index to account for the clumpiness of the canopy. Reflectance measurements performed over a wide range of situations are compared to the estimation derived with the previous models. The architecture model is first adjusted over the observations. It appears to be flexible enough to describe all the situations considered. Results show a good agreement between the measured and simulated reflectance, although inaccuracies observed over the experimental data. In comparison, the classical SAIL model provides also relatively good estimates of canopy reflectance. Possible improvements are discussed, as well as future applications.

Resumen

La teledetección constituye una herramienta privilegiada para el seguimiento de la evolución de la vegetación. La interpretación de los datos de teledetección debe poder beneficiar de los conocimientos adquiridos sobre la física de la transferencia radiativa y sobre la dinámica de la estructura del dosel. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo de transferencia radiativa para la simulación de la variación direccional, espectral y temporal de la reflectancia, basado sobre la descripción realista de la estructura del dosel. Esto supone el desarrollo de un modelo de descripción de la planta y de un útil adaptado para la simulación precisa y rápida de la reflectancia.

Se ha desarrollado un modelo de descripción de la planta de maíz para describir la forma de las hojas, sus dimensiones y su altura de inserción, durante todo un ciclo cultural. Las superficies paramétricas resultantes de este modelo se aproximan con triángulos, lo que permite la construcción de maquetas informáticas. Los estudios de sensibilidad realizados muestran que es posible trabajar con maquetas simplificadas, sin renunciar a una buena precisión de las estimaciones de la reflectancia.

Se propone un modelo de transferencia radiativa, que consiste en estimar la reflectancia simple por doble proyección y la reflectancia múltiple con un modelo de medio turbio (*SAIL*), a partir de un índice foliar efectivo, estimado sobre la maqueta, que permite tener en cuenta el carácter agregativo del dosel.

Se han comparado medidas de reflectancia, realizadas sobre un conjunto representativo de parcelas, a las estimaciones del modelo propuesto. En primer lugar se han ajustado las maquetas sobre las observaciones. El modelo de estructura se ha mostrado lo suficientemente flexible como para representar las diferentes situaciones estudiadas. Los resultados muestran una buena adecuación entre medidas y simulaciones, a pesar de las imprecisiones asociadas a las medidas experimentales. Por comparación, el modelo *SAIL* proporciona también estimaciones relativamente buenas de la reflectancia del dosel. Se discuten las posibles mejoras, así como las aplicaciones del modelo propuesto.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Étude bibliographique : État de l'art sur l'utilisation des données de télédétection en agriculture	9
2.1	Modèles de transfert radiatif	9
2.1.1	Les modèles de milieux turbides ou statistiques .	10
2.1.2	Les modèles géométriques	10
2.1.3	Les modèles basés sur une description réaliste de la structure	11
2.1.4	Choix d'un type de modèle	12
2.2	Modélisation des couverts végétaux	13
2.2.1	Caractérisation de la structure 3D des plantes . .	13
2.2.2	Modélisation de l'évolution temporelle	14
2.2.3	Modélisation des propriétés optiques	14
2.3	Le maïs	16
2.3.1	Méthodes de caractérisation de la structure du maïs	17
2.3.2	Modèles de description de la structure du maïs . .	17
2.3.3	Développement	19
2.4	Objectif et plan de la thèse	19
3	Le modèle de structure dynamique de maïs	23
3.1	Introduction	23
3.2	Matériel et méthodes	24
3.2.1	Expérimentations	24
3.2.2	Mesures biologiques	25
3.2.3	Autres mesures	26

3.3	Modèle de description de la plante	27
3.3.1	Forme de la feuille développée	27
3.3.2	Courbure de la nervure centrale	29
3.3.3	Section transversale et gaufrage	31
3.4	Dimensions de la plante	34
3.4.1	Paramétrisation de la description de la structure: la vigueur	34
3.4.2	Plante adulte	35
3.4.3	Évolution temporelle	58
3.5	Construction de plantes et de champs	73
3.6	Propriétés optiques	74
3.6.1	Contenu en chlorophylle	74
3.6.2	Contenu en eau	75
3.6.3	Indice de structure	76
3.7	Conclusion	76
4	Effet de la qualité de la représentation de la maquette sur le transfert radiatif	93
4.1	Introduction	93
4.2	Représentation de la maquette 3D: Triangulation	95
4.2.1	Procédure de triangulation	96
4.2.2	Étude de la convergence de la procédure de tri- angulation	99
4.3	Méthodes de calcul des variables du transfert radiatif	105
4.3.1	Calcul de la <i>LIDF</i>	106
4.3.2	Fraction de trous monodirectionnelle	108
4.3.3	Réflectance bidirectionnelle par lancer de rayons	111
4.4	Sensibilité à la qualité de la représentation de la maquette	113
4.4.1	Niveau de triangulation de référence	114
4.4.2	Nombre de plantes nécessaires pour bien décrire le champ de réflectance	115
4.4.3	Effet de la triangulation et du gaufrage: P_0 et <i>LIDF</i>	118
4.4.4	Sensibilité de la <i>BRDF</i>	125
4.5	Conclusion	139

5	Développement d'un modèle rapide de calcul de la réflectance	141
5.1	Introduction	141
5.2	Entrées du modèle	142
5.2.1	Les maquettes utilisées dans les simulations de réflectance	142
5.2.2	Les propriétés optiques utilisées dans les simulations de réflectance	144
5.3	Résultats obtenus par lancer de rayons	145
5.4	Construction d'un modèle rapide de réflectance	146
5.4.1	Calcul de la diffusion simple par double projection	150
5.4.2	Calcul de la diffusion multiple	151
5.5	Évaluation du modèle	166
5.6	Conclusion	171
6	Validation du modèle rapide proposé	173
6.1	Introduction	173
6.2	Matériel et méthodes	174
6.2.1	Expérimentation INRA 90	174
6.2.2	Expérimentation INRA 97	179
6.2.3	Expérimentation Alpilles 97	184
6.3	Résultats	188
6.3.1	Construction des maquettes	189
6.3.2	Estimation du <i>LAI</i> effectif et de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles	194
6.3.3	Simulation de la réflectance	199
6.4	Discussion	212
6.4.1	Représentation de la structure	212
6.4.2	Simulation de la réflectance	216
6.5	Conclusion	218
7	Conclusion	221

Chapitre 1

Introduction

Par sa capacité à obtenir d'une manière rapide, non destructive et à large échelle des informations précises sur les surfaces naturelles, à partir de la mesure, grâce aux satellites, des rayonnements réfléchis ou émis dans les différents domaines de longueurs d'onde, les applications opérationnelles de la télédétection sont nombreuses.

Dans le domaine de l'agriculture, la télédétection est actuellement reconnue comme un outil très efficace d'estimation des caractéristiques biophysiques de la végétation permettant le suivi des cultures, l'établissement des statistiques agricoles et la cartographie de l'occupation du sol. Un grand intérêt est accordé également à son utilisation pour le suivi des surfaces non cultivées, comme les forêts, les océans ou les zones urbaines. Une autre application importante est l'étude de phénomènes globaux, tels que les changements climatiques, la déforestation, la désertification, etc.

L'interaction entre les radiations électro-magnétiques et les objets *modèles TR* est régie par les équations de Maxwell et l'équation d'onde. Dans le cas d'un couvert végétal, la complexité de sa structure ne permet pas de résoudre ces équations directement et l'utilisation d'approximations s'impose. Des nombreux modèles de transfert radiatif (TR) ont été développés ces dernières années. Ils permettent de simuler la distribution directionnelle, spectrale et la polarisation des rayonnements réfléchis ou émis par les surfaces naturelles. Ces modèles nécessitent en entrée une description de la structure du couvert, ainsi que les propriétés optiques,

diélectriques ou la température des éléments qui le composent. L'interprétation des données satellitaires pose donc le problème de l'inversion de ces modèles.

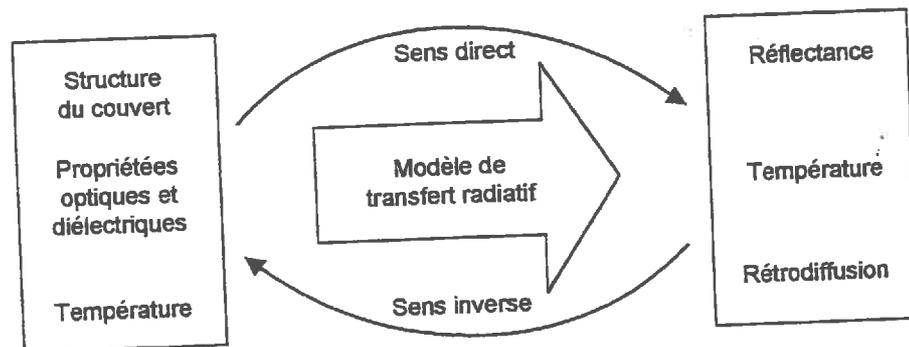


FIG. 1.1 - Modèles TR en sens direct et inverse

sens inverse

La précision avec laquelle les caractéristiques des cultures peuvent être estimées à partir des données de télédétection est souvent limitée par le manque de robustesse des algorithmes empiriques actuellement utilisés, ainsi que par la qualité et la quantité d'information radiométrique disponible. Les satellites actuels mesurent principalement la variation spectrale du signal dans quelques bandes spectrales larges, et cela soit avec une haute résolution spatiale et une faible résolution temporelle, soit avec des mesures fréquentes mais une faible résolution spatiale.

Des nouveaux projets, comme *POLDER*, *MERIS*, *ATSR*, *MISR*, *PRISM* ... permettront de mesurer en complément la variation directionnelle de la réflectance. Cette information, dans la plupart des cas, sera acquise au cours d'une brève période de temps, pendant laquelle la végétation peut évoluer. Cette variation temporelle représente par elle-même une source très intéressante d'information, essentielle pour caractériser la dynamique du couvert et suivre son fonctionnement.

En plus des dimensions spectrale et spatiale on trouvera alors, dans l'information radiométrique, les dimensions directionnelle et temporelle. L'utilisation de l'ensemble de ces informations doit permettre de

faciliter l'interprétation des données de télédétection, en augmentant les contraintes lors de l'inversion des modèles de transfert radiatif.

Une manière d'améliorer la précision et la robustesse des algorithmes d'interprétation des données satellitaires est d'utiliser l'ensemble des connaissances acquises sur les processus physiques qui gouvernent le transfert de la lumière à l'intérieur des couverts. Les modèles de transfert radiatif, utilisés dans le sens direct, constituent un outil très puissant d'étude de la physique des interactions rayonnement électromagnétique/végétation et peuvent fournir des relations plus robustes entre la réflectance des couverts végétaux et ses propriétés optiques, structurales et biophysiques. *sens direct*

La structure d'un couvert à un instant donné est le résultat de processus dynamiques de croissance, développement et sénescence. Cela confère à son évolution une forte cohérence temporelle, qui peut être formalisée en un modèle dynamique d'architecture du couvert. Ces modèles dynamiques de couverts peuvent être couplés à des modèles de transfert radiatif, pour simuler la réponse radiométrique de la végétation, aussi bien au niveau spectral, que directionnel et temporel.

L'objectif de ce travail consiste à développer un modèle de transfert radiatif pour la simulation de la réflectance directionnelle, spectrale et temporelle d'un couvert végétal dans le domaine optique. Ce modèle s'appuie sur une représentation réaliste et dynamique de la structure du couvert sous la forme de maquette informatique 4D (3D + temps). Les maquettes sont construites de manière à prendre en compte explicitement la structure détaillée de la végétation et son stade phénologique. *objectif général du travail*

Ce travail se situe donc en amont des applications futures en essayant de dégager les facteurs importants à prendre en compte dans l'interprétation de l'évolution temporelle du signal radiométrique.

Chapitre 2

Étude bibliographique : État de l'art sur l'utilisation des données de télédétection en agriculture

Les modèles de transfert radiatif peuvent être utilisés pour établir *plan* des relations entre les caractéristiques de couverts végétaux et leur réponse radiométrique. On présente rapidement les différents types de modèle existants et on justifie le choix d'un modèle qui considère la structure détaillée du couvert. On est amené ensuite à étudier les modèles de caractérisation et de description dynamique des plantes. Après une revue générale des principaux modèles existants, on se concentrera sur la culture de maïs, qui sera la plante choisie pour cette étude.

2.1 Modèles de transfert radiatif

Différents modèles de simulation du transfert radiatif dans un couvert végétal ont été proposés récemment. Ils diffèrent principalement dans la manière dont la structure du couvert est prise en compte (voir la synthèse de Goel, 1988).

2.1.1 Les modèles de milieux turbides ou statistiques

Dans ce type de modèle le couvert est représenté par une distribution statistique de petits diffuseurs repartis aléatoirement au sein du couvert (Verhoef, 1984; Verhoef, 1985; Kuusk, 1994; Sinoquet *et al.*, 1996; Andrieu *et al.*, 1997). Les performances de ces modèles ont été améliorées en discrétisant à la fois l'espace et les directions afin de mieux décrire la réponse directionnelle, ainsi que les hétérogénéités de répartition des feuilles dans les plans vertical et horizontal (Myneni *et al.*, 1992, Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996). De même, des corrections ont été introduites afin de décrire au mieux les fréquences bidirectionnelles de trous, qui contrôlent le phénomène de *hot-spot*. Certains modèles permettent de prendre en compte le caractère spéculaire prononcé de la réflectance des feuilles.

Les versions les plus élaborées sont très gourmandes en temps de calcul, en revanche les plus simples sont assez rapides. Le nombre de variables d'entrée dépend de la qualité avec laquelle on cherche à décrire la structure de couvert. Parmi ces variables certaines sont difficiles à mesurer directement sur le couvert, car sont issues de simplifications nombreuses qui rendent leur signification physique délicate. Ce sont donc des paramètres qu'il faut essayer d'ajuster au mieux (paramètre de *hot-spot*, paramètre d'agrégation/dispersion, angle moyen d'inclinaison des feuilles, etc.)

2.1.2 Les modèles géométriques

Ils assimilent la végétation à un ensemble d'objets géométriques simples (cylindres, sphères, ...) dont on connaît les dimensions, la position et les propriétés optiques de la surface. En utilisant les lois de l'optique géométrique, ces modèles estiment les régions à l'ombre et éclairées, ce qui leur permet de relativement bien décrire la simple diffusion (Li et Strahler, 1992; Cierniewski *et al.*, 1994, Verbrugghe *et al.*, 1995). Ils sont donc mieux adaptés pour décrire des couverts épars, dans lesquels la dispersion multiple est faible. La quantité de variables et paramètres nécessaires peut être importante et certains peuvent être difficiles à mesurer précisément. Le problème majeur consiste à carac-

tériser les propriétés optiques des objets eux-mêmes, en particulier la transmittance, qui est parfois simulée par des coefficients de porosité. Les approximations introduites peuvent limiter le réalisme des simulations, notamment au niveau des rediffusions.

On trouve aussi des modèles hybrides réalisant un compromis entre les approches milieux turbide et géométrique. Ils représentent les plantes sous forme d'enveloppes géométriques, dont le volume intérieur constitue un milieu turbide (Begue, 1992). *modèles hybrides*

2.1.3 Les modèles basés sur une description réaliste de la structure

Les progrès rapides de la puissance de calcul et de la capacité mémoire en informatique ont permis l'émergence et l'utilisation de modèles détaillés de structure 3D des couverts végétaux. Chaque élément du couvert (feuilles, tiges, etc.) est décrit avec le plus grand réalisme sous la forme d'une surface paramétrique tridimensionnelle. Ces surfaces sont ensuite décomposées en facettes élémentaires, dont la position et l'orientation sont parfaitement connues et auxquelles on peut affecter, pour les études de transfert radiatif, des propriétés spectrales et directionnelles (Aries *et al.*, 1993; Aries, 1997).

La structure 3D décrite sous la forme d'une maquette informatique peut être utilisée, à partir de calculs géométriques simples, pour estimer les variables d'intérêt difficiles à mesurer directement, telles que la distribution des angles foliaires, le *LAI* ou le facteur d'agrégation/dispersion. Il est également possible d'appliquer des techniques de projection pour connaître les surfaces de sol et de végétation à l'ombre et au soleil et estimer ainsi la fraction de trous (Chen *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1994), le taux de couverture et même la réflectance de premier ordre (Andrieu, 1997).

La construction de maquettes informatiques de cultures a permis le développement de modèles de transfert radiatif capables de simuler d'une manière très réaliste le régime radiatif à l'intérieur du couvert. Une grande attention est accordée aux applications en télédétection, en particulier pour l'étude des effets bidirectionnels. Ainsi, la méthode de radiosité (Borel *et al.*, 1991; Gerstl and Borel, 1992) et de lancer de

rayons (Dauzat et Hautecoeur, 1991 ; Lewis et Muller, 1991 ; Govaerts et Verstraete, 1994 ; Govaerts *et al.*, 1995 ; Govaerts, 1996 ; Chelle, 1997) sont utilisées pour étudier avec précision la distribution de la lumière dans le couvert. Le lancer de rayons donne une estimation de la variabilité directionnelle des flux moyens et permet une grande souplesse pour traiter des scènes complexes, avec des éléments qui peuvent ne pas être lambertiens. En revanche, la radiosité est mieux adaptée pour décrire la distribution spatiale du rayonnement.

La précision obtenue avec ces modèles, le lancer de rayons en particulier, permet de les considérer comme une référence pour évaluer l'impact des approximations réalisées par les différents types de modèles sur la précision de la simulation de la réflectance. Mais, les temps de calcul trop importants associés ne permettent pas de les utiliser de manière opérationnelle.

2.1.4 Choix d'un type de modèle

De nombreuses études montrent que le calcul du transfert radiatif, malgré les approximations introduites n'est pas la source principale d'écart aux observations (Goel and Kuusk, 1992 ; Jaquinta and Pinty, 1997 ; Chelle, 1997). En effet les modèles de transfert radiatif fournissent généralement de bonnes estimations des flux quand les hypothèses faites implicitement sur la structure du couvert sont vérifiées. En revanche, en dehors de ces hypothèses les réponses des modèles peuvent être très différentes des flux radiatifs réels. C'est le cas, par exemple du phénomène de *hot-spot*, lié à la taille des feuilles et à leur distance, la dispersion ou agrégation des éléments foliaires, ses distribution et orientation verticales ou horizontales, les propriétés directionnelles des feuilles ou du sol, etc. Cette sensibilité à la représentation de la structure accroît l'intérêt de modèles permettant de prendre en compte explicitement la structure détaillée.

Le développement d'un modèle de transfert radiatif est donc indissociable de la description de la structure du couvert. Notre objectif sera donc de développer un couple structure du couvert/modèle de transfert radiatif le plus réaliste possible.

2.2 Modélisation des couverts végétaux

La description détaillée de la structure du couvert nécessite de développer des méthodes spécifiques de mesure et de **caractérisation** des différents éléments. C'est l'étape préalable à sa **représentation**. L'étude du **développement** de la plante permet d'établir des modèles dynamiques d'évolution de la structure, à partir de variables représentant l'échelle de temps, comme la somme des températures. L'étude des **propriétés optiques** directionnelles est nécessaire pour estimer la réponse radiométrique à partir des caractéristiques structurelles.

2.2.1 Caractérisation de la structure 3D des plantes

On distingue deux types de méthodes de caractérisation de la structure des couverts végétaux : les méthodes directes et indirectes. Dans le premier cas (voir Sinoquet et Andrieu, 1993), on mesure directement *in situ* la surface, l'orientation, la forme et la distribution spatiale de ses différents éléments. Des méthodes spécifiques ont été développées pour certaines plantes, en fonction de leur structure particulière. Pour certaines espèces végétales, et notamment pour les arbres, la forme des feuilles est relativement peu importante par rapport à la structure générale de la plante et l'intérêt est centré sur la caractérisation du branchement (Bouchon et Houllier, 1993); dans d'autres cas (comme pour le maïs, par exemple), la structure globale de la plante est relativement simple et c'est la forme de la feuille ou des autres organes qui est importante et doit être bien représentée. *méthodes directes*

Les méthodes directes les plus sophistiquées, tels que la numérisation 3D ou les techniques de photogramétrie et stéréo-vision (Ivanov *et al.*, 1993; Ivanov *et al.*, 1994; Ivanov, 1994) offrent une description précise de l'architecture du couvert; mais elles sont très coûteuses en temps et souvent très lourdes à mettre en oeuvre.

Les méthodes indirectes (voir la synthèse de Andrieu et Baret, 1993), comme celui des points quadrats (Warren Wilson, 1965), les photographies hémisphériques (Bonhomme *et al.*, 1974) ou les techniques de laser (Vanderbilt *et al.*, 1990) offrent une information globale sur la structure du couvert, à partir de l'inversion de modèles simples basés sur des mesures radiatives ou d'interception (Andrieu et Ivanov, 1993; Andrieu et *méthodes indirectes*

Sinoquet, 1993; Andrieu *et al.*, 1994; Baret *et al.*, 1993; Lang *et al.*, 1985; Lang et Yuequin, 1986). En revanche, ces modèles ne considèrent généralement pas l'architecture détaillée du couvert et ne peuvent pas fournir une description réaliste sans une connaissance *a priori* de certaines de ses caractéristiques.

2.2.2 Modélisation de l'évolution temporelle

Des modèles dynamiques ont été proposés qui peuvent être couplés à la description instantanée de la structure du couvert, permettant de suivre sa croissance (Françon (1991) et Goel *et al.* (1991)). On trouve des modèles très simples, purement empiriques, jusqu'aux modèles de fonctionnement des cultures, d'inspiration très physiologique. Les systèmes de Lindermayer (*L-systems*) ont une motivation botanique; ils ont été conçus comme une théorie mathématique du développement des plantes. Ils sont fondés sur l'idée de *ré-écriture*: une forme complexe peut être définie en remplaçant successivement les parties d'un objet simple initial selon des lois de production données. Prusinkiewics et Lindermayer (1990) utilisent les *L-systems* pour décrire l'architecture de différentes espèces végétales.

De Reffye *et al.*, (1988), Lewis et Muller (1990), et Jaeger et de Reffye (1992) ont aussi utilisé une description botanique des étapes de la *construction* d'une plante. L'approche de P. de Reffye décrit la croissance d'une plante par un système de processus stochastiques associés aux phénomènes de croissance, mortalité et ramification des meristèmes. La nature et les paramètres de ces processus sont obtenus à partir de connaissances précises en botanique, des observations et des mesures de terrain.

2.2.3 Modélisation des propriétés optiques

Lorsqu'un rayon lumineux intercepte une feuille, une grande partie pénètre à l'intérieur où il interagit avec les tissus. Une partie de l'énergie est absorbée et le reste est diffusé par les tissus en contribuant à la réflectance ou à la transmittance des feuilles. Le résultat de cette interaction est fonction de la longueur d'onde. Dans le visible les pigments foliaires (chlorophylle et caroténoïdes principalement) absorbent

fortement ; dans le proche infra-rouge les pigments sont transparents et la réflexion et la transmission sont donc très fortes.

Tout le rayonnement incident ne pénètre pas dans la feuille. Une fraction est réfléchiée par la cuticule, en étant peu affectée spectralement. C'est la réflexion spéculaire, qui ne dépend que peu de la longueur d'onde, mais fortement de la géométrie d'incidence et des caractéristiques de la surface : si elle est plus ou moins poilue, rugueuse, etc. Dans le visible, la fraction réfléchiée par diffusion interne étant très faible, la réflexion spéculaire apparaît relativement plus importante que dans le proche infra-rouge (Guyot, 1997).

La réflexion spéculaire est encore un phénomène mal compris. D'une manière générale, elle suit les lois de Fresnel. Des mesures expérimentales (Brakke, 1992 ; Sanz *et al.*, 1997) montrent, pour un angle d'incidence donné, un pic dont l'axe central correspond bien à la direction spéculaire et dont l'amplitude maximale et la largeur varient avec l'angle d'incidence.

Peu d'études ont été réalisées pour caractériser la bidirectionnalité des propriétés des feuilles (Sinclair *et al.*, 1973 ; Walter-Shea *et al.*, 1989 ; Walter-Shea *et al.*, 1990). La plupart s'intéressent uniquement au plan principal (plan d'incidence) (Vanderbilt *et al.*, 1993). Certains modèles considèrent que la réflectance de la feuille est la somme d'une composante purement spéculaire et d'une composante diffuse lambertienne (Vanderbilt et Grant, 1985 ; Grant, 1987 ; Nilson, 1991 ; Myneni *et al.*, 1992 ; Kuusk, 1993 ; Brakke, 1994). La feuille est considérée comme une surface plate. Les effets de rugosité et la présence de poils sont pris en compte par un facteur d'atténuation, qui dépend de l'angle d'incidence. Ce type de modèle peut être intégré à une distribution des inclinaisons des feuilles pour estimer la composante spéculaire d'un couvert, mais il ne peut pas être validé directement au niveau de la feuille.

La modélisation précise des propriétés bidirectionnelles des feuilles nécessite une description détaillée des caractéristiques de sa surface et de sa structure interne. Kumar et Silva (1973) et Brakke et Smith (1987) ont simulé les propriétés bidirectionnelles des feuilles avec des techniques de lancer de rayons. Govaerts *et al.* (1995) ont utilisé le modèle de lancer de rayons *RAYTRAN* pour simuler le comportement spectral et bidirectionnelle d'une feuille de dicotylédone. Malgré quelques déficiences, ces techniques se révèlent assez efficaces ; mais il serait dif-

ficile et coûteux en temps de calcul de coupler ce type de description aux modèles de transfert radiatif.

Des fonctions empiriques ont été proposées pour simuler la variation bidirectionnelle de la réflectance d'un petit nombre de feuilles (Brakke *et al.*, 1989). Mais il est difficile de généraliser ces résultats à d'autres types de feuilles, d'autres conditions d'illumination ou d'autres longueurs d'onde.

2.3 Le maïs

Plusieurs raisons nous ont amené à travailler sur le maïs :

1. il s'agit d'une culture qui a fait l'objet de nombreuses études et qui est bien documentée, notamment par les travaux réalisés précédemment dans notre laboratoire (Prévot *et al.*, 1991) ;
2. c'est une culture à cycle assez court, bien adaptée à nos conditions climatiques, ce qui facilite énormément la réalisation des expérimentations et permet de les concentrer dans le temps (Gay, 1980) ;
3. sa structure est assez simple (Hanway, 1966 ; Ledent, 1990), ce qui encourage à développer un modèle détaillé pour la décrire ;
4. mais le caractère assez *ouvert* de son architecture (les plantes ne forment pas dans le champ des structures compactes, comme pour certaines cultures ou la forêt), rendrait difficile sa représentation par un ensemble de formes géométriques 3D simples (sphères, cylindres, ellipsoïdes, etc.) et justifie le développement d'un modèle d'architecture plus complexe ;
5. son évolution phénologique relativement simple (Ledent, 1990 ; Stewart et Dwyer, 1993b) permet d'établir un modèle dynamique d'architecture du couvert purement empirique, sans tenir compte explicitement des facteurs liés au fonctionnement de la culture ;
6. la surface cultivée, ainsi que son intérêt économique sont considérables ;

7. c'est une plante originaire du Mexique.

Beaucoup d'auteurs se sont intéressés au maïs et ont essayé de caractériser son fonctionnement et de décrire sa structure.

2.3.1 Méthodes de caractérisation de la structure du maïs

En partant de l'idée que les feuilles d'une même plante se situent d'une manière approximative dans un seul plan, Bonhomme et Varlet-Grancher (1978) ont développé la méthode des silhouettes : les plantes sont photographiées devant une grille ; les nervures centrales des feuilles sont numérisées et le point d'insertion, la longueur et la courbure de chaque feuille sont mesurées ; la largeur et la forme des feuilles sont déterminées par des mesures indirectes. On peut ainsi obtenir les fonctions de distribution des paramètres et variables qui décrivent la structure de la plante. *silhouette*

D'autres types de méthodes ont également été utilisées, comme celle des points quadrats de Warren Wilson (1965), celle utilisée par Sinoquet *et al.* (1991) basée sur la numérisation 3D du feuillage par ultrasons ou celle d'Inavov *et al.* (1994), qui utilise la stéréo-vision. Ces travaux montrent que la variation autour de cette position azimutale principale n'est pas négligeable ; elle peut donner des différences significatives par rapport à la pénétration de la lumière, car elle affecte le recouvrement à l'intérieur du couvert. *autres méthodes*

2.3.2 Modèles de description de la structure du maïs

Différents modèles de description du maïs ont été proposés basés sur l'étude du profil de la plante (Steward et Lemon, 1969 ; Daynard *et al.*, 1971 ; Aries *et al.*, 1987 ; Prévot *et al.*, 1991). La courbure de la feuille a reçu une attention particulière. Daynard (1971), Bonhomme et Varlet-Grancher (1978) ont étudié la courbure des feuilles comme un ensemble de segments linéaires consécutifs mesurés selon la méthode des silhouettes. Stewart et Dwyer (1993) ont proposé une équation quadratique générale pour décrire la courbure de la feuille. Prévot *et al.* (1991) *courbure*

proposent un modèle composé de portions de courbes paraboliques et elliptiques.

surface

La surface foliaire est classiquement estimée à partir d'une relation parabolique entre la longueur et la largeur maximale (Prévot *et al.*, 1991). Bonhomme et Varlet-Grancher (1978) l'approchent par la somme de surfaces trapézoïdales. Keating et Wafula (1992) distinguent entre les approches par régression, comme celle proposée par Jones *et al.* (1986), et les approches plus mécanistes et proposent un modèle d'estimation de la surface foliaire en fonction du nombre total de feuilles. Dwyer *et al.* (1992) étudient la relation entre la surface foliaire et la hauteur d'insertion des feuilles. Steward et Dwyer (1993a) divisent la feuille en segments dont ils calculent la surface par intégration de la largeur, qu'ils décrivent avec des coefficients de forme. Ruget *et al.* (1997) proposent une méthode simple pour l'estimation de la surface foliaire des plantes de maïs à partir de comptages de feuilles pendant leur mise en place.

*nombre de
feuilles*

Le nombre total de feuilles d'une plante dépend principalement de la variété et des conditions de la culture, comme la date de semis, la température, la durée du jour ou les conditions du sol (Vincourt, 1984; Hubbard et Leng, 1955; Eik *et al.*, 1965; Bonaparte, 1975; Warrington et Kanemasu (I, II, III), 1983; Bonhomme *et al.*, 1984) et est en général compris entre 14 et 20.

dimensions

Plusieurs auteurs proposent des relations entre la longueur et la largeur des feuilles: Stewart et Lemon (1969) calculent la largeur en fonction de la longueur; Prévot *et al.* (1991) représentent cette relation sous la forme linéaire. Ils s'intéressent à la distance entre les hauteurs d'insertion de deux feuilles successives et cherchent à établir une relation parabolique entre la hauteur d'une feuille et sa longueur.

gaufrage

En revanche, très peu d'attention est accordée à la section transversale et au gaufrage, en raison de leur complexité et de la difficulté de la mesure; on peut tout de même signaler les travaux de Ledent (1976, 1978) dans ce sens. Ces aspects sont très importants car ils déterminent directement la distribution des normales des feuilles et, par conséquent, l'interception de la lumière et la fonction de phase du couvert.

2.3.3 Développement

Le processus de développement de la plante de maïs est très simple : pendant la phase de croissance, on trouve à l'extrémité de la tige l'ensemble de feuilles encore engainées qui forment le cornet ; au fur et à mesure que la plante croît, le cornet monte, en se séparant de sa feuille la plus extérieure. Sur la plante adulte, les feuilles ont leurs tailles et positions définitives ; la fleur mâle se situe à l'extrémité de la tige et un (ou deux) épis apparaît à l'aisselle de la (ou les) feuille centrale. L'étude de la croissance se réduit donc, très schématiquement, à l'apparition et mise en place de ses feuilles et à l'augmentation en hauteur de la tige.

De nombreuses études apparaissent dans la littérature sur la croissance du maïs en fonction de la somme des températures, dont l'objectif est souvent la prédiction de la floraison et la précocité. On pourrait citer, par exemple, Bonaparte (1975), Colheo et Dale (1980), Tollenaar *et al.* (1979), Thiagarajah (1981), Warrington et Kanemasu (I, II, III), Duburcq *et al.* (1983) ou Vincourt (1984) parmi les auteurs qui étudient l'apparition et la croissance des feuilles en fonction de la température. Ce dernier propose l'utilisation du phyllotherme (défini comme la somme de températures qui sépare l'apparition de deux gaines successives) comme indice de vigueur.

Plus récemment, Stewart et Dwyer (1993b) ont proposé un algorithme pour relier l'apparition et l'expansion des feuilles à la somme de températures. Fournier (1995) s'intéresse actuellement à l'utilisation de L-Systèmes pour étudier les réponses écophysiologiques du maïs à la température ; il étudie avec détail toutes les phases du développement de la plante.

2.4 Objectif et plan de la thèse

En partant d'une observation directe de champs de maïs, on cherche à développer un modèle de description réaliste et détaillée de la structure de la plante, tout le long de son développement pendant un cycle cultural complet. Ce modèle nous permettra de construire des maquettes informatiques 4D ($3D + le\ temps$) de champs cultivés. L'objectif de ce travail est de développer un modèle de transfert radiatif qui, en

utilisant ces maquettes en entrée, soit capable d'estimer, de manière rapide et précise, la réflectance du couvert simulé.

La suite de ce travail est organisée en quatre parties correspondant chacune à un chapitre :

chapitre 3 : développement d'un modèle 3D et dynamique de la structure d'un couvert de maïs

Le modèle proposé utilise des courbes et des surfaces paramétriques simples pour décrire les différents éléments de la plante, utilisant un nombre limité de paramètres. Plusieurs expérimentations ont été réalisées afin de décrire l'évolution temporelle des dimensions, de la forme, de la position et de l'orientation des feuilles et de la tige. Des modèles empiriques sont proposés pour estimer ces variables en fonction du temps. Les distributions statistiques des différents paramètres du modèle sont étudiées, qui permettent d'obtenir des simulations de champs cultivés par un tirage aléatoire à l'intérieur de ces distributions. On s'intéresse aussi aux propriétés optiques des feuilles.

chapitre 4 : construction de la maquette 3D et analyse de sensibilité à la qualité de la représentation

Étant donné la complexité du modèle mathématique de description de la plante, on approche la structure 3D par un ensemble de facettes élémentaires. Afin d'ajuster et d'évaluer le modèle, des analyses de sensibilité à partir de variables intermédiaires sont réalisés. Elles permettent de décrire avec une grande précision la pénétration et la dispersion de la lumière. Il s'agit en particulier, de la fréquence bidirectionnelle de trous (P_0) et de la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles (*LIDF* : *Leaf Inclination Distribution Function*). Une étude de sensibilité est également réalisée par rapport au caractère spéculaire des feuilles.

chapitre 5 : développement d'un modèle de transfert radiatif opérationnel

Une fois le modèle de structure de la végétation développé, on peut l'utiliser pour simuler le transfert radiatif. Le lancer de rayons

est considéré comme la référence avec laquelle obtenir les résultats les plus exacts et proches de la réalité. Mais ces techniques sont très gourmandes en temps de calcul, ce qui restreint considérablement les analyses de sensibilité qu'on peut réaliser. Un modèle plus opérationnel est proposé et comparé au modèle de référence : la double projection permet de calculer d'une manière exacte et rapide la réflexion du premier ordre, les ordres supérieurs pouvant être estimés à partir d'un modèle de type milieux turbide.

chapitre 6 : validation du modèle proposé

Des mesures de terrain sont comparées aux simulations du modèle proposé dans différents cas particuliers. On discute la sensibilité aux différentes variables : représentation de la structure, propriétés optiques lambertiennes et directionnelles, . . . , en le comparant à un modèle de milieu turbide très utilisé (*SAIL*).

Une **conclusion** est enfin présentée, reprenant les principaux résultats, discutant de leur portée dans le contexte d'une utilisation future et dégageant ainsi les perspectives qu'ouvre ce travail.

Chapitre 3

Le modèle de structure dynamique de maïs

3.1 Introduction

L'objectif est de développer un modèle de description de la plante de maïs :

- capable de décrire la structure de la plante à tous ses stades phénologiques ;
- en prenant en compte tous les aspects qui peuvent être importants du point de vue du transfert radiatif ;
- n'utilisant qu'un nombre limité de paramètres ou variables.

Des conditions de culture moyennes sont considérées et l'influence de facteurs externes, tels que le stress hydrique, n'est pas prise en compte explicitement dans le modèle ; par contre, l'échantillonnage réalisé sera conçu de manière à représenter des situations diverses. Quant à la température, elle n'a été considérée que pour déterminer l'échelle de temps : l'unité de temps employée est le *phyllochrone*, qui détermine le stade foliaire. Cette variable peut être considérée proportionnelle à la somme de températures, comme le signalent Colheo (1980) et Warrington (1983), le passage se faisant par le phyllotherme.

Plusieurs éléments sont à considérer pour caractériser la plante de maïs : les feuilles, la tige, les épis, la fleur mâle, ...

plan

On s'intéresse particulièrement aux feuilles, qui jouent un rôle principal dans le fonctionnement de la plante, ainsi que dans les processus de transfert radiatif, en tant que réceptrices de la lumière et lieu de la photosynthèse. La forme des feuilles est étudiée d'abord (forme développée, courbure, section transversale, gaufrage, etc.), pour s'intéresser ensuite à ses dimensions et à sa position sur la tige. L'étude porte d'une part sur les dimensions et les hauteurs d'insertion des feuilles complètement développées et d'autre part sur leur évolution temporelle. On s'intéresse également aux propriétés optiques des feuilles, la finalité de la maquette étant de réaliser des études de transfert radiatif.

3.2 Matériel et méthodes

Plusieurs expérimentations ont été menées afin de recueillir un ensemble détaillé et représentatif de données, sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour construire le modèle de structure du couvert. Elles sont décrites par la suite.

3.2.1 Expérimentations

campagne 94

Pendant l'été 94, deux parcelles de maïs, semées à deux dates différentes, ont été cultivées sur le site INRA d'Avignon (domaine Saint Paul), qui se trouve à l'ouest d'Avignon, dans la plaine alluviale de la basse vallée du Rhône. Le sol est de texture limono-sableuse, très sensible à la battance et le climat est de type méditerranéen, caractérisé par un fort déficit hydrique estival et une amplitude thermique annuelle élevée ; l'ensoleillement est favorisé par la présence du mistral (vent du nord fort et irrégulier). Les parcelles ont été semées à un mois d'intervalle avec la même variété demi-précoce de maïs : *DEA*.

campagne 95

Une autre expérimentation a eu lieu l'été 95 pendant laquelle des échantillons de plantes de maïs ont été recueillis dans des parcelles d'agriculteurs (basse vallée du Rhône et nord des Alpilles, principalement). Les dates de semis, les états phénologiques et les conditions de culture étaient différentes.

3.2.2 Mesures biologiques

Pendant la campagne 94, des mesures hebdomadaires de structure *campagne 94* et de biomasse ont été réalisées, à raison de 3 échantillons par parcelle, 5 plantes par échantillon. Ces mesures ont été réalisées :

- pour la parcelle 1 : du 13/05/94 au 15/09/94
- pour la parcelle 2 : du 16/06/94 au 13/10/94

Elles incluent :

1. point d'insertion de chaque feuille, mesuré (en mètres) à partir de la base de la plante, c'est-à-dire du point où elle a été coupée,
2. longueur de chaque feuille, mesurée (en centimètres) de l'insertion à la tige jusqu'à l'extrémité,
3. largeur maximale de chaque feuille, mesurée (en centimètres) transversalement à la nervure centrale au point le plus large de la feuille,
4. diamètre en haut et en bas de la tige de chaque plante, mesurés à l'aide d'un palmer,

Pendant la campagne 95, 30 échantillons ont été prélevés (5 plantes *campagne 94* par échantillon), correspondant à deux stades phénologiques : le stade 6 feuilles et le stade adulte. Des mesures de structure ont été réalisées telles que décrites pour l'année 94.

Les données de la **campagne 94** sont :

- continues dans le temps : les échantillons ont été pris régulièrement toutes les semaines ; *données 94*
- plus homogènes dans l'espace : elles correspondent uniquement à 2 parcelles ;
- chaque échantillon est constitué de 5 plantes très similaires, qui se trouvaient côte à côte dans le champ ; cela justifie le calcul des valeurs moyennes de toutes les dimensions.

Ainsi, la modélisation de l'évolution temporelle de la structure peut être réalisée à partir des valeurs moyennes des données 94.

données 95

Les **données 95** présentent une plus grande variabilité :

- les prélèvements ont été faits dans des parcelles différentes, plus ou moins éloignées (sur le domaine de l'INRA, à Saint-Rémy, ...);
- les variétés cultivées sont différentes (*DEA*, *Cécilia*, ...), ainsi que les dates de semis, le type de sol, les pratiques culturales, etc.;
- on a choisi, pour chaque échantillon, 5 plantes de tailles différentes et séparées les unes des autres dans le champ.

Voulant conserver toute la variabilité observée, les valeurs moyennes n'ont pas été calculées dans une même parcelle.

Une base de données a été constituée à partir des données de la campagne 95 et de 5 groupes de 5 plantes jeunes et 5 plantes adultes de la campagne 94. Elle comprend 150 plantes jeunes et 150 plantes adultes et a été utilisée pour établir des modèles de description de la structure des plantes, basés sur 3 grandeurs importantes : la longueur, la largeur et la hauteur d'insertion de chaque feuille. Les données de 94, continues dans le temps, serviront à établir le modèle d'évolution temporelle.

3.2.3 Autres mesures

photos

Afin de caractériser la forme de la plante, des photos ont été également prises de manière hebdomadaire. D'une part, en 1994 une douzaine de plantes, repérées dès leur germination à l'intérieur des parcelles, ont été photographiées toutes les semaines de manière non destructive, ce qui a permis de suivre leur évolution. D'autre part, les plantes prélevées pour réaliser les mesures de structure ont été régulièrement photographiées, en 1994 et en 1995, devant une grille. Ces photos fournissent une référence des plantes de maïs à différents stades phénologiques, ainsi que d'étudier certains paramètres de forme ou d'évolution; elles

n'ont pas été numérisées. On disposait aussi d'une collection de photos de 20 plantes adultes, qui avaient été numérisées selon la méthode des silhouettes (Prévot *et al.*, 1993) afin d'obtenir tous les paramètres descriptifs; l'ensemble de ces plantes comporte 236 feuilles et il a permis la caractérisation de la courbure des feuilles.

3.3 Modèle de description de la plante

La modélisation des feuilles est basée sur le modèle de structure géométrique du maïs proposé par Aries et Prévot (Prévot *et al.*, 1991; Aries *et al.*, 1987; Aries *et al.*, 1993). Il utilise des formes paramétriques simples pour décrire les principaux aspects de la feuille et ne fait intervenir qu'un nombre limité de paramètres. Certains éléments ont été ajoutés au modèle de Aries et Prévot, afin de compléter la description des plantes, comme le gaufrage des feuilles ou la représentation de la tige.

Les différents éléments de la description de la feuille sont présentés par la suite, à savoir : la forme de la feuille développée, la courbure de la nervure centrale, ainsi que la coupe transversale et le gaufrage. Dans chaque cas, le modèle paramétrique choisi est exposé, avec les paramètres qui entrent en jeu; les fonctions de distribution des paramètres du modèle sont ensuite déduits des différentes expérimentations.

3.3.1 Forme de la feuille développée

Modèle

Selon le modèle de Prévot *et al.*, (1991) la feuille développée est assimilée à une surface plane, symétrique par rapport à un axe qui correspond à la nervure centrale, considérée comme une ligne droite (fig. 3.1).

La relation entre la largeur de la feuille à un point donnée de son axe (w), et la distance entre ce point et son point d'insertion sur la tige (l) peut être représentée par un polynôme (classiquement utilisé pour les graminées (Sinoquet *et al.*, 1988)), fonction des valeurs normalisées : $l^* = \frac{l}{l_t}$ et $w^* = \frac{w}{w_t}$, l_t et w_t étant, respectivement, la longueur de la

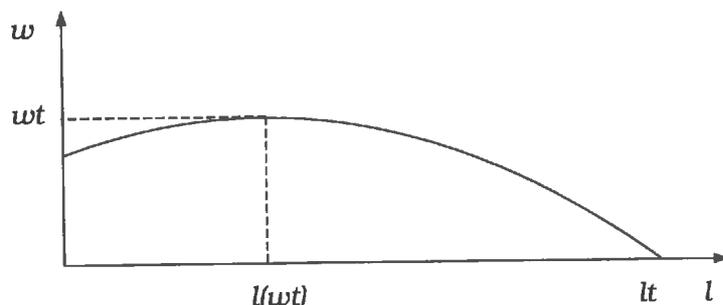


FIG. 3.1 - Modèle de la forme de la feuille développée

feuille et sa largeur maximale. On considère un polynôme de second degré :

$$w^*(l^*) = \alpha l^{*2} + \beta l^* + \gamma$$

Deux conditions permettent de réduire le nombre de paramètres à un (α , par exemple) : la largeur de la feuille à son extrémité est nulle ($w(l_t) = 0$) ; la largeur de la feuille est maximale quand la dérivée de w par rapport à l est nulle ($\frac{dw}{dl} = 0$ quand $w = w_t$) (Voir l'annexe 1 à la fin de ce chapitre).

surface adimensionnelle En connaissant le paramètre α , qui caractérise la forme de la feuille, on peut calculer la surface adimensionnelle de celle-ci, définie comme :

$$S^*(\alpha) = \int_{l^*=0}^1 w^* dl^* \quad (3.1)$$

Fonctions de distribution du paramètre α

Un seul paramètre, α , caractérise la largeur de la feuille en fonction de la distance à son point d'insertion. Si on considère que la largeur de la feuille est maximale à l'insertion (ce qui est le cas, principalement, des feuilles qui ne sont pas complètement sorties du cornet) α est compris entre -1 et 1 . En revanche, pour les feuilles complètement dégainées, la largeur maximale peut correspondre à un point quelconque le long de la feuille ; dans ce cas, α se trouve entre -4 et -1 .

On a constaté, à partir de mesures sur plusieurs feuilles, qu'une valeur de $\alpha = -3$ donne une bonne description de la forme de la feuille. Cette valeur de α correspond en effet à une valeur de S^* de 0.72, qui est

en accord avec les observations expérimentales de McKee *et al.* (1964), Dwyer *et al.* (1986) et Keating et Wafula (1992). Nous avons donc choisi de fixer la valeur de $\alpha = -3$ dans le modèle, indépendamment de l'ordre de la feuille et de son stade de développement.

3.3.2 Courbure de la nervure centrale

Modèle

Le modèle choisi pour décrire la nervure centrale des feuilles est aussi celui de Prévotet *al.* (1991). La nervure centrale appartient au plan vertical et est divisée en une partie ascendante et une partie descendante :

- la partie ascendante est assimilée à un arc de parabole à axe de symétrie vertical

$$y = ax^2 + bx \quad (3.2)$$

- la partie descendante, lorsqu'elle existe, est assimilée à un arc d'ellipse dont un des axes est horizontal et l'autre vertical

$$\begin{aligned} x &= x_c + d\cos\phi \\ y &= y_c + e\sin\phi \end{aligned} \quad (3.3)$$

(x_c, y_c) étant le centre de l'ellipse, d et e les longueurs des demi-axes horizontal et vertical. L'angle paramétrique total correspondant à l'arc d'ellipse d'une feuille doit être inférieur à une demi-ellipse, c'est-à-dire $\leq \pi$, et toujours convexe.

Le raccordement des deux modèles est situé au point le plus haut de la feuille (x_m, y_m) , où l'on impose la contrainte de continuité; on n'impose pas de contrainte sur la dérivée, un certain nombre de feuilles étant cassées à cet endroit.

La paramétrisation du modèle global, telle qu'elle a été décrite, est peu adaptée à l'étude des distributions de ses paramètres. En effet, certains d'entre eux ($a, b, x_c, y_c, d, e, \dots$) peuvent tendre vers l'infini en valeur absolue pour des arcs de parabole quasi-verticaux ou des arcs d'ellipse quasi-rectilignes. Une reparamétrisation a été réalisée en utilisant des grandeurs dérivées de la première définition, mais choisies de

reparamétrisation

telle sorte qu'elles soient finies et correspondent à des paramètres plus facilement interprétables.

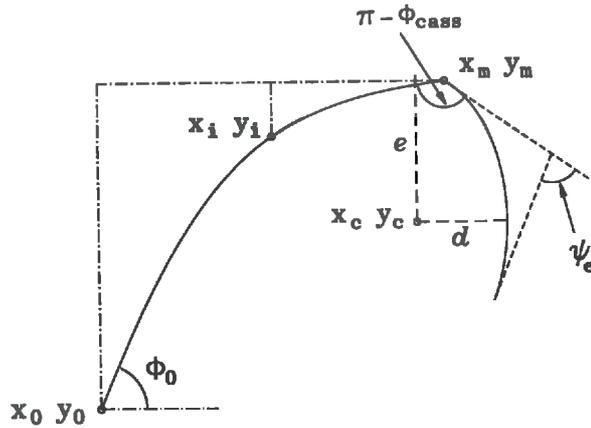


FIG. 3.2 – Modèle de description de la courbure de la nervure centrale

Ces paramètres sont les suivants:

- longueur de la feuille: $[l_t]$ (dont on parlera dans la section suivante)
- angle d'insertion de la feuille: $[\phi_0]$ $\phi_0 = \arctan(b)$
- courbure de la parabole: $[C_p]$ $C_p = \frac{y_m}{y_i}$ ($y_i = ax_i^2 + bx_i$, $x_i = \frac{x_m}{2}$)
- point de raccordement entre la parabole et l'ellipse: $[P_{cass}]$

$$P_{cass} = \frac{\text{longueur parabole}}{\text{longueur totale}}$$
- angle de cassure de la feuille: $[\phi_{cass}]$
- allongement de l'ellipse: $[\epsilon]$ $\epsilon = \begin{cases} (d^2 - e^2)/d^2 & d \geq e \\ -(e^2 - d^2)/e^2 & d < e \end{cases}$
- courbure angulaire de l'ellipse: $[\psi_e]$

(Le modèle est développé avec plus de détail dans l'annexe 2, à la fin du chapitre)

Fonctions de distribution des paramètres

La figure 3.3 montre la distribution des paramètres qui décrivent la nervure centrale, calculée sur les 236 feuilles numérisées. Ces distributions ont été approchées par les lois uniformes (U) et gaussiennes (\mathcal{N}) suivantes (i étant l'ordre de la feuille, à partir de la première apparue) :

ϕ_0		$\mathcal{N}(1.05, 0.23)$
C_p	$i < 12$	$U(1.3, 1.4)$ dans 85% des cas $U(1.4, 1.8)$ dans 5% des cas $U(1.8, 3.0)$ dans 10% des cas
	$i \geq 12$	$U(1.3, 1.4)$ dans 75% des cas $U(1.4, 1.8)$ dans 21% des cas $U(1.8, 3.0)$ dans 4% des cas
P_{cass}	$C_p < 4$	$P_{cass} = 1$
	$C_p \geq 4$	$U(0.25, 1)$
ϕ_{cass}		$U(0.0, 0.1)$ dans 75% des cas $U(0.1, 1.0)$ dans 17% des cas $U(1.0, 2.0)$ dans 8% des cas
ϵ		$\mathcal{N}(-0.14, 0.36)$ avec $ \epsilon \leq 1.0$
ψ_e		$\mathcal{N}(1.46, 0.75)$ avec $ \psi_e > 0.0$

3.3.3 Section transversale et gaufrage

Modèle

Pour chaque point de la nervure centrale donné par l'abscisse curviline l , on considère le plan $[f, g]$ perpendiculaire à celle-ci. On définit ainsi un repère orthonormé, dont l'origine est sur la nervure centrale, les axes g étant localement des axes verticaux (fig. 3.4). *section transversale*

La section transversale de la feuille est modélisée par deux arcs de cercle, qui représentent les côtés gauche et droit de la feuille; ils sont tangents à l'axe horizontal f ; leur longueur correspond à la demi-largeur ($w/2$) de la feuille à la position l .

La tangente à l'extrémité de la feuille définit l'angle Ω , qui caractérise le gaufrage de la feuille. L'observation montre que le gaufrage *gaufrage*

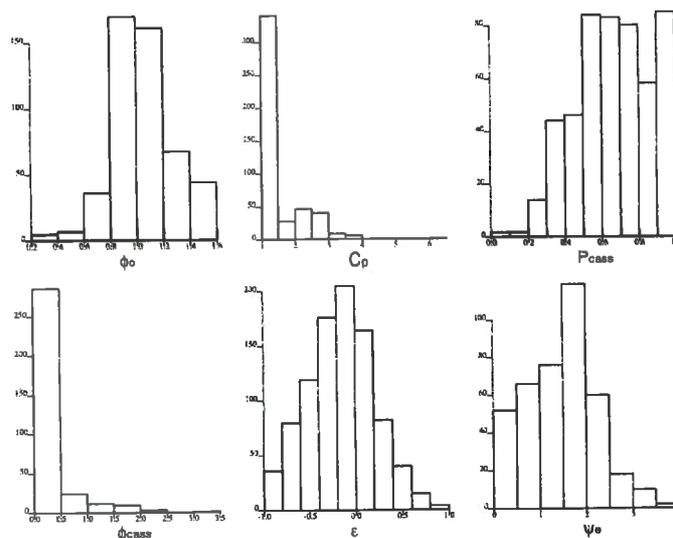


FIG. 3.3 – Distributions des paramètres du modèle de courbure de la nervure centrale de la feuille (ϕ_0 , C_p , P_{cass} , ϕ_{cass} , ϵ , ψ_e)

n'est pas symétrique (fig. 3.5) et ne peut pas être décrit par une fonction trigonométrique simple, mais par des cycloïdes, selon le système d'équations paramétriques suivant :

$$\begin{aligned} l &= t + r \cos(\omega t) \\ G &= \frac{1}{2}(1 + \sin(\omega t)) \end{aligned} \quad (3.4)$$

où t est une variable auxiliaire et ω est la fréquence. La variable G est comprise entre 0 et 1 et permet de faire varier l'angle Ω selon l'expression :

$$\Omega(l) = \Omega_{max} G(l)$$

Ω_{max} étant l'amplitude angulaire du gaufrage. La variable r contrôle la relation entre les deux semipériodes de la cycloïde, la différence entre deux semipériodes étant de $4r$. La fonction $G(l)$ est calculée numériquement à partir du système d'équations (3.4). Le gaufrage de la feuille est ainsi caractérisé par deux variables : le nombre de périodes, n_T , et l'amplitude angulaire. L'observation montre qu'il faut considérer deux cycloïdes séparées pour chaque côté de la feuille, avec deux nombres différents de périodes, un pour la partie ascendante et l'autre pour la

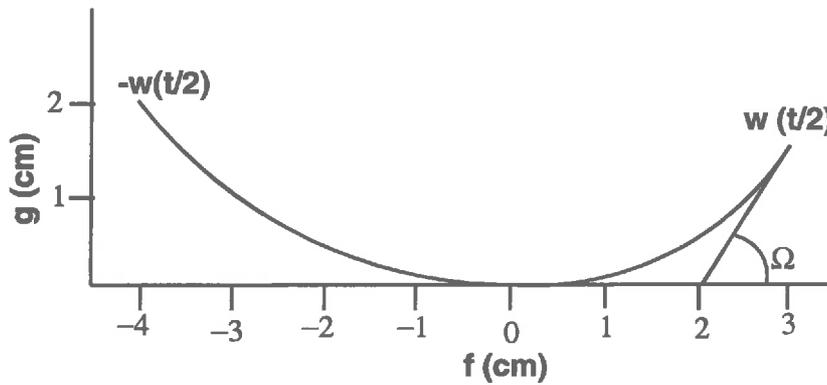


FIG. 3.4 – *Modèle de la section transversale de la feuille*

partie descendante, c'est-à-dire avant et après le point de cassure :

$$n_T = \begin{cases} \frac{\omega P_{cass} - \frac{1}{2}}{2\pi} & \text{parabole} \\ \frac{\omega(1-P_{cass})}{2\pi} & \text{ellipse} \end{cases}$$

Le gaufrage est maximum au point d'insertion ($G(0) = 1$) et minimum au point de cassure ($G(P_{cass}) = 0$) et à l'extrémité de la feuille ($G(l_t) = 0$).

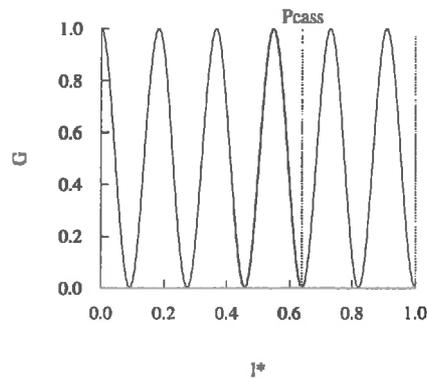


FIG. 3.5 – *Modèle du gaufrage de la feuille*

Fonctions de distribution des paramètres

Les distributions des paramètres qui décrivent la section transversale et le gaufrage des feuilles ont été étudiées à partir de l'observation des plantes photographiées :

- l'amplitude maximale du gaufrage Ω_{max} varie uniformément entre 0.9 et 1.1 ;
- le nombre de périodes, n_T de chaque partie, ascendante ou descendante, et pour chaque côté de la feuille, doit être un entier, pouvant varier uniformément entre 1 et 5 ;
- le paramètre r , qui définit la dissymétrie des semipériodes des cycloïdes, est compris uniformément entre 0.0001 et 0.0005.

3.4 Dimensions de la plante

3.4.1 Paramétrisation de la description de la structure : la vigueur

vigueur

L'observation montre qu'il semble possible de décrire la structure d'une plante de maïs selon un schéma *général*: Une plante grande ou une petite plante ont des structures qui suivent des schémas similaires; de forme très semblable, elles diffèrent principalement par leurs dimensions. Ces différences de taille correspondent à des *vigueurs* différentes. On peut donc établir des modèles généraux de description de la structure du maïs (à un stade donné de son développement ou au cours du temps) qui, en fonction d'une caractéristique de vigueur, permettent de représenter chaque cas particulier.

*surface
foliaire*

La surface foliaire d'une plante donne une bonne idée de son potentiel photosynthétique, de croissance et de production de biomasse. Elle correspond, en effet, à sa capacité d'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (Williams *et al.*, 1968; Gallo *et al.*, 1985; Watson, 1956; Sinclair, 1984). De plus, c'est une valeur qui détermine en grande partie le signal réfléchi et mesuré par les capteurs de télédétection. C'est donc une caractéristique de choix par rapport à

notre objectif final et sera la variable quantitative que nous associerons à la vigueur de la plante. Dans la suite de ce texte, on appellera *vigueur* la surface foliaire totale cumulée, S_T , d'une plante.

À partir de la modélisation de la feuille développée (fig. 3.1) et de la définition de la surface adimensionnelle d'une feuille S^* (équation 3.1) on estime sa surface foliaire réelle en multipliant par ses dimensions maximales, w_t et l_t .

$$S = S^*(\alpha) l_t w_t$$

La surface foliaire totale cumulée d'une plante, à laquelle on s'intéresse, est la somme des surfaces foliaires de toutes ses feuilles.

$$S_T = \sum_{i=1}^{i_T} S(i) \quad (3.5)$$

où i_T est le nombre total de feuilles émises par la plante à la fin de son développement.

3.4.2 Plante adulte

On cherche à étudier la structure d'une plante de maïs au cours de son développement, c'est-à-dire de la germination à la fin de la phase de croissance en longueur de la tige. En particulier, on veut estimer pour chaque feuille et à n'importe quel stade phénologique de la plante :

1. la longueur,
2. la largeur,
3. la hauteur d'insertion.

Dans un premier temps on s'intéressera à l'estimation de ces valeurs pour la plante adulte, ce qui permettra ensuite de déduire leur évolution tout au long de la phase de croissance.

La *vigueur* de la plante, associée à la surface foliaire totale de celle-ci, S_T , le nombre total de feuilles, i_T , et la hauteur finale de la plante, h_t , seront les variables d'entrée de notre modèle. *entrées*

L'ensemble des données de la campagne 95, ainsi que quelques prélèvements de 94, constitue la base de données utilisée pour réaliser cette *données*

étude. Cette base se compose de 150 plantes adultes (30 parcelles, 5 plantes par parcelle). On a utilisé 100 pour réaliser la paramétrisation et les 50 restantes pour valider les modèles proposés.

Approche suivie

Le processus suivi pour établir ces modèles est le suivant :

1. Des **modèles paramétriques de base** sont choisis de manière à bien s'ajuster aux observations :
 - un polynôme de degré 3 pour la largeur ;
 - un modèle double *droite-parabole* pour la longueur ;
 - une courbe de degré variable pour les hauteurs d'insertion.
2. Certaines **contraintes** sont imposées :
 - la première feuille est la moins large¹ ;
 - la longueur de la première feuille est supposée connue et fixe ;
 - le point d'insertion de la première feuille est également supposé connu et fixe. Cela revient à fixer, pour toutes les plantes, une origine pour la mesure des hauteurs des feuilles.
3. Étant donné qu'une plante n'a jamais toutes ses feuilles présentes en même temps avec ses dimensions définitives, les plantes mesurées n'avaient plus toutes les feuilles au moment du prélèvement. Afin de corriger et compléter les données, nous avons **calé** numériquement les modèles décrits, en imposant des contraintes, pour chacune des plantes adultes mesurées.
4. À partir de cette base de données corrigée et complétée, nous avons **estimé** les variables suivantes, qui interviennent dans le modèle paramétrique final :
 - la largeur et l'ordre de la feuille la plus large ;

1. En réalité le coléoptile est un peu plus large que la deuxième feuille et plus arrondi ; une correction serait nécessaire pour lui donner une largeur plus réaliste. Keating *et al.* (1992) l'excluent de leur modèle.

- la longueur et l'ordre de la feuille la plus longue ;
- la surface foliaire cumulée de la plante, selon l'expression (3.5). Cette valeur est considérée comme étant la variable caractéristique de la vigueur qui, avec le nombre total de feuilles, est une des entrées principales du modèle de structure.

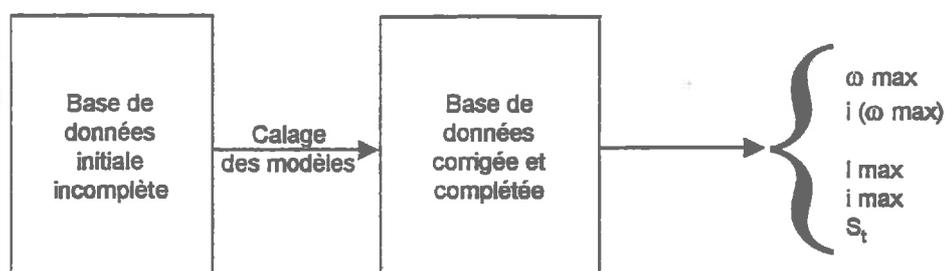


FIG. 3.6 - Correction de la base de données

Les différents points évoqués sont décrits par la suite : les modèles *plan* proposés pour décrire la longueur, la largeur et la hauteur d'insertion des feuilles, leur ajustement et leur validation. La modélisation de la plante est complétée par la représentation de la tige et la prise en compte de l'azimut des feuilles.

Longueur et largeur

Modèles génériques

La largeur

La figure 3.7 montre l'ensemble des mesures de largeur étudiées, correspondant à la base de données de 95, complétée par quelques mesures de 94 (§ 3.2.2). Une tendance similaire est observée pour les valeurs moyennes des données de la campagne de mesures de 94 et pour les données de 95. D'une manière générale, la largeur des premières

feuilles augmente d'une valeur initiale de l'ordre de 1.5 cm, pour atteindre un maximum entre la feuille 10 et 15; elle diminue ensuite jusqu'à la dernière feuille, qui dans le cas des plantes de faible vigueur ou en développement peut correspondre à des ordres foliaires faibles, comme le montre le graphique 3.7 (b). Ce comportement suggère l'utilisation d'une expression de troisième degré pour modéliser la largeur maximale des feuilles en fonction de l'ordre foliaire :

$$w_i(i) = a_w i^3 + b_w i^2 + c_w i + d_w$$

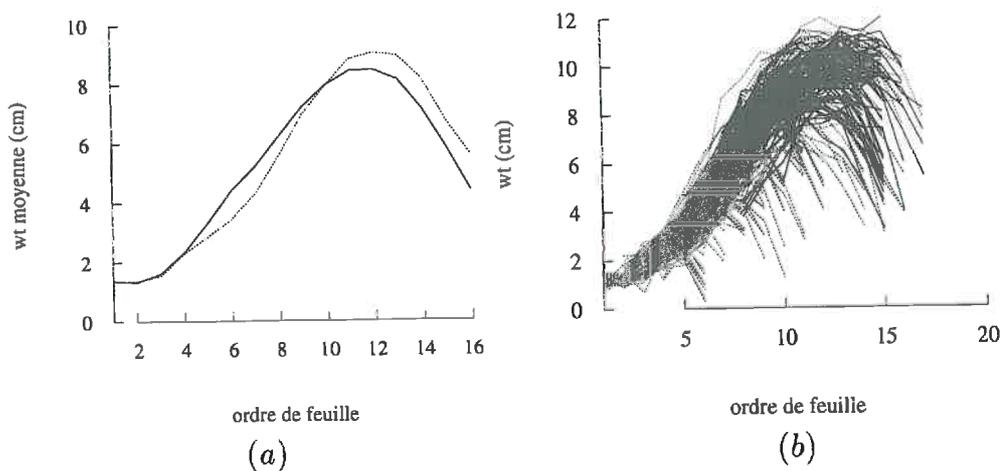


FIG. 3.7 - Largeurs mesurées en fonction de l'ordre de la feuille : (a) campagne 94; (b) campagne 95

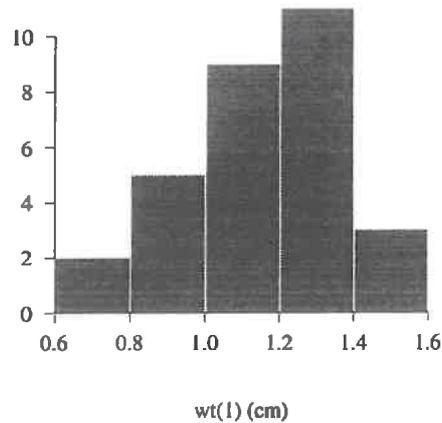


FIG. 3.8 – Histogramme de la largeur des feuilles d'ordre 1 (campagnes 94 et 95)

En imposant :

1. la largeur de la première feuille : $w_t(1)$ (l'histogramme des largeurs des feuilles mesurées d'ordre 1 apparaît à la figure 3.8)

$$w_t(1) = a_w + b_w + c_w + d_w$$

d'où :

$$d_w = w_t(1) - a_w - b_w - c_w$$

2. le minimum de la fonction, atteint pour la première feuille (ce qui évite d'avoir des largeurs négatives)^a

$$\left(\frac{dw_t}{di}\right)_{i=1} = 0 = 3 a_w i^2 + 2 b_w i + c_w$$

d'où :

$$c_w = -3 a_w i^2 - 2 b_w i$$

^a pour calculer cette dérivée, l'ordre des feuilles est considérée comme étant une variable continue

on arrive à l'expression de la largeur en fonction de 2 paramètres, a_w et b_w :

$$w_t(i) = a_w (i^3 - 3 i + 2) + b_w (i^2 - 2 i + 1) + w_t(1) \quad (3.6)$$

On suppose que la feuille la plus large correspond à l'ordre $i(w_{max})$ et que sa largeur vaut w_{max}^2 .

$$w_{max} = a_w i^3(w_{max}) + b_w i^2(w_{max}) + c_w i(w_{max}) + d_w$$

c'est-à-dire :

$$w_{max} = a_w (i^3(w_{max}) - 3i(w_{max}) + 2) + b_w (i^2(w_{max}) - 2i(w_{max}) + 1) + w_t(1) \quad (3.7)$$

D'autre part, puisqu'il s'agit d'un maximum :

$$\begin{aligned} \left(\frac{dw_t}{di}\right)_{i(w_{max})} &= a_w (3i^2(w_{max}) - 3) + b_w (2i(w_{max}) - 2) \\ &= 3a_w i^2(w_{max}) + 2b_w i(w_{max}) - 3a_w - 2b_w = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

a_w et b_w peuvent être exprimés en fonction de w_{max} et $i(w_{max})$.

De (3.7) et (3.8) :

$$\begin{aligned} 3a_w (i^2(w_{max}) - 1) + 2b_w (i(w_{max}) - 1) &= 0 \\ a_w (i^3(w_{max}) - 3i(w_{max}) + 2) + b_w (i(w_{max}) - 1)^2 &= w_{max} - w_t(1) \end{aligned}$$

$$b_w = \frac{-3a_w(i^2(w_{max}) - 1)}{2(i(w_{max}) - 1)} \quad (3.9)$$

$$a_w = \frac{w_{max} - w(1)}{(i^3(w_{max}) - 3i(w_{max}) + 2) - \frac{3}{2}(i^2(w_{max}) - 1)(i(w_{max}) - 1)} \quad (3.10)$$

De (3.6) et en substituant (3.10) et (3.9), on arrive à une expression de la largeur en fonction, uniquement, de l'ordre de la feuille et de la position et la largeur de la feuille la plus large de la plante ($w_t(1)$ et i_T étant connus). Il faudra relier ces paramètres, $i(w_{max})$ et w_{max} , à la surface foliaire S_T , pour avoir un modèle de la largeur des feuilles en fonction de la vigueur, qui est le paramètre d'entrée.

2. $i(w_{max})$ n'est pas forcément un entier

La longueur

La longueur et la largeur des feuilles sont modélisées indépendamment, afin de permettre une plus grande adaptabilité aux caractéristiques de chaque plante.

Les valeurs observées de la longueur par ordre de feuille, (aussi bien des valeurs moyennes de 94, que des valeurs individuelles par plante de 95 (fig. 3.9)) justifie l'utilisation d'un modèle double pour modéliser celle-ci :

PREMIÈRES FEUILLES : la relation entre la longueur et l'ordre de la feuille est plutôt linéaire ; elle peut être modélisée par une droite

$$l_t(i) = \alpha_l i + \beta_l \quad (3.11)$$

RESTE DES FEUILLES : l_t augmente avec l'ordre de la feuille, jusqu'à $i = 12, 13$ pour diminuer ensuite d'une manière presque symétrique par rapport à la valeur maximale. Ce comportement suggère l'utilisation d'une parabole :

$$l_t(i) = a_l i^2 + b_l i + c_l \quad (3.12)$$

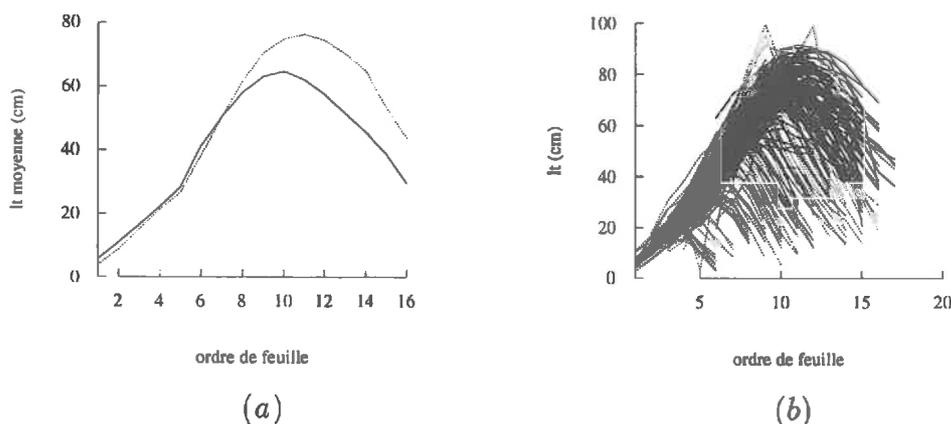


FIG. 3.9 – Longueurs mesurées en fonction de l'ordre de la feuille : (a) campagne 94 ; (b) campagne 95

Le point de raccordement des deux modèles semble se situer, d'après les données, entre les feuilles 5 et 7. Cela se comprend, d'une part, du fait que les 5 premières feuilles sont préformées dans la graine, ce qui fait que ses dimensions sont en grande partie fixées *a priori* (Hubbard *et al.*, 1955; Duburcq *et al.*, 1983). D'autre part, on sait qu'au stade 6-7 feuilles des changements physiologiques importants s'opèrent dans la plante: la période végétative est achevée et l'apex développe la panicle mâle (Gay, 1980). De plus, ce stade correspond à un changement du système racinaire avec l'émission des racines coronaires de l'entre-noeud 6; cela expliquerait la disparition des 6 premières feuilles dans les plantes adultes: elles sont séparées de la tige par la mise en place du système racinaire aérien (Girardin *et al.*, 1987).

On peut donc considérer que les 6 premières feuilles de la plante jouent un rôle important lors de sa croissance, mais qu'elles ne font plus partie de la plante adulte. Cela explique le comportement particulier de leurs caractéristiques (dont la longueur) par rapport aux autres feuilles de la plante, et justifie l'utilisation d'un modèle particulier pour les décrire. Le modèle a été ajusté en considérant le point de raccordement successivement à la feuille 5, 6 et 7. Une précision légèrement supérieure a été constatée dans le cas où le changement de modèle se fait à la feuille 7. Le choix de la feuille 7 permet de tenir compte des réalités botaniques citées et, d'un point de vue plus pratique, assure une plus grande continuité de la fonction globale en évitant l'éventuelle apparition de longueurs négatives lors de l'ajustement du modèle. Le raccordement droite-parabole se produit en effet pour des longueurs plus grandes que dans les deux autres cas.

On impose les conditions suivantes:

– la longueur de la première feuille, $l(1)$, est connue (histogramme à la figure 3.10)

$$l_t(1) = \alpha_l + \beta_l$$

d'où:

$$\beta_l = l_t(1) - \alpha_l \quad (3.13)$$

et on a:

$$l_t(i) = \alpha_l(i-1) + l_t(1)$$

pour les feuilles 1 à 7;

- continuité des deux modèles à la feuille 7

$$l_t(7) = \alpha_l(7 - 1) + l_t(1) = a_l 7^2 + b_l 7 + c_l$$

d'où :

$$\alpha_l = \frac{a_l 7^2 + b_l 7 + c_l - l_t(1)}{7 - 1} \quad (3.14)$$

et on a toutes les expressions en fonction de a_l , b_l et c_l .

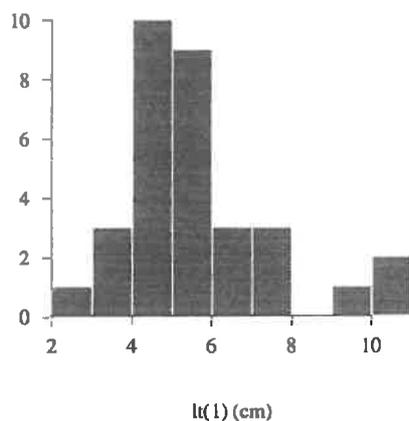


FIG. 3.10 - Histogramme de la longueur des feuilles d'ordre 1 (campagnes 94 et 95)

De manière similaire à la largeur, on considère que la feuille la plus longue correspond à l'ordre $i(l_{max})^3$ et sa longueur est l_{max} ; logiquement il s'agit d'une feuille située entre la 7 et la dernière.

$$l_{max} = a_l i^2(l_{max}) + b_l i(l_{max}) + c_l \quad (3.15)$$

$$\left(\frac{dl_t}{di}\right)_{i=i(l_{max})} = 2a_l i(l_{max}) + b_l = 0 \quad (3.16)$$

3. $i(l_{max})$ n'est pas forcément un entier

d'où :

$$b_l = -2a_l i(l_{max}) \quad (3.17)$$

et :

$$c_i = l_{max} + a_l i^2(l_{max}) \quad (3.18)$$

et on a pour les feuilles 7 à i_T :

$$l_t(i) = a_l (i - i(l_{max}))^2 + l_{max}$$

En supposant que $i(l_{max})$ et l_{max} peuvent être estimées à partir de la surface foliaire et du nombre de feuilles de la plante (S_T et i_T), a_l est le seul paramètre à déterminer.

La longueur de toutes les feuilles d'une plante doit être telle que, connaissant leur largeur, $w_t(i)$, et la surface foliaire totale, S_T , l'équation (3.5) soit vérifiée.

$$\begin{aligned} \frac{S_T}{S^*} &= \sum_i w_t(i) l_t(i) = \sum_{i=1}^{i=7} w_t(i) l_t(i) + \sum_{i=8}^{i=i_T} w_t(i) l_t(i) \\ &= \sum_{i=1}^{i=7} w_t(i) (\alpha_l i + \beta_l) + \sum_{i=8}^{i=i_T} w_t(i) (a_l i^2 + b_l i + c_l) \\ &= \sum_{i=1}^{i=7} w_t(i) (\alpha_l(a_l) (i-1) + l_t(1)) + \sum_{i=8}^{i=i_T} w_t(i) (a_l i^2 + b_l(a_l) i + c_l(a_l)) \end{aligned} \quad (3.19)$$

a_l peut être calculé à partir de cette expression, ce qui résout complètement le système d'équations.

La figure 3.11 montre l'organigramme de cette phase de développement des modèles de description de la largeur et la longueur des feuilles.

Ajustement

Les expressions décrivant la longueur et la largeur de chaque feuille complètement développée d'une plante de maïs ont été établies. Les variables d'entrée utilisées sont la vigueur de la plante et son nombre de feuilles. Elles font appel aussi à d'autres valeurs telles que l'ordre et la largeur de la feuille la plus large ainsi que l'ordre et la longueur de

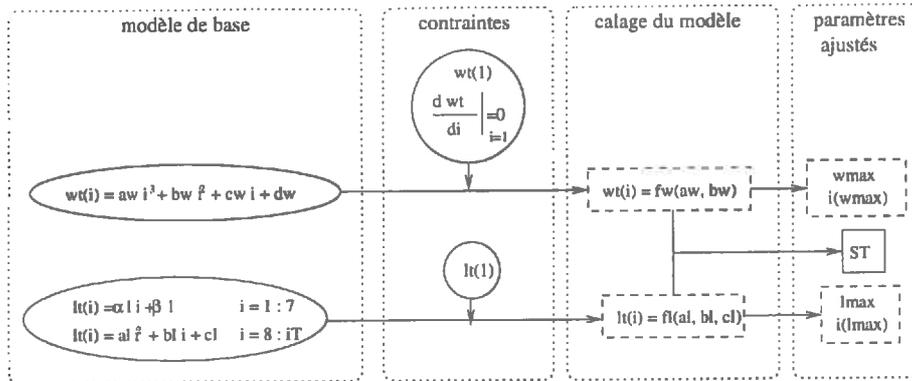


FIG. 3.11 – Organigramme de la phase d'apprentissage du modèle de description des dimensions des feuilles de la plante adulte

la feuille la plus longue, qui ne sont pas connues et qu'il faudra estimer en fonction des variables connues, que sont i_T , S_T et $h(i_T)$.

Pour estimer $w_t(i)$ il est donc nécessaire de connaître w_{max} et $i(w_{max})$ pour chaque plante. Ces valeurs peuvent être estimées par régression linéaire à partir de la surface foliaire totale et du nombre total de feuilles de la plante selon les expressions :

$$\hat{i}(w_{max}) = 1.591 + 0.654 i_T \quad (3.20)$$

$$\hat{w}_{max} = 6.634 - 0.047 i_T + 8.47 S_T \quad (3.21)$$

où S_T est exprimée en m^2 . Ces expressions ont été ajustées sur les 100 plantes adultes de la base de données complétée (voir figure 3.6), utilisées pour le développement du modèle.

De cette manière, la largeur des feuilles d'une plante est estimée en fonction de sa vigueur et de son nombre de feuilles :

$$w_t(i) = f_w(S_T, i_T)(i)$$

De même, pour estimer les longueurs des feuilles, $l(i)$, il faut connaître l'ordre et la longueur de la feuille la plus longue, $i(l_{max})$ et l_{max} . Par régression linéaire à partir de la surface foliaire et du nombre total de feuilles de la plante, l_{max} et $i(l_{max})$ peuvent être estimées selon les équations :

$$\hat{i}(l_{max}) = 5.812 + 0.306 i_T \quad (3.22)$$

$$\hat{l}_{max} = 99.197 - 3.956 i_T + 94.45 S_T \quad (3.23)$$

Le fait d'estimer $i(l_{max})$ et l_{max} en fonction de S_T et i_T revient à estimer la longueur des feuilles à partir de la vigueur, c'est-à-dire à calculer :

$$l_i(i) = f_l(S_T, i_T)(i)$$

modèle global

Ainsi, le modèle global d'estimation de la largeur et de la longueur suit la démarche suivante (l'organigramme correspondant apparaît à la figure 3.12) :

1. Les variables d'entrée sont S_T et i_T . Elles nous permettent d'estimer $i(w_{max})$, w_{max} , $i(l_{max})$ et l_{max} (équations (3.20), (3.21), (3.22), et (3.23)) ;
2. à partir de ces valeurs, on calcule a_w et b_w (équations (3.10) et (3.9)),
3. ce qui permet d'estimer la largeur, $w_i(i)$, $i \in (1, i_T)$ (équation (3.6)) ;
4. en connaissant w_i de chaque feuille et S_T de la plante, on calcule a_i (équation (3.19)), ce qui permet de calculer b_i et c_i (équations (3.17) et (3.18))
5. et ainsi α_i et β_i (équations (3.14) et (3.13)) ;
6. la longueur des feuilles, $l_i(i)$, $i \in (1, i_T)$, peut alors être estimée selon les équations (3.11) et (3.12).

Validation

La précision des modèles proposés est évaluée par rapport à la base de données initiale, en considérant les 50 plantes que n'ont pas été utilisées pour l'ajustement des paramètres.

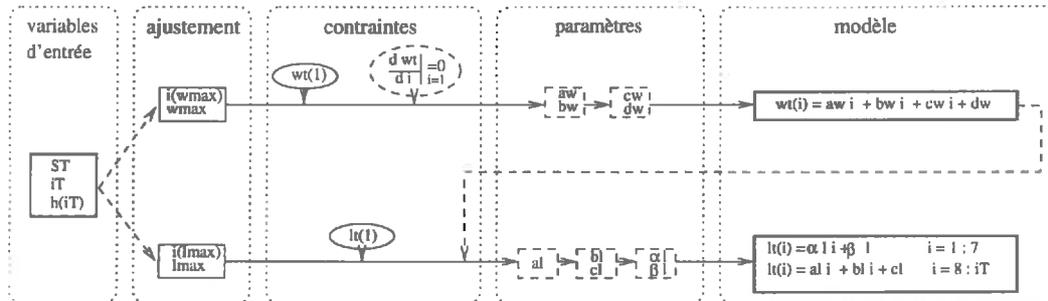


FIG. 3.12 – Organigramme du modèle d'estimation des dimensions des feuilles de la plante adulte

Mais, étant donné que la base de données initiale est incomplète car les premières feuilles manquent, il est également intéressant de comparer les estimations aux données complétées à partir du calage des modèles de base sur ces mêmes 50 plantes, en particulier pour évaluer la précision de l'estimation des variables *intermédiaires* ($i(w_{max})$, w_{max} , $i(l_{max})$, l_{max}).

Bilan d'erreur

En comparant, pour les 50 plantes adultes non utilisées lors de la paramétrisation, la base de données initiale à la base de données complétée, on trouve :

- largeur : $RMSE = 0.50 \text{ cm}$, $R^2 = 0.93$, $N = 1332$,
- longueur : $RMSE = 2.56 \text{ cm}$, $R^2 = 0.97$, $N = 1308$.

Ce résultat reflète l'imprécision du calage et la dispersion des données initiales. La régression apparaît à la figure 3.13).

En comparant les estimations aux données calées à partir des modèles de base (base de données complétée) on arrive à (fig. 3.14) :

- largeur : $RMSE = 0.48 \text{ cm}$, $R^2 = 0.97$, $N = 879$,
- longueur : $RMSE = 5.03 \text{ cm}$, $R^2 = 0.95$, $N = 879$.

La précision est dans ce cas logiquement satisfaisante : S_T provient des données complétées, qui suivent par définition le modèle calé sur

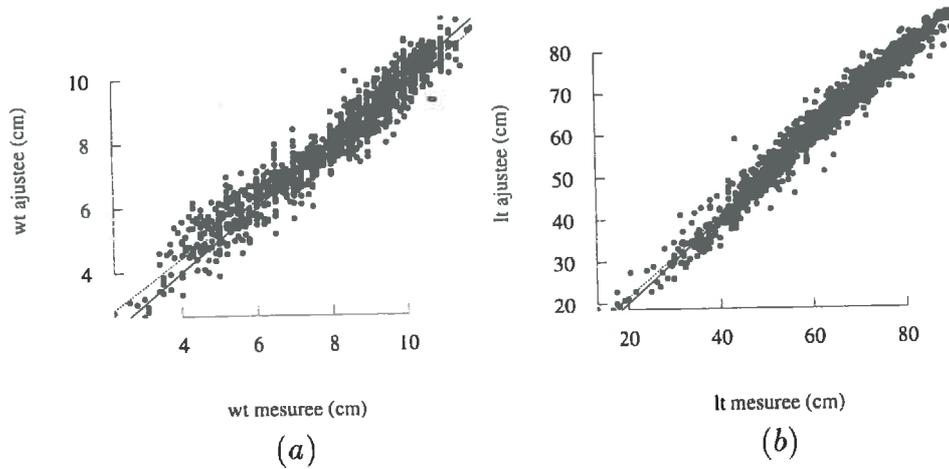


FIG. 3.13 – Comparaison entre la base de données initiale et la base de données complétée en considérant 50 plantes non utilisées pour le développement des modèles : (a) largeur ; (b) longueur

elles. Ce résultat indique aussi que l'erreur commise dans l'estimation, par rapport aux mesures, est due en partie à l'imprécision du calage réalisé, à partir duquel on a calculé la variable de vigueur, S_T .

Finalement, en comparant, les dimensions mesurées et estimées par le modèle, on obtient les régressions de la figure 3.15, avec :

(a) LARGEUR : $RMSE = 0.78 \text{ cm}$, $R^2 = 0.86$, $N = 564$,

(b) LONGUEUR : $RMSE = 5.88 \text{ cm}$, $R^2 = 0.83$, $N = 552$.

ce qui est très satisfaisant, étant donné le nombre réduit de paramètres et la relative simplicité des modèles choisis.

Variables intermédiaires

Dans le cas de la largeur, afin d'évaluer la qualité des estimations réalisées, la valeur de $i(w_{max})$ est calculée, sur la base de données complétée, à partir de (3.8) :

$$i(w_{max}) = \frac{-b_w - \sqrt{b_w^2 + 9a_w^2 + 6a_w b_w}}{3a_w} \quad (3.24)$$

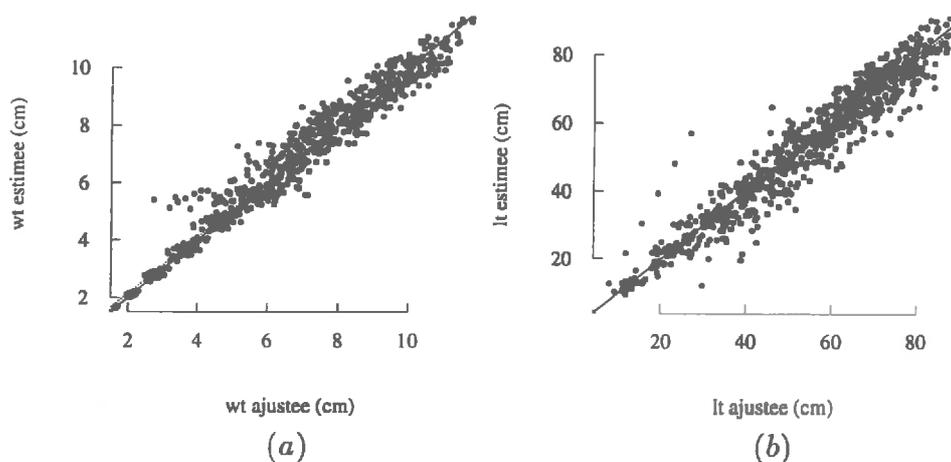


FIG. 3.14 – Comparaison entre les valeurs de la base de données complétée et les valeurs estimées sur 50 plantes non utilisées pour le développement des modèles : (a) largeur ; (b) longueur

et w_{max} à partir de l'équation (3.7).

La précision des estimations par régression linéaire (équations (3.20) et (3.21)) par rapport aux valeurs calculées par ces équations ((3.24) et (3.7)) est de :

$$RMSE = 0.37, R^2 = 0.77, N = 50 \text{ pour } i(w_{max}) \text{ et}$$

$$RMSE = 0.50 \text{ cm}, R^2 = 0.83, N = 50 \text{ pour } w_{max}.$$

De façon similaire, $i(l_{max})$ est calculé à partir de la base de données complétée comme (de (3.16)) :

$l_{max}, i(l_{max})$

$$i(l_{max}) = \frac{-b_l}{2a_l} \quad (3.25)$$

et l_{max} répond à l'expression (3.15).

En comparant ces valeurs (équations (3.25) et (3.15)) aux estimations (équations (3.22) et (3.23)) on trouve que la précision est de :

$$RMSE = 0.69, R^2 = 0.15, N = 50 \text{ pour } i(l_{max}) \text{ et}$$

$RMSE = 4.77 \text{ cm}$, $R^2 = 0.64$, $N = 50$ pour l_{max} .

Les dimensions maximales semblent être reliées autant au nombre de feuilles de la plante qu'à la surface foliaire totale de celle-ci. Par contre, l'estimation des ordres foliaires correspondants s'est révélée moins précise en prenant en compte la surface foliaire et le nombre de feuilles, qu'en ne considérant que le nombre total de feuilles. La précision la plus faible correspond à l'estimation de $i(l_{max})$; cela peut s'expliquer dans certains cas par une erreur de l'ordre assigné aux feuilles.

Autant pour $i(w_{max})$ que pour $i(l_{max})$, l'erreur maximale commise est plus ou moins un ordre de feuille, ce qui n'est pas très important par rapport à notre objectif final. De plus, lors de la numérotation des feuilles, les premières ayant disparu, des erreurs de plus ou moins une feuille ont pu être commises; ces erreurs s'ajoutent aux erreurs de mesure.

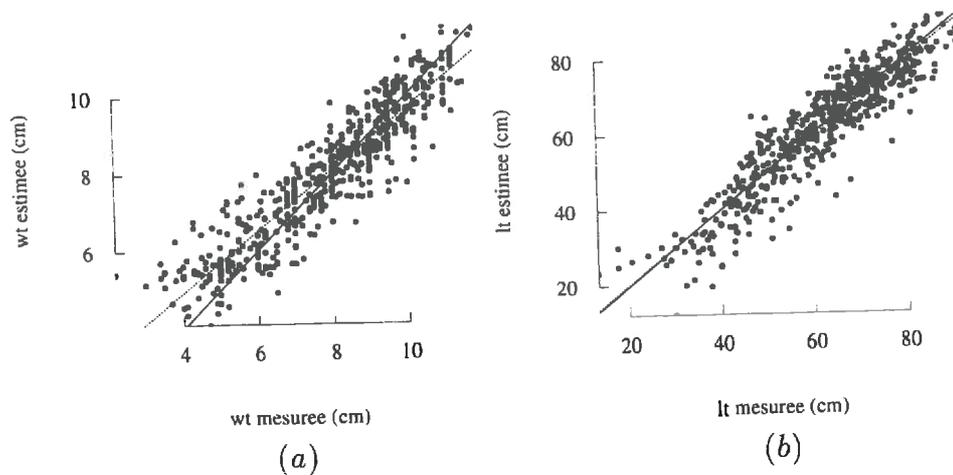


FIG. 3.15 – Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées sur 50 plantes non utilisées pour le développement des modèles: (a) largeur; (b) longueur

exemples

La figure 3.16 offre quelques exemples de valeurs de largeur et longueur mesurées-ajustées-estimées. On constate la bonne concordance entre l'ajustement et les mesures; on observe également comment les

valeurs manquantes ont été complétées. Les valeurs estimées correspondent bien aux ajustées, faute d'une meilleure estimation des variables intermédiaires. En général, les modèles se révèlent assez souples, du fait de l'utilisation d'expressions capables de s'adapter à chaque cas particulier.

Les hauteurs d'insertion

Description du modèle

Une relation simple est proposée pour estimer la hauteur d'insertion, en connaissant la surface foliaire totale de la plante et l'ordre de la feuille.

Logiquement, la hauteur d'insertion augmente avec l'ordre de la feuille. La figure 3.17 montre par contre que la hauteur d'insertion des feuilles n'est pas tout à fait linéaire avec l'ordre des feuilles. Nous avons donc considéré un modèle du type :

$$h(i) = a_h i^n + b_h \quad (3.26)$$

On impose au modèle les conditions suivantes :

1. le point d'insertion de la première feuille (dont l'histogramme apparaît à la figure 3.18)

$$h(1) = a_h + b_h$$

d'où :

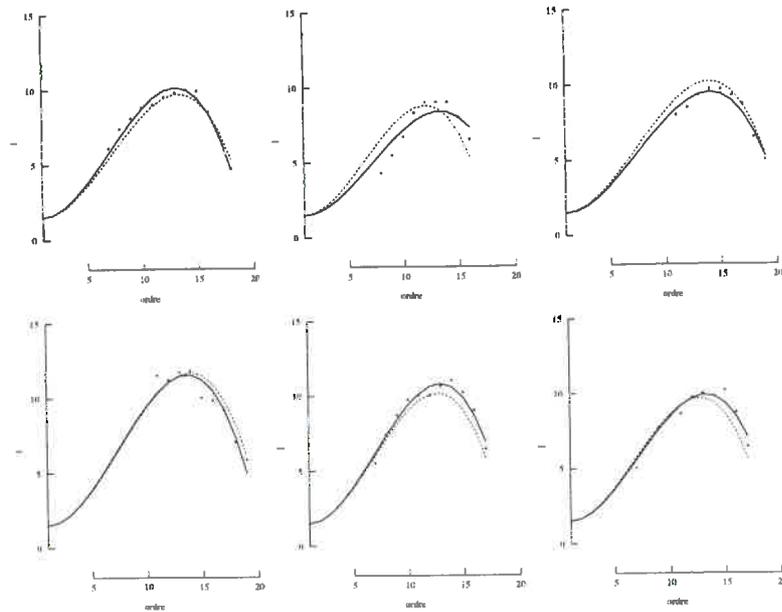
$$b_h = h(1) - a_h$$

2. la hauteur d'insertion de la dernière feuille correspond à la hauteur de la plante :

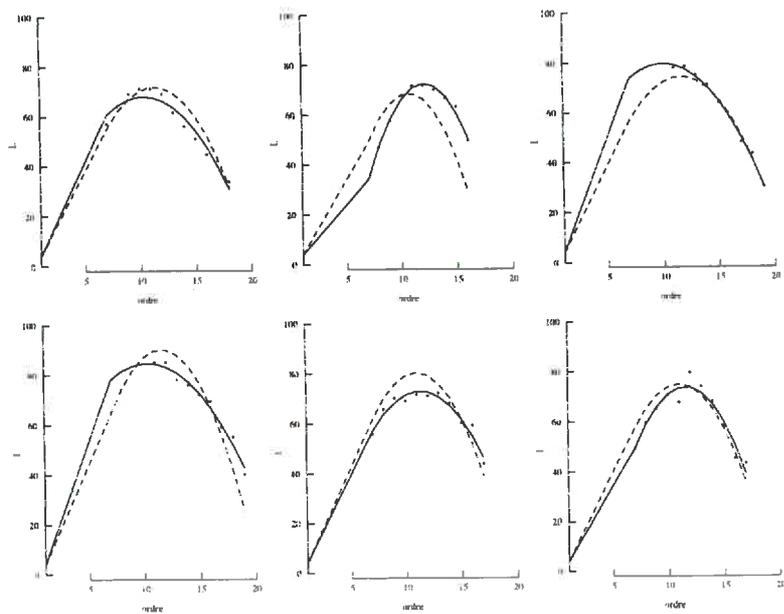
$$h(i_T) = a_h (i_T^n - 1) + h(1)$$

d'où :

$$a_h = \frac{h(i_T) - h(1)}{i_T^n - 1}$$



(a)



(b)

FIG. 3.16 – Exemples de largeurs (a) et longueurs (b): (. . .) valeur mesurée (base de données initiale), (—) valeur ajustée (base de données complétée) et (- - -) valeur estimée (en cm)

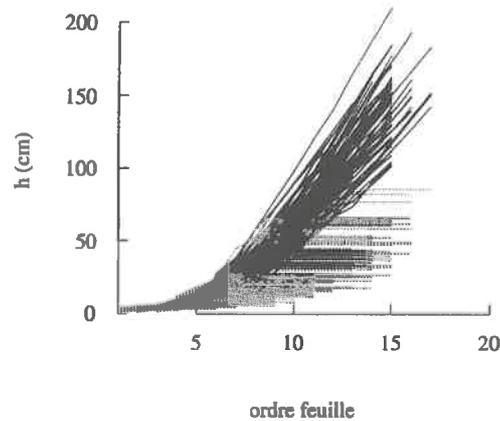


FIG. 3.17 – Ensemble des hauteurs d'insertion mesurées en fonction de l'ordre de la feuille (campagnes 94 et 95)

L'équation (3.26) devient :

$$h(i) = \frac{h(i_T) - h(1)}{i_T^n - 1} (i^n - 1) + h(1) \quad (3.27)$$

L'organigramme de la figure 3.19 permet de mieux comprendre le développement du modèle de description de la hauteur d'insertion des feuilles.

Ajustement

Si la hauteur de la plante est supposée connue, ainsi que sa surface foliaire et le nombre de feuilles, n peut être estimé par régression linéaire à partir des entrées, selon l'expression :

$$\hat{n} = 3.655 - 0.104 i_T - 0.359 S_T + 0.001 h(i_T) \quad (3.28)$$

avec S_T exprimée en m^2 et $h(i_T)$ en m .

Validation

La précision du modèle est évaluée par rapport aux valeurs de $h(i_T)$ et n estimées, selon l'équation (3.27), pour les 50 plantes adultes de la base de données complétée qui n'ont pas été utilisées pour la paramétrisation du modèle.

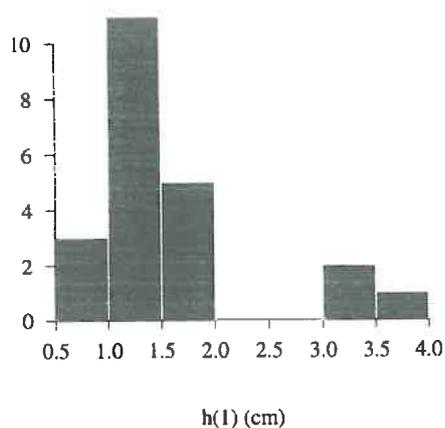


FIG. 3.18 – Histogramme des hauteurs d'insertion des feuilles d'ordre 1 (campagnes 94 et 95)

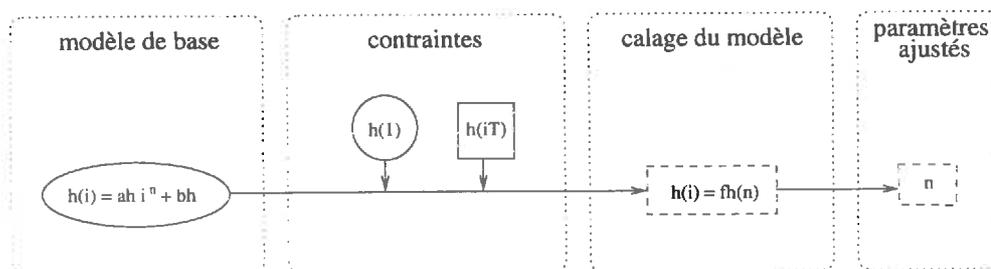


FIG. 3.19 – Organigramme de la phase d'apprentissage du modèle de description des hauteurs d'insertion des feuilles de la plante adulte

La précision de l'estimation de n par l'équation (3.28) est : $RMSE = 0.21$, $R^2 = 0.57$, avec $N = 50$.

À partir de n ainsi estimé, on calcule les hauteurs d'insertion de ces mêmes plantes. La précision de cette estimation par rapport aux mesures (base de données initiale) est (fig. 3.20) :

$$RMSE = 9.19 \text{ cm}, R^2=0.96, N = 602$$

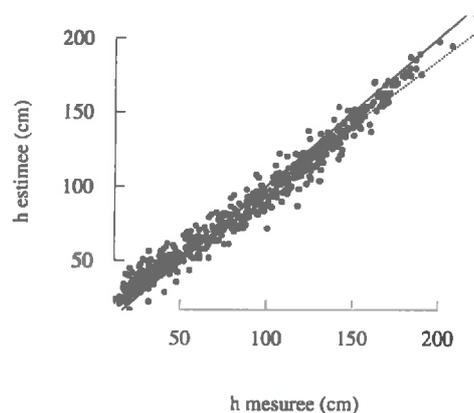


FIG. 3.20 – *Comparaison entre les hauteurs d'insertion mesurées et estimées en considérant 50 plantes non utilisées pour le développement du modèle*

Quelques exemples de hauteurs d'insertion *mesurées-estimées* sont *exemples* montrés à la figure 3.22. La hauteur de la plante est en général sur-estimée. Le modèle estime bien les mesures et propose des valeurs réalistes pour les hauteurs d'insertion des feuilles manquantes.

L'organigramme de la figure 3.21 résume le fonctionnement du modèle.

Fonctions de distribution des variables d'entrée

Les fonctions de distribution suivantes correspondent aux variables d'entrée du modèle pour les plantes étudiées :

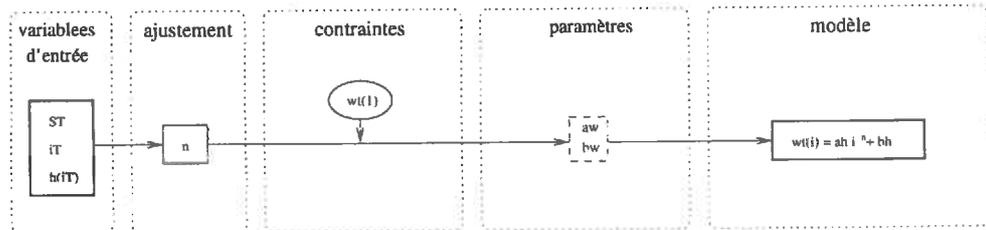


FIG. 3.21 – Organigramme du modèle d'estimation des hauteurs d'insertion des feuilles de la plante adulte

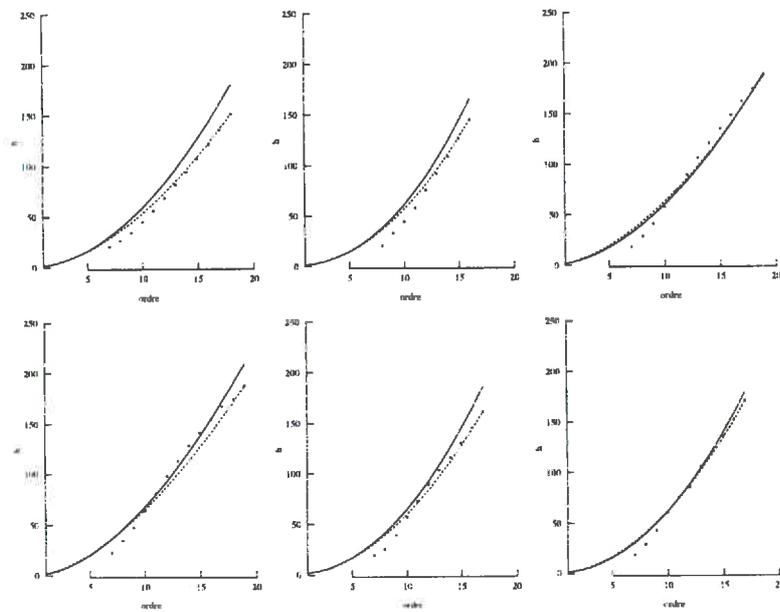


FIG. 3.22 – Exemples de hauteurs d'insertion mesurées (...) et estimées en considérant la hauteur de la plante connue (.....) ou ajustée (—) (en cm)

$$S_T = U(0.42, 0.52)$$

$$i_T = U(16, 19) \text{ et entier}$$

La tige

La tige est représentée comme un tronc de cône, caractérisé par sa hauteur, qui correspond à la hauteur d'insertion de la dernière feuille, et ses rayons en haut, $r(h(i_T))$, et en bas, $r(0)$. Par souci de simplicité, on ne représente pas la fleur mâle, ni la panicule femelle.

Les rayons supérieur et inférieur sont considérés comme étant proportionnels :

$$\frac{r(h(i_T))}{r(0)} = \gamma \quad (3.29)$$

Comme ils n'ont été mesurés que pour un nombre limité de plantes, qui n'expriment qu'une petite variabilité, le paramètre γ est simplement mis à sa valeur moyenne ($\gamma = 0.4$) et le rayon inférieur de la tige est considéré proportionnel à la vigueur de la plante, S_T :

$$r(0) = \overline{r(0)} \frac{S_T}{\overline{S_T}} \quad (3.30)$$

où $\overline{r(0)}$ et $\overline{S_T}$ représentent respectivement les valeurs moyennes du rayon inférieur et de la vigueur mesurés sur l'ensemble des plantes de la base de données.

L'azimut des feuilles

Les feuilles peuvent sortir du plan vertical principal de la plante. Cette déviation suit la fonction de distribution de l'azimut des feuilles obtenue par Sinoquet *et al.* (1991), qu'on approche par une fonction normale :

$$\theta_{lc} = \mathcal{N}(0.0, 0.18) \quad (3.31)$$

L'interpénétration entre les feuilles d'une même plante n'a pas été prise en compte, car il s'agit d'un problème mineur par rapport à l'interpénétration entre feuilles de plantes voisines.

La figure 3.23 montre comme exemple une plante photographiée selon la méthode des silhouettes et sa reconstruction par le modèle en 2 et 3 dimensions.

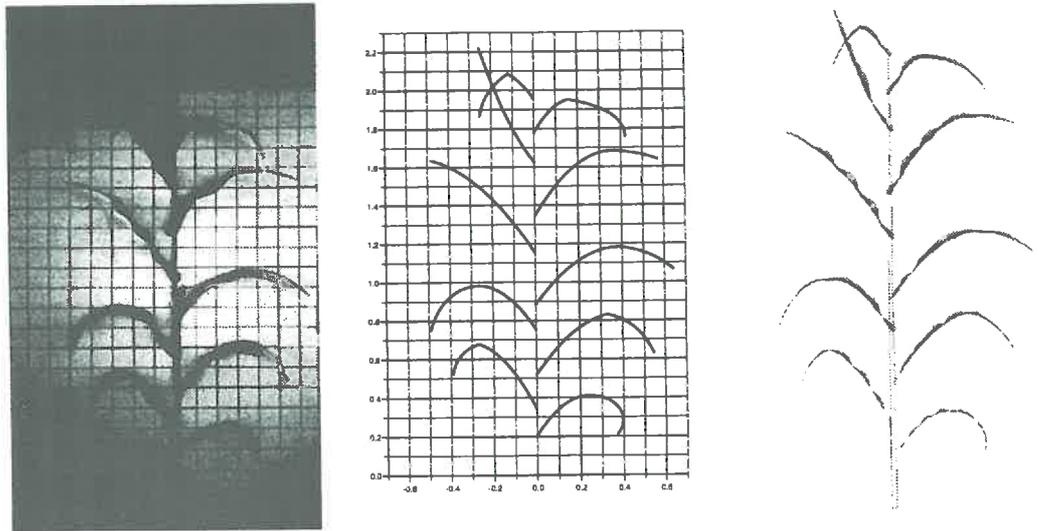


FIG. 3.23 – Exemple d'une plante photographiée et reproduite par le modèle en 2D et 3D

3.4.3 Évolution temporelle

L'étude présentée dans la section précédente montre qu'il est possible d'estimer les dimensions et la position d'une feuille de maïs complètement développée à partir de la surface foliaire totale et du nombre de feuilles de la plante. On s'intéresse maintenant à l'évolution suivie par la plante au cours de son développement, c'est-à-dire au processus de mise en place et de croissance des feuilles, dès leur apparition dans le cornet jusqu'à ce qu'elles atteignent leurs taille et hauteur définitives.

objectif

L'objectif de cette partie est de rendre le modèle capable de décrire la structure de la plante pour tout stade phénologique, en connaissant la vigueur, le nombre total de feuilles et la hauteur finale. On ne cherche

pas spécialement à développer un modèle continu d'évolution dans le temps. On pourra se contenter d'une description discrète, pour chaque stade foliaire. Ce modèle doit être simple et ne doit nécessiter qu'un nombre limité de paramètres et variables d'entrée ; il doit de plus être cohérent avec les modèles de description de la structure vus auparavant.

L'analyse a été réalisée à partir des données de la campagne 94 *données* (§ 3.2.2) : 3 échantillons de 5 plantes étaient prélevés par semaine sur deux parcelles de culture et les dimensions et positions de toutes les feuilles présentes étaient mesurées. Les mesures étant destructives, les données des différentes dates ne correspondent pas aux mêmes plantes. C'est pour cette raison que nous avons travaillé avec les valeurs moyennes par échantillon et par parcelle. Pour les hauteurs d'insertion, les données sont assez complètes, contrairement à celles de la longueur et la largeur, car il n'est pas possible de mesurer les dimensions d'une feuille cassée ou disparue, mais son point d'insertion est souvent observable sur la tige.

Ne disposant pas d'un jeu de données supplémentaire pour réaliser *validation* la validation des modèles, nous nous contenterons, par rapport à notre objectif final, du bon accord entre les valeurs mesurées utilisées pour établir les modèles et les valeurs estimées par ceux-ci.

Les hauteurs d'insertion

Une feuille est considérée dès qu'elle est visible dans le cornet. La hauteur d'insertion d'une feuille augmente dès son apparition dans le cornet jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale définitive.

La figure 3.24 montre l'évolution des hauteurs d'insertion en fonction du phyllochrone (somme de températures pour l'apparition d'une nouvelle feuille), pour les feuilles 1 à 16. Il s'agit des valeurs moyennes pour les 15 plantes de chaque prélèvement. Pour chaque ordre de feuille, on peut considérer que la hauteur augmente de façon linéaire, puis se stabilise. On peut donc considérer une valeur maximale moyenne de hauteur d'insertion pour chaque ordre de feuille, calculée comme la moyenne des hauteurs d'insertion atteinte à partir de la stabilité. Cette valeur finale apparaît superposée en pointillé sur le graphique. *données*

Les courbes de la figure 3.25 ont été obtenues en normalisant les courbes précédentes, pour chaque ordre de feuille, en fonction de la

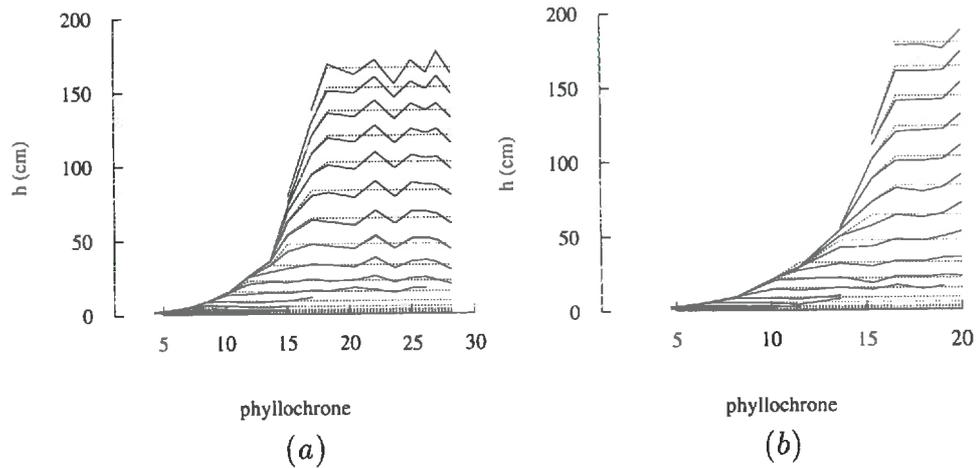


FIG. 3.24 – Hauteurs d'insertion moyennes par ordre de feuille en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2

valeur finale de la hauteur d'insertion.

Description du modèle

normalisation

De l'observation de ces courbes, on peut considérer que la hauteur d'insertion d'une feuille augmente linéairement en fonction du phyllochrone (ϕ), jusqu'à sa valeur finale, ce qui s'exprime par :

$$h^*(i)(\phi) = 1 - a_h(i) (\phi_{1h}(i) - \phi) \quad (3.32)$$

où $\phi_{1h}(i)$ est, pour chaque ordre de feuille, le phyllochrone correspondant à la hauteur d'insertion finale. La pente de toutes les courbes, $a_h(i)$, étant similaire, on considère une pente moyenne, a_h , qui permet de modéliser la vitesse de *montée* des feuilles, indépendamment de leur ordre et de la parcelle considérée. Comme les dernières feuilles atteignent leur hauteur finale plus rapidement que les premières, cette relation peut s'exprimer par un polynôme du second degré :

$$\hat{\phi}_{1h}(i) = \alpha_h i^2 + \beta_h i + \gamma_h$$

On impose deux contraintes :

1. la fonction atteint son maximum pour la dernière feuille

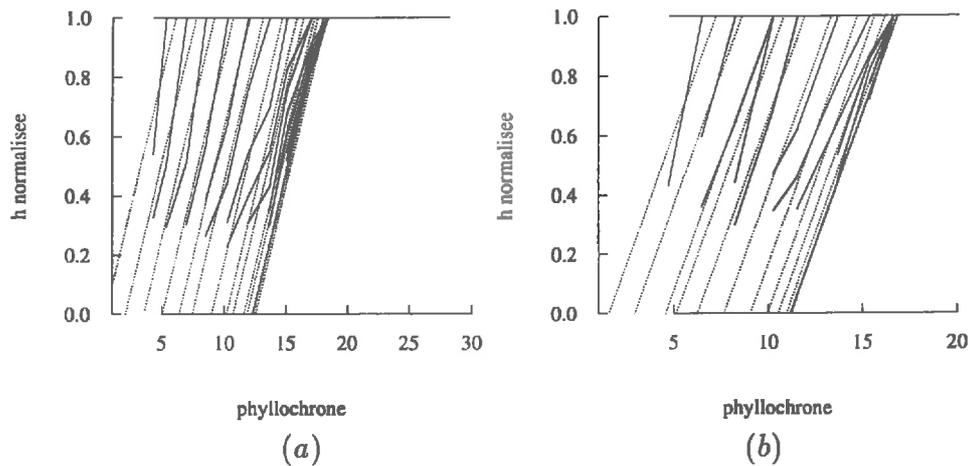


FIG. 3.25 – Hauteurs d'insertion moyennes normalisées par ordre de feuille en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2

2. pour tous les ordres de feuilles, la hauteur initiale normalisée est supérieure à une certaine valeur, h_0^* .

Dans l'expression 3.32 on considère, pour chaque ordre foliaire, le phyllochrone correspondant à l'apparition de la feuille, c'est-à-dire $\phi = i$:

$$h^*(\phi = i) = 1 - a_h (\phi_{1h}(i) - i) \geq h_0^*$$

d'où :

$$\phi_{1h}(i) - i \leq \frac{1 - h_0^*}{a_h}$$

Cela est vérifié pour toute valeur de i , si cela est vérifié pour le maximum de l'expression :

$$\frac{d(\phi_{1h}(i) - i)}{di} = 0$$

c'est-à-dire pour le i tel que :

$$i = i_T + \frac{1}{2\alpha_h}$$

La contrainte qu'on impose est donc :

$$\phi_{1h}(i_T + \frac{1}{2\alpha_h}) - (i_T + \frac{1}{2\alpha_h}) \leq \frac{1 - h_0^*}{a_h}$$

soit :

$$\gamma_h \leq \frac{1 - h_0^*}{a_h} + i_T + \alpha_h i_T^2 + \frac{1}{4\alpha_h}$$

Ainsi, on considère l'égalité :

$$\hat{\phi}_{1h}(i) = \alpha_h (i - i_T)^2 + \frac{1 - h_0^*}{a_h} + i_T + \frac{1}{4\alpha_h} \quad (3.33)$$

dénormalisation L'expression 3.33 nous permet d'estimer ϕ_{1h} pour chaque feuille et, en connaissant a_h et α_h , les hauteurs d'insertion normalisées en fonction du phyllochrone (3.32). Les hauteurs d'insertion finales doivent ensuite être dénormalisées à partir des hauteurs finales, estimées par (3.27) à partir de la vigueur, du nombre de feuilles de la plante et de la hauteur finale de la tige. Si pour un phyllochrone donné, une feuille a une hauteur d'insertion estimée inférieure à celle de la feuille précédente, elle se trouve dans le cornet et n'est donc pas considérée.

Estimation des paramètres

Dans le modèle d'estimation de l'évolution de la hauteur d'insertion des feuilles précédent, apparaissent deux paramètres : a_h (qui agit comme une vitesse moyenne de croissance en hauteur de la plante) et α_h (qui correspond au rythme d'apparition des feuilles). Ces paramètres ont été ajustés sur l'ensemble des données de la campagne 94.

Sur chacune des courbes de hauteur normalisée (fig. 3.25), la valeur de $a_h(i)$ est ajustée à partir de l'expression (3.32); la moyenne des $a_h(i)$ nous donne le paramètre a_h , vitesse moyenne d'augmentation de la hauteur normalisée des feuilles :

$$a_h = 0.177 \text{ (feuille/}^\circ\text{C)}$$

Sur les mêmes courbes normalisées (fig. 3.25), mais en fixant la pente à a_h , on a réajusté l'expression 3.32, ce qui a permis d'obtenir,

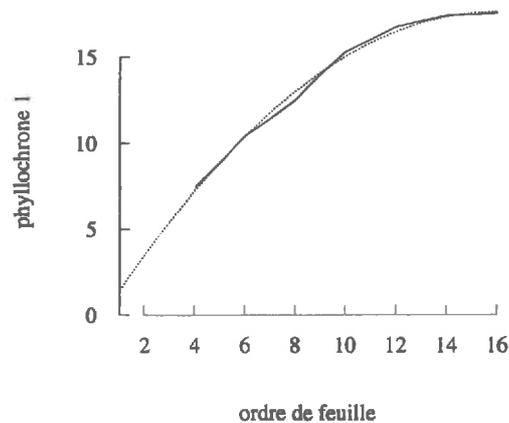


FIG. 3.26 – Phyllochrone correspondant à la hauteur d'insertion définitive, par rapport à l'ordre de la feuille : (—) mesuré, (.....) ajusté

pour chaque ordre de feuille, le phyllochrone, $\phi_1(i)$, correspondant à la hauteur finale. La relation entre $\phi_1(i)$ et l'ordre foliaire, i , répond à l'expression parabolique 3.33. La moyenne des deux courbes correspondantes aux deux parcelles étudiées apparaît à la figure 3.26; la courbe ajustée, en considérant $h_0^* = 0.1$, est superposée en pointillé; la valeur correspondante de α_h est :

$$\alpha_h = -0.072 \text{ (}^\circ\text{C/feuille}^3\text{)}$$

Pour la rendre plus générale, on la normalise par rapport au nombre total de feuilles de la plante, dont la moyenne pour les données étudiées est de 16 :

$$\alpha_h = -0.072 \times \frac{16}{i_T} \text{ (}^\circ\text{C/feuille}^3\text{)}$$

Validation

Étant donné qu'on ne dispose que des mesures utilisées lors du développement des modèles, sa précision est évaluée par rapport à cette base de données, en considérant l'ensemble des deux parcelles d'expérimentation.

Le modèle se compose de deux parties :

1. la première concernant l'estimation des valeurs normalisées
2. la deuxième, la dénormalisation de ces valeurs.

Cette dénormalisation étant faite par rapport à des valeurs estimées par d'autres modèles (section précédente), la validation du modèle d'évolution ne concerne que la première phase, c'est-à-dire les valeurs normalisées.

En connaissant a_h et α_h , et pour toute valeur de ϕ , l'expression 3.32 permet d'estimer (ϕ_{1h} étant estimé par 3.33) la hauteur normalisée de chacune des feuilles d'une plante de i_T feuilles. La figure 3.27 montre le résultat de cette estimation pour une plante de 16 feuilles.

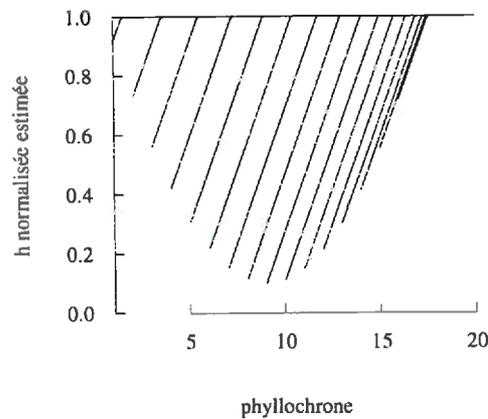


FIG. 3.27 – Hauteur d'insertion normalisée estimée par ordre de feuille, en fonction du phyllochrone pour les valeurs moyennes observées de i_T et S_T

On ne prend en compte dans le calcul de la régression que les feuilles qui montent, c'est-à-dire celles dont la hauteur normalisée est inférieure à 1. La figure 3.28 montre la régression entre les valeurs normalisées mesurées et estimées par le modèle. La précision de cette estimation est :

$$RMSE = 0.26, R^2 = 0.83, N = 67$$

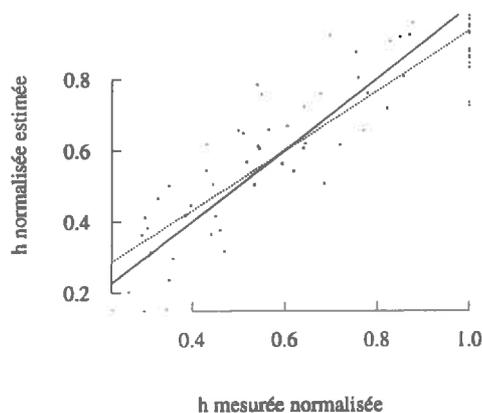


FIG. 3.28 – Comparaison entre les hauteurs d'insertion normalisées mesurées et estimées : parcelles 1 et 2

On a superposé à la figure 3.29 les hauteurs d'insertion moyennes, mesurées et estimées par le modèle décrit, pour les données des parcelles 1 et 2 de la campagne 94. Pour cela, la courbe précédente est dénormalisée à partir des hauteurs moyennes calculées pour chaque ordre foliaire à partir des mesures.

La longueur

Un modèle d'estimation de la longueur des feuilles de maïs au cours de son développement est proposé, similaire à celui décrit pour la modélisation de la hauteur d'insertion. Il est basé sur l'analyse des mêmes données. La figure 3.30 montre l'ensemble des données en considérant les valeurs moyennes par date.

Comme la hauteur d'insertion, la longueur de chaque feuille est supposée augmenter linéairement avec le phyllochrone, jusqu'à une valeur maximale, qui dépend de l'ordre foliaire et de la vigueur de la plante. On superpose en pointillé sur la figure une estimation de cette valeur maximale, calculée comme la moyenne des longueurs des feuilles complètement développées. La figure 3.31 montre les mêmes courbes normalisées à la longueur finale.

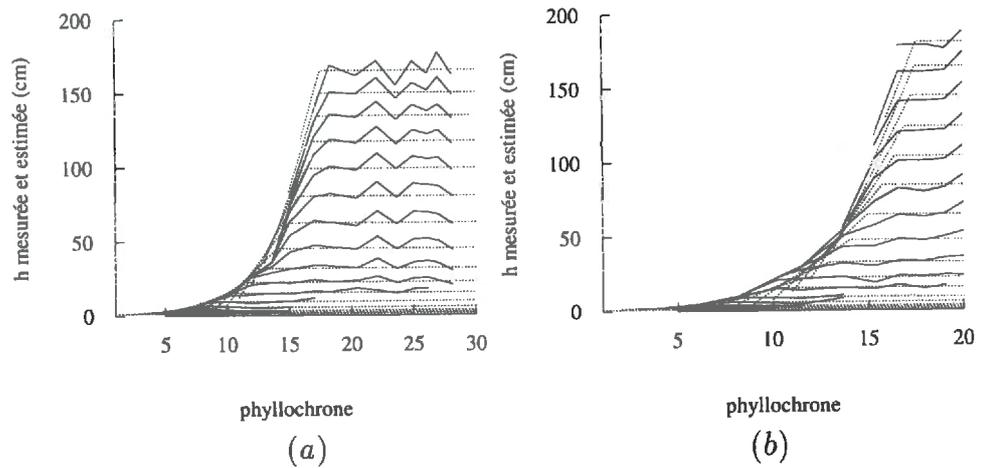


FIG. 3.29 – Superposition des hauteurs d'insertion moyennes mesurées et estimées, par ordre de feuille en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2 ((—) : mesures ; (.....) : estimations)

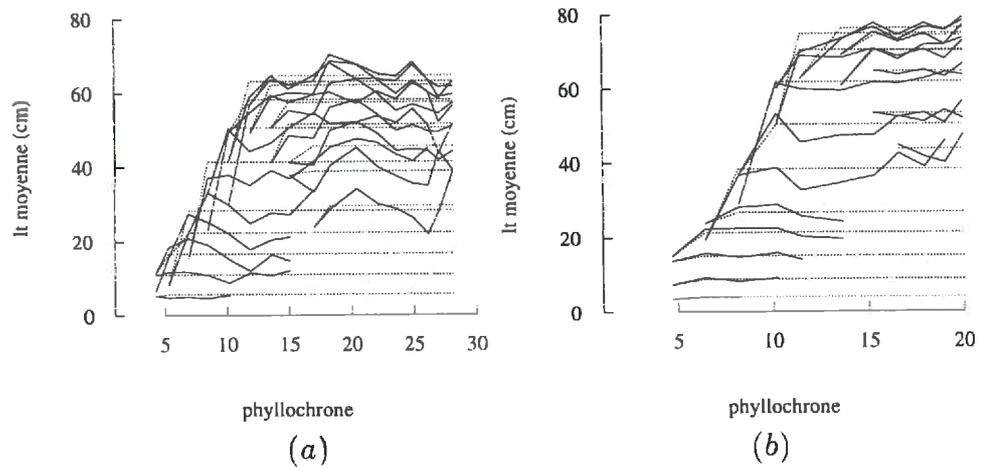


FIG. 3.30 – Longueurs moyennes mesurées par ordre de feuille, en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2

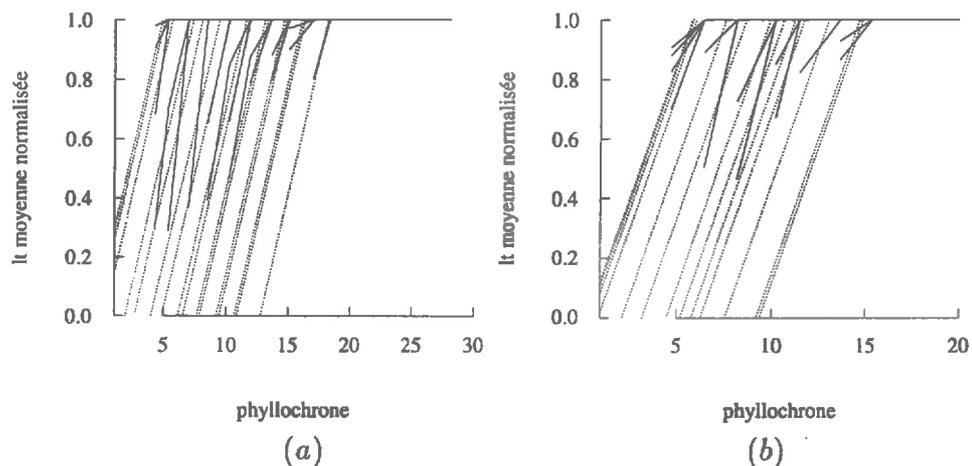


FIG. 3.31 – Longueurs moyennes mesurées, normalisées par rapport à la longueur finale moyenne, par ordre de feuille en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2

Description du modèle

La variation de la longueur de chaque feuille est exprimée en fonction du phyllochrone par une relation linéaire :

$$l^*(i) = 1 - a_l (\phi_{1l}(i) - \phi) \tag{3.34}$$

Le paramètre a_l représente une sorte de vitesse moyenne de croissance en longueur, en cm/phyllochrone. $\phi_{1l}(i)$ correspond au phyllochrone pour lequel chaque ordre foliaire fini sa croissance en longueur ; cette valeur marque le rythme d'évolution de la longueur des feuilles. Par analogie avec la hauteur d'insertion, il est estimé par l'expression :

$$\hat{\phi}_{1l}(i) = \alpha_l (i - i_T)^2 + \frac{1 - l_0^*}{a_l} + i_T + \frac{1}{4 \alpha_l} \tag{3.35}$$

En connaissant a_l et α_l (donc, $\hat{\phi}_{1l}$), l'expression 3.34, permet d'estimer la longueur normalisée par ordre de feuille en fonction du phyllochrone. La longueur réelle est obtenue en la dénormalisant par rapport à la longueur finale estimée par (3.11)-(3.12).

Estimation des paramètres

Comme pour les hauteurs d'insertion, les paramètres du modèle sont au nombre de deux : a_l et α_l . Le premier, a_l , est calculé comme la pente moyenne des droites ajustées, selon l'expression 3.34, sur les longueurs mesurées normalisées qui apparaissent à la figure 3.31. Ce paramètre correspond à la vitesse moyenne de croissance en longueur des feuilles, qu'on considère indépendante de l'ordre foliaire et de la parcelle de culture.

$$a_l = 0.18 \text{ (feuille/}^\circ\text{C)}$$

Pour estimer α_l , on ajuste les mêmes courbes en imposant a_l dans l'expression 3.34. On obtient ainsi les $\phi_{1l}(i)$. La relation entre $\phi_{1l}(i)$ et i est donnée par l'expression 3.35, qui, en considérant $l_0^* = 0.4$, donne une valeur de α_l de :

$$\alpha_l = -0.06 \text{ (}^\circ\text{C/feuille}^3\text{)}$$

Le résultat de cet ajustement apparaît à la figure 3.32.

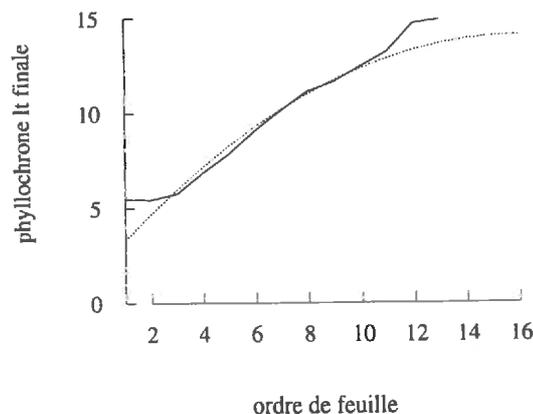


FIG. 3.32 – *Phyllochrone correspondant à la longueur finale moyenne, par rapport à l'ordre de la feuille : (—) mesuré, (.....) ajusté*

De même que pour la hauteur, on normalise α_l par rapport au nombre total de feuilles de la plante, afin de la rendre plus général :

$$\alpha_l = -0.06 \frac{16}{i_T} (\text{°C}/\text{feuille}^3)$$

Validation

Comme pour les hauteurs d'insertion, on compare les mesures aux estimations pour le même ensemble de données utilisés lors du développement du modèle, en considérant les valeurs normalisées.

À partir de l'expression 3.34, en utilisant les valeurs de a_l et α_l calculées dans la section précédente, on estime pour chaque ordre foliaire entre 1 et i_T , la longueur normalisée en fonction du phyllochrone. La figure 3.33 montre le résultat de cette estimation pour une plante de 16 feuilles (i_T moyen pour les plantes étudiées).

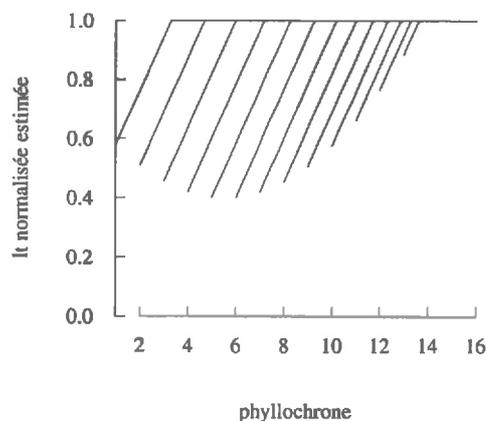


FIG. 3.33 – Longueur normalisée estimée par ordre de feuille, en fonction du phyllochrone, pour les valeurs moyennes de i_T et S_t des plantes étudiées

La précision du modèle est évaluée par rapport aux valeurs normalisées, la dénormalisation faisant appel à un autre modèle, présenté et validé auparavant.

La régression entre valeurs normalisées mesurées et estimées apparaît à la figure 3.34. La précision des estimations par rapport aux mesures est :

$$RMSE=0.23, R^2 = 0.82, N = 32$$

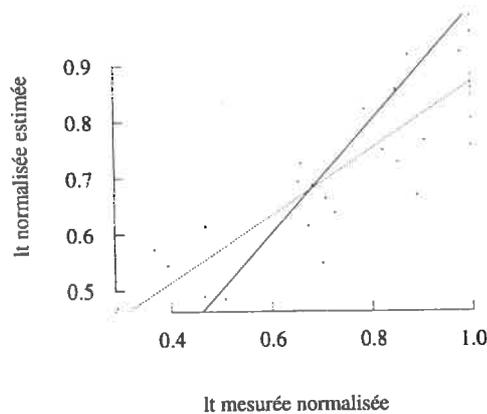


FIG. 3.34 – *Comparaison entre les longueurs normalisées mesurées et estimées : parcelle 1 et 2*

La figure 3.35 montre les longueurs moyennes, mesurées et estimées par le modèle décrit, pour les données des parcelles 1 et 2. On a considéré les longueurs moyennes calculées par ordre de feuille à partir des données.

La largeur

La figure 3.36 montre les courbes de l'évolution de la largeur des feuilles en fonction du phyllochrone; il s'agit des valeurs moyennes calculées sur les 15 plantes de chaque prélèvement (3 échantillons, 5 plantes par échantillon) de la campagne de mesures de 94. On observe des oscillations assez importantes, dues aux différences entre les plantes considérées. On peut dire que la largeur moyenne finale des feuilles correspond à la moyenne des largeurs à partir du phyllochrone pour lequel la largeur des feuilles se stabilise, ce qui se produit assez rapidement.

De l'observation de ces données on déduit que la largeur d'une feuille ne change pas beaucoup entre son apparition dans le cornet et la fin de son développement. Il n'est donc pas nécessaire d'établir un modèle d'estimation de l'évolution de la largeur, car on peut considérer qu'elle est fixée au départ.

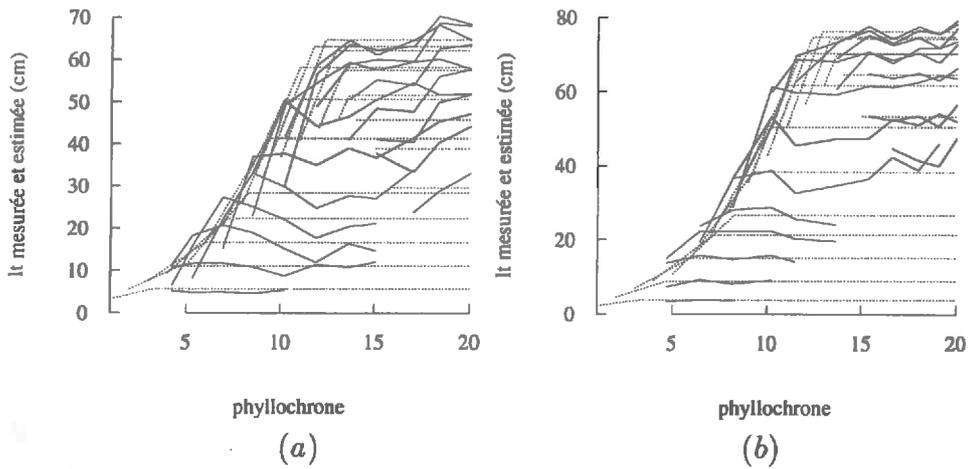


FIG. 3.35 - Superposition des longueurs moyennes mesurées et estimées, par ordre de feuille, en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2 ((—) : mesures ; (.....) : estimations)

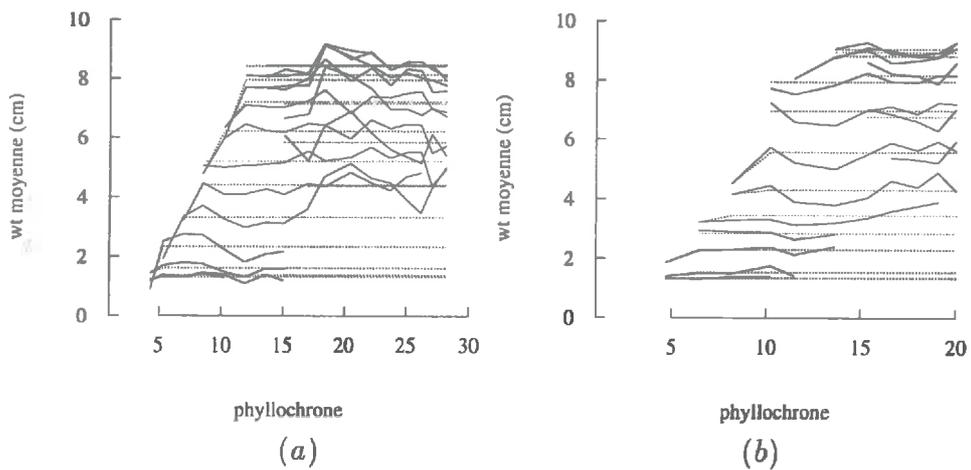


FIG. 3.36 - Largeurs moyennes mesurées par ordre de feuille en fonction du phyllochrone : (a) parcelle 1 ; (b) parcelle 2

Évolution temporelle et courbure des feuilles

Lorsqu'une feuille est sortie du cornet, et a donc un point d'insertion bien visible sur la tige, sa forme varie très peu, comme l'a montré l'analyse des plantes photographiées.

Les modèles de description de la forme des feuilles présentés dans la section précédente (3.3) sont des modèles généraux, qui permettent de décrire toutes les feuilles, indépendamment de leur ordre foliaire et de leur niveau de développement, à condition qu'elles soient complètement sorties du cornet.

On a vu dans cette section que la longueur et la hauteur d'insertion d'une feuille augmentent progressivement dès son apparition jusqu'à sa valeur finale. Sans modifier le reste des paramètres, cette augmentation de la longueur suffit à donner l'impression de croissance de la feuille.

Afin de suivre le développement de la plante et d'obtenir des représentations réalistes, on introduit certaines contraintes très simples dans le modèle général : on impose

- aux trois dernières feuilles du cornet, qu'on considère encore engainées, de n'être pas cassées et d'être verticales (angle d'insertion de 90°)
- aux autres feuilles du cornet, qu'elles partagent l'angle qui reste entre la verticale et l'angle d'insertion de la feuille la plus extérieure du cornet, ce qui évite qu'elles se croisent à la base.

Les diamètres haut et bas de la tige sont pondérés par le nombre de feuilles présentes dans la plante, pour une valeur de phyllochrone donnée, afin de les adapter à la hauteur de la plante.

Sénescence et disparition des premières feuilles

Les 7 premières feuilles de la plante ont un comportement et des caractéristiques différentes des autres (§ 3.4.2, *longueur*). Elles se séparent de la tige, tombent et disparaissent pendant la phase de croissance de la plante. À partir de l'observation des plantes photographiées, on a développé un algorithme assez simple de disparition des 7 premières

feuilles : on considère qu'il n'y a jamais plus de deux feuilles d'ordre inférieur à 7 avant le cornet ; la feuille 7 disparaît quand le développement de la plante est complètement fini.

La figure 3.37 illustre l'évolution temporelle d'une plante selon le modèle proposé.



FIG. 3.37 – Exemple de la simulation du développement d'une plante par le modèle (4 stades phénologiques)

3.5 Construction de plantes et de champs

Pour la construction de nouvelles plantes, les paramètres de forme *forme* qui interviennent dans les modèles de description de la feuille sont obtenus par tirage aléatoire dans des fonctions de distribution ; ces fonctions ont été observées sur un nombre suffisant de silhouettes de plantes (§ 3.3.2).

dimensions Les dimensions des feuilles (longueur et largeur maximale) et les hauteurs d'insertion sur la tige sont estimées à partir de lois empiriques, avec 4 variables d'entrée :

- le nombre maximum de feuilles ;
- la vigueur, assimilée à la surface foliaire totale de la plante ;
- le phyllochrone, qui permet de déterminer le stade foliaire et ainsi de simuler l'évolution temporelle de la culture ;
- la hauteur finale de la plante.

densité Pour la construction d'un champ, les différentes plantes sont disposées en rangs, selon la densité de semis choisie, l'azimut de la plante étant aléatoire. Une petite variation aléatoire, en rotation et translation, est introduite à la position de chaque pied pour simuler les conditions réelles de semis.

3.6 Propriétés optiques

Les spectres de réflectances des feuilles de maïs récoltées pendant tout un cycle végétatif (campagne 1994) ont été utilisés pour l'inversion du modèle de transfert radiatif *PROSPECT* (Jacquemoud et Baret, 1990). L'inversion permet d'estimer trois paramètres essentiels dans la description des interactions entre le rayonnement et la feuille : la teneur en chlorophylle (C_{ab}), la teneur en eau (C_w) et l'indice de structure (N), caractérisant la nature et l'état des tissus cellulaires composant les feuilles.

3.6.1 Contenu en chlorophylle

La majeure partie du rayonnement visible reçu par les feuilles est absorbée par les pigments foliaires, principalement par les chlorophylles a et b, responsables de la couleur verte des plantes. La teneur en chlorophylle diminue très rapidement lors du vieillissement ou sous l'effet d'un stress, laissant apparaître la couleur jaune d'autres pigments foliaires, comme les caroténoïdes.

La figure 3.38 montre l'évolution de la teneur en chlorophylles (en $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) en fonction du temps, en considérant, pour chaque date, la moyenne des valeurs obtenues pour toutes les feuilles prélevées des deux parcelles de la campagne 1994. On constate la diminution de la teneur en chlorophylles avec le vieillissement des plantes (le temps est exprimé en jours à compter à partir du 30/07).

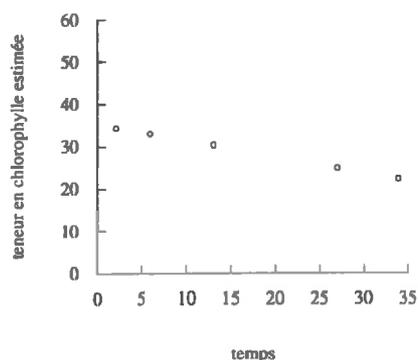


FIG. 3.38 – Évolution de la teneur en chlorophylle ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) en fonction du temps (en jours à compter du 30/07)

3.6.2 Contenu en eau

La teneur en eau des feuilles a une grande influence sur leurs propriétés optiques (Jacquemoud et Baret, 1991), d'une manière directe dans l'infra-rouge moyen, par la présence de fortes bandes d'absorption, et d'une manière indirecte dans le visible et le proche infra-rouge, en modifiant la turgescence des cellules. Une diminution de la teneur en eau des feuilles se traduit par une augmentation de la réflectance.

L'analyse des valeurs de teneur en eau estimées par *PROSPECT* (Jacquemoud et Baret, 1991) (en g/cm^2), sur les feuilles de maïs étudiées, montre que la teneur en eau diminue au cours du temps, à cause de la sénescence des feuilles (fig, 3.39).

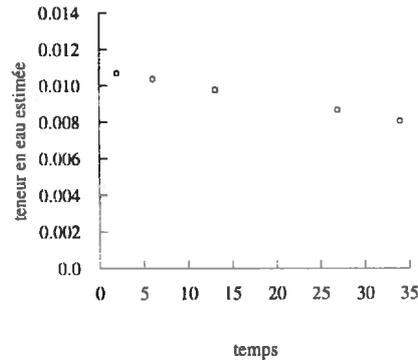


FIG. 3.39 – Évolution de la teneur en eau (g/cm^2) en fonction du temps (en jours à compter du 30/07)

3.6.3 Indice de structure

L'indice de structure, N , caractérise la structure interne de la feuille, représentant un nombre de couches définies par un indice de réfraction et un coefficient d'absorption. La réflectance des feuilles dépend de la structure interne: nombre d'assises cellulaires, dimension des cellules et épaisseur relative du parenchyme lacuneux. Cette structure interne évolue avec l'âge des feuilles. Elle est désorganisée par le dessèchement lors de la sénescence. La figure 3.40 montre l'évolution temporelle de l'indice de structure, en considérant la valeur moyenne par date pour les deux parcelles d'expérimentation de la campagne 94. Les valeurs se situent aux alentours de 1.5 et augmentent légèrement avec l'âge des plantes.

3.7 Conclusion

Nous avons proposé un modèle de description de la structure de la plante de maïs, qui tient compte de son évolution temporelle. Ce modèle utilise des expressions très simples et ne fait intervenir comme variables d'entrée que le nombre de feuilles, la vigueur de la plante et sa hauteur finale, ce qui lui confère une grande souplesse et un bon

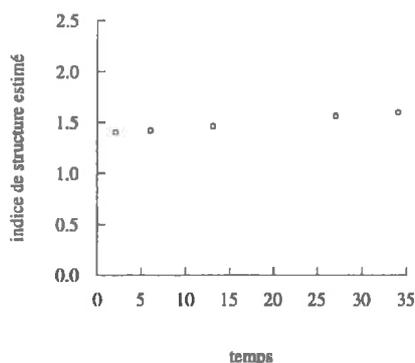


FIG. 3.40 – Évolution de l'indice de structure en fonction du temps (en jours à compter du 30/07)

réalisme. Il ne s'agit pas d'un modèle de fonctionnement de la plante, mais simplement de la description statistique de sa structure, qui permet d'estimer, pour chaque stade phénologique, les dimensions et la hauteur de chaque feuille.

Il serait intéressant de tester le modèle avec des données complètement indépendantes de celles utilisées pour l'établir. Il est malheureusement très difficile et coûteux en temps de se procurer une telle base de données. Nous essaierons de le valider sur quelques cas particuliers dans le chapitre 6, parallèlement à la validation du modèle de transfert radiatif.

L'étude des propriétés optiques montre qu'elles ne varient que peu pendant le cycle végétatif, ce qui simplifiera leur utilisation en permettant de considérer des valeurs constantes dans le temps et pour tout ordre foliaire. Toutefois, ces observations seraient également à confronter sur des cultures soumises à différents types et niveaux de stress, hydriques ou azotés en particulier.

L'objectif étant de construire des maquettes informatiques de couverts de maïs pour l'étude du transfert radiatif, l'étape suivante consistera à passer de la description de la plante, donnée par notre modèle, à sa représentation informatique.

Annexe 1 : Modélisation de la surface foliaire

Les dimensions maximales normalisées de la feuille sont :

$$l^* = \frac{l}{l_t}$$

$$w^* = \frac{w}{w_t}$$

l_t et w_t étant, respectivement, la longueur de la feuille et sa largeur maximale.

On considère un polynôme du second degré :

$$w^*(l^*) = \alpha l^{*2} + \beta l^* + \gamma$$

3 paramètres sont donc nécessaires pour chaque feuille : α , β et γ . Deux conditions permettent de réduire le nombre de paramètres à un (α , par exemple) :

1. $w^*(l^* = 1) = 0$
La largeur de la feuille à son extrémité est nulle.
 $l(w_t) = l_t \rightarrow l^* = 1$
 $w^*(l^* = 1) = \alpha + \beta + \gamma = 0$
2. La largeur de la feuille est maximale soit à son point d'insertion, soit à un point quelconque, l_m , où la dérivée de l^* par rapport à w^* est nulle.

(a) $l_m^* = 0$
 $\rightarrow w^*(l_m^*) = \gamma = 1, \beta = -(1 + \alpha)$

$$w^*(l^*) = \alpha l^{*2} - (1 + \alpha)l^* + 1$$

Dans ce cas ($w_0^* \in (0, 1)$ et $\gamma = 1$) on peut facilement vérifier que : $\alpha \in (-1, 1)$

C'est le cas, principalement, des feuilles qui ne sont pas complètement sorties du cornet.

(b) $l_m^* \neq 0$

$$\frac{dw^*}{dl^*} = 2\alpha l^* + \beta$$

$$\left(\frac{dw^*}{dl^*}\right)_m = 0 \rightarrow l_m^* = \frac{-\beta}{2\alpha}$$

$$w_m^* = \alpha\left(\frac{-\beta}{2\alpha}\right)^2 + \beta\left(\frac{-\beta}{2\alpha}\right) + \gamma = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{-\beta^2}{4\alpha} + \gamma = 1 \\ \alpha + \beta + \gamma = 0 \end{array} \right\} \beta = -2(\alpha \pm \sqrt{-\alpha})$$

$$\gamma = -\alpha - \beta = \alpha \pm 2\sqrt{-\alpha} \quad (3.36)$$

$$w^*(l^*) = \alpha(l^*)^2 - 2(\alpha + \sqrt{-\alpha})l^* + 2\sqrt{-\alpha} + \alpha$$

Dans ce cas :

$w_0^* \in (0, 1) \rightarrow \gamma \in (0, 1)$ et à partir de (3.36) on peut facilement vérifier que : $\alpha \in (-4, -1)$.

Il s'agit en général des feuilles complètement dégainées. α permet de déplacer la position de u_m entre les deux extrêmes : $l^* = 0$ et $l^* = 1$.

On voit donc qu'un seul paramètre (α) détermine la largeur de la feuille en fonction de la distance à son point d'insertion, en considérant les valeurs normalisées.

En connaissant le paramètre α , qui détermine donc la forme de la feuille, on peut calculer la **surface adimensionnelle** de celle-ci, définie comme :

$$S^*(\alpha) = \int_{l^*=0}^1 w^* dl^* = \frac{\alpha}{3} + \frac{\beta}{2} + \gamma$$

On considère les deux cas vus précédemment :

1. $\alpha \in (-1, 1)$

$$S^*(\alpha) = \frac{(1-\frac{\alpha}{3})}{2}$$

2. $\alpha \in (-4, -1)$

$$S^*(\alpha) = \frac{\alpha}{3} + \sqrt{-\alpha}$$

Annexe 2 : Modèle mathématique de la courbure de la nervure centrale

Le modèle choisi pour décrire la nervure centrale des feuilles est celui de Prévot et Aries (1991).

La nervure est supposée appartenir au plan vertical. On considère chaque feuille divisée en deux parties:

- la partie ascendante est assimilée à un arc de parabole à axe de symétrie vertical

$$y = ax^2 + bx \quad (3.37)$$

paramètres: a, b

- la partie descendante, lorsqu'elle existe, est assimilée à un arc d'ellipse dont un des axes est horizontal et l'autre vertical

$$\begin{aligned} x &= x_c + d\cos\phi \\ y &= y_c + e\sin\phi \end{aligned} \quad (3.38)$$

paramètres: $x_c, y_c, d, e, \phi_m, \phi_f$

(x_c, y_c) étant le centre de l'ellipse, d et e les longueurs des demi-axes horizontal et vertical. L'angle paramétrique total correspondant à l'arc d'ellipse d'une feuille doit être $\leq \pi$, et toujours convexe.

Le raccordement des deux modèles est situé au point le plus haut de la feuille (x_m, y_m) , où l'on impose la contrainte de continuité:

$$\begin{aligned} x_m &= x_c + d\cos\phi_m \\ y_m &= ax_m^2 + bx_m = y_c + e\sin\phi_m \end{aligned} \quad (3.39)$$

paramètre: x_m

On n'impose pas de contrainte sur la dérivée à (x_m, y_m) , un certain nombre de feuilles étant cassées à cet endroit.

Le modèle est défini en plaçant l'origine du repère au point d'insertion de la feuille (x_0, y_0) . Il comporte ainsi 9 paramètres ; la condition de continuité réduit à 7 le nombre de paramètres nécessaires pour décrire une feuille.

Reparamétrisation du modèle

La paramétrisation du modèle, telle qu'elle a été décrite, est peu adaptée à l'étude des distributions de ses paramètres. En effet, certains d'entre eux $(a, b, x_c, y_c, d, e, \dots)$ peuvent tendre vers l'infini en valeur absolue pour des arcs de parabole quasi-verticaux ou des arcs d'ellipse quasi-rectilignes. Une reparamétrisation a été réalisée en utilisant des grandeurs dérivées de sa première définition, mais choisies de telle sorte qu'elles soient finies et correspondent à des paramètres plus facilement interprétables.

Ce sont les suivants:

- longueur de la feuille : l_t

- angle d'insertion de la feuille : ϕ_0

$$\phi_0 = \arctan(b) \quad (3.40)$$

$$\phi_0 \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

- courbure de la parabole : C_p

$$C_p = \frac{y_m}{y_i} \quad (3.41)$$

$$y_i = ax_i^2 + bx_i$$

$$x_i = \frac{x_m}{2}$$

$$C_p \in [\frac{4}{3}, 4]$$

- point de raccordement des deux modèles: P_{cass}

$$P_{cass} = \frac{\text{longueur parabole}}{\text{longueur totale}} \quad (3.42)$$

$$P_{cass} \in [0, 1]$$

- angle de cassure de la feuille: ϕ_{cass}

$$\phi_{cass} \in [0, \pi]$$

- allongement de l'ellipse: ϵ

$$\epsilon = \begin{cases} (d^2 - e^2)/d^2 & d \geq e \\ -(e^2 - d^2)/e^2 & d < e \end{cases} \quad (3.43)$$

$$\epsilon \in [-1, 1]$$

- courbure angulaire de l'ellipse: ψ_e

ψ_e est calculé à partir des tangentes à l'ellipse aux points du début et de fin de celle-ci (respectivement (x_m, y_m) et (x_f, y_f)), qui répondent aux équations suivantes:

$$\frac{xx_m}{d^2} + \frac{yy_m}{e^2} = 1 \quad (3.44)$$

$$\frac{xx_f}{d^2} + \frac{yy_f}{e^2} = 1 \quad (3.45)$$

L'intersection de ces deux droites se produit au point (x_e, y_e) donné par les expressions:

$$x_e = -d^2 \frac{y_m - y_f}{x_m y_f - y_m x_f} \quad (3.46)$$

$$y_e = e^2 \frac{x_m - x_f}{x_m y_f - y_m x_f} \quad (3.47)$$

En considérant (x_e, y_e) comme origine des coordonnées, on définit:

$$x'_m = (x_m - x_e), y'_m = (y_m - y_e) \quad (3.48)$$

$$x'_f = (x_f - x_e), y'_f = (y_f - y_e) \quad (3.49)$$

Le produit scalaire des deux vecteurs: $(x'_m, y'_m) \times (x'_f, y'_f)$ répond à l'équation:

$$x'_m x'_f + y'_m y'_f = \sqrt{(x'_m)^2 + (y'_m)^2} \sqrt{(x'_f)^2 + (y'_f)^2} \cos(\pi - \psi_e) \quad (3.50)$$

d'où:

$$\psi_e = \pi - \arccos \left(\frac{x'_m x'_f + y'_m y'_f}{\sqrt{(x'_m)^2 + (y'_m)^2} \sqrt{(x'_f)^2 + (y'_f)^2}} \right) \quad (3.51)$$

Inversion du modèle

Même si une feuille est parfaitement décrite à partir des sept paramètres choisis, ce sont les paramètres du modèle initial (a, b, d, e, x_e, \dots) qui vont permettre de la tracer, en utilisant les équations de la parabole et de l'ellipse. Il faut donc connaître les relations qui lient les deux groupes de paramètres, afin de pouvoir passer de l'un à l'autre indifféremment.

Les deux parties, ascendante et descendante, de la feuille sont considérées séparément.

Partie ascendante: parabole

L'équation est la suivante:

$$y = ax^2 + bx \quad (3.52)$$

On connaît les paramètres:

$$\phi_0, l_t, P_{cass}, C_p \quad (3.53)$$

Il s'agit de calculer a et b à partir de $\phi_0, l_t, P_{cass}, C_p$.
Le procédé est le suivant:

- on calcule d'abord b comme la tangente à l'origine

$$b = \tan(\phi_0) \quad (3.54)$$

(cela suppose $x_0 = 0$);

- la valeur de a est obtenue à partir de la longueur de la parabole

$$a \leftarrow l_p \quad (3.55)$$

P_{cass} étant le rapport entre la longueur de l'ellipse et la longueur totale de la feuille, on obtient cette dernière comme:

$$l_p = l_t \times P_{cass} \quad (3.56)$$

En général, la longueur d'une courbe entre deux de ses points, $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, peut être calculée comme son intégrale curviligne entre ces deux points:

$$l_1^2 = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3.57)$$

En appliquant l'équation (3.57) entre l'origine de la feuille, (x_0, y_0) , et son point de cassure, (x_m, y_m) :

$$l_p = \int_{x_0}^{x_m} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3.58)$$

En substituant $\frac{dy}{dx}$ par sa valeur:

$$l_p = \int_{x_0}^{x_m(a)} \sqrt{1 + (2ax + b)^2} dx$$

En intégrant par rapport à x on obtient, quand $a \neq 0$:

$$l_p = \frac{1}{4a} \left(2ax_m \sqrt{(\theta)} + b\sqrt{(\theta)} + \log \left(\frac{\sqrt{(\theta)} + 2ax_m + b}{\sqrt{1+b^2} + b} \right) - b\sqrt{1+b^2} \right)$$

avec

$$\theta = 1 + (2ax_m + b)^2 \quad (3.59)$$

tous les termes de l'équation étant réels.

Mais on ne connaît pas la valeur de x_m ; elle est une fonction de a qu'on peut obtenir à partir de la définition de C_p (3.41).

$$C_p = \frac{y_m}{y_i} = \frac{ax_m^2 + bx_m}{a\left(\frac{x_m}{2}\right)^2 + b\frac{x_m}{2}} = 4 \left(\frac{ax_m + b}{ax_m + 2b} \right) \quad (3.60)$$

d'où (si $C_p \neq 4$ et $a \neq 0$):

$$x_m = -2 \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{2 - C_p}{4 - C_p} \right) \quad (3.61)$$

d'où

$$l_p = \frac{1}{4a} \left(-\frac{4b(-2 + C_p)\sqrt{(\theta')}}{C_p - 4} + b\sqrt{(\theta')} + \log \left(\frac{\sqrt{(\theta')} - \frac{4b(-2 + C_p)}{C_p - 4} + b}{\sqrt{1+b^2} + b} \right) - b\sqrt{1+b^2} \right) \quad (3.62)$$

et

$$a = \frac{1}{4l_p} \left(-\frac{4b(-2 + C_p)\sqrt{(\theta')}}{C_p - 4} + b\sqrt{(\theta')} + \ln \left(\frac{\sqrt{(\theta')} - \frac{4b(-2 + C_p)}{C_p - 4} + b}{\sqrt{1+b^2} + b} \right) - b\sqrt{1+b^2} \right) \quad (3.63)$$

b et l_p étant connus et

$$\theta' = 1 + b^2 \left(\frac{3C_p - 4}{C_p - 4} \right)^2 \quad (3.64)$$

Deux valeurs de C_p sont à considérer à part:

- $C_p = 2$

La partie ascendante de la feuille est une ligne droite qui passe par l'origine et dont l'inclinaison est donnée par b .

Dans ce cas:

$$a = 0, x_m = \frac{l_p}{\sqrt{1 + b^2}} \quad (3.65)$$

- $C_p = 4$

La parabole est concave; la tangente à l'origine est horizontale.

On trouve facilement:

$$b = 0 \quad (3.66)$$

mais les valeurs de a et x_m restent indéterminées, ce qui rend nécessaire de considérer $C_p \in [\frac{4}{3}, 4[$.

Une autre valeur intéressante de C_p est: $C_p = \frac{3}{4}$. Dans ce cas la tangente à la parabole au point de cassure est horizontale, ce qui est vrai pour un grand nombre de feuilles ($(\frac{dy}{dx})_{x_m} = 0$).

- Une fois a déterminé, C_p étant connu, x_m peut être calculé facilement à partir de l'équation (3.61). On utilise l'équation de la parabole pour calculer y_m

$$y_m = ax_m^2 + bx_m \quad (3.67)$$

Partie descendante: ellipse

L'équation d'un arc d'ellipse est, sous sa forme paramétrique:

$$\begin{aligned} x &= x_c + d \cos(\phi) \\ y &= y_c + e \sin(\phi) \\ \phi_{deb} &\leq \phi \leq \phi_{fin} \end{aligned} \quad (3.68)$$

On part des paramètres suivants, qu'on connaît soit parce qu'ils font partie des paramètres du modèle, soit parce qu'ils ont été calculés précédemment:

$$\phi_{cass}, \epsilon, l_t, \psi_e, x_m, a, b \quad (3.69)$$

À partir de ϵ on calcule une valeur intermédiaire, K , qui exprime la relation au carré entre les deux diamètres de l'ellipse, d et e :

$$K = \frac{e^2}{d^2} = \begin{cases} 1 - \epsilon & \epsilon > 0 \\ \frac{1}{1+\epsilon} & \epsilon < 0 \end{cases} \quad (3.70)$$

Avant de calculer les angles de début et de fin de l'arc d'ellipse, on calcule des angles intermédiaires, à savoir:

pmg : l'angle que forme la tangente à la parabole au point de cassure avec l'horizontale

$$\begin{aligned} \tan(pmg) &= \left(\frac{dy_p}{dx_p}\right)_m \\ pmg &= \arctan(2ax_m + b) \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$pmg \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

pmd : l'angle que forme la tangente à l'ellipse au point de cassure, avec l'horizontale

$$\tan(pmd) = \left(\frac{dy_e}{dx_e}\right)_m \quad (3.72)$$

$$pmd \in [-\frac{\pi}{2}, 0]$$

On impose la condition:

$$pmg + \pi - \phi_{cass} > \frac{\pi}{2} \quad (3.73)$$

(la feuille descend vers la droite) d'où:

$$pmd = pmg - \phi_{cass} \quad (3.74)$$

On néglige la possibilité que la feuille revienne en arrière avec un angle $pm d > 0$. Dans ce cas on aurait:

$$pmg + \pi - \phi_{cass} < \frac{\pi}{2} \quad (3.75)$$

et

$$pmd = \pi - \phi_{cass} + pmg \quad (3.76)$$

pmf : l'angle que forme la tangente à l'ellipse à son extrême, avec l'horizontale

$$\tan(pm f) = \left(\frac{dy_e}{dx_e} \right)_f \quad (3.77)$$

$$pm f \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

On calcule $pm f'$ comme:

$$pm f' = pmd - \psi_e \equiv \pi \quad (3.78)$$

et:

- si $(pm f' < -\frac{\pi}{2}) \rightarrow pm f = pm f' + \pi$
- si $(-\frac{\pi}{2} < pm f' < \frac{\pi}{2}) \rightarrow pm f = pm f'$
- si $(pm f' > \frac{\pi}{2}) \rightarrow pm f = pm f' - \pi$

On obtient ϕ_{deb} à partir de pmd et K .

$$\frac{dx_e}{d\phi} = -d \sin(\phi) \quad (3.79)$$

$$\frac{dy_e}{d\phi} = e \cos(\phi) \quad (3.80)$$

$$\cos(\phi) = \frac{x - x_c}{d} \quad (3.81)$$

$$\sin(\phi) = \frac{y - y_c}{e} \quad (3.82)$$

$$\tan(\phi_{deb}) = \frac{\sin(\phi_{deb})}{\cos(\phi_{deb})} = \frac{1}{\sqrt{K}} \frac{y_m - y_c}{x_m - x_c} \quad (3.83)$$

D'autre part

$$\tan(pmd) = \left(\frac{dy_e}{dx_e} \right)_m \quad (3.84)$$

$$\tan(pmd) = \frac{e \cos(\phi)}{-d \sin(\phi)} = -K \frac{x_m - x_c}{y_m - y_c} \quad (3.85)$$

De (3.83) et (3.85):

$$\frac{y_m - y_c}{x_m - x_c} = \sqrt{K} \tan(\phi_{deb}) = \frac{-K}{\tan(pmd)} \quad (3.86)$$

d'où

$$\tan(\phi_{deb}) = \frac{-\sqrt{K}}{\tan(pmd)} \quad (3.87)$$

$$\phi_{deb} = \arctan\left(\frac{-\sqrt{K}}{\tan(pmd)}\right) \quad (3.88)$$

- si $pmd \in [-\frac{\pi}{2}, 0] \rightarrow \phi_{deb} \in [0, \frac{\pi}{2}]$
- si $pmd \in [0, \frac{\pi}{2}] \rightarrow \phi_{deb} \in [-\frac{\pi}{2}, 0]$

ϕ_{deb} étant toujours compris entre $-\frac{\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{2}$, par définition du modèle (si $\phi_{deb} > \frac{\pi}{2}$, la partie elliptique de la feuille serait ascendante au point x_m ; si $\phi_{deb} < -\frac{\pi}{2}$, la partie elliptique de la feuille serait concave).

De même, on peut arriver à ϕ'_{fin} à partir de pmf et K .

$$\phi'_{fin} = \arctan\left(\frac{-\sqrt{K}}{\tan(pmf)}\right) \quad (3.89)$$

ϕ'_{fin} étant compris entre $-\frac{\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{2}$. Dans ce cas on n'a pas les mêmes restrictions que pour ϕ_{deb} : ϕ'_{fin} peut varier entre $-\pi$ et π . En revanche, on doit avoir :

1. $\phi_{deb} > \phi'_{fin}$

$$2. |\phi_{deb}| + |\phi_{fin}| < \pi$$

ce qui donne :

$$- \text{ si } \phi'_{fin} > \phi_{deb} \longrightarrow \phi_{fin} = \phi'_{fin} - \pi$$

$$- \text{ si } \phi'_{fin} \leq \phi_{deb} \longrightarrow \phi_{fin} = \phi'_{fin}$$

Une fois les angles de début et de fin de l'arc de parabole de la partie descendante de la feuille connus, on calcule d à partir de la longueur de l'ellipse.

$$l_e = l_t \times (1 - P_{cass}) = l_t - l_p \quad (3.90)$$

$$l_e = \int_{\phi_{fin}}^{\phi_{deb}} \sqrt{\left(\frac{dx_e}{d\phi}\right)^2 + \left(\frac{dy_e}{d\phi}\right)^2} d\phi \quad (3.91)$$

$$\frac{dx_e}{d\phi} = -d \sin(\phi) \quad (3.92)$$

$$\frac{dy_e}{d\phi} = e \cos(\phi) \quad (3.93)$$

$$l_e = \int_{\phi_{fin}}^{\phi_{deb}} \sqrt{e^2 \cos^2(\phi) + d^2 \sin^2(\phi)} d\phi \quad (3.94)$$

En utilisant l'expression (3.70)

$$l_e = d \int_{\phi_{fin}}^{\phi_{deb}} \sqrt{K \cos^2(\phi) + \sin^2(\phi)} d\phi \quad (3.95)$$

d'où :

$$d = \frac{l_e}{\int_{\phi_{fin}}^{\phi_{deb}} \sqrt{K \cos^2(\phi) + \sin^2(\phi)} d\phi} \quad (3.96)$$

intégrale qui devra être calculée de manière numérique.

Si $d = e$, $K = 1$, on n'aura pas une ellipse, mais un cercle, et comme

$$\cos^2(\phi) + \sin^2(\phi) = 1, \forall \phi,$$

le dénominateur de d devient égal à l'intégrale de 1, et on a donc la relation :

$$d = \frac{l_e}{\int_{\phi_{fin}}^{\phi_{deb}} d\phi} = \frac{l_e}{\phi_{deb} - \phi_{fin}}$$

$$l_e = d \times (\phi_{deb} - \phi_{fin})$$

c'est-à-dire que *l'arc est égal au rayon fois l'angle.*

Une fois d connu, on peut facilement obtenir e (3.70)

$$e = \sqrt{K} d \quad (3.97)$$

x_c et y_c sont calculés à partir des expressions paramétriques de l'ellipse (3.38) au point (x_m, y_m) , où l'angle paramétrique est ϕ_{deb} :

$$x_c = x_m - d \cos(\phi_{deb}) \quad (3.98)$$

$$y_c = y_m - e \sin(\phi_{deb}) \quad (3.99)$$

Chapitre 4

Effet de la qualité de la représentation de la maquette sur le transfert radiatif

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, un modèle géométrique de la structure *problème* de couverts de maïs a été présenté. Il permet de représenter des plantes et des champs très réalistes, sous la forme de surfaces paramétriques tridimensionnelles. Les sous-modèles utilisés pour décrire les différents éléments de la feuille (nervure centrale, coupe transversale, gaufrage, etc.) ont été choisis par souci de simplicité et d'économie de paramètres, tout en étant aussi réalistes que possible.

Malgré leur simplicité, la combinaison de tous ces sous-modèles conduit à un modèle global complexe. La surface paramétrique 3D qui en résulte ne peut être représentée directement, ni utilisée pour réaliser des calculs du transfert radiatif. C'est pour cette raison qu'on l'approche par un ensemble d'éléments plus simples : des triangles. Cette approximation conduit à une perte de précision, plus ou moins grande selon la finesse de la triangulation. En particulier, le gaufrage des feuilles, pris en compte par le modèle, exige une triangulation assez fine pour être

représenté correctement.

Les fonctions de distribution proposées précédemment pour toutes les variables qui interviennent dans le modèle permettent de générer une infinité de plantes différentes et réalistes. La population de ces plantes peut être décrite par un nombre limité de variables d'entrée, que sont la densité, le stade phénologique, la vigueur et la hauteur des plantes. Mais il est impossible de construire et de gérer une maquette infinie! Même la maquette d'un champ relativement petit peut facilement supposer une quantité de mémoire importante qui rendrait sa manipulation très lourde. De plus, il n'est peut-être pas nécessaire de considérer une quantité infinie de plantes différentes pour obtenir une représentativité suffisante de l'ensemble de la culture, du point de vue du transfert radiatif. On propose donc de travailler avec la maquette d'une petite parcelle, que l'on répéterait *infiniment*.

objectif

L'objectif du présent chapitre est d'évaluer l'influence de la qualité de la représentation de la maquette sur les calculs du transfert radiatif. On cherche à déterminer :

- la quantité de plantes nécessaire pour avoir une maquette représentative de l'ensemble de la culture et
- la manière la plus simple de les représenter, sans renoncer pour autant à une bonne précision des simulations des variables du transfert radiatif.

Les critères choisis pour évaluer la qualité de la représentation sont le niveau de triangulation (taille maximale des triangles) et le fait de considérer ou non le gaufrage des feuilles. L'étude de sensibilité a été réalisée sur deux variables du transfert radiatif qui déterminent directement la pénétration de la lumière dans le couvert végétal : la fraction de trous (P_0) et la fonction de distribution des inclinaisons foliaires (*LIDF*). Ces variables présentent l'avantage de pouvoir être facilement et rapidement calculées sur les maquettes, contrairement au transfert radiatif qui, par lancer de rayons, demande des temps de calcul importants, notamment pour des maquettes très détaillées.

Néanmoins, les résultats précédents relatifs au P_0 et à la *LIDF* ont été vérifiés dans quelques cas. L'influence de la description des

propriétés directionnelles des feuilles sur la réflectance a également été évaluée, en particulier vis à vis de la specularité.

La procédure de triangulation utilisée est présentée d'abord, en justifiant sa cohérence par rapport aux objectifs de ce travail. Les méthodes développées pour l'obtention des variables du transfert radiatif sont expliquées ensuite. On justifie le choix du niveau de triangulation et du nombre de plantes à générer pour obtenir une simulation suffisamment précise et réaliste pour être considérée comme une référence. Les études de sensibilité à la qualité de la représentation de la maquette sont présentées finalement, en se rapportant à la référence précédemment définie. *plan*

4.2 Représentation de la maquette 3D : Triangulation

On se propose d'utiliser les maquettes 3D de champs cultivés, obtenues selon le modèle géométrique précédent, afin de réaliser des simulations du transfert radiatif avec des méthodes comme la projection ou le lancer de rayons. Ces méthodes considèrent la scène étudiée comme un ensemble de facettes (primitives géométriques élémentaires) et travaillent facette à facette. D'un point de vue informatique, le problème essentiel est de calculer l'intersection entre une droite (représentant un rayon lumineux ou une direction de projection) et une primitive géométrique (qui représente un élément de la scène). Si cette primitive est une surface paramétrique rationnelle, le problème peut être assez complexe ; il sera en revanche relativement facile, si la primitive géométrique considérée est un triangle. *problème*

Il est donc judicieux d'approcher par un ensemble de triangles la structure 3D décrite par les équations paramétriques. Cette triangulation induit une perte de précision par rapport à la surface paramétrique initiale et ne peut pas être réalisée au hasard. Différents critères de convergence entre la surface paramétrique et la surface triangulée peuvent être considérés (convergence des normales, en distance, de l'aire, . . .), mais qui ne seront pas forcément respectés par la même méthode de triangulation. En effet, on rencontre facilement le phénomène *triangulation*

connu en infographie comme *le problème de Schwartz* (Aries, 1997) : en fonction de la triangulation choisie, l'aire de la surface approchée tend vers n'importe quelle valeur entre l'aire vraie et l'infini. Ainsi, la convergence en distance n'implique pas la convergence de l'aire, ni celle des normales à la surface (Aries, 1997).

*transfert
radiatif*

Pour les calculs de transfert radiatif, en particulier pour le lancer de rayons, qui considère la direction du rayonnement réfléchi, il est important que la procédure de triangulation utilisée préserve au maximum la distribution des normales aux surfaces des triangles, par rapport à celle des normales à la surface paramétrique. Pour les méthodes de projection, comme pour le lancer de rayons, il est indispensable que la projection des surfaces selon toutes les directions soit préservée.

On présente maintenant la procédure de triangulation utilisée proposée par Aries (1997) et on étudie sa convergence.

4.2.1 Procédure de triangulation

La surface 3D (x, y, z) est d'abord décrite par des surfaces paramétriques définies dans un espace 2D paramétrique (l^*, w^*) . Compte tenu des différences de géométrie de la tige et des feuilles, deux procédures de triangulation sont utilisées.

la tige

Dans le cas de la tige, les axes orthonormés correspondent respectivement à la hauteur et au périmètre localement normalisé. La triangulation est réalisée d'une manière très simple et fixe : afin d'éviter l'apparition de triangles trop allongés, la tige est divisée transversalement en 50 troncs de cône empilés et chacun d'entre eux est approché par 10 triangles rectangles : 5 triangles appuyés sur la base et les 5 autres sur le sommet supérieur (voir schéma à la figure 4.1).

les feuilles

Les feuilles sont triangulées d'une manière plus complexe et adaptative. Les axes orthonormés correspondent respectivement à la longueur et à la demi-largeur normalisées de la feuille, comme il a été montré lors de la présentation du modèle de gaufrage (§ 3.3.3). La triangulation est faite en deux étapes :

1. d'abord, une division grossière en 20 triangles, en respectant la position de la nervure centrale et du point de cassure ;
2. puis un affinement progressif de cette première triangulation.

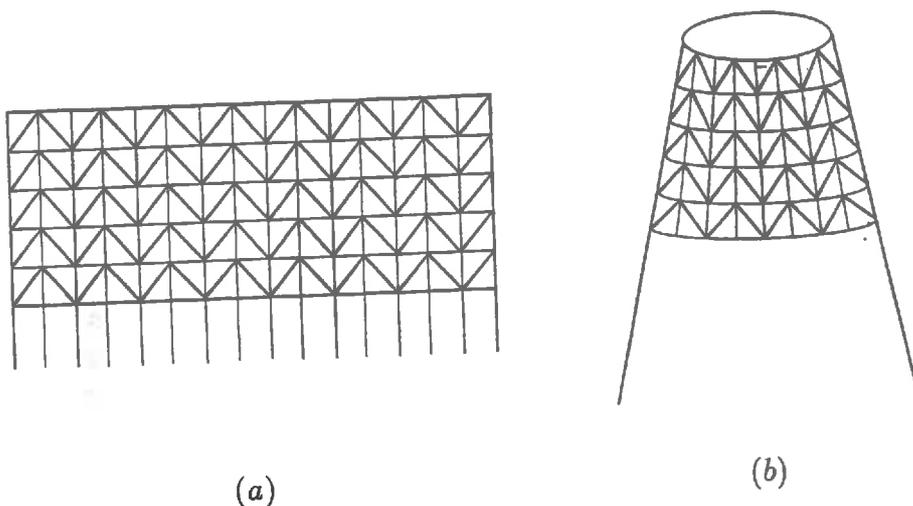
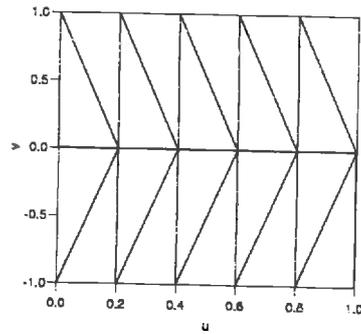


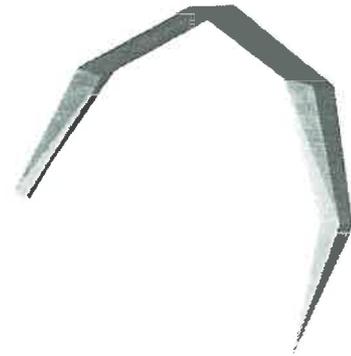
FIG. 4.1 – Schéma de la procédure de triangulation de la tige : (a) espace orthonormé 2D, (b) espace 3D

La taille maximale, dans l'espace 3D, du plus grand côté de chaque triangle sert de critère d'arrêt. Logiquement, plus les triangles sont petits, plus la précision est grande, mais plus il sont nombreux, avec l'augmentation du temps de calcul et de mémoire que cela implique.

La figure 4.2 montre la triangulation initiale d'une feuille, dans l'espace 2D et 3D ; le point de cassure correspond à $l^* = 0.4$; le gaufrage de la feuille ne peut pas être représenté avec une triangulation si grossière. La figure 4.3 montre la même feuille avec un niveau de triangulation pour lequel le plus grand côté de chaque triangle est inférieur à 2 cm. La représentation est dans ce cas plus réaliste et le gaufrage apparaît. Dans l'espace orthonormé 2D, on peut distinguer la position du point de cassure et les parties hautes et basses du gaufrage ; on constate l'asymétrie de la triangulation par rapport à la nervure centrale et le plus petit nombre de triangles vers l'extrémité de la feuille. En réduisant encore la taille des triangles (fig. 4.4), il est possible d'obtenir une surface très lisse et bien ondulée, d'un grand réalisme.

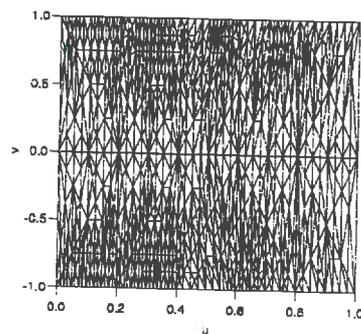


(a)



(b)

FIG. 4.2 - Triangulation élémentaire d'une feuille (20 triangles) : (a) espace orthonormé 2D, (b) espace 3D



(a)



(b)

FIG. 4.3 - Triangulation intermédiaire d'une feuille (taille maximale du plus grand côté d'un triangle=2 cm) : (a) espace orthonormé 2D, (b) espace 3D



FIG. 4.4 – Très bonne triangulation d'une feuille (taille maximale du plus grand côté d'un triangle=0.02 cm)

4.2.2 Étude de la convergence de la procédure de triangulation

Afin d'évaluer l'accord entre la surface triangulée et la surface paramétrique initiale, l'erreur introduite par la triangulation dans le calcul des normales aux triangles, par rapport aux normales à la surface paramétrique, est étudiée en considérant différents niveaux de triangulation. Les méthodes utilisées pour le calcul des normales, des erreurs angulaires et de leur distribution sont expliqués d'abord très schématiquement. Les erreurs angulaires associées à différents niveaux de triangulation sont comparées et leur importance est discutée. On s'intéresse également à l'aire estimée dans chaque cas¹.

Calcul de la normale

Normale à la surface paramétrique

À partir du modèle géométrique du maïs, chaque feuille est représentée dans l'espace 3D (x, y, z) . Le modèle 3D lui même est représenté

1. L'aire d'une feuille ne peut pas être calculée analytiquement à partir de la surface paramétrique

par des surfaces paramétriques 2D :

$$\begin{aligned}
 & f_x(l^*, w^*) \\
 & f_y(l^*, w^*) \\
 & f_z(l^*, w^*) \\
 & 0 \leq l^* \leq 1 \\
 & -1 \leq w^* \leq 1
 \end{aligned}$$

La normale à la surface paramétrique en un point donné $(x, y, z) = f(l^*, w^*)$ est calculé à partir des dérivées partielles.

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\delta y}{\delta l^*} \frac{\delta z}{\delta w^*} - \frac{\delta y}{\delta w^*} \frac{\delta z}{\delta l^*} \\
 B &= \frac{\delta z}{\delta l^*} \frac{\delta x}{\delta w^*} - \frac{\delta z}{\delta w^*} \frac{\delta x}{\delta l^*} \\
 C &= \frac{\delta x}{\delta l^*} \frac{\delta y}{\delta w^*} - \frac{\delta x}{\delta w^*} \frac{\delta y}{\delta l^*}
 \end{aligned}$$

$$N = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$

$$X_N = A/N$$

$$Y_N = B/N$$

$$Z_N = C/N$$

Normale au triangle

La normale à un triangle défini par trois points non alignés, P_1, P_2, P_3 , est le résultat du produit vectoriel entre deux des ses côtés, \vec{c}_1, \vec{c}_2 :

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3)$$

$$\vec{c}_1 = (x_1 - x_3, y_1 - y_3, z_1 - z_3)$$

$$\vec{c}_2 = (x_2 - x_3, y_2 - y_3, z_2 - z_3)$$

$$\vec{c}_1 \times \vec{c}_2 = \vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$$

$$n = |\vec{n}| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$$

$$X_n = n_x/n$$

$$Y_n = n_y/n$$

$$Z_n = n_z/n$$

Aire du triangle

L'aire d'un triangle est égale à la moitié de la longueur du vecteur résultant du produit vectoriel de deux côtés :

$$S_T = n/2$$

Erreur angulaire de la normale au triangle

L'erreur est calculée comme le majorant des trois angles formés par la normale au triangle et chacune des trois normales aux trois sommets de la surface paramétrique correspondante. On l'obtient à partir du produit scalaire des deux vecteurs.

Soit \vec{n}_T la normale au triangle et \vec{n}_i la normale à la surface paramétrique correspondante calculée au sommet i ($i = 1, 2, 3$), et soit (\vec{n}_i, \vec{n}_T) l'angle qu'ils forment.

$$\vec{n}_i \cdot \vec{n}_T = |\vec{n}_i| |\vec{n}_T| \cos(\widehat{\vec{n}_i, \vec{n}_T})$$

$$(\widehat{\vec{n}_i, \vec{n}_T}) = \arccos\left(\frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_T}{|\vec{n}_i| |\vec{n}_T|}\right)$$

$$\varepsilon_{angulaire} = \max_i(\widehat{\vec{n}_i, \vec{n}_T})$$

Erreur angulaire selon le niveau de triangulation

L'erreur angulaire est analysée par surface normée, c'est-à-dire les surfaces des triangles présentant la même erreur (par pas d'un degré) sont cumulées et divisées par la surface totale de la feuille.

2.5cm

On impose d'abord au côté le plus grand de chaque triangle d'être inférieur à 2.5cm ; ce niveau de triangulation permet à une grande feuille de 10 cm de largeur maximale d'être décomposée transversalement en 4 triangles, deux de chaque côté de la nervure centrale. Une feuille exemple, calculée avec ce niveau de triangulation, est représentée à la figure 4.5 ; elle est divisée en 436 triangles et sa surface estimée est de 318.005 cm². La forme de la feuille est bien décrite, mais les zones gaufrées apparaissent très peu arrondies ; on peut distinguer facilement les triangles. L'erreur angulaire moyenne est inférieure à 15 degrés, mais elle peut dépasser 60 degrés pour quelques triangles.

En représentant seulement les triangles dont l'erreur dépasse les 20 degrés, on obtient l'image de la figure 4.6, ce qui permet de constater

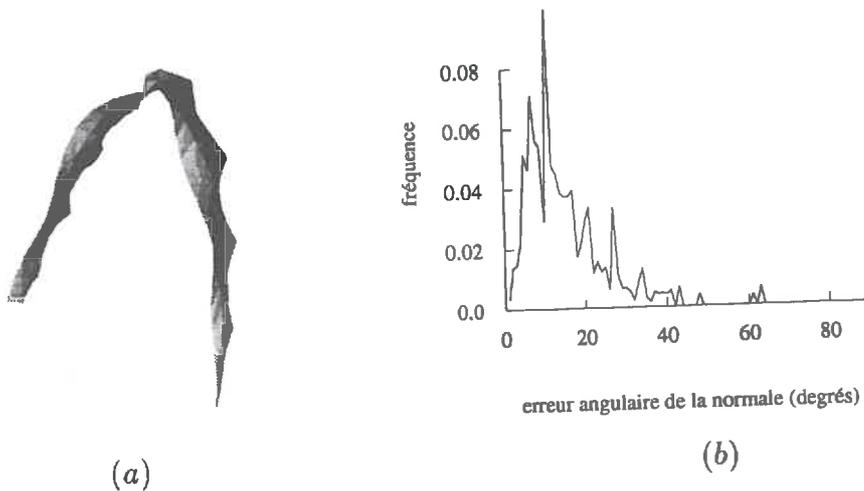


FIG. 4.5 - (a) feuille, (b) histogramme de l'erreur angulaire de la normale en degrés (taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 2.5 cm, 436 triangles, 318 cm²)

que les principales erreurs se produisent dans les zones les plus courbées de la feuille. Pour cette raison, pour un même niveau de triangulation, une feuille non gaufrée présentera des erreurs plus petites que la même feuille gaufrée, les parties les plus ondulées de la feuille étant les plus difficiles à approcher par des triangles.

En divisant par 10 la taille maximale des côtés des triangles, le nombre de triangles est multiplié par près de 100. Ainsi, pour un côté maximal de 0.25cm, pour la même feuille de la figure 4.6, le nombre de triangles passe à 34 194 et devient prohibitif. L'aire estimée augmente légèrement (319.509 cm²). L'erreur angulaire diminue considérablement et est en moyenne inférieure à 5 degrés, mais elle peut encore dépasser les 10 degrés dans les zones les plus gaufrées. La distribution des inclinaisons de triangles suit bien celle de la surface paramétrique. Une représentation de la feuille et la distribution des erreurs angulaires apparaissent à la figure 4.7.

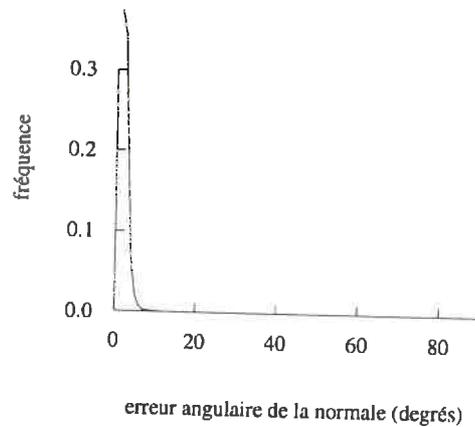
La figure 4.8 montre une triangulation encore plus fine (le côté le plus grand d'un triangle ne peut pas dépasser 1 mm). Les erreurs sont



FIG. 4.6 – Triangles dont l'erreur angulaire de la normale est supérieure à 20° (taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 2.5 cm)



(a)



(b)

FIG. 4.7 – (a) feuille, (b) histogramme de l'erreur angulaire de la normale en degrés (taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 0.25 cm, 34 194 triangles, 319.5 cm²)

très petites et on a une bonne approximation de la vraie surface paramétrique (319.5 cm^2); mais le nombre de triangles est énorme (plus de 200 000 pour une seule feuille).

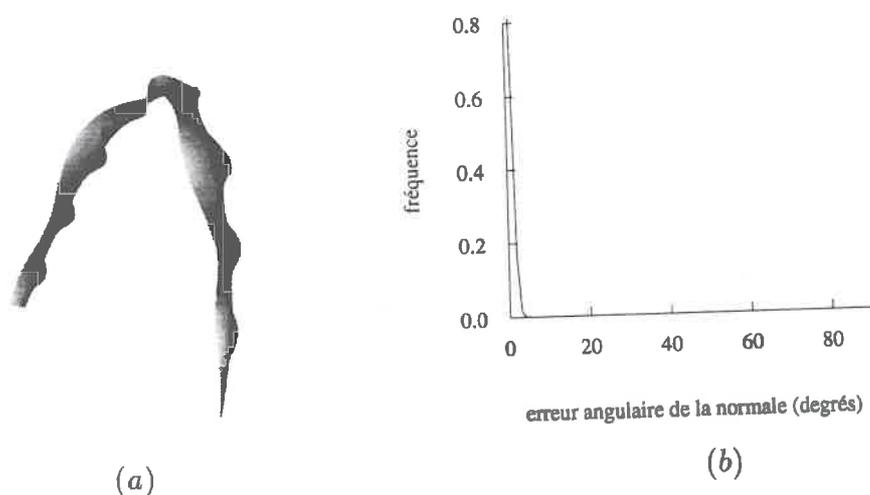


FIG. 4.8 - (a) feuille, (b) histogramme de l'erreur angulaire de la normale en degrés (taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 0.1 cm , plus de 200 000 triangles, 319.522 cm^2)

Cette étude montre que la procédure de triangulation utilisée est bien adaptée aux études du transfert radiatif, car elle assure la convergence des normales, des distances et de l'aire dans le cas où la taille des triangles est suffisamment petite. *conclusion*

4.3 Méthodes de calcul des variables du transfert radiatif

La représentation de la maquette comme un ensemble de triangles permet de réaliser des simulations du transfert radiatif. Il sera intéressant de déterminer jusqu'à quel point on peut simplifier la représentation de la maquette, de manière à accélérer et faciliter les calculs, tout en assurant une bonne précision des simulations.

On a vu l'importance, du point de vue du transfert radiatif, de préserver les normales et les projections quand on passe de la surface paramétrique aux triangles. La procédure de triangulation utilisée est bien adaptée pour cela. Deux variables du transfert radiatif sont très reliées à ces deux aspects :

1. la fonction de distribution des inclinaisons foliaires, c'est-à-dire de ces normales (*LIDF*), et
2. la fraction de trous (P_0), qui traduit la projection des surfaces dans la direction considérée.

Afin d'étudier la sensibilité de ces variables à la qualité de la représentation, des méthodes spécifiques, adaptées à sa décomposition en triangles, ont été développées pour les estimer à partir de la maquette.

Ces méthodes sont présentées par la suite, ainsi que le modèle de lancer de rayons (*Parcinopy*), utilisé pour simuler la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (*BRDF*) de la maquette obtenue pour différentes précisions de la représentation.

4.3.1 Calcul de la *LIDF*

La distribution des normales aux surfaces de la maquette peut être connue de manière exacte par des calculs purement géométriques. On peut considérer les surfaces paramétriques issues du modèle, ou bien les triangles qui les approchent.

La distribution en azimut est supposée être aléatoire, ce qui se justifie par la rotation aléatoire donnée à chaque plante par rapport à la verticale (§ 3.5). On étudie seulement la distribution des angles zénithaux, c'est-à-dire par rapport à la verticale.

Calcul de l'angle entre la normale à la feuille et la verticale

Il a été montré précédemment (§ 4.2.2) comment calculer le vecteur normal à un triangle, ainsi qu'à la surface paramétrique qu'il approche.

L'angle zénithal d'un vecteur (x, y, z) est défini comme celui qu'il forme avec la verticale. Il est compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$.

Il peut être calculé par une de ces trois expressions équivalentes (y étant la coordonnée verticale) :

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{z^2 + x^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{z^2 + x^2}}{y}$$

Distribution

On calcule l'angle zénithal de la normale à chaque triangle et on lui affecte la surface du triangle. On cumule les surfaces des triangles dont la normale a le même angle zénithal, par pas de 1 degré ; le résultat est normalisé par rapport à la surface totale.

On calcule, pour la surface paramétrique associée à chaque triangle, l'angle zénithal des normales aux trois sommets ainsi qu'au centre de la surface paramétrique,

ce dernier étant défini par :

$$l_c^* = \frac{l_1^* + l_2^* + l_3^*}{3}$$

$$w_c^* = \frac{w_1^* + w_2^* + w_3^*}{3}$$

Une partie de la surface du triangle est associée à chaque normale. Ces parties sont calculées de la manière suivante : on définit un triangle intérieur, en unissant les milieux des trois côtés ; on associe à ce triangle la normale au centre de la surface paramétrique et aux autres la normale au sommet correspondant. On considère l'ensemble des surfaces dont la

normale associée présente le même angle zénithal et on normalise par la surface totale. De cette façon on a une approximation de la distribution des normales à la surface paramétrique, qui peut être considérée comme une référence pour évaluer la précision de la *LIDF* calculée à partir de la triangulation.

4.3.2 Fraction de trous monodirectionnelle

définition

La fraction de trous (P_0) peut être définie comme la probabilité qu'un rayon lumineux traverse un couvert dans une direction donnée et arrive au sol sans intercepter des éléments végétaux. Autrement dit c'est la proportion de trous dans la végétation à travers lesquels on peut voir le sol. Quand on parle de fraction de trous monodirectionnelle, on fait référence au sol vu dans une direction ; on parle de fraction de trous bidirectionnelle pour faire référence au sol éclairé et vu simultanément. Le cas monodirectionnel correspond donc à la situation pour laquelle il n'y a pas d'ombre vue et tout le sol vu est éclairé, ce qui suppose la colinéarité entre les directions d'illumination et d'observation (phénomène de *hot-spot*).

intérêt

Dans le cas d'un couvert hypothétique, avec les feuilles complètement noires, le P_0 équivaut à la transmittance du couvert. C'est une variable clé dans les modèles de transfert radiatif, qui détermine la quantité de rayonnement intercepté dans une direction donnée. De plus, le P_0 à la verticale, $P_0(0)$, permet d'estimer le taux de couverture comme $1 - P_0(0)$.

projection

On perçoit l'étroite relation existant entre le P_0 d'un champ pour une direction donnée et la projection de ses surfaces dans cette direction. En effet, comme on le verra dans le chapitre suivant, il est facile d'estimer la fraction de trous monodirectionnelle d'une maquette d'un champ par simple projection.

méthode des fantômes

Afin de s'affranchir de la variabilité liée au tirage aléatoire de la maquette, une méthode originale a été développée basée sur la cartographie des probabilités d'interception : la *méthode des fantômes*. Vis à vis de l'étude de la qualité de la représentation et de la triangulation, on s'intéresse dans un premier temps à la plante moyenne isolée et à ses projections. Dans le prochain chapitre cette méthode sera appliquée à l'estimation de la fraction de trous monodirectionnelle d'un champ

complet. Au niveau du champ, on se contentera pour le moment d'une étude théorique sur la propagation de l'erreur commise sur une plante individuelle, quand on considère la superposition de plusieurs plantes, telle que cela se produit dans un champ, du fait de sa profondeur.

Méthode des fantômes pour calculer P_0

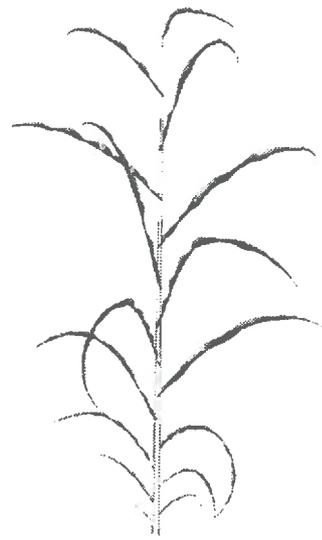
Soit un rayon lumineux, caractérisé dans un espace 3D par son angle zénithal. On s'intéresse à la probabilité qu'une plante de maïs décrite dans le même espace 3D comme un ensemble de triangles l'intercepte. De manière à exploiter au maximum l'information de projection contenue dans la silhouette de la plante, on considère différents angles azimutaux (k rotations du pied autour de son axe, par pas de $2\pi/k$ radians⁽²⁾), étant donnée que l'orientation de la plante dans le champ est supposée aléatoire.

L'image de la projection de chaque pied est obtenue, selon les k rotations. Chaque image indique la probabilité de passage d'un rayon qui arriverait selon la direction de projection : 0 pour les parties correspondantes à la silhouette projetée ; 1 en dehors de la projection de la plante.

Les k projections sont superposées, en calculant l'image moyenne, pixel par pixel. La probabilité de passer sans être intercepté par un élément de la végétation (probabilité de rencontrer un trou) sera de 1 au niveau de la tige (où pour toutes les cartes superposées la probabilité est 1) et de 0 pour les pixels qui n'ont pas de silhouette projetée pour aucune direction azimutale. Cette image moyenne correspond à la carte bidimensionnelle de probabilité de trous de la plante, pour une direction (zénithale) donnée. Elle constitue le *fantôme* de plante dans cette direction. La figure 4.9 montre une plante et ses fantômes, pour des observations horizontale, à 45° et verticale.

La moyenne des fantômes de plusieurs plantes, calculés pour la même direction, donnera la carte de probabilité de trous pour cette direction, indépendante du pied et de son orientation, si le nombre de plantes considéré est suffisamment grand. La figure 4.10 montre les cartes de probabilité de trous correspondant aux 3 angles précédents

2. pour nous, $k = 360$



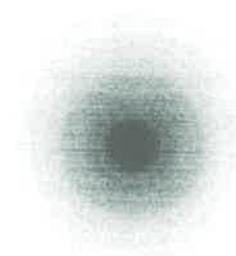
(a)



(b)



(c)



(d)

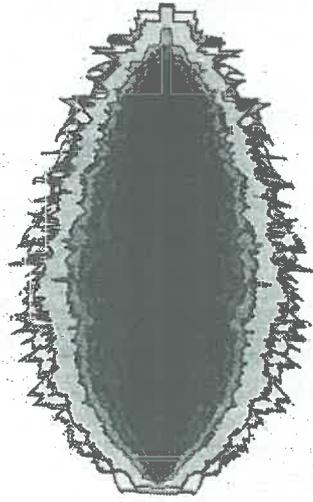
FIG. 4.9 - Exemple des fantômes d'une plante : (a) la plante, (b) fantôme horizontal, (c) fantôme à 45°, (d) fantôme vertical

(horizontale, 45° et verticale), calculées comme le cumul des fantômes de 120 plantes.

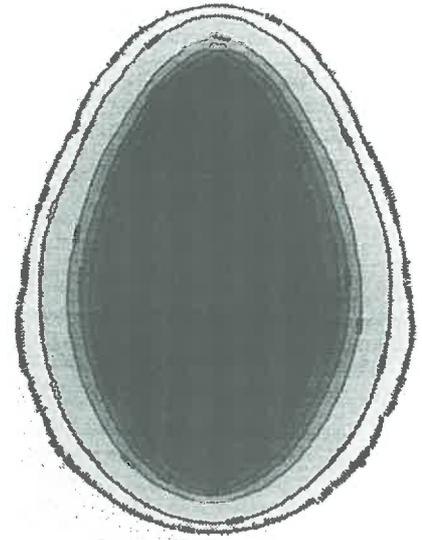
4.3.3 Réflectance bidirectionnelle par lancer de rayons

Le principe du lancer de rayons est le suivant : pour une scène donnée, composée de surfaces dont les propriétés optiques sont connues, et pour une certaine direction d'illumination, on suit le parcours des rayons lumineux qui pénètrent dans la scène (les réflexions et transmissions successives) jusqu'à extinction ou jusqu'à ce qu'ils arrivent à s'échapper, en contribuant ainsi à la réflectance totale. Le poids de chaque rayon évolue avec chaque interception, en fonction de la géométrie d'incidence et des propriétés optiques des éléments interceptés. Pour obtenir des résultats précis, il est nécessaire de lancer un grand nombre de rayons. Dans les simulations réalisées nous avons lancé 3 millions de rayons pour chaque bande spectrale, ce qui a permis d'obtenir des courbes relativement lisses. *principe*

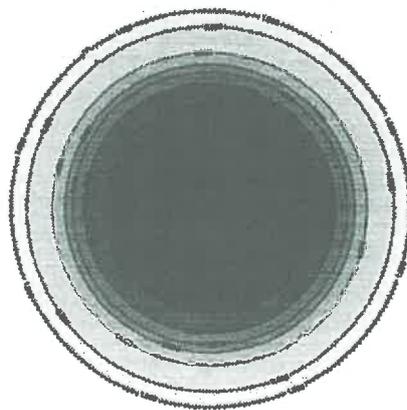
Le modèle de lancer de rayons stochastique utilisé dans ce travail pour les simulations de la réflectance bidirectionnelle, *Parcinopy*, a été développé par M. Chelle à l'INRA-Bioclimatologie de Grignon (Chelle, 1997). Ce modèle est monospectral, c'est-à-dire que la réflectance est estimée pour une seule bande spectrale à la fois. Il permet de simuler un couvert périodique infini. Pour l'estimation de la réflectance bidirectionnelle, l'hémisphère surplombant la scène est décomposé en angles solides fins (5degrs). Pour mieux estimer la réflectance dans le *hot-spot*, des angles solides plus petits (2degrs) sont considérés autour de la direction de rétro-diffusion. Pour chaque angle solide, le poids des rayons émergents est cumulé, ce qui permet d'estimer le facteur de réflectance, à partir d'un coefficient géométrique. Nous nous sommes intéressés uniquement au plan principal, qui contient la plus grande variation de réflectance directionnelle. *Parcinopy*



(a)



(b)



(c)

FIG. 4.10 – Cartes de probabilité de trous de la plante moyenne (120 plantes) : (a) horizontal, (b) à 45°, (c) vertical

4.4 Sensibilité à la qualité de la représentation de la maquette

Les études de sensibilité du transfert radiatif à la qualité de la représentation de la maquette sont présentées par la suite. La qualité de la représentation est supposée dépendre principalement du niveau de triangulation des feuilles, en fonction duquel il est possible ou non de représenter le gaufrage. On procède de la manière suivante :

1. On choisit un niveau de triangulation de référence ; ce choix est justifié par rapport à plusieurs critères, que nous allons décrire.
2. On détermine un nombre de plantes pour constituer une parcelle représentative de l'ensemble de la culture, par rapport :
 - (a) à la fraction de trous,
 - (b) à la distribution des angles foliaires,qu'on estime avec les méthodes que l'on vient de présenter.
3. On construit ainsi la maquette de référence.
4. On analyse les effets dus à la dégradation de la représentation de la maquette de référence, en deux étapes :
 - (a) étude de l'effet du gaufrage
 - (b) étude de l'effet de la dégradation de la triangulation,et cela par rapport :
 - (a) à la probabilité d'interception,
 - (b) à la distribution des angles foliaires,
 - (c) à la *BRDF*, simulée par lancer de rayons, en considérant :
 - i. des feuilles lambertiennes
 - ii. des feuilles avec une composante spéculaire.
5. On est ainsi en mesure de choisir la manière dont on représentera la maquette pour poursuivre ce travail.

4.4.1 Niveau de triangulation de référence

Il a été montré précédemment, lors de l'étude de l'erreur angulaire associée à chaque niveau de triangulation (§ 4.2.2), qu'en imposant comme critère d'arrêt du processus de triangulation 2.5 cm de taille maximale des côtés des triangles, le gaufrage est bien représenté et l'erreur angulaire moyenne est relativement petite ; la surface paramétrique est approchée à 0.3% près.

Avec une triangulation plus fine (0.25 cm de taille maximale du plus grand côté), les erreurs sont plus petites et on a une meilleure approximation de la vraie surface paramétrique ; mais le nombre de triangles devient rapidement très grand.

La figure 4.11 compare la *LIDF* de la feuille étudiée, pour ces deux niveaux de triangulation (2.5 cm, 0.25 cm). Dans les deux cas la forme de la courbe est la même, mais elle est plus lisse pour la triangulation plus fine, du fait du plus grand nombre de triangles considérés. On peut espérer que la *LIDF* d'un ensemble de plantes, même avec la moins bonne triangulation, subira le même effet de lissage, principalement lié au nombre de triangles considérés.

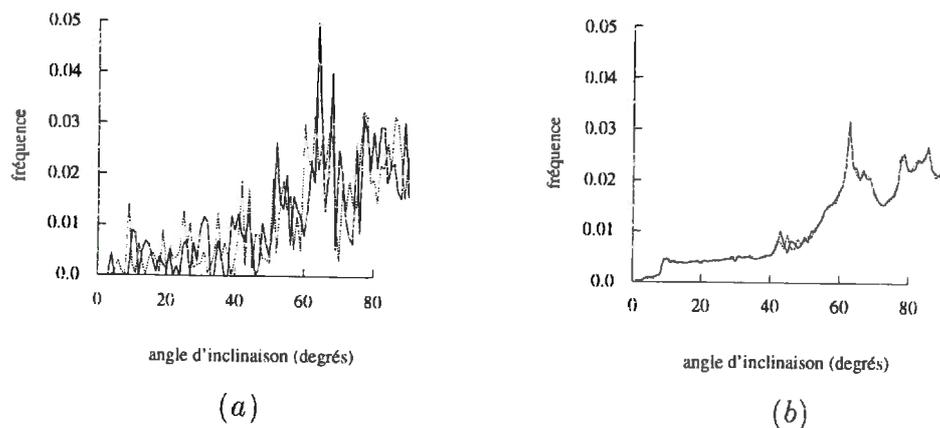


FIG. 4.11 - *LIDF* de la feuille étudiée ((—) triangles, (.....) surface paramétrique) : (a) Taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 2.5 cm (b) Taille maximale du plus grand côté d'un triangle = 0.25 cm

conclusion

Par rapport aux objectifs de simulation du transfert radiatif, la pré-

cision obtenue avec le niveau de triangulation de 2.5 cm est considérée suffisante. Il sera par la suite notre niveau de référence.

4.4.2 Nombre de plantes nécessaires pour bien décrire le champ de réflectance

L'objectif maintenant est d'évaluer le nombre minimum de plantes suffisant pour constituer une petite parcelle de maïs qui, répétée à l'infini, permettra de représenter un champ complet sur lequel simuler la réflectance bidirectionnelle avec une bonne précision. On s'intéresse au P_0 et à la *LIDF*.

Par rapport au P_0

On a considéré (§ 4.3.2) qu'avec 120 pieds, représentés avec gaufrage et la triangulation de référence, on arrive à la convergence dans l'obtention des cartes de probabilité de trous selon la méthode des fantômes. Les 120 pieds ont été séparés en 5 groupes de 24 pieds et les cartes de P_0 correspondantes ont ainsi été obtenues, pour les 3 angles ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) considérés précédemment. Pour toutes les cartes, l'histogramme des probabilités a été tracé, en considérant tous les pixels.

La figure 4.12 montre, pour les 3 angles, la différence entre l'histogramme des 120 pieds et les histogrammes des 5 groupes de 24 pieds. Aucune tendance claire de sous-estimation ni de sur-estimation ne se dégage. La plupart des valeurs sont inchangées (pic à 0°) ou très peu perturbées, sans biais apparent.

Du point de vue du P_0 , et donc de la projection des surfaces de la maquette, on peut donc conclure que 24 plantes suffisent pour avoir une parcelle représentative de l'ensemble de la culture. *conclusion*

Par rapport à la *LIDF*

La figure 4.13 (a) montre la *LIDF* correspondant à un ensemble de 120 plantes, calculée sur les surfaces paramétriques et sur les triangles, en considérant la triangulation de référence. On constate le bon accord entre les deux courbes, ce qui confirme le choix du niveau de référence. La plus grande différence entre triangles et surface paramétrique se

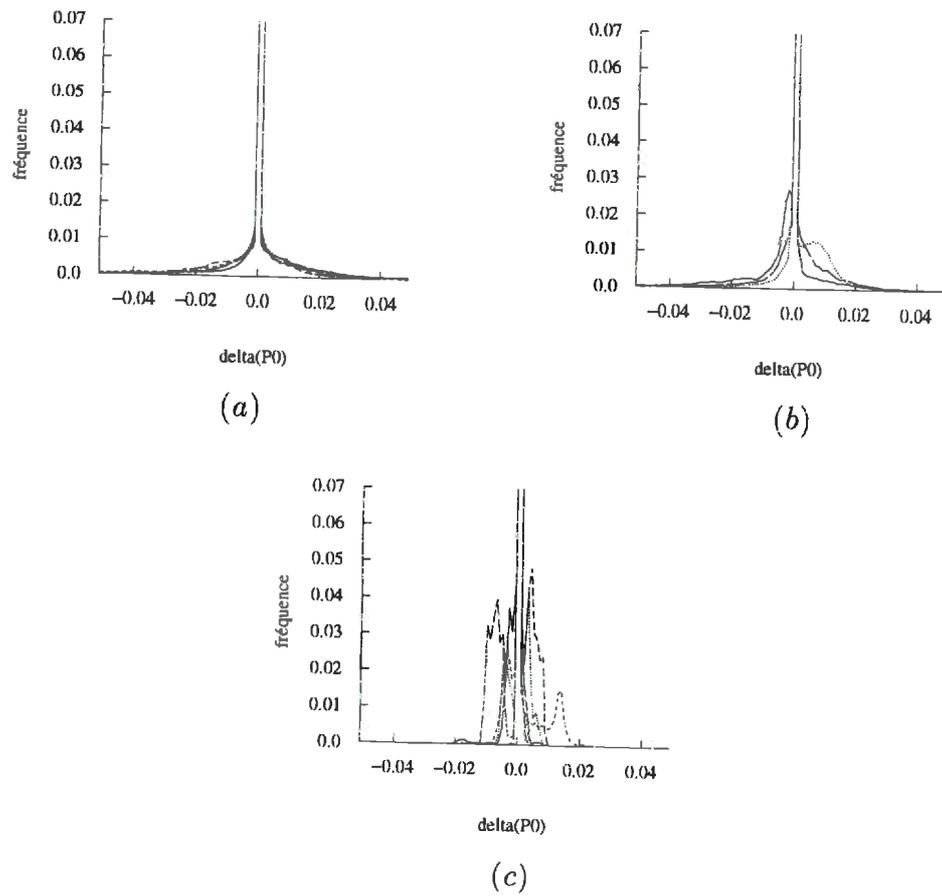


FIG. 4.12 – Histogramme des différences de P_0 entre 5 groupes de 24 plantes et l'ensemble des 120 plantes : (a) horizontal, (b) à 45° , (c) vertical

produit pour les grands angles, qui correspondent principalement aux tiges. Le caractère très lisse de la courbe confirme que la représentativité de la distribution des angles foliaires est largement suffisante avec 120 plantes.

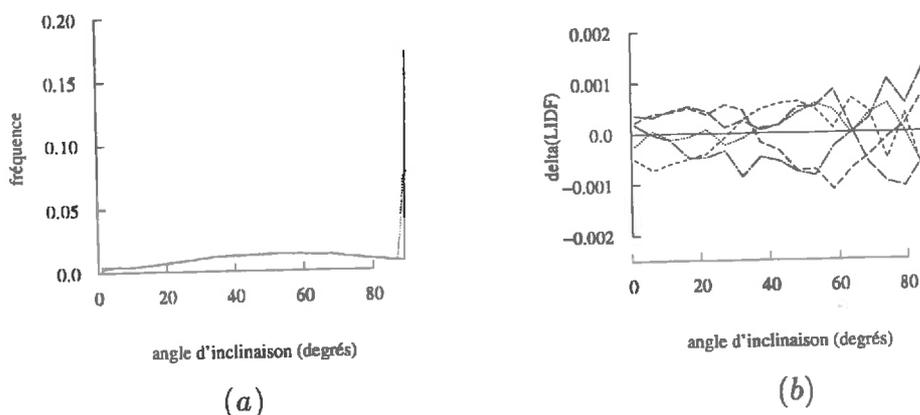


FIG. 4.13 - (a) *LIDF* d'un groupe de 120 plantes ((—) triangles, (.....) surface paramétrique); (b) *Histogramme des différences de LIDF* entre 5 groupes de 24 plantes et l'ensemble des 120 plantes

Similairement au P_0 , les *LIDF* correspondantes à 5 groupes de 24 plantes ont été calculées, à partir des triangles, toujours avec la triangulation de référence. Les différences entre ces courbes et celle obtenue avec 120 pieds apparaissent à la figure 4.13 (b). Les angles sont considérés par pas de 5° . Pour toutes les inclinaisons foliaires, l'écart par rapport à la distribution des 120 pieds est inférieur à 0.0015° et est en moyenne de l'ordre de 0.0005° .

La *LIDF* est correctement représentée avec 24 plantes gaufrées et *conclusion* avec la triangulation de référence. En ce qui concerne la *LIDF* il semble donc également justifié de travailler avec une parcelle de 24 plantes.

4.4.3 Effet de la triangulation et du gaufrage: P_0 et $LIDF$

L'étude précédente montre qu'une maquette de 24 plantes avec gaufrage et la triangulation de référence représente correctement un champ de maïs et peut être utilisée pour des simulations du transfert radiatif. L'idée est de simplifier encore cette représentation, sans que cela entraîne pour autant une perte de précision importante des simulations. On analyse à présent la sensibilité du P_0 et de la $LIDF$ à la qualité de la représentation, par rapport au niveau de triangulation et au gaufrage.

Sensibilité du P_0

Au niveau de la plante

Les cartes de probabilité d'interception de 24 plantes, représentées avec gaufrage et la triangulation de référence, ont été obtenues par la méthode des fantômes, en considérant 3 visées (horizontale, 45° , verticale). Afin d'évaluer la sensibilité du P_0 à la qualité de la représentation, ces cartes de référence sont comparées aux cartes correspondant aux mêmes plantes, mais représentées :

- sans gaufrage et la triangulation de référence (2.5 cm)
- sans gaufrage et une triangulation moins bonne (5 cm)
- avec la triangulation de base (20 triangles par feuille), qui ne permet pas de représenter le gaufrage.

Les histogrammes des différences de P_0 entre ces cartes et les cartes de référence apparaissent à la figure 4.14. Les différences sont très petites (de l'ordre de 2%) et elles ne concernent qu'un nombre réduit de cas.

verticale

Pour étudier l'effet du gaufrage en visée verticale on compare (fig. 4.15) le transect le long d'un rayon de la carte du P_0 correspondant à la bonne triangulation, avec et sans gaufrage. La figure 4.15 (a) représente la valeur du P_0 par rapport à la distance au centre de la tige, dans les deux cas ; les courbes se superposent presque parfaitement. On constate la forte probabilité d'interception des rayons qui arriveraient près de la

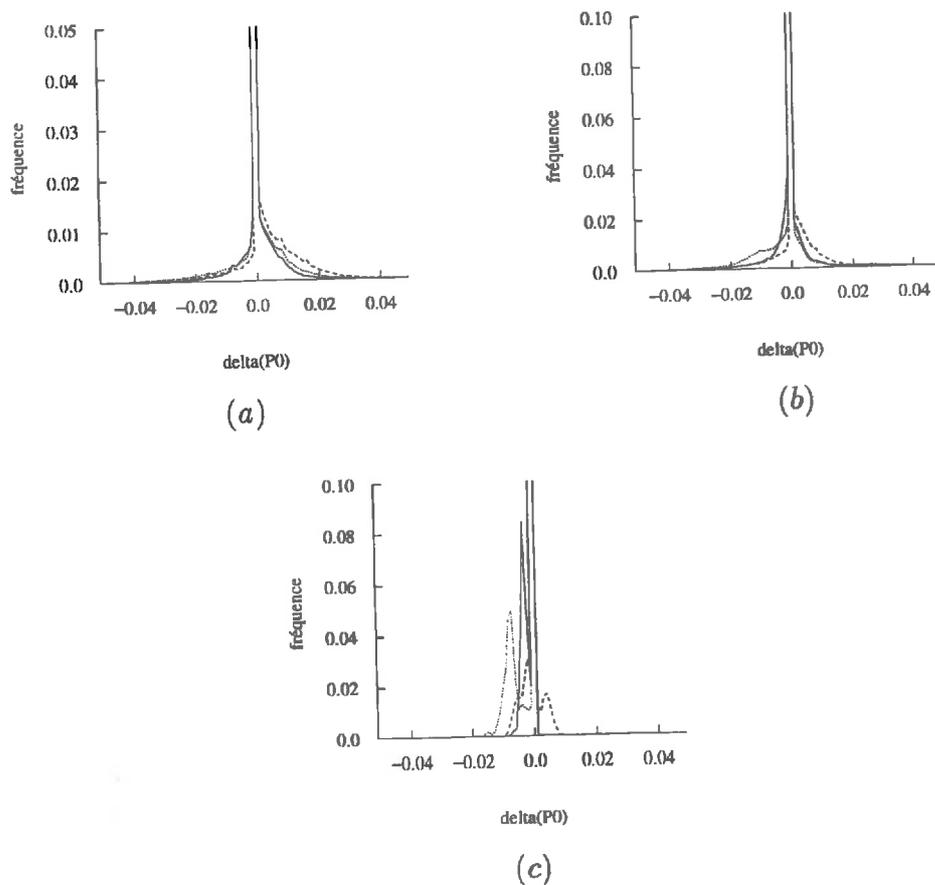


FIG. 4.14 - Histogramme des différences de P_0 de 24 plantes représentées avec gaufrage et la triangulation de référence, et les mêmes plantes représentées sans gaufrage (—), sans gaufrage et moins une bonne triangulation (.....), avec la triangulation initiale (- - -) : (a) horizontal, (b) à 45° , (c) vertical

tige et la diminution de cette probabilité pour ceux qui arriveraient au niveau des extrémités des feuilles. La figure 4.15 (b) montre la différence entre les courbes : elle est nulle au niveau de la tige, positive à l'insertion des feuilles (sous-estimation quand on enlève le gaufrage) et négative (sur-estimation) pour le reste de la feuille ; dans tous les cas l'erreur est très petite, inférieure en moyenne à 1%.

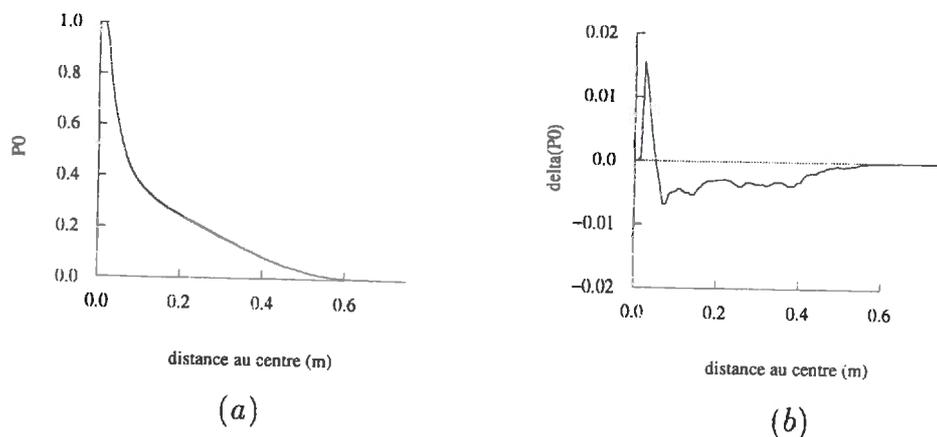


FIG. 4.15 - Sur 24 plantes représentées avec la triangulation de référence, on compare le transect le long d'un rayon du P_0 en visée verticale, en considérant les feuilles avec (—) et sans (.....) gaufrage : (a) les deux transects, (b) la différence entre les courbes

horizontale

Cet effet peut être compris plus facilement à partir de l'observation de la figure 4.16, qui montre pour une plante donnée, la différence entre les fantômes en visée horizontale correspondant à la triangulation de référence, avec et sans gaufrage. Le gris correspond aux endroits où les deux cartes ont la même valeur. En blanc sont les endroits où le P_0 correspondant aux feuilles gaufrées est inférieur au P_0 des feuilles sans gaufrage. Cela se produit quand les feuilles sont regardées de profil et s'explique par l'effet d'épaisseur donné par le gaufrage. En noir apparaissent les endroits où l'absence de gaufrage entraîne une diminution du P_0 , ce qui arrive au niveau du point de cassure.

conclusion

En ce qui concerne la probabilité d'interception du rayonnement incident, le gaufrage des feuilles ne joue pas un rôle fondamental. Même

l'utilisation d'une triangulation très simplifiée n'introduit pas des erreurs importantes dans la projection des surfaces de la plante. Il est donc justifié, du point de vue du P_0 , de travailler avec la représentation la plus simple : la triangulation de base.

Au niveau du couvert

À cause d'une mauvaise représentation des plantes, on peut commettre une erreur ΔP_{0p} sur la carte de probabilité d'interception de la plante moyenne :

$$\Delta P_{0p} = P_{0p}^{vrai} - P_{0p}^{carte}$$

Une étude théorique a été réalisée afin de connaître comment l'erreur calculée sur une plante se propage au niveau d'un champ. Pour se placer dans le cas le plus simple, on suppose une visée horizontale et les rangs suffisamment séparés pour qu'il n'y ait pas d'interaction. On vise un seul rang. La carte de probabilité d'interception du rang s'obtient alors comme la superposition, n fois, de la carte horizontale de la plante moyenne, n étant la profondeur du champ. L'erreur commise devient alors :

$$\Delta P_{0n} = P_{0n}^{vrai} - P_{0n}^{carte} = (P_{0p}^{vrai})^n - (P_{0p}^{carte})^n = (P_{0p}^{vrai})^n - (P_{0p}^{vrai} - \Delta P_{0p})^n$$

La figure 4.17 montre le résultat de l'application de cette expression, exprimé en \log_{10} , pour 4 profondeurs ($n = 2, 5, 10, 20$), quand on suppose qu'on commet sur une plante des erreurs de 0.01, 0.02 et 0.04. Dans tous les cas, logiquement, plus l'erreur commise sur une plante est grande, plus l'erreur commise au niveau du champ sera grande. On constate aussi que plus la valeur du P_{0p} est grande, plus l'erreur propagée est importante.

Étant donné que le nombre de plantes, n , intervient en exposant dans l'expression mathématique présentée ci dessus, son augmentation accentue la différence entre l'erreur commise pour les grandes et les petites valeurs de P_{0p} . Ainsi, pour une profondeur de 2 plantes, l'erreur augmente linéairement avec P_{0p} et reste toujours inférieure à 1%. En augmentant n , l'erreur se concentre vers les grandes valeurs de P_0 , qui correspondent à la position des tiges. Pour un couvert épais, une erreur

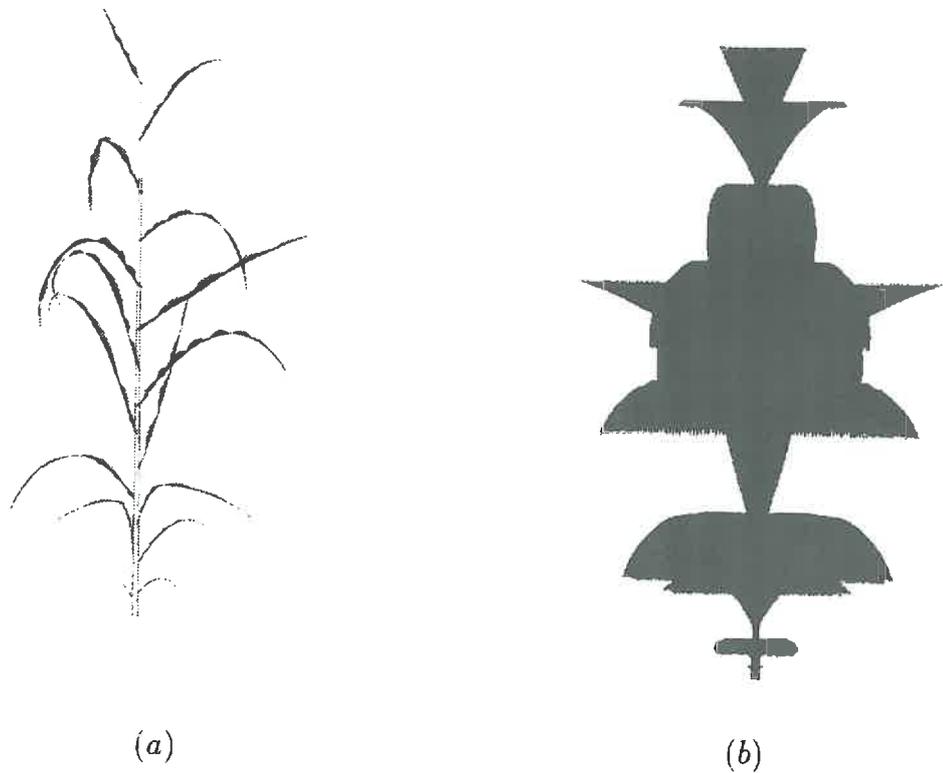


FIG. 4.16 – Image d'une plante particulière (a) et image des différences des fantômes horizontaux de la plante représentée avec et sans gaufrage, en considérant dans les deux cas la triangulation de référence (b). Le gris moyen correspond aux endroits où les deux cartes ont la même valeur; le blanc correspond aux endroits où le P_0 correspondant aux feuilles gaufrées est inférieur au P_0 des feuilles sans gaufrage; le noir correspond aux endroits où l'absence de gaufrage entraîne une diminution du P_0

sur la plante de 4% pour les P_0 proches de 1 peut approcher les 50% au niveau du couvert ; en revanche, elle sera très petite (inférieure à 0.5%) pour les P_0 inférieurs à 0.8.

En conclusion, des erreurs sur la carte de la plante moyenne n'entraîneront sur la carte du champ des erreurs cumulées significatives qu'au niveau des tiges, et cela si on considère une grande profondeur. Pour les visées verticales ou obliques, habituelles en télédétection, le nombre de plantes traversées par un rayon lumineux sera faible. Les erreurs resteront donc, dans la majorité des cas, très petites. conclusion

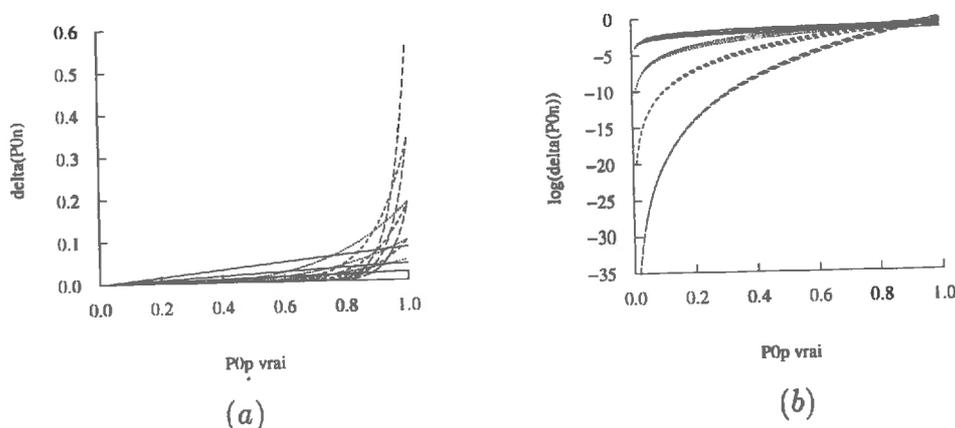


FIG. 4.17 - Transfert de l'erreur de la plante au couvert en fonction de la valeur du P_0 de la plante, de l'erreur commise sur la plante (0.01, 0.02 et 0.04) et de la profondeur considérée ($n=2$ plantes (—), 5 plantes (.....), 10 plantes (- - -), 20 plantes (- - -)) (a) valeur absolue, (b) logarithme)

Sensibilité de la LIDF

Pour évaluer l'effet de la triangulation et du gaufrage sur la LIDF, une étude similaire à celle présentée pour le P_0 a été réalisée : la LIDF de la parcelle de 24 pieds représentés avec gaufrage et une bonne triangulation a été comparée à la LIDF de la même parcelle :

- sans gaufrage et la triangulation de référence,

- sans gaufrage et une moins bonne triangulation et
- avec la triangulation initiale.

Le résultat apparaît à la figure 4.18. Les erreurs sont inférieures à 1%, sauf pour les angles proches de la verticale, qui peuvent conduire à une erreur de 2.5%, ce qui n'est pas très important.

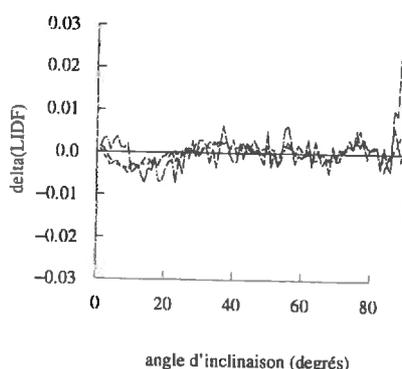


FIG. 4.18 – Comparaison de la *LIDF* de 24 plantes gaufrées avec la triangulation de référence et la *LIDF* des mêmes plantes sans gaufrage (---), sans gaufrage et moins bonne triangulation (- - -), triangulation de base (-...-...-...-)

On s'est intéressé également à la variation de la distribution des orientations des normales des triangles vus, en fonction de la direction d'observation. On a considéré un champ de 120 pieds, représentés avec la triangulation de référence. On l'observe verticalement, horizontalement dans les sens parallèle et perpendiculaire aux rangs, et à 45°, également dans le sens parallèle et perpendiculaire aux rangs. La figure 4.19 montre la superposition de la *LIDF* totale et les *LIDF* obtenues dans chaque cas.

La distribution des inclinaisons foliaires n'est donc pas trop dépendante de la direction d'observation. Cette conclusion est très importante du point de vue du transfert radiatif, car elle justifie l'utilisation d'une seule *LIDF* (la *LIDF* totale) lors de la simulation de la réflectance bidirectionnelle, indépendamment de la direction d'observation considérée.

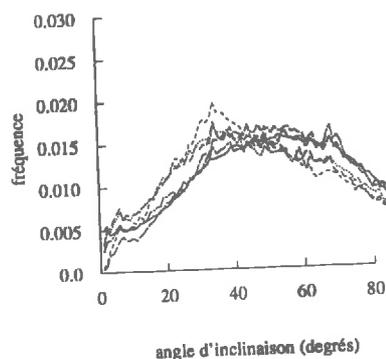


FIG. 4.19 - *LIDF* sur l'ensemble des triangles (—) de la maquette de 120 plantes représentées avec la triangulation de référence et pour les triangles vus en une direction donnée : verticale (.....), horizontale parallèle aux rangs (-.-.-), 45° parallèle aux rangs (- - -), horizontale perpendiculaire aux rangs (-...-...-...-), 45° perpendiculaire aux rangs (-.-.-)

4.4.4 Sensibilité de la *BRDF*

Après s'être intéressé à la sensibilité des deux variables les plus déterminantes du transfert radiatif (P_0 , *LIDF*) sur la qualité de la représentation, on a vérifié les conclusions obtenues sur la distribution directionnelle de la réflectance (*BRDF*). Les simulations ont été réalisées par lancer de rayons, avec le modèle *Parcinopy* présenté précédemment. On s'est également intéressé à l'effet de l'introduction d'une composante spéculaire pour décrire les propriétés optiques de feuilles.

Conditions de simulation

- GÉOMÉTRIE D'ILLUMINATION :

Le Soleil se situe à 45° de zénith et 0° d'azimut (perpendiculaire aux rangs) :

$$\theta_{\text{Soleil}} = 45^\circ, \quad \phi_{\text{Soleil}} = 0^\circ$$

- GÉOMÉTRIE D'OBSERVATION : *Plan Principal*

L'observateur parcourt le plan principal, par pas de 5°

$$\theta_{obs} \in [-85^\circ, 85^\circ], \quad \phi_{obs} = 0^\circ$$

- PROPRIÉTÉS OPTIQUES :

composante lambertienne:

- végétation :

La réflectance (ρ) et la transmittance (τ) de la végétation ont été obtenues par simulation du modèle *PROSPECT* (Jacquemoud et Baret, 1990), pour une plante de maïs typique, dans le visible (R) (670 nm) et le proche infra-rouge (IR) (850 nm). Elles sont les suivantes :

$$- \rho_R = 0.056, \quad \tau_R = 0.03$$

$$- \rho_{IR} = 0.44, \quad \tau_{IR} = 0.47$$

- sol: $\rho = 0.2$, dans le rouge et l'infra-rouge, pour simplifier.

composante spéculaire:

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle permettant de décrire de manière réaliste la distribution directionnelle de la réflectance et de la transmittance des feuilles. Nous avons donc choisi d'utiliser le modèle simple de Nilson (1989) qui n'a encore jamais été directement validé. La fonction de phase de la feuille est considérée comme la somme d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire. Nilson considère que la fonction de phase spéculaire au sommet du couvert, γ_{ls} , est :

$$\gamma_{ls} = \frac{1}{8} K(k, \alpha) F_r(n, \alpha) g_l(\theta_l)$$

où

$$K(k, \alpha) = \exp\left(-\frac{2k}{\pi} \tan(\alpha)\right)$$

est un facteur correcteur qui prend en compte le caractère poilu et rugueux de la surface des feuilles, et α correspond à l'angle d'incidence.

$$F_r(n, \theta_s) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_s - \theta_f)}{\sin^2(\theta_s + \theta_f)} + \frac{\tan^2(\theta_s - \theta_f)}{\tan^2(\theta_s + \theta_f)} \right)$$

spéculaire

est le terme de Fresnel, avec $\theta_f = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n}\right)$, $g_l(\theta_l)$ est la fonction de distribution des angles foliaires et n est l'indice de réfraction.

Pour les simulations réalisées avec une composante spéculaire, l'indice de réfraction est fixé à 1.4 et le coefficient d'atténuation K à 1.0, ce qui revient à assimiler les feuilles des miroirs plats.

Maquettes utilisées

Les simulations ont été réalisées sur une maquette de 24 pieds adultes, avec un LAI de 3.6 et une densité de semis de $7.15 \text{ pieds}/\text{m}^2$. Trois cas sont considérés :

- (a) une maquette de référence, avec des plantes gaufrées et la triangulation de référence (cette maquette est composée de 210 486 triangles) (fig. 4.20) ;
- (b) la même maquette avec des feuilles sans gaufrage (209 730 triangles) (fig. 4.25 a) et
- (c) la maquette *dégradée*, c'est-à-dire avec la triangulation initiale (20 triangles par feuille, en respectant la nervure centrale et le point de cassure : 20 200 triangles) (fig. 4.25 b).

Résultats

Feuilles lambertiennes

La figure 4.21 montre les résultats des simulations sur la maquette de référence. De rouge le facteur de réflectance prend des valeurs beaucoup plus faibles que dans le proche infra-rouge, ce qui s'explique par la présence de la chlorophylle avec des bandes de forte absorption dans le visible. La contribution à la réflectance totale des ordres supérieurs est très faible dans le visible, contrairement au proche infra-rouge où les réflectances simple et multiple ont un poids équivalent. La réflectance multiple est presque symétrique par rapport à la verticale, où elle présente un minimum.



FIG. 4.20 – *Maquette de référence utilisée pour les simulations*

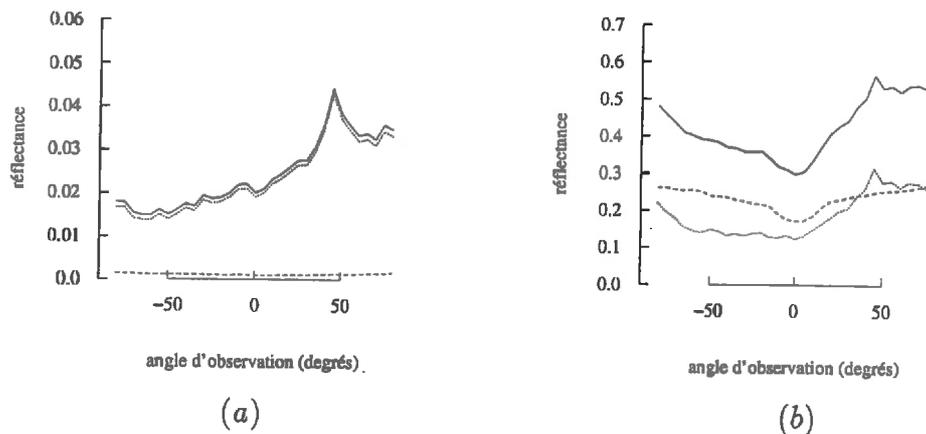


FIG. 4.21 - Réflectance de la maquette de référence dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

Si on sépare dans la réflectance simple la contribution du sol et celle de la végétation (fig. 4.22), on constate que l'influence du sol est plus importante dans le rouge que dans le proche infra-rouge. Ce résultat est principalement expliqué par le contraste entre les propriétés optiques du sol et celles de la végétation dans ces deux bandes spectrales. Dans les deux cas la réflectance simple (ainsi que la totale), présente un maximum dans la direction du Soleil (45°), dû au phénomène du *hot-spot*: les directions de visée et d'illumination sont colinéaires et il n'y a pas d'ombre vue (fig. 4.23 a). Elles sont illustrées par les images de la figure 4.23, obtenues par double projection.

En visée verticale ($\theta = 0^\circ$) la fraction de sol vu est maximale et celle de la végétation est minimale. Le comportement de la réflectance simple (sol + végétation) diffère suivant le domaine spectral considéré: dans le proche infra-rouge l'influence du sol est petite par rapport à celle de la végétation et on observe le minimum de réflectance. Dans le visible la végétation est très absorbante et la réflectance du sol est comparativement grande, ce qui donne un maximum relatif de réflectance (fig. 4.23 b).

Pour des observations autour de 45° la plupart des surfaces vues

sont éclairées et correspondent à la végétation (fig. 4.23 c) : la réflectance est élevée. Quand l'observateur a le Soleil en face (fig. 4.23 d), la réflectance est très faible car il voit peu de surfaces éclairées directement ; en revanche, il voit le rayonnement transmis à travers les feuilles supérieures.

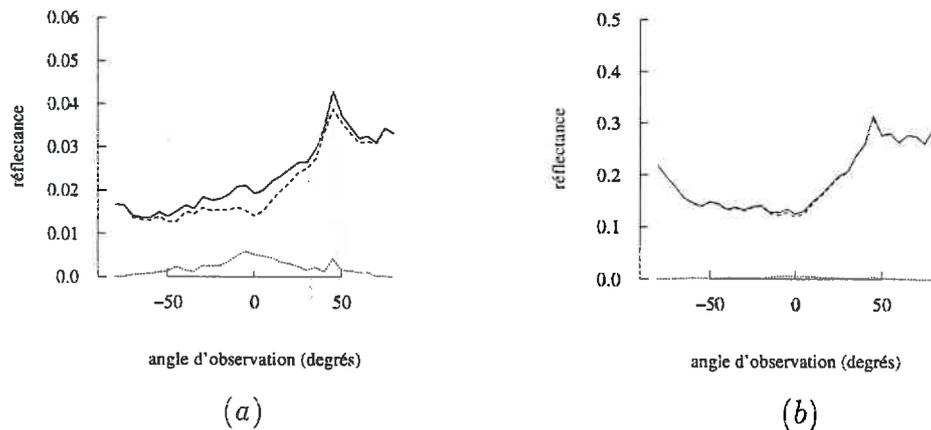


FIG. 4.22 - Réflectance simple de la maquette de référence dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons: contribution du sol et de la végétation ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance simple, : sol, - - - : végétation)

La réponse de la végétation a un comportement similaire dans les deux bandes spectrales, à un facteur d'échelle près (fig. 4.24) ; la proportionnalité des deux courbes n'est pas parfaite à cause de la différence dans la relation réflectance/transmittance dans les deux cas ($0.056/0.3=1.87$ dans le visible et $0.44/0.47=0.94$ dans le proche infra-rouge) (España *et al.*, 1996).

maquettes
sans gaufrage
et dégradée

Les figures 4.26 et 4.27 montrent, respectivement, le résultat des simulations sur les maquettes sans gaufrage et dégradée ; la figure 4.28 (a et b) montre la différence par rapport à la maquette de référence. On constate que la réflectance bidirectionnelle de la maquette n'est pas très sensible à la qualité de la représentation, avec des différences maximales de l'ordre de 0.02, légèrement supérieures à la précision du lancer de rayons, dans les conditions dans lesquelles on l'a effectué.

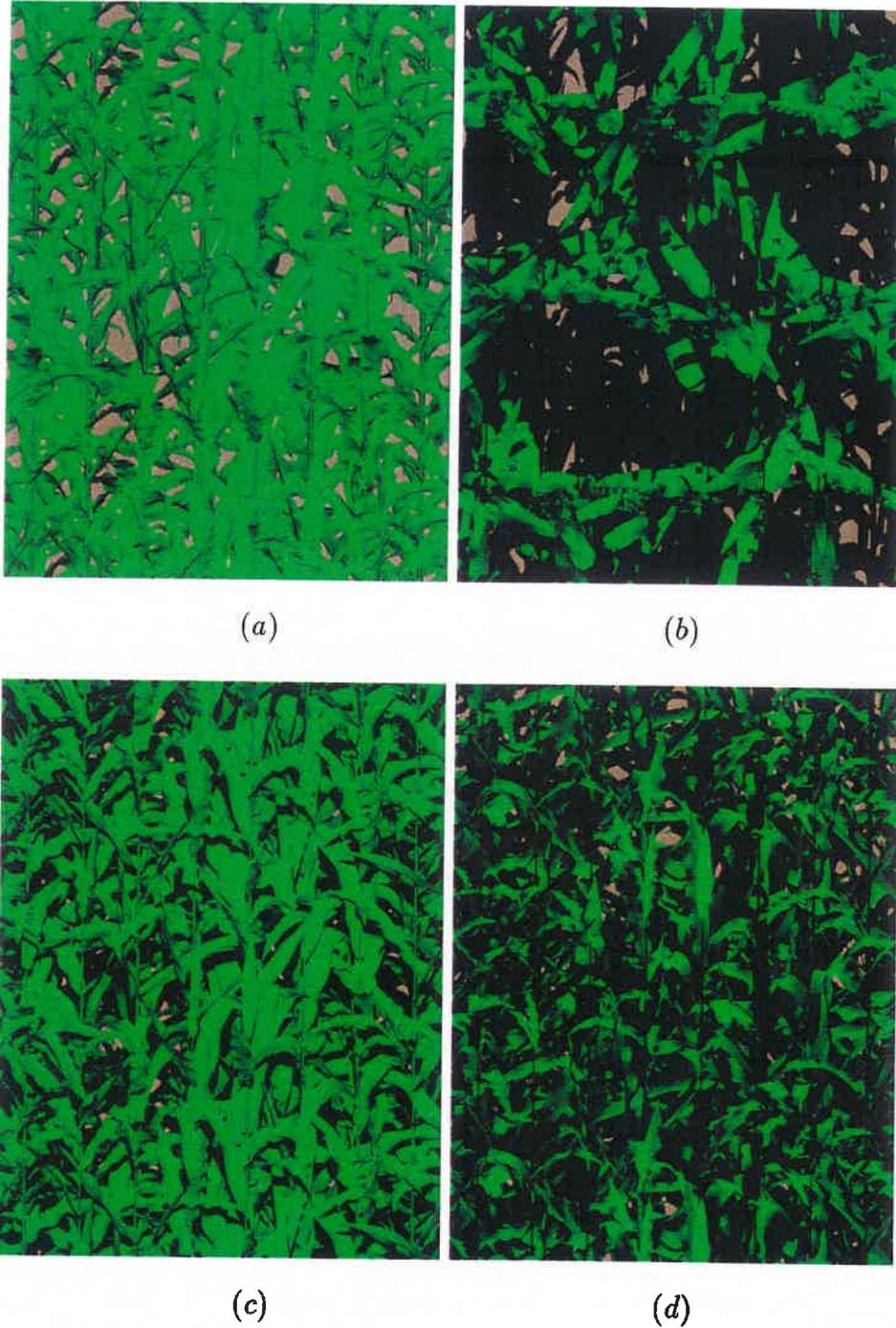


FIG. 4.23 – Illustration du champ d'observation (Soleil à 45°) : (a) hot-spot (45°), (b) vertical (0°), (c) près du hot-spot (50°), (d) symétrique au hot-spot (-45°) (images obtenues par double projection sur la maquette de référence)

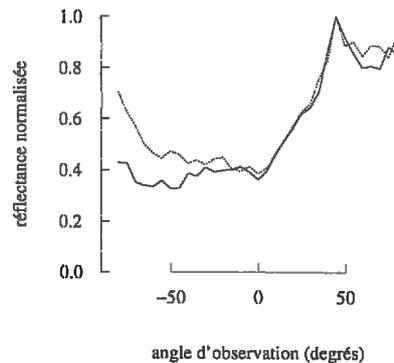


FIG. 4.24 – Comparaison entre la réflectance simple due à la végétation, estimée par lancer de rayons sur la maquette de référence, dans le visible (—) et dans le proche infra-rouge (.....) (valeurs normalisées par rapport au hot-spot)

Une légère augmentation de la réflectance simple dans l'infra-rouge peut être signalée avec la disparition du gaufrage (0.005 en moyenne) et une diminution de 0.01 de la composante multiple dans l'infra-rouge avec la dégradation de la triangulation ; on remarque aussi une légère augmentation de la réflectance simple dans le visible. L'effet sur la réflectance simple peut être dû à la diminution de la surface des feuilles plates ou grossièrement triangulées par rapport aux feuilles gaufrées, qui diminue la probabilité d'interception.

Feuilles avec une composante spéculaire

maquette de référence

En introduisant une composante spéculaire dans la description des propriétés optiques des feuilles, on obtient pour la maquette de référence les facteurs de réflectance présentés à la figure 4.29. Dans la réflectance totale, ainsi que le premier ordre, le pic dû au spéculaire apparaît dans la position symétrique au soleil par rapport à la verticale, très clairement dans le visible et le proche infra-rouge, où il provoque une augmentation de l'ordre de 0.03 (fig. 4.30). En dehors de la direction spéculaire l'effet n'est pas significatif pour la réflectance simple.

L'angle moyen d'inclinaison des feuilles du couvert étant de 65°,

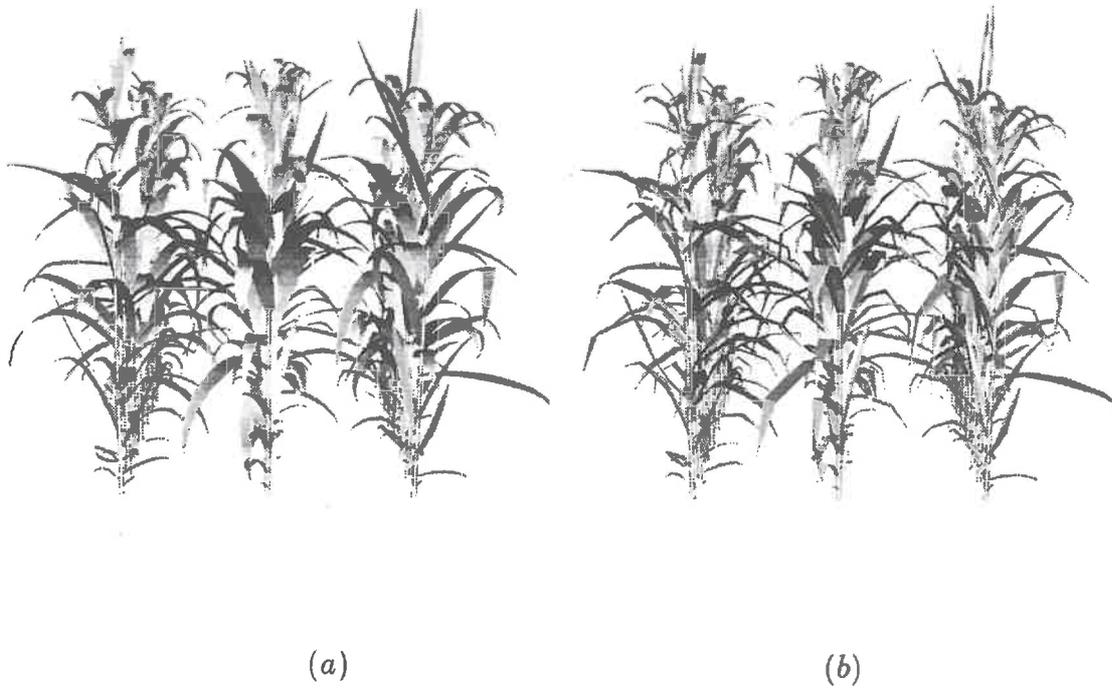


FIG. 4.25 – Maquettes sans gaufrage (a) et dégradée (b) utilisées pour les simulations

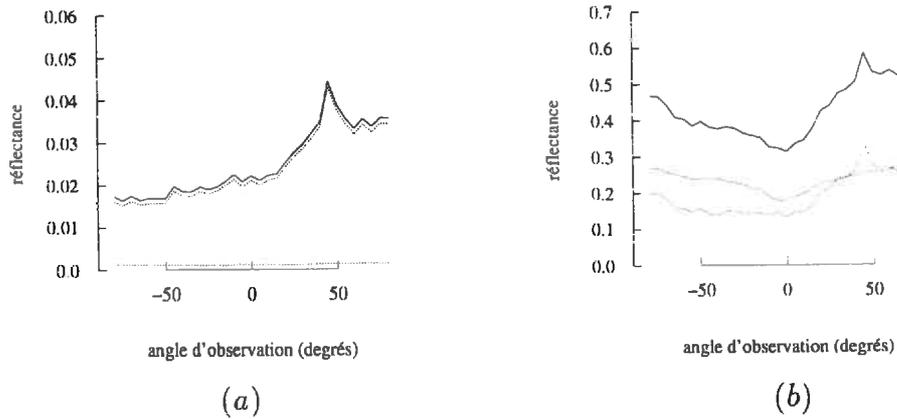


FIG. 4.26 – Réflectance de la maquette sans gaufrage dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

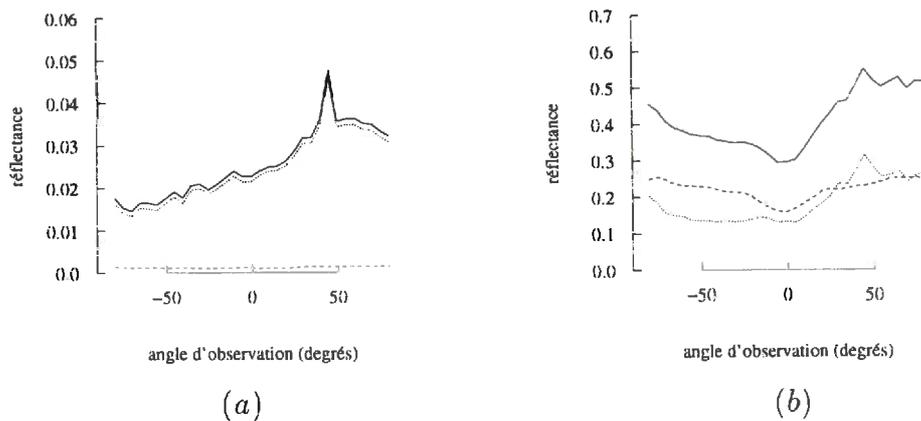


FIG. 4.27 – Réflectance de la maquette dégradée dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

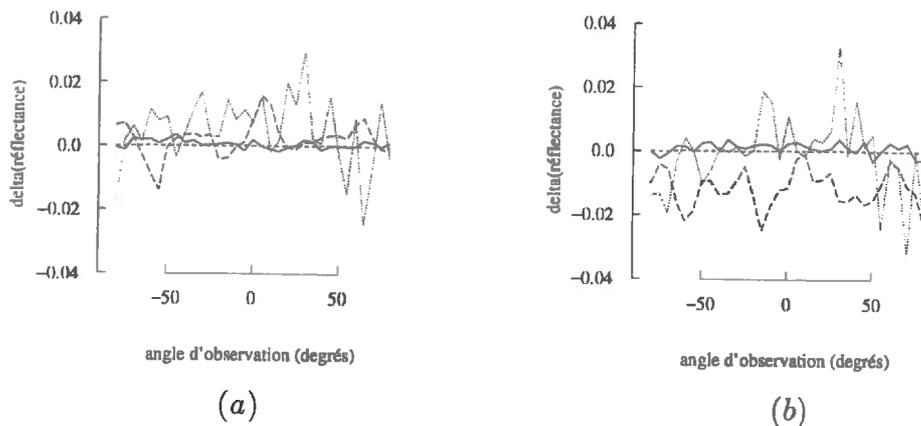


FIG. 4.28 – Réflectance par rapport à la maquette de référence ((a) maquette sans gaufrage, (b) maquette dégradée) (— : R réflectance simple, : IR réflectance simple, - - - : R réflectance multiple, - - : IR réflectance multiple)

la *LIDF* a un caractère plus sphérique que planophile; dans le cas contraire, le pic aurait été plus grand. La réflectance multiple est augmentée de 0.01 dans le proche infra-rouge pour toutes les directions. En revanche, dans le visible, l'augmentation est seulement marginale. Cela s'explique par l'augmentation des propriétés de dispersion des feuilles avec l'addition d'une composante spéculaire (Sanz *et al.*, 1997).

Dans le cas de la maquette sans gaufrage (fig. 4.31 a) ou dégradée (fig. 4.32 b) le pic spéculaire de la réflectance simple est plus ou moins masqué par d'autres pics parasites. Ce comportement peut s'expliquer par une *LIDF* peu représentative et peu continue, du fait de l'échantillonnage réduit des triangles décrivant la culture. La figure 4.33 (a et b) montre la différence par rapport à la maquette de référence.

Conclusion

La précision de la représentation de la maquette, évaluée par le niveau de triangulation ou le gaufrage, n'a pas une grande influence sur la *BRDF*. dans le cas de feuilles lambertiennes. La disparition du gaufrage induit une petite augmentation de la réflectance surtout

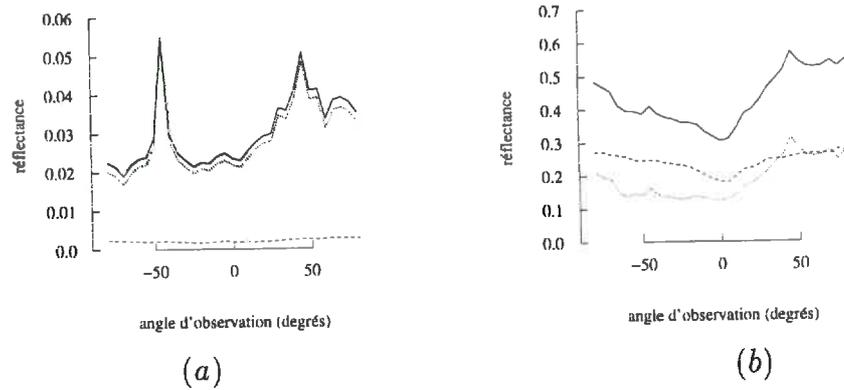


FIG. 4.29 - Réflectance de la maquette de référence dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons, en considérant une composante spéculaire des feuilles ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

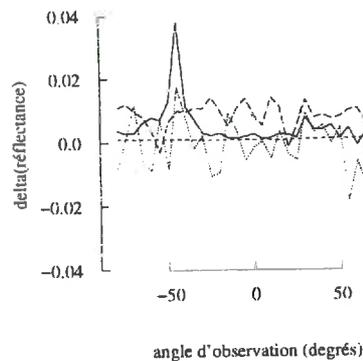


FIG. 4.30 - Effet du spéculaire sur la maquette de référence : différence entre les réflectances estimées sur la maquette de référence par lancer de rayons, en considérant et non une composante spéculaire des feuilles (— : R réflectance simple, : IR réflectance simple, - - - : R réflectance multiple, - - - : IR réflectance multiple)

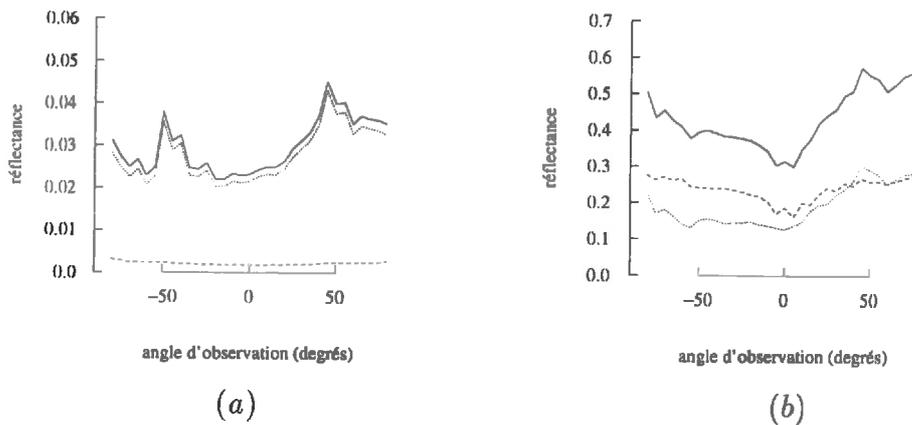


FIG. 4.31 – Réflectance de la maquette sans gaufrage dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons, en considérant une composante spéculaire des feuilles ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

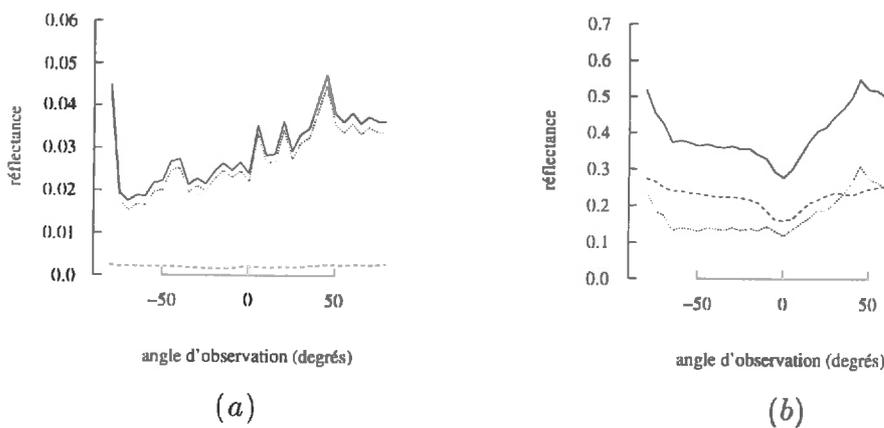


FIG. 4.32 – Réflectance de la maquette dégradée dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons en considérant une composante spéculaire des feuilles ((a) visible, (b) proche infra-rouge) (— : réflectance totale, : simple, - - - : multiple)

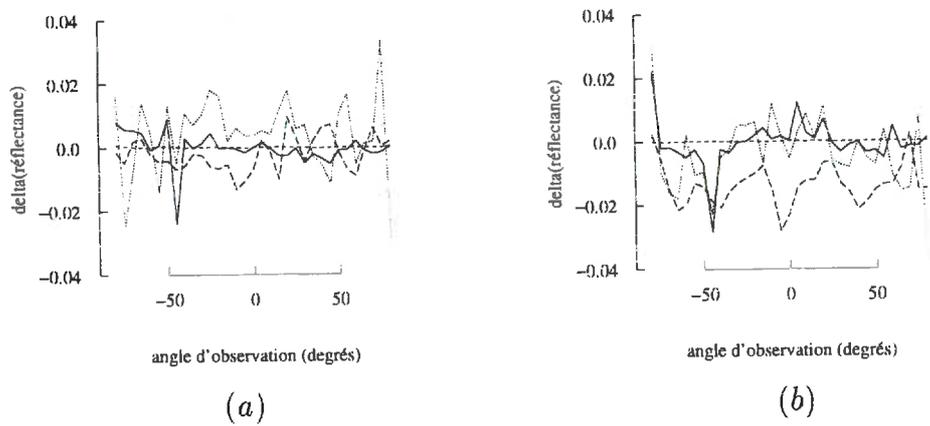


FIG. 4.33 – Effet du spéculaire selon la qualité de la représentation : différence entre la réflectance estimée par lancer de rayons en considérant une composante spéculaire des feuilles sur la maquette de référence et sur la maquette sans gaufrage (a) et la maquette dégradée (b) (— : R réflectance simple, : IR réflectance simple, - - - : R réflectance multiple, - - - : IR réflectance multiple)

sensible en simple diffusion dans l'infra-rouge.

Quand on introduit une composante spéculaire, on obtient une forte *spéculaire* augmentation de la réflectance simple dans la position symétrique par rapport au soleil (le pic spéculaire) dans le visible et dans le proche infra-rouge, et une augmentation de la réflectance multiple dans le proche infra-rouge. Si on représente les feuilles sans gaufrage, et surtout si on dégrade la triangulation, le pic spéculaire est dispersé en plusieurs pics parasites.

Ces résultats sont obtenus avec le modèle de fonction de phase des feuilles de Nilson. Ce modèle considère la réflectance des feuilles comme étant la somme d'une contribution lambertienne et d'une contribution spéculaire, les feuilles étant alors considérées comme des miroirs. Les quelques observations disponibles montrent qu'en fait les feuilles présentent un lobe de réflectance dans la direction spéculaire, plutôt qu'un delta de Dirac, réduisant certainement la portée de nos simulations.

La perte de précision est marginale et il ne semble pas nécessaire, pour les objectifs de ce travail, d'utiliser une représentation meilleure de la culture que celle donnée par la triangulation dégradée.

4.5 Conclusion

Si dans le chapitre précédent le modèle de description de la plante de maïs était resté assez théorique, dans ce chapitre les choses se sont concrétisées : les surfaces paramétriques tridimensionnelles qui décrivaient les feuilles ondulées sont transformées en un ensemble de triangles susceptibles d'être représentés par ordinateur et d'être utilisés pour réaliser des simulations de transfert radiatif, par des méthodes informatiques. La "belle" maquette infinie, très détaillée et réaliste, est devenue une petite parcelle de 24 plantes, avec des feuilles très simplifiées. Cela permettra de l'utiliser d'une manière plus rapide et efficace, sans une perte importante de la qualité des simulations, dans la mesure où les feuilles sont considérées comme étant lambertiennes. En revanche, la considération du caractère spéculaire des propriétés optiques des feuilles exigerait une description plus précise de leur structure.

Les simulations réalisées nous ont permis de faire des constats intéressants, à partir desquels nous pouvons orienter le développement d'un

modèle de transfert radiatif opérationnel, qui est un objectif essentiel de ce travail.

Chapitre 5

Développement d'un modèle rapide de calcul de la réflectance

5.1 Introduction

Les différentes approches proposées dans la littérature pour calculer le transfert radiatif dans un couvert végétal ont été évoquées dans l'étude bibliographique. Elles sont classées selon la manière dont ils considèrent la structure de la végétation ; les plus avancées décrivent le couvert avec beaucoup de détail. C'est en vue d'utiliser ce type de modèle qu'on a orienté la construction de la maquette de maïs (triangulation, études de sensibilité à la représentation, ...).

Les modèles les plus puissants utilisent les techniques de lancer de rayons, dont le principe a été présenté auparavant (§ 4.3.3). Ces modèles permettent des simulations très réalistes, en considérant explicitement le parcours des photons qui pénètrent le couvert. Ils s'appuient sur une représentation du couvert sous la forme de maquette informatique 3D, dont les éléments ont des propriétés optiques parfaitement caractérisées. Ils constituent ainsi des outils d'étude très puissants, permettant l'obtention de résultats de référence. C'est dans cette optique que le modèle *Parcinopy* a été utilisé dans le chapitre précédent et qu'il le sera à nouveau dans le présent chapitre. L'inconvénient majeur de ce

type de modèle réside dans les temps de calcul très importants associés, qui rendent impensable à l'heure actuelle de généraliser leur utilisation lors d'applications opérationnelles.

objectif

C'est pour cette raison que nous nous proposons de développer un modèle de simulation du transfert radiatif, qui aurait une précision comparable à celle du lancer de rayons, tout en étant beaucoup plus rapide et facile à mettre en oeuvre.

plan

Les diffusions simple et multiple, ainsi que les contributions du sol et de la végétation sont étudiées séparément à partir des simulations du modèle de référence, sur des maquettes représentant la variation temporelle du couvert. À la suite de cette analyse on propose un modèle de transfert radiatif opérationnel. Les résultats des simulations réalisées avec le modèle de référence sont comparés à ceux du modèle rapide proposé, dont la précision est évaluée également par rapport à d'autres modèles rapides existants, classiquement utilisés.

5.2 Entrées du modèle

5.2.1 Les maquettes utilisées dans les simulations de réflectance

Les maquettes utilisées pour les simulations de la *BRDF* (fig. 5.1) ont été construites à partir des résultats des analyses de sensibilité présentées dans le chapitre précédent. Elles sont donc constituées de 24 plantes, dont les feuilles sont représentées avec la triangulation de base (20 triangles par feuille, en respectant la nervure centrale et le point de cassure), ce qui ne permet pas la représentation du gaufrage. Elles n'ont pas de fleurs.

S_T, i_T

La vigueur moyenne considérée (surface foliaire totale par plante) est de $4\,670\text{ cm}^2$ et le nombre de feuilles est compris entre 16 et 19, ce qui correspond aux valeurs moyennes des campagnes de 1994 et 1995 (§ 3.4.2). Les plantes sont disposées par rangs séparés de 70 cm ; la distance moyenne entre les plantes consécutives d'un rang est de 20 cm , ce qui fournit une densité de semis de 12 plantes/m^2 (§ 3.5).

densité

Les modèles empiriques présentés dans le chapitre 3 (§ 3.4.3) ont été utilisés pour simuler l'évolution temporelle des plantes. Les phyl-



FIG. 5.1 – Maquettes utilisées pour les simulations correspondant à 6 stades phénologiques

LAI

lochrones ont été choisis de manière à bien échantillonner le *LAI*, qui varie entre 0.26 pour les petites plantes et 3.4 pour les plantes adultes. La figure 5.2 (a) montre le *LAI* des 6 parcelles. Le dernier stade phénologique correspond à la plante adulte : la phase de croissance est finie (la tige et les feuilles ont leur taille définitive) et les premières feuilles ont disparu. Le dernier stade étudié se distingue du précédent par une élévation de la tige et la disparition de la feuille 6. La surface verte totale ne change donc que très peu entre ces deux stades.

LIDF

La *LIDF* de chaque maquette a été obtenue selon la méthode décrite dans la section § 4.3.1 (fig. 5.2 b).

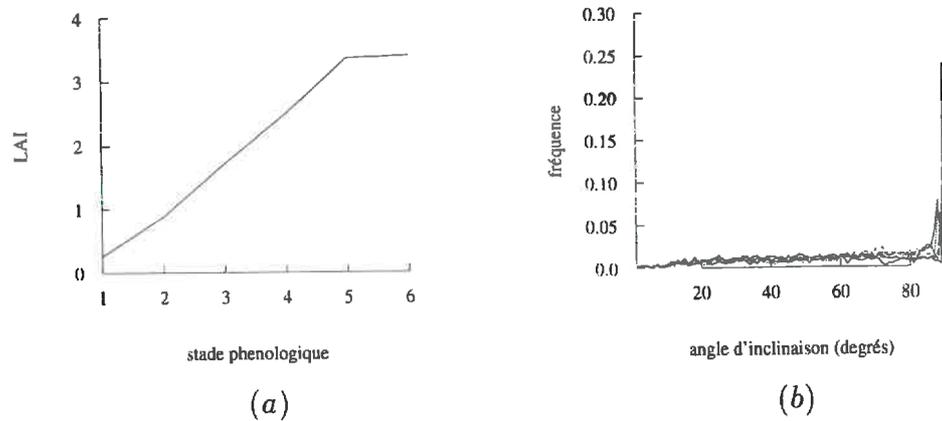


FIG. 5.2 – *LAI* (a) et *LIDF* (b) des maquettes utilisées pour les 6 stades phénologiques

5.2.2 Les propriétés optiques utilisées dans les simulations de réflectance

Les propriétés optiques sont les mêmes que celles utilisées pour les simulations présentées dans la section § 4.4.4, c'est-à-dire :

- pour la végétation dans le visible : $\rho_R = 0.056, \tau_R = 0.03$,
- pour la végétation dans le proche infra-rouge : $\rho_{IR} = 0.44, \tau_{IR} = 0.47$

— pour le sol : $\rho_{sol} = 0.2$.

Le propriétés optiques des tiges sont supposées identiques à celles des feuilles.

5.3 Résultats obtenus par lancer de rayons

La figure 5.3 montre la *BRDF* totale, obtenue par lancer de rayons, *BRDF* dans le visible (*R*) et le proche infra-rouge (*IR*), pour les différents stades phénologiques considérés.

Le facteur de réflectance est plus grand dans le *IR* que dans le *R*, la végétation étant très absorbante dans le visible, grâce à la présence de pigments, comme la chlorophylle. Dans le rouge, le facteur de réflectance diminue avec le *LAI*, la réflectance du sol étant plus grande que celle de la végétation ; en revanche, la réflectance totale augmente dans l'infra-rouge avec l'augmentation de surface foliaire et, donc, avec le temps.

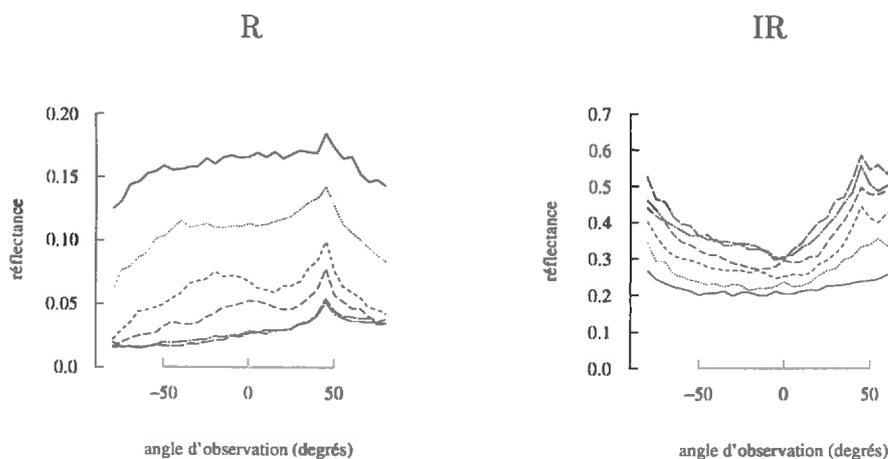


FIG. 5.3 - Réflectance dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons, dans le visible (*R*) et le proche infra-rouge (*IR*) (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

Dans la figure 5.4 les réflectances simple et multiple sont représentées séparément. Dans le visible, la réflectance multiple est très petite,

de l'ordre de 0.002. Dans le *IR* les réflectances simple et multiple ont un poids équivalent ; la réflectance multiple augmente avec le *LAI*, tandis que la réflectance simple se maintient autour de 0.2 pour tous les stades phénologiques.

simple

Pour mieux comprendre ce phénomène, on sépare dans la réflectance simple la contribution du sol et celle de la végétation (fig. 5.5). Dans les deux bandes spectrales étudiées, la réflectance simple due à la végétation augmente, logiquement, avec l'augmentation du *LAI*, et la contribution du sol diminue avec le *LAI*. Mais, dans le rouge c'est le sol qui l'emporte (avec une contribution 4 fois plus grande que celle de la végétation) et la réflectance simple diminue avec le stade phénologique. En revanche, dans le *IR*, les réponses du sol et de la végétation sont presque équivalentes, ce qui explique l'effet de compensation : la réflectance simple ne varie pas beaucoup avec le *LAI*.

multiple

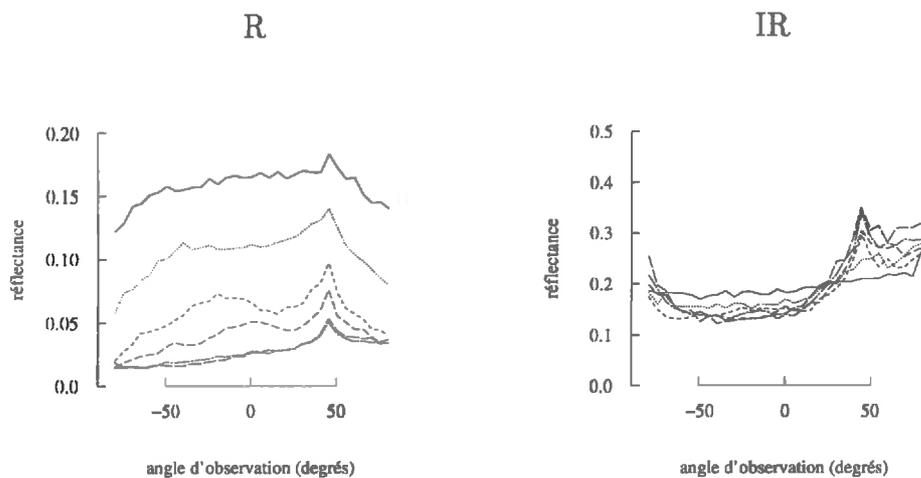
La réflectance multiple (fig. 5.6) est presque symétrique par rapport à la verticale, où elle présente un minimum dans le cas de la végétation et un maximum dans le cas du sol. Dans le visible, elle est très petite et du même ordre pour le sol et la végétation (environ 0.001). Dans le proche infra-rouge la réponse de la végétation est 10 fois plus importante que celle du sol.

5.4 Construction d'un modèle rapide de réflectance

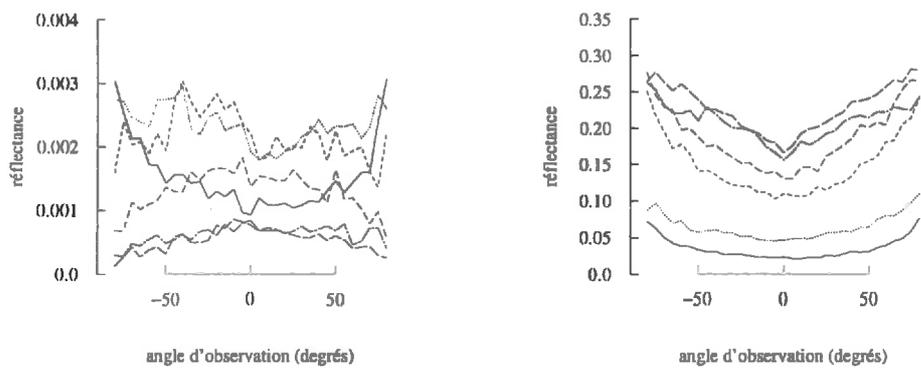
La simple diffusion a un comportement directionnel très marqué et joue un rôle prépondérant sur la réflectance totale, en particulier dans le cas du visible. On s'attachera donc à la simuler d'une manière précise. Pour chaque géométrie soleil-observateur, elle n'est que le résultat de la proportion de surfaces de sol et de végétation à l'ombre et au soleil, pondérées par les propriétés optiques correspondantes :

$$\rho^{\circ} = P_0 \rho_s + (1 - P_0) \rho_v^{\circ}$$

La réflectance multiple est très faible dans le visible et peut pratiquement être négligée. Dans le proche infra-rouge elle est beaucoup

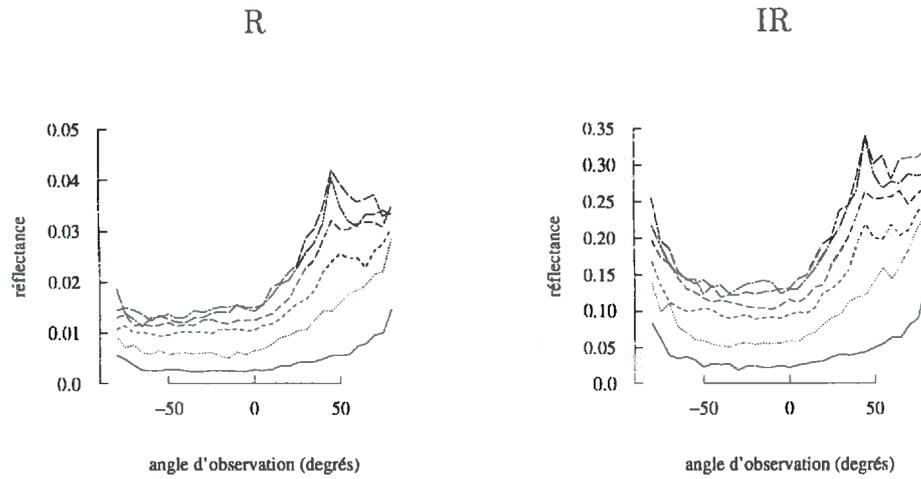


(a)

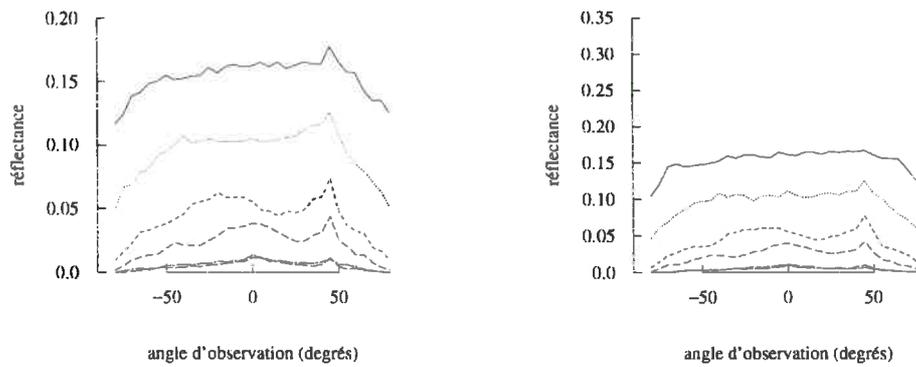


(b)

FIG. 5.4 - Réflectance dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons dans le visible (R) et le proche infra-rouge (IR) : (a) réflectance simple (b) réflectance multiple (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))



(a)



(b)

FIG. 5.5 – Réflectance simple dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons dans le visible (R) et le proche infra-rouge (IR), en considérant séparément les contributions du sol et de la végétation : (a) végétation, (b) sol (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

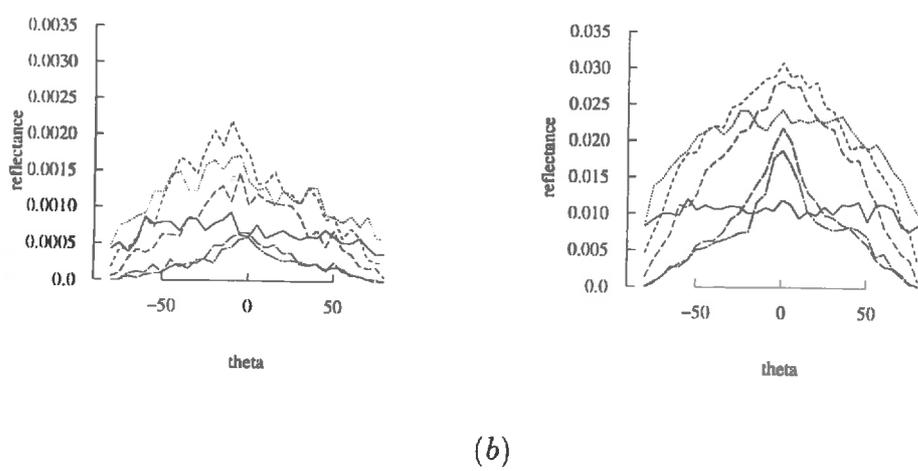
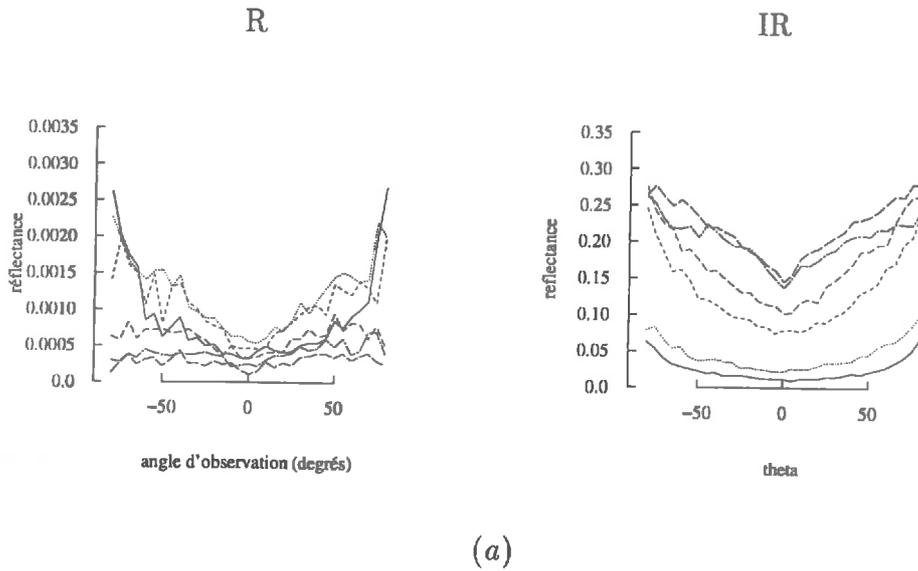


FIG. 5.6 - Réflectance multiple dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par lancer de rayons dans le visible (R) et le proche infra-rouge (IR), en considérant séparément les contributions du sol et de la végétation : (a) végétation, (b) sol (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

moins dépendante de la géométrie du couvert et de la direction d'observation que la réflectance simple.

proposition

Ces constatations suggèrent l'application de techniques de double projection, pour estimer la réflectance simple. Cela permet de prendre en compte explicitement le *hot-spot* et de considérer l'effet du spéculaire, en connaissant la distribution des inclinaisons des surfaces éclairées et vues dans toutes les directions. Nous proposons d'estimer la réflectance multiple par un modèle classique de transfert radiatif en milieu diffusant (*SAIL*), en utilisant les valeurs effectives des variables d'entrée (LAI, θ_i, λ_0), ajustées, par exemple, à partir du P_0 calculé par simple projection sur la maquette.

5.4.1 Calcul de la diffusion simple par double projection

principe

La double projection permet de déterminer, pour une direction d'illumination donnée et un ensemble d'objets, les surfaces vues à partir d'une certaine position d'observation, en tenant compte des recouvrements et des ombrages respectifs des uns sur les autres. Cela est possible en étudiant les intersections entre les rayons solaires et ceux qui, depuis l'observateur, arrivent sur chaque élément de surface. On détermine ainsi ceux qui sont vus et éclairés simultanément. La double projection diffère donc de la projection simple (qu'on a utilisé pour produire certaines figures, comme la figure 5.1, par exemple) qui suppose la colinéarité entre l'observateur et la source lumineuse, ce qui évite l'apparition d'ombres.

bvis

Le modèle de double projection utilisé pour les simulations, *bvis*, a été développé par Bruno Andrieu (INRA-Grignon, communication personnelle). La figure 4.23 du chapitre précédent, par exemple, qui montre un champ vue à partir de 4 positions d'observation, a été obtenue par double projection calculée par *bvis*.

simulations

Des simulations ont été réalisées dans les mêmes conditions (propriétés optiques, géométrie d'observation et d'illumination, ...) que celles utilisées pour le lancer de rayons (fig. 5.4). Les résultats (fig. 5.7) correspondent à la moyenne de 10 répétitions, calculées en considérant 10 positions aléatoires de l'observateur dans une parcelle infinie,

construite en répétant la parcelle élémentaire de 24 plantes. La différence par rapport au lancer de rayons apparaît à la figure 5.8.

On constate le bon accord entre la réflectance simple obtenue par double projection et celle estimée par lancer de rayons stochastique. Les plus grandes différences se produisent au niveau du *hot-spot*. Dans le cas du lancer de rayons, le calcul du *hot-spot* est conditionné par le choix de l'angle solide d'intégration directionnelle. Cet angle est de 5° dans le plan principal et de 2° autour de la position du Soleil. Dans le cas de la double projection, dans la situation de *hot-spot*, l'image d'éclairement se superpose à l'image d'observation. Cela peut induire des imprécisions dans le calcul des ombres portées, étant donné la résolution différente des deux images.

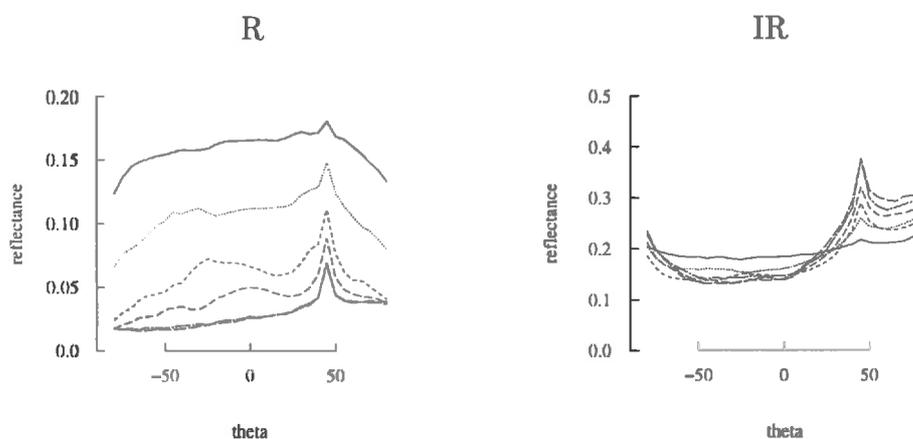


FIG. 5.7 – Réflectance simple dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par double projection, dans le visible (R) et le proche infra-rouge (IR) (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

5.4.2 Calcul de la diffusion multiple

Le modèle *SAIL*

Le modèle *SAIL*, proposé par Verhoef (1984, 1985), est sans doute le modèle de simulation du transfert radiatif le plus utilisé. Il est très

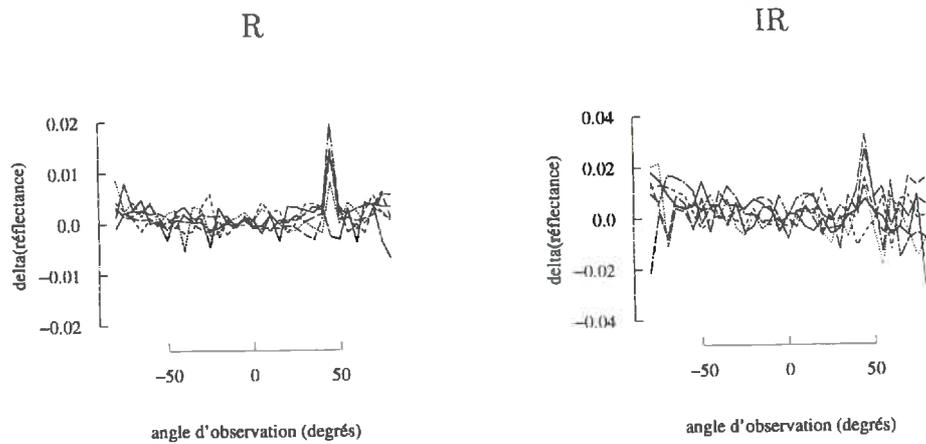


FIG. 5.8 – Différence entre la réflectance simple dans le plan principal (Soleil à 45°) estimée par double projection et celle estimée par lancer de rayons, dans le visible (R) et le proche infra-rouge (IR) (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

rapide et les validations réalisées montrent de bonnes performances générales.

Sans vouloir décrire en détail le modèle, on montrera comment extraire de la réflectance totale la contribution de la diffusion multiple et de la simple diffusion.

Entrées

Le couvert, supposé homogène et infiniment étendu, est défini par son indice foliaire (*LAI*) et la fonction de distribution des inclinaisons foliaires (*LIDF*), en considérant une distribution azimutale aléatoire. Les propriétés optiques des feuilles et du sol sont connues. Les feuilles sont supposées lambertiennes, avec des propriétés optiques identiques sur les deux faces. Un paramètre permet d'ajuster le *hot-spot* (Kuusk, 1985).

La position du Soleil est donnée par son angle zénithal ; la direction d'observation est définie par l'angle zénithal et l'azimut relatif au plan d'incidence.

Théorie

Le modèle *SAIL* constitue une amélioration du modèle de Suits (1972). Il repose sur le système d'équations suivant, dérivé du système de Kubelka-Munk (1931) décrivant le transfert radiatif de flux directionnels et hémisphériques dans un milieu diffusant ou absorbant, supposé homogène et infiniment étendu (fig. 5.9) :

$$\begin{aligned} dE_s/dx &= kE_s \\ dE_-/dx &= -sE_s + aE_- - \sigma E_+ \\ dE_+/dx &= s'E_s + \sigma E_- + aE_+ \\ dE_o/dx &= wE_s + vE_- + uE_+ - KE_o \end{aligned}$$

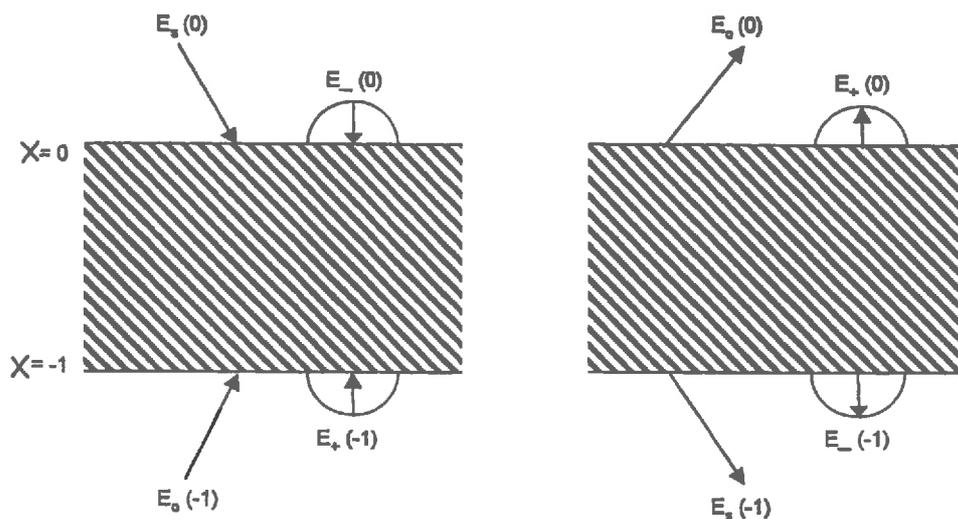


FIG. 5.9 - Schéma des flux incidents et sortants d'un couvert

x est l'épaisseur du milieu,
 E_s est la radiation solaire incidente,
 E_- et E_+ sont, respectivement, les flux diffus descendants et montants,
 E_o est le flux directionnel dans la direction de l'observateur,
 a, σ, s, s', v, w et u sont des coefficients de diffusion et de rétro-diffusion,
 k et K sont les coefficients d'extinction.

La résolution de ce système donne (fig. 5.10) :

$$\begin{aligned} E_s(-1) &= \tau_{ss} E_s(0) \\ E_-(-1) &= \tau_{sd} E_s(0) + \tau_{dd} E_-(0) + \rho_{dd} E_+(-1) \\ E_+(0) &= \rho_{sd} E_s(0) + \rho_{dd} E_-(0) + \tau_{dd} E_+(-1) \\ E_o(0) &= \rho_{so} E_s(0) + \rho_{do} E_-(0) + \tau_{do} E_+(-1) + \tau_{oo} E_o(-1) \end{aligned}$$

où :

τ est une transmittance de la strate,
 ρ est une réflectance de la strate,
 o indique la direction d'observation,
 s indique la direction d'éclairement,
 d indique les flux diffus.
 -1 correspond à la base du couvert et 0 au sommet.

et les coefficients τ_{ss}, \dots s'expriment en fonction des coefficients de diffusion et d'extinction du système différentiel initial.

La réflectance bidirectionnelle est donnée par :

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

r étant une réflectance caractérisant la couche inférieure (sol).

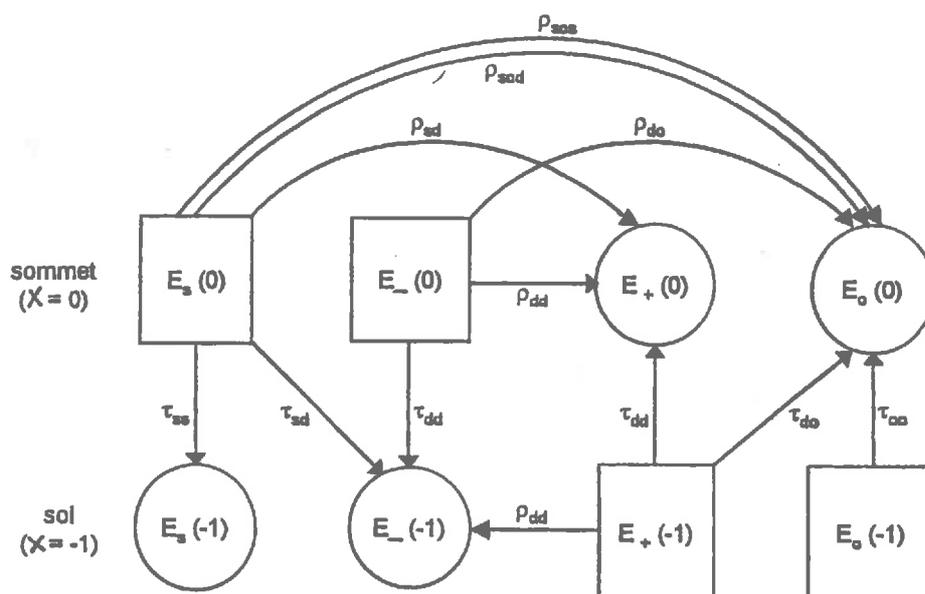


FIG. 5.10 - Schéma des interactions entre les flux

En reprenant la même nomenclature que dans Verhoef (1985), la contribution à la réflectance simple apparaît dans le terme ρ_{so} :

$$\rho_{so} = H_o(1 - \tau_{ss}\tau_{oo}) - C_o\tau_{sd}\tau_{oo} - D_o\rho_{sd}$$

avec :

$$H_o = (sC_o + s'D_o + w)/(K + k)$$

Le terme w correspond à la contribution de la végétation à la simple diffusion.

Le terme ρ_{so} peut être décomposé en 2 parties, correspondant respectivement à la réflectance simple (ρ_{sos}) et multiple (ρ_{sod}) :

$$\rho_{so} = \rho_{sos} + \rho_{sod}$$

avec :

$$\rho_{sos} = \frac{w}{K + k}(1 - \tau_{ss}\tau_{oo})$$

et

$$\rho_{sod} = \frac{sC_o + s'D_o}{K + k}(1 - \tau_{ss}\tau_{oo}) - C_o\tau_{sd}\tau_{oo} - D_o\rho_{sd}$$

Finalement, la réflectance multiple du couvert est estimée comme :

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

Estimation du P_0

L'estimation de la réflectance multiple d'un couvert végétal par le modèle *SAIL* nécessite une valeur de *LAI* et une *LIDF*, en plus des propriétés optiques de ses éléments. Une possibilité est d'utiliser directement le *LAI* du couvert, qui dans le cas de la maquette, correspond à la surface cumulée de tous les triangles qui la constituent. Cette solution, la plus généralement utilisée, serait justifiée pour un couvert homogène idéal, ce qui n'est pas le cas du maïs. Il serait convenable de corriger cette valeur de *LAI* afin de prendre en compte le caractère hétérogène du couvert.

Quant à la *LIDF*, la relativement faible sensibilité de la réflectance à cette variable permet d'utiliser un angle moyen d'inclinaison des feuilles, avec lequel ajuster une distribution d'angles foliaires.

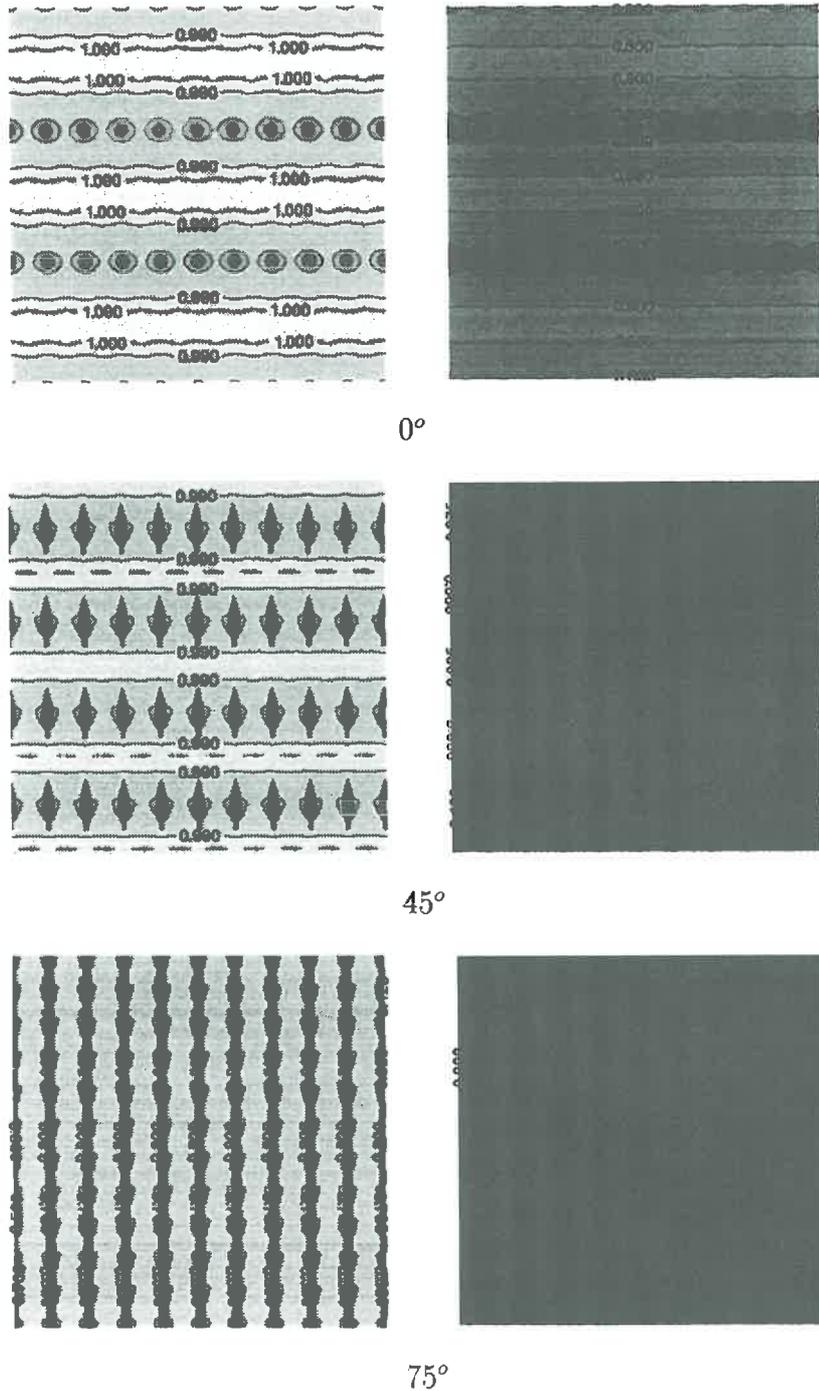
La fraction de trous est une variable importante du transfert radiatif, qui renseigne sur les hétérogénéités à l'intérieur du couvert et reflète bien le degré de recouvrement de ses éléments. Afin de prendre en compte la structure détaillée du couvert, nous proposons d'estimer les valeurs effectives du *LAI* et θ_l , permettant de simuler plus précisément le P_0 réel de la maquette.

Estimation du P_0 à partir d'une maquette

La méthode des fantômes présentée dans le chapitre précédent permet la construction de la carte de probabilité d'interception d'une plante moyenne selon une direction donnée. Il est possible de déterminer le P_0 d'un couvert par convolution de ces cartes, en les superposant selon la distribution des plantes dans le champ, en respectant la densité de semis de la culture. La figure 5.11 montre quelques exemples, correspondants aux premier et dernier stades phénologiques étudiés, pour 3 angles d'observation (0° , 45° , 75°). Le P_0 pour une direction donnée est estimé comme la moyenne de la carte, calculée sur une partie périodique de celle-ci.

On peut aussi estimer la fraction de trous bidirectionnelle d'une maquette par simple projection. Pour une direction d'observation donnée, on projette la maquette sur le plan perpendiculaire à la direction d'observation. On considère les plantes noires et le sol blanc. Le P_0 correspond à la proportion de blanc sur la surface projetée. Pour illustrer cette méthode, la figure 5.12 montre les parcelles au stade le plus précoce et au dernier stade phénologique étudiés, projetées selon 3 directions: 0° , 45° , 75° .

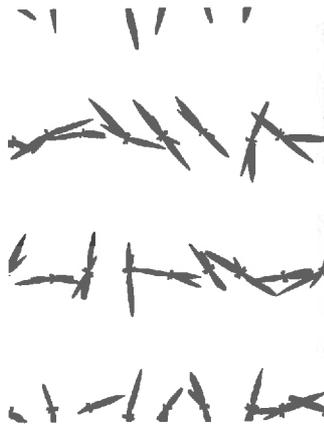
L'avantage de la méthode des fantômes par rapport à la projection est de permettre l'estimation du P_0 pour différentes densités de semis ou disposition des plantes, sans avoir besoin de construire les différentes maquettes. De plus, il n'est pas nécessaire de faire des répétitions et le résultat obtenu est très précis et indépendant de la position et de l'orientation de chaque plante individuelle dans la maquette. Le désavantage, c'est qu'il faut calculer les cartes par stade et par angle; mais,



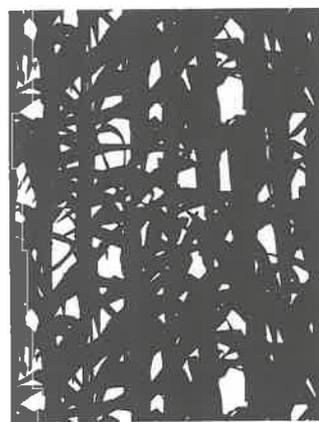
(a)

(b)

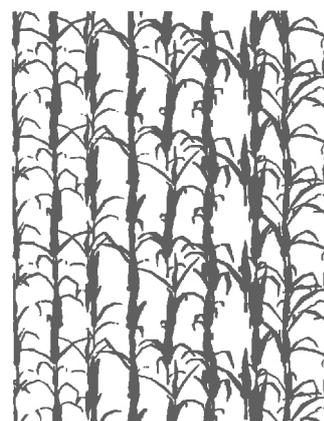
FIG. 5.11 – Estimation du P_0 par la méthode des fantômes, en considérant trois angles de visée ((a) petites plantes, (b) plantes adultes)



0°



45°



75°

(a)

(b)

FIG. 5.12 - Estimation du P_0 par projection, en considérant trois angles de visée ((a) petites plantes, (b) plantes adultes)

comme on le montre à la section § 4.3.2, il suffit de cumuler les fantômes de 24 pieds, représentés avec la triangulation de base, pour avoir la carte de probabilité d'interception de la plante moyenne dans une direction donnée.

résultats

La variation du P_0 des 6 maquettes étudiées avec l'angle d'observation θ_p a été estimé par la méthode des fantômes et apparaît à la figure 5.13 (a). Le bon accord de ces résultats avec ceux obtenus par projection (fig. 5.13 (b)) valide indirectement les deux méthodes.

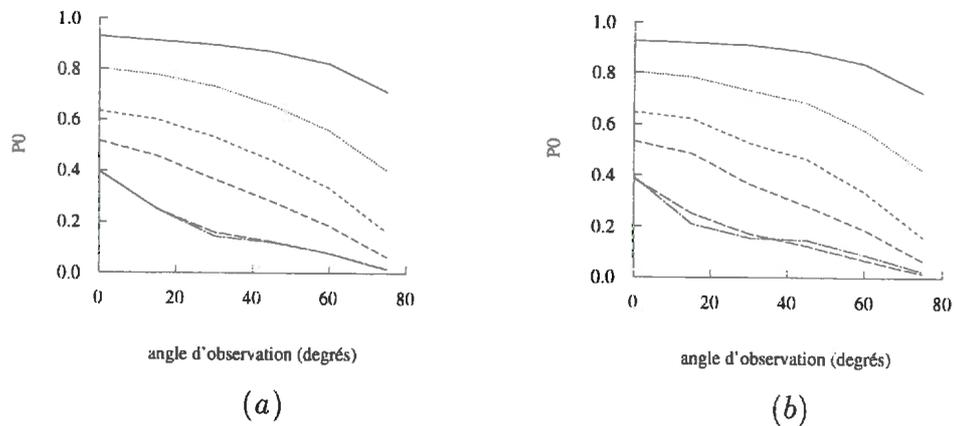


FIG. 5.13 – Estimation du P_0 en fonction de l'angle d'observation : (a) méthode des fantômes, (b) projection (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

Expression théorique du P_0

La fréquence de trous est théoriquement reliée au LAI par une relation exponentielle (Nilson, 1971) (loi de Poisson) :

$$P_0(\theta_p) = e^{-K(\theta_p) \times LAI} \quad (5.1)$$

où K est le coefficient d'atténuation ou d'extinction qui dépend de l'angle d'observation, θ_p .

Dans le cas d'un couvert homogène idéal (constitué de petites feuilles disposées et orientées aléatoirement), pour un angle zénithal θ_p , K ne

dépend que de l'inclinaison et de la position relative des feuilles et est donné par l'expression :

$$K(\theta_p) = \frac{G(\theta_p, g(\theta_l))}{\cos(\theta_p)} \quad (5.2)$$

où la fonction G correspond à la projection orthogonale de l'unité de surface foliaire selon la direction considérée θ_p et $g(\theta_l)$ est la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles, θ_l étant l'angle moyen d'inclinaison des feuilles.

Dans le cas d'un couvert hétérogène, on introduit le paramètre λ_0 de dispersion/agrégation, λ_0 , pour tenir compte du recouvrement des feuilles :

$$K(\theta_p) = \lambda_0 \frac{G(\theta_p, g(\theta_l))}{\cos(\theta_p)}$$

- $\lambda_0 = 1$ correspond à une dispersion aléatoire (couvert homogène idéal) ;
- $\lambda_0 < 1$ si les feuilles se recouvrent (agrégation)
- $\lambda_0 > 1$ si les feuilles cherchent à s'éviter (dispersion).

Ainsi, le LAI effectif du couvert est donné par :

LAI_{eff}

$$LAI_{eff} = LAI \times \lambda_0$$

Ajustement du P_0

Les valeurs de la fraction de trous obtenues par la méthode des fantômes pour les 6 stades phénologiques étudiés et pour des angles d'observation entre 0° et 75° vont servir à ajuster les valeurs de λ_0 et(ou) θ_l , en utilisant les équations 5.1 et 5.2.

Les résultats des différentes combinaisons essayées apparaissent à la figure 5.14 (la figure 5.15 montre la différence entre les courbes) :

- (a) on considère que le couvert est homogène, constitué de petites feuilles disposées aléatoirement. On applique directement l'expression 5.1 avec les vraies valeurs LAI et $LIDF$;

- $\lambda_0(\theta_p)$, *LIDF*
- (b) pour chaque stade phénologique, on considère la vraie *LIDF* et, pour tous les stades phénologiques confondus, on ajuste un paramètre de dispersion λ_0 pour chaque angle d'observation θ_p . On considère dans ce cas que la dispersion est fonction de la direction d'observation et non du développement de la plante. La figure 5.16 (a) montre les valeurs de $\lambda_0(\theta_p)$ obtenues : elles sont toutes inférieures à 1 et indiquent un recouvrement des feuilles, qui est maximal en visée verticale (étant donnée la position dans un seul plan des feuilles de maïs) et près de l'horizontale (avec la disparition de l'effet des rangs) ;
- $\lambda_0(LAI)$, *LIDF*
- (c) on considère ici que le coefficient de dispersion, λ_0 , et la *LIDF* dépendent seulement du stade phénologique et non de la direction d'observation. Ainsi, pour chaque stade phénologique, on considère la vraie *LIDF* et on ajuste le paramètre de dispersion λ_0 de manière à estimer le *LAI* effectif ; la figure 5.16 ((b), trait continu) montre les valeurs des λ_0 ajustées, en fonction du *LAI* : ils sont tous inférieurs à 1, ce qui indique qu'il s'agit de couverts dont les feuilles ont tendance à se recouvrir ; pour les stades correspondants aux plantes en croissance, la présence du cornet accentue le recouvrement du feuillage ;
- $\lambda_0(LAI)$, $\bar{\theta}_l$
- (d) étant donné que le coefficient d'extinction n'est pas très sensible à une variation de la fonction de distribution des angles foliaires, on ajuste un angle moyen d'inclinaison des feuilles, commun pour tous les stades ($\bar{\theta}_l = 57^\circ$), à partir duquel on obtient la *LIDF* selon une distribution ellipsoïdale. La valeur de λ_0 est ajustée pour chaque stade phénologique ; sa variation avec le *LAI* (fig. 5.16 (b), en pointillé) est similaire à celle du cas précédent.

conclusion

Les meilleurs ajustements sont ceux utilisant un coefficient d'agrégation, λ_0 , pour chaque stade phénologique, c'est-à-dire pour chaque maquette. On remarque la faible sensibilité à la manière de décrire la *LIDF*.

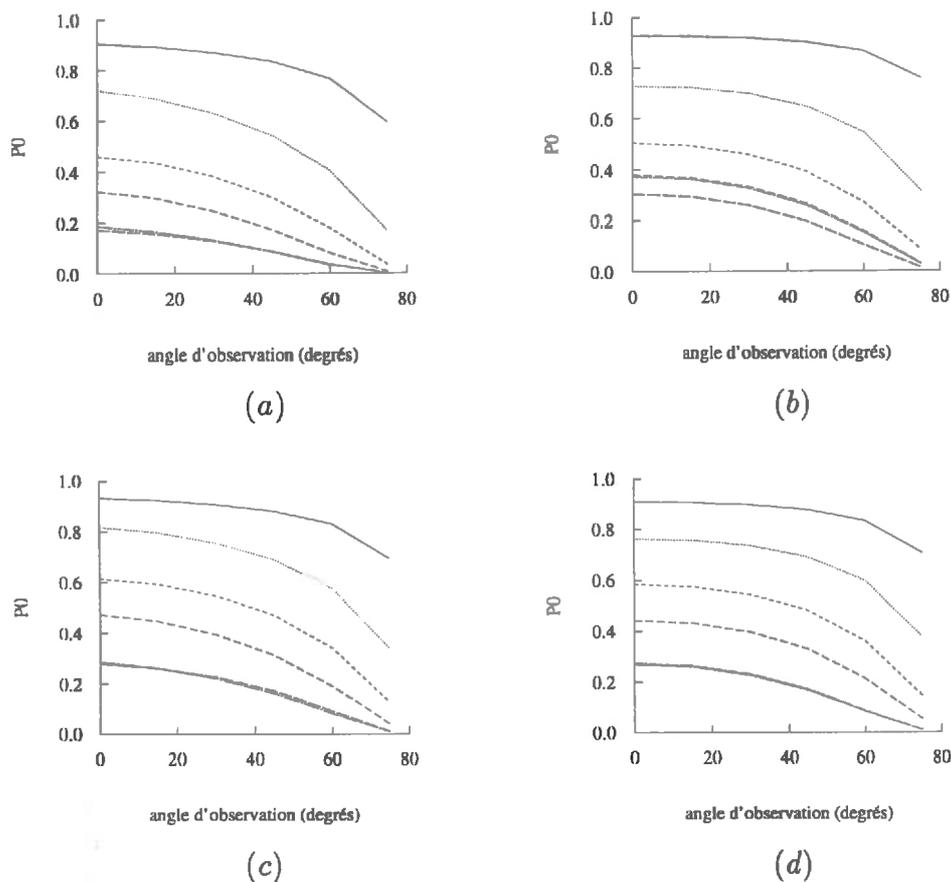


FIG. 5.14 – Estimation du P_0 par l'expression théorique en fonction de l'angle d'observation : (a) en considérant les vraies valeurs de LAI et de LIDF des maquettes, (b) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(\theta_p)$, (c) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(LAI)$ et (d) en considérant θ_l et $\lambda_0(LAI)$ (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

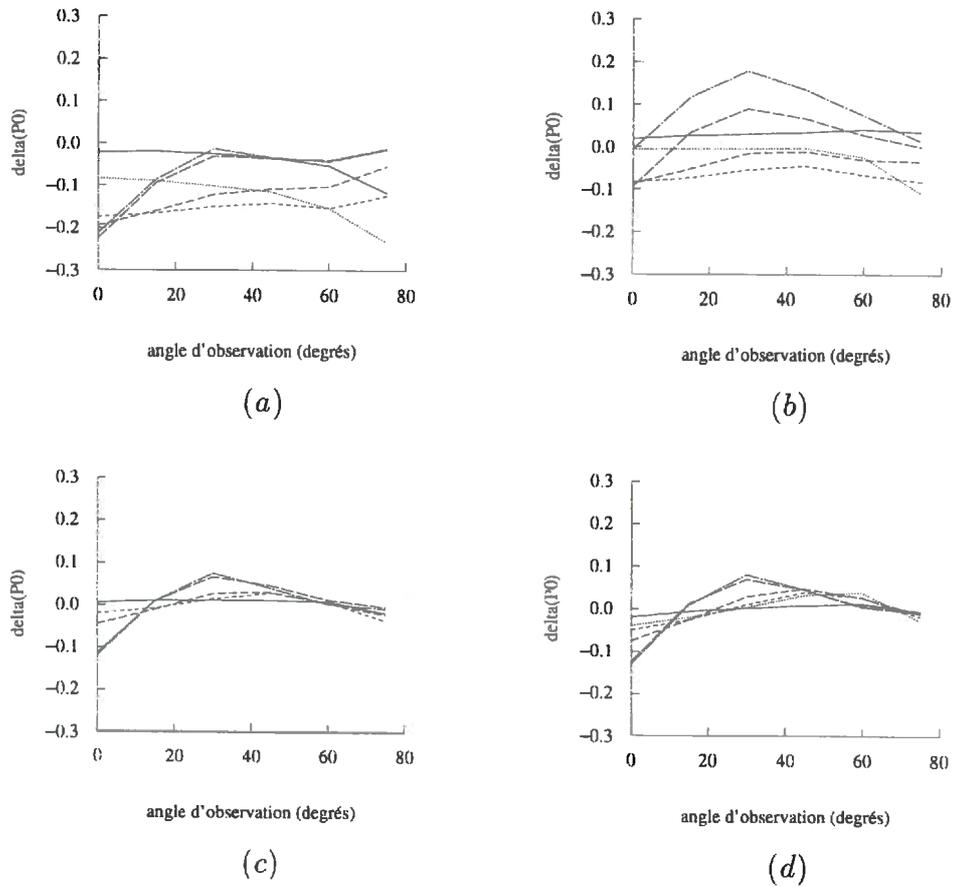


FIG. 5.15 – Différence entre le P_0 estimé par la méthode des fantômes et le P_0 estimé par l'expression théorique : (a) en considérant les vraies valeurs de LAI et de LIDF des maquettes, (b) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(\theta_p)$, (c) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(LAI)$ et (d) en considérant $\bar{\theta}_l$ et $\lambda_0(LAI)$ (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

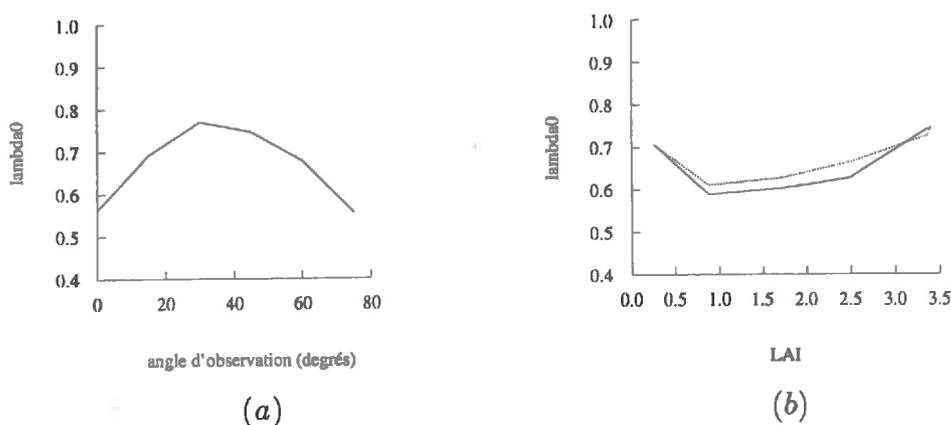


FIG. 5.16 - Ajustement du paramètre de dispersion λ_0 dans l'expression théorique, à partir du P_0 obtenue par la méthode des fantômes ((a) $LIDF$ vrai et en ajustant $\lambda_0(LAI)$, (b) $LIDF$ vrai et en ajustant $\lambda_0(\theta_p)$)

Estimation de la réflectance multiple

Pour les mêmes conditions d'illumination et d'observation que pour les simulations par lancer de rayons (et par double projection), ainsi que pour les mêmes propriétés optiques, on a estimé la réflectance multiple correspondante aux 6 stades phénologiques, avec le modèle *SAIL*, dans les 4 cas décrits précédemment. simulations

La réflectance multiple dans le visible est très petite et peut donc être négligée. Les résultats correspondant au proche infra-rouge apparaissent à la figure 5.17 et sont comparés aux résultats de la figure 5.4 (b) à la figure 5.18. résultats

Si on considère le vrai LAI , plus grand que le LAI effectif étant donné le caractère agrégé du couvert ($\lambda_0 < 1$) (cas a), la réflectance multiple est sur-estimée par rapport aux résultats de référence. En utilisant les valeurs effectives l'estimation est moins biaisée.

Si le paramètre d'agrégation est estimé en fonction de la direction d'observation, indépendamment du stade phénologique, et la $LIDF$ est connue (cas b), l'erreur semble s'homogénéiser par rapport à la visée. En revanche, si λ_0 est ajusté pour chaque stade phénologique, sans

distinguer entre les différentes directions d'observation (cas *c* et *d*), pour les grandes valeurs de *LAI* la réflectance est sur-estimée pour les observations les plus rasantes et sous-estimée à la verticale ; l'erreur est faible pour les petits *LAI*, qui correspondent également à de faibles valeurs de la diffusion multiple.

conclusion

L'erreur commise dans l'estimation de la réflectance multiple dans l'infra-rouge, par rapport au lancer de rayons, est plus faible en utilisant un $\lambda_0(LAI)$, indépendamment de la direction d'observation si la *LIDF* est connue ou ajustée à partir d'un angle moyen. Ceci est cohérent avec la conclusion à laquelle nous sommes arrivés précédemment, lors de l'étude du P_0 . D'un point de vue pratique, le cas (*d*) ($\lambda_0(LAI)$ et $\bar{\theta}_l$) est plus facilement applicable, dans la mesure où il permet de travailler avec un seul stade phénologique et sans connaître explicitement la *LIDF* du couvert.

5.5 Évaluation du modèle

La réflectance simple a été estimée par double projection à partir de la maquette et la réflectance multiple avec le modèle *SAIL*, en considérant les valeurs effectives des variables d'entrée. La somme de ces deux résultats constitue la réflectance totale obtenue par le modèle rapide proposé.

Afin d'évaluer l'intérêt de ce modèle, on compare la réflectance ainsi estimée à la réflectance obtenue par lancer de rayons et aussi à celle donnée par le modèle *SAIL* pour évaluer l'amélioration proposée.

Les régressions par rapport au modèle de référence (lancer de rayons) apparaissent à la figure 5.19 et les histogrammes des différences par rapport au modèle de référence à la figure 5.20.

1. avec le modèle *SAIL* (*LAI* et *LIDF* vrais) :

$$R : R^2 = 0.96, RMSE = 0.010$$

$$IR : R^2 = 0.53, RMSE = 0.029$$

2. avec le modèle rapide proposé ($\lambda_0(LAI)$ et θ_l) :

$$R : R^2 = 0.99, RMSE = 0.003$$

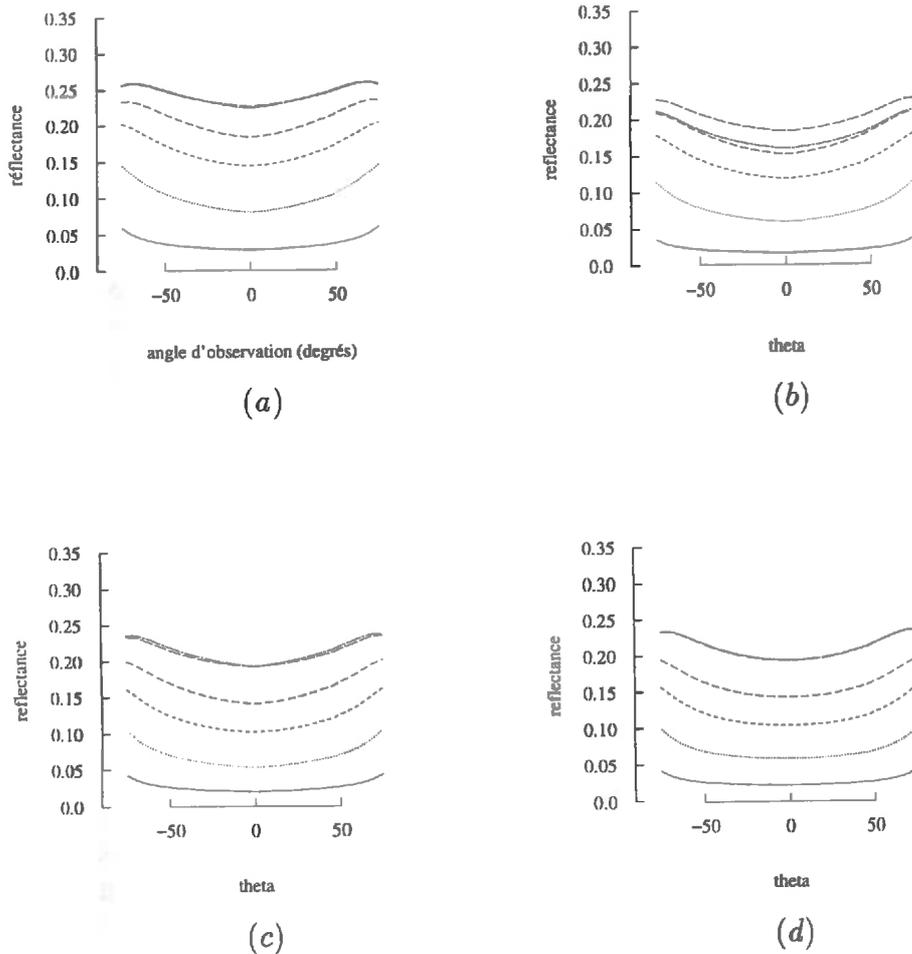


FIG. 5.17 – Réflectance multiple dans le proche infra-rouge estimée avec le modèle SAIL (plan principal, Soleil à 45°): (a) en considérant les vraies valeurs de LAI et de LIDF des maquettes, (b) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(\theta_p)$, (c) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(\text{LAI})$ et (d) en considérant θ_1 et $\lambda_0(\text{LAI})$ (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

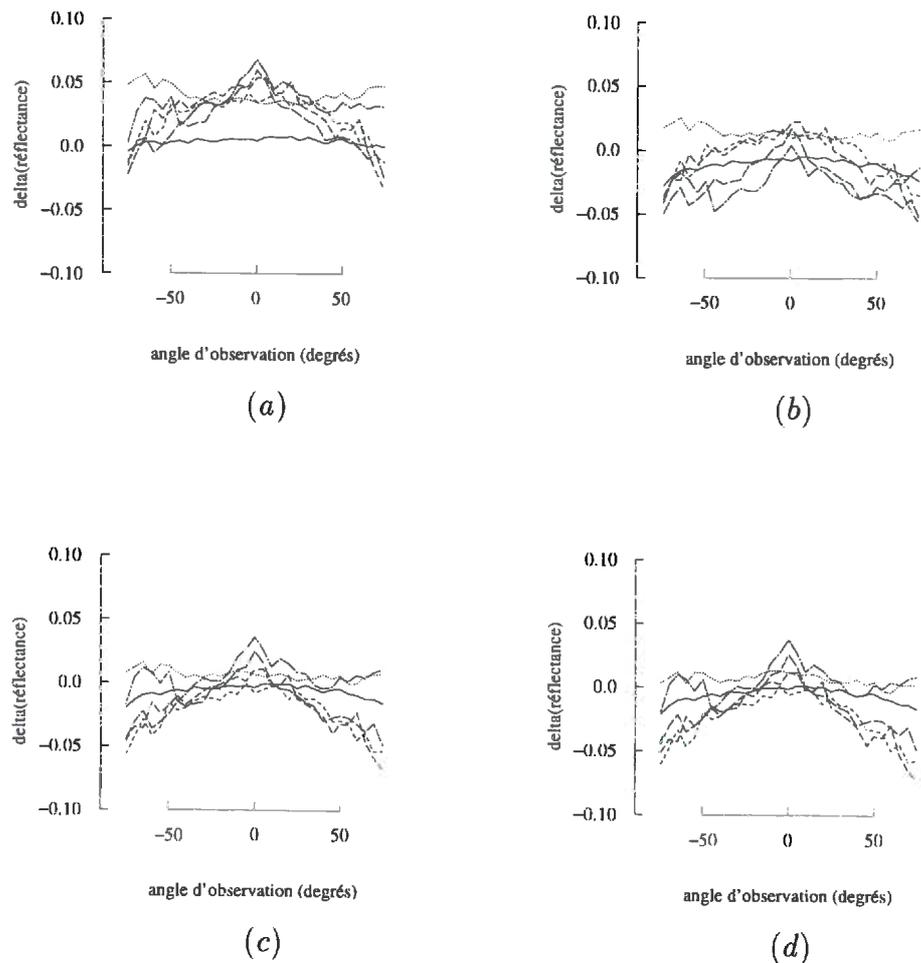


FIG. 5.18 – Différence entre la réflectance multiple dans le proche infra-rouge estimée par lancer de rayons et par le modèle SAIL : (a) en considérant les vraies valeurs de LAI et de LIDF des maquettes, (b) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(\theta_p)$, (c) en considérant la vraie LIDF et $\lambda_0(LAI)$ et (d) en considérant θ_i et $\lambda_0(LAI)$ (stades phénologiques de 1 (—) à 6 (-.-.-))

IR: $R^2 = 0.95$, $RMSE = 0.019$

L'utilisation du *LAI* vrai dans le modèle *SAIL* conduit à une sous-estimation de la réflectance dans le visible et à une sur-estimation importante dans le proche infra-rouge (les résultats sont très biaisés), en plus d'une assez forte dispersion dans les deux cas. La nécessité de prendre en compte le caractère agrégé du couvert ($\lambda_0 < 1$) est donc justifiée.

Le modèle rapide élimine le biais et la dispersion dans le visible. Étant donnée la faible contribution de la réflectance multiple dans cette bande spectrale, on retrouve ici la précision obtenue avec la double projection. Dans le proche infra-rouge la sur-estimation disparaît et on observe même une légère sous-estimation de la réflectance.

5.6 Conclusion

Les modèles de réflectance basés sur des techniques de lancer de rayons sont très précis. Nous les avons considérés comme des références. Étant donné que ce type de modèle est très lent, nous avons proposé un modèle beaucoup plus rapide et capable d'utiliser la description de la structure du couvert telle que fourni par les maquettes informatiques 3D de maïs, construites selon les chapitres précédents.

*La diffusion simple est estimée par double projection, ce qui permet d'obtenir une précision très proche de celle obtenue par lancer de rayons. La réflectance multiple est estimée par le modèle *SAIL*, en considérant une valeur effective du *LAI* du couvert, afin de prendre en compte l'agrégation des feuilles. Cette valeur est ajustée à partir du P_0 directionnel de la maquette, obtenu par la méthode des fantômes ou par projection, de manière indépendante pour chaque stade phénologique. La faible sensibilité de la réflectance multiple à la description de la *LIDF*, permet de travailler avec un angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). L'estimation simultanée du $LAI_{eff}(\lambda_0)$ et du θ_l à partir du P_0 impose l'interdépendance de ces deux paramètres et empêche de les considérer séparément.*

*Nous avons constaté le bon accord entre les résultats obtenus avec ce modèle rapide et le modèle de référence. Il montre une amélioration par rapport au modèle *SAIL*, plus classique, très rapide et très utilisé.*

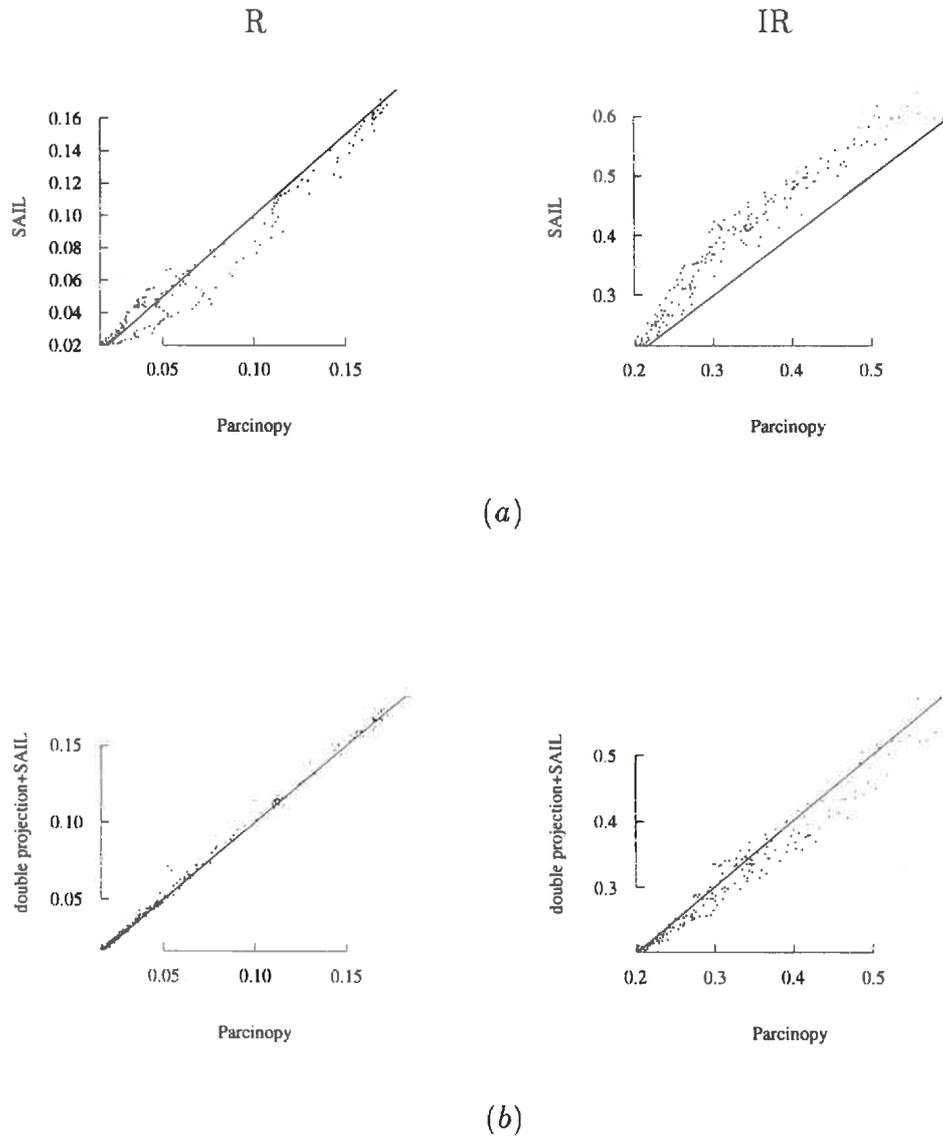
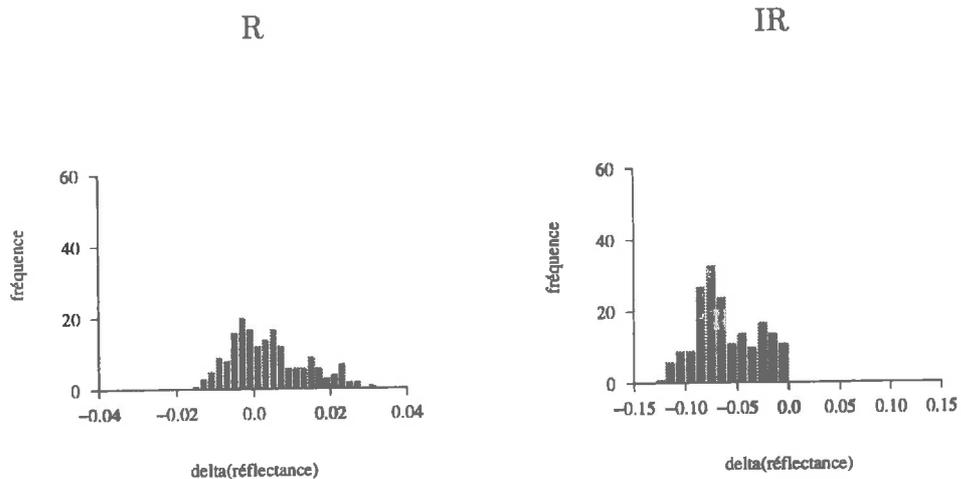
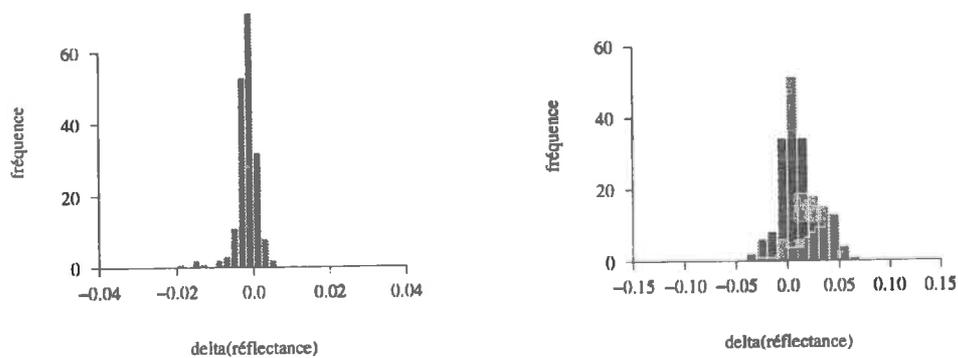


FIG. 5.19 – Comparaison entre la réflectance de référence (lancer de rayons) et la réflectance estimée par le modèle SAIL (a) et par le modèle rapide proposé (b)



(a)



(b)

FIG. 5.20 - *Histogramme des différences entre la réflectance de référence (lancer de rayons) et la réflectance estimée par le modèle SAIL (a) et par le modèle rapide proposé (b)*

Mais les validations réalisées dans le présent chapitre se sont limitées à la comparaison entre modèles. Une vraie validation passe forcément par la comparaison des simulations avec des données expérimentales. Cette validation sera effectuée de manière conjointe avec la validation du modèle de structure 3D du couvert.

Chapitre 6

Validation du modèle rapide proposé

6.1 Introduction

Le travail présenté jusqu'ici a consisté à développer un modèle de transfert radiatif opérationnel, s'appuyant sur une description réaliste du couvert. Par rapport au modèle de référence (lancer de rayons stochastique), le modèle proposé s'est avéré précis et rapide. Ce modèle doit nous fournir des estimations réalistes de la réflectance d'un couvert de maïs, caractérisé par un stade phénologique, une vigueur, une hauteur des plantes et une densité de semis, pour lequel on connaît les propriétés optiques.

Les objectifs de cette partie sont :

objectifs

1. tester la souplesse du modèle de description de la structure du maïs pour construire des maquettes qui reproduisent bien les parcelles étudiées (*LAI*, forme des feuilles, densité, ...), en analysant la pertinence des variables d'entrée choisies, ainsi que des fonctions de distribution des différents paramètres. Les plantes construites par le modèle sont comparées aux photos des silhouettes des plantes observées et la relation entre le *LAI* des maquettes et la taux de couverture associé est analysée par rapport aux valeurs moyennes expérimentales.

2. évaluer la capacité du modèle rapide proposé à simuler de manière réaliste la variation spectrale, directionnelle et temporelle de la réflectance de cultures de maïs. Pour cela, des mesures de réflectance, réalisées sur le terrain, sont comparées à des simulations du modèle. Sa précision et sa sensibilité à la géométrie du couvert et aux propriétés optiques sont ainsi évaluées.

Trois expérimentations particulières sont étudiées :

1. **Expérimentation INRA 90** : Des données déjà existantes ont été utilisées. Elles incluent des visées à différents angles d'azimut et à 45° de zénith. Ces mesures ont été prises à différentes heures de la journée, sur des cultures de faible développement.
2. **Expérimentation INRA 97** : Des mesures directionnelles dans le plan *SPOT* ont été prises pour 2 stades phénologiques du même échantillon.
3. **Expérimentation Alpilles 97** : Il s'agit dans ce cas de mesures à la verticale, sur des couverts de même stade phénologique mais de vigueur différentes.

L'ensemble des cas étudiés représente une variation de *LAI* (7), de phyllochrones (4), de variétés (3), de densités (3) et de positions du Soleil (11).

6.2 Matériel et méthodes

6.2.1 Expérimentation INRA 90

Pendant l'été 90, une campagne expérimentale a été réalisée sur le domaine expérimental de l'INRA de Montfavet, en collaboration avec plusieurs laboratoires du Royaume Uni, ainsi que la station de Bioclimatologie de l'INRA de Grignon. Le détail de la méthodologie et des résultats est décrit dans Baret, 1992. Seules les principales caractéristiques et données utilisées seront présentées ici.

Parmi les différentes mesures réalisées pendant l'expérimentation, on s'est intéressé aux mesures de réflectance effectuées sur 2 parcelles

semées le 28 juin 1990. L'une est semée dans le sens N-S et l'autre dans le sens E-W, avec une densité dans les deux cas de 12 *pl/m*². La distance entre rangs est de 0.55 *m* et l'espacement entre plantes de 0.15 *m*. Les mesures de réflectance ont été réalisées le 27 juillet 1990 avec un système de mesure particulier appelé l'Araignée.

Mesures biologiques

Des mesures biologiques ont été réalisées de manière simultanée aux mesures radiométriques. Les hauteurs et les dimensions des feuilles ont été mesurées de manière détaillée sur un échantillon de 20 plantes.

Afin d'estimer de manière non destructive l'indice foliaire des zones échantillonnées par les radiomètres, une relation empirique a été établie entre la hauteur de ces plantes (définie comme la hauteur de l'extrémité de la dernière feuille) et leur surface :

$$S = 0.4867 + 5.2675h + 0.5584h^2$$

La hauteur d'un nombre représentatif de plantes de chaque parcelle a été mesurée et la surface foliaire moyenne a été estimée par cette loi linéaire.

On a ainsi estimé le *LAI* de la parcelle, en connaissant la surface *LAI* foliaire moyenne d'une plante et la densité de semis :

LAI de la parcelle *NS* : 0.44

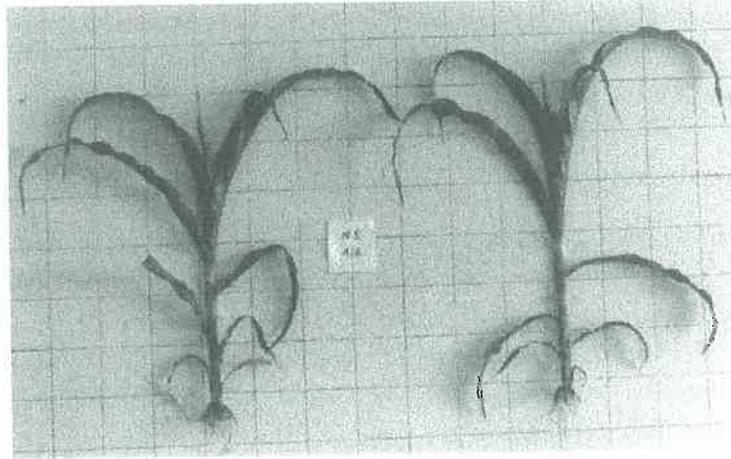
LAI de la parcelle *EW* : 1.0

Photos

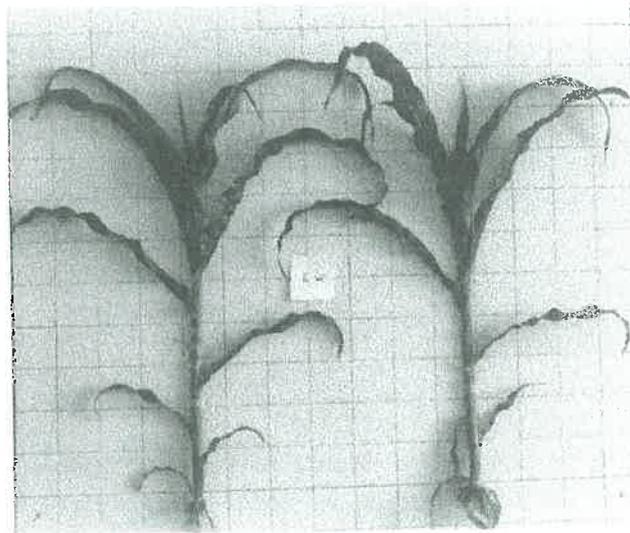
Des photos de silhouettes ont été prises pour toutes les plantes prélevées. Cela a permis d'établir le stade phénologique des plantes au moment des mesures : la feuille 14 commençait à apparaître. La figure 6.1 montre par exemple deux plantes appartenant à chacune des deux parcelles étudiées.

Mesures de réflectance

L'Araignée consiste en un ensemble de radiomètres *CIMEL* situés



parcelle NS



parcelle EW

FIG. 6.1 – INRA 90 : Exemple de photos de silhouettes

à 5 m du sol. Quatre radiomètres supportés par des bras visent le même point dans les quatre directions cardinales, avec une inclinaison de 45° . Un cinquième radiomètre, au centre du système, vise le même point au nadir (voir schéma à la figure 6.2). L'ensemble est supporté par un chariot motorisé qui se déplace sur des rails le long des parcelles.

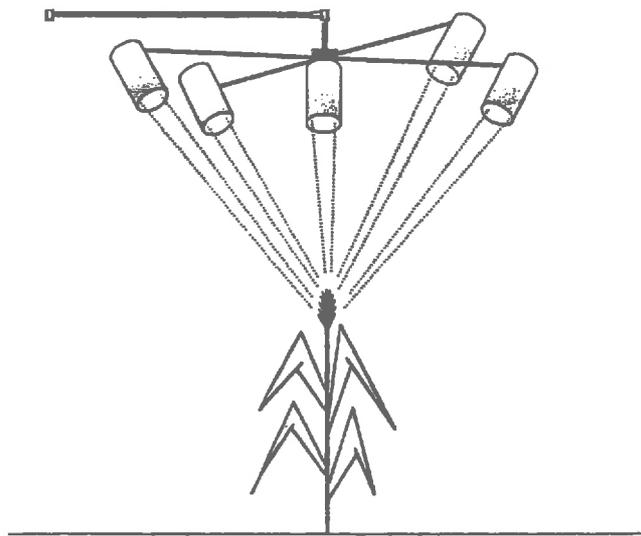


FIG. 6.2 – INRA 90 : Schéma de l'Araignée

Les mesures correspondent aux 3 bandes spectrales des radiomètres *bandes spectrales*
 CIMEL:

- vert : 500 – 590 nm
- rouge : 620 – 680 nm
- proche infra rouge : 790 – 890 nm

Comme dans les chapitres précédents, on travaillera seulement avec le rouge et le proche infra-rouge.

L'angle d'ouverture des radiomètres est de 12° .

Les mesures ont été réalisées à 3 heures dans la journée, qui corres- *Soleil*

pondent à 3 positions du Soleil (le Nord correspondant à 0° d'azimut) :

- SÉRIE 1 : 55.76° de zénith et 95.0° d'azimut,
- SÉRIE 2 : 42.15° de zénith et 111.5° d'azimut,
- SÉRIE 3 : 31.15° de zénith et 133.65° d'azimut,

Chaque mesure a été répétée 4 fois. Un bon accord a été constaté entre les 4 répétitions ($R^2 = 0.997$, $RMSE = 0.006$, $n = 340$), ainsi qu'avec les mesures réalisées avec d'autres spectro-radiomètres (*IRIS* et *SPECTRON*).

Des mesures d'éclairement ont été réalisées simultanément, ce qui a permis de calculer les facteurs de réflectance (à partir de mesures sur des panneaux de référence), ainsi que de décrire les conditions d'irradiance, caractérisées principalement par la fraction diffuse.

Mesure des propriétés optiques

végétation

Les réflectances et transmittances d'un nombre représentatif de feuilles ont été mesurées avec un spectrophotomètre Varian Cary D17 :

bande spectrale	réflectance	transmittance
rouge	0.113	0.058
proche infra-rouge	0.448	0.511

sol

On a considéré pour le sol des propriétés optiques directionnelles, qui correspondent dans le rouge aux mesures réalisées sur des parcelles de sol nu, situées à côté des parcelles étudiées et traversés aussi par les rails sur lesquels se déplaçait le chariot supportant l'Araignée.

SÉRIE 1 :

bande/radiomètre	nadir	N	S	E	W
rouge	0.184	-	0.177	0.307	0.123
proche infra-rouge	0.236	0.206	0.228	0.430	0.170

SÉRIE 2 :

bande/radiomètre	nadir	N	S	E	W
rouge	0.212	-	0.213	0.292	0.141
proche infra-rouge	0.268	0.206	0.269	0.392	0.187

SÉRIE 3 :

bande/radiomètre	nadir	N	S	E	W
rouge	0.238	-	0.252	0.243	0.168
proche infra-rouge	0.297	0.209	0.311	0.319	0.219

À partir de ces mesures et selon le modèle de réflectance directionnelle de Walhall (1985), on a estimé les propriétés hémisphériques du sol :

bande spectrale	série 1	série 2	série 3
rouge	0.192	0.200	0.199
proche infra-rouge	0.263	0.511	0.263

6.2.2 Expérimentation INRA 97

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier la variation directionnelle et temporelle de la réflectance d'un champ de maïs et d'évaluer la capacité du modèle à la simuler. *objectif*

Les mesures ont été réalisées à deux dates (12 et 25 Août), qui correspondent à deux stades phénologiques (13 et 17 feuilles).

Mesures biologiques

Pour chacun des jours de mesures, 3 plantes ont été prélevées à proximité de la zone de mesure radiométrique. Les hauteurs d'insertion et les dimensions de toutes les feuilles ont été mesurées. La surface foliaire moyenne d'une plante a ainsi été estimée : 0.36 m^2 pour la première date et 0.53 m^2 pour la deuxième.

La distance moyenne entre les rangs, qui sont orientés dans le sens N-S, est de 0.75 m ; on estime à 7 le nombre de plantes sur 1.10 m de

rang. La densité de la parcelle est ainsi de $8.5 \text{ plantes}/m^2$. Une différence a été constatée dans l'espacement entre les trois rangs centrales de la zone de mesure : 0.7 et 0.8 m respectivement, comme on peut apprécier à la figure 6.4 qui montre une vue verticale la deuxième journée d'expérimentation (au midi solaire).

Le *LAI* estimé de l'échantillon pour les deux stades phénologiques étudiés est :

date 1 : $LAI = 3.0$

date 2 : $LAI = 4.5$

Photos

En complément des photos des silhouettes des plantes prélevées, de nombreuses photos de la zone de mesure ont été prises, en particulier lors de la deuxième journée d'expérimentation. Elles permettront d'appréhender le réalisme des maquettes construites.

Mesures de réflectance

instrument

L'instrument utilisé, un goniomètre, a été conçu spécialement pour ce type de mesures. Il est composé de deux barres horizontales en T, supportées par trois pieds verticaux, un à chaque extrémité du T. La hauteur des pieds est réglée de manière à situer les barres horizontales juste au dessus du couvert. À l'intersection des barres horizontales, une barre de 3 m est accrochée par une de ses extrémités. Cette barre peut être tournée manuellement de 180° (horizontale, verticale, horizontale dans l'autre sens) dans un plan vertical. Une barre horizontale perpendiculaire à la barre mobile supporte le radiomètre (voir le schéma à la figure 6.3).

échantillon

L'instrument de mesure ne pouvant pas être facilement déplacé, toutes les mesures ont été réalisées au même endroit dans le champ.

Lorsque la barre mobile de l'instrument de mesure est verticale, le champ de visée du radiomètre est un cercle de 0.73 m de diamètre, valeur qui coïncide avec la distance entre deux rangs. Lorsqu'elle est inclinée, le cercle devient une ellipse, plus ou moins allongée, qui contient toujours le centre du cercle observé à la verticale.

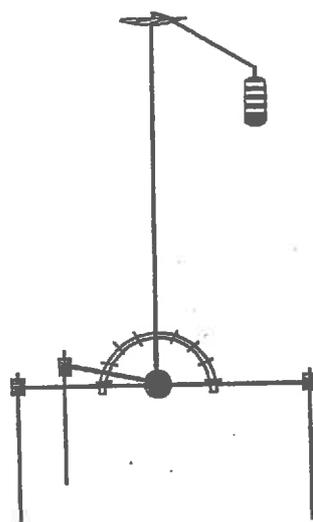


FIG. 6.3 – INRA 97: Schéma du goniomètre

On a considéré dans chaque cas 3 positions du Soleil, correspondant *Soleil* à trois heures particulières dans la journée :

Première date (12 Août, 1997) :

- SÉRIE 1 : 56.4° de zénith et 101.3° d'azimut,
- SÉRIE 2 : 43.2° de zénith et 119.0° d'azimut,
- SÉRIE 3 : 28.6° de zénith et 179.0° d'azimut,

Deuxième date (25 Août, 1997) :

- SÉRIE 1 : 61.8° de zénith et 102.1° d'azimut,
- SÉRIE 2 : 54.8° de zénith et 110.5° d'azimut,
- SÉRIE 3 : 43.5° de zénith et 128.6° d'azimut,



FIG. 6.4 – INRA 97: Vue verticale de la zone de mesure à la date 2

Les mesures ont été réalisées dans le plan de dépointage du satellite *SPOT*, qui correspond à 105° d'azimut, c'est-à-dire à 15° par rapport à la perpendiculaire aux rangs. Les angles zénithaux de visée vont de -60° à 60° , par pas de 10° .

Lors de la première date, les plantes étant petites, les mesures étaient acquises assez rapidement. Il a été possible de réaliser deux séries de mesures (une avec le champ d'observation du radiomètre centré sur le rang et une autre sur l'inter-rang) pour, approximativement, la même position du Soleil. Les résultats des deux répétitions n'étant pas très différents, on a considéré la moyenne des deux.

La deuxième journée d'expérimentation, ayant constaté la faible sensibilité des mesures à la position (rang ou inter-rang) de l'instrument et étant donné la difficulté de manoeuvre, une seule série de mesures a été réalisée pour chaque position du Soleil.

panneau

Des mesures de réflectance verticale ont été prises régulièrement sur un panneau de référence (halon), en bordure du champ, qui ont permis de calculer les facteurs de réflectance. Les conditions dans lesquelles ces mesures ont été réalisées n'étaient pas idéales : la proximité du champ

et d'une haie brise-vent a pu induire une légère erreur.

Mesure des propriétés optiques

Plusieurs feuilles de maïs ont été prélevées et leur spectre de réflectance a été mesuré avec un spectro-radiomètre *NIRS 6500*, ce qui a permis de calculer leur réflectance dans les 2 bandes spectrales étudiées. Compte tenu de l'absence de mesures de transmittance, une relation linéaire a été ajustée, avec le modèle *PROSPECT* de propriétés optiques des feuilles (Jacquemoud et Baret, 1991), pour estimer la transmittance à partir de la réflectance mesurée : $\tau/\rho = 1.25$ pour toutes les longueurs d'onde. *végétation*

bande spectrale	réflectance	transmittance
rouge	0.102	0.127
proche infra-rouge	0.436	0.545

Des mesures de réflectance sur du sol nu ont également été réalisées : *sol*

- **première date** : après chaque série de mesures de réflectance sur la végétation, les plantes d'une zone à proximité de l'échantillon de mesure ont été coupées et l'appareil de mesure y était déplacé. On a ainsi réalisé des mesures directionnelles de réflectance du sol dans le rouge, selon le même protocole que pour la végétation, sur un sol similaire à celui du couvert étudié et dans des conditions d'éclairement équivalentes. À cause de la proximité des plantes, dont la contribution à la composante diffuse dans l'infra-rouge est sûrement non négligeable, la réflectance du sol dans cette bande spectrale n'a pas été mesurée directement, mais estimée à partir de l'ajustement de la droite du sol (fig. 6.5).
- **deuxième date** : étant donnée la difficulté de déplacer l'instrument de mesure, les plantes étant très hautes, la réflectance du sol nu n'a pas été mesurée. On a considéré, pour les deux bandes spectrales, les valeurs moyennes au nadir obtenues à la première date.

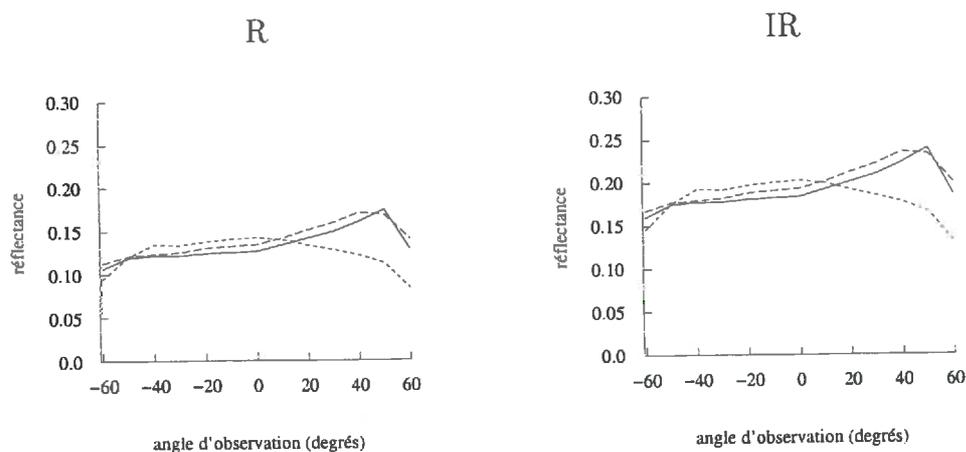


FIG. 6.5 – INRA 97, première date : Propriétés optiques du sol dans le rouge et le proche infra-rouge (— : série 1, - - - : série 2, - . - . : série 3)

bande spectrale	
rouge	0.131
proche infra-rouge	0.188

6.2.3 Expérimentation Alpilles 97

objectif

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier la réflectance au nadir sur des parcelles de vigueur différente, pour plusieurs positions du Soleil, afin de mieux comprendre les problèmes rencontrés dans l'étude précédente (INRA 90).

Les mesures ont été prises dans un champ d'agriculteur faisant partie du site expérimental *Alpilles*. Elles ont été réalisées sur trois zones du même champ, correspondant à la même densité et date de semis, mais ayant différentes hauteurs des plantes. Chaque zone inclut une largeur de 3 rangs et un total d'une soixantaine de plantes.

L'expérimentation a été réalisée le 30 juillet 1997.

Mesures biologiques

Pour chaque échantillon, 5 plantes ont été mesurées sur place : longueur, largeur et hauteur d'insertion des feuilles.

Une relation linéaire a été établie entre la hauteur maximale, mesurée du sol jusqu'à l'extrémité de la dernière feuille apparue, et la surface foliaire des plantes mesurées (fig. 6.6 (a)) :

$$S = 0.412 h - 0.203 \quad (R^2 = 0.92, RMSE = 0.037 \text{ m}^2, n = 15)$$

La hauteur de toutes les plantes a été mesurée. Cela a permis d'estimer la surface foliaire moyenne des plantes de chaque échantillon : 0.36, 0.41 et 0.47 m^2 , respectivement.

On a estimé la densité de semis, en mesurant la distance entre rangs (0.76 m) et la distance moyenne entre deux plantes consécutives (0.185 m). Ceci correspond à une densité de 7 plantes/ m^2 .

Les valeurs de LAI correspondant aux trois échantillons sont : LAI

$$LAI_1 = 2.34$$

$$LAI_2 = 2.86$$

$$LAI_3 = 3.26$$

Une relation linéaire a également été ajustée entre la hauteur maximale et la hauteur du cornet (dernier point d'insertion visible sur la tige) des plantes mesurées (fig. 6.6 (b)) :

$$h_c = 1.037 h - 0.656 \quad (R^2 = 0.96, RMSE = 0.063 \text{ m}, n = 15)$$

Ceci nous a permis d'estimer la hauteur du cornet des plantes de chaque échantillon. Les histogrammes apparaissent à la figure 6.7. Cette valeur est intéressante, car plus facile à obtenir sur la maquette que la hauteur de l'extrémité de la dernière feuille de la plante.

Mesures de réflectance

Les mesures de réflectance ont été prises à la verticale, avec un radiomètre CIMEL, installé sur une perche, à 5 m de hauteur.

On a réalisé deux séries de mesures sur chaque échantillon, qui correspondent à deux positions du Soleil :

- 10 h : 45.0° de zénith et 108.5° d'azimut

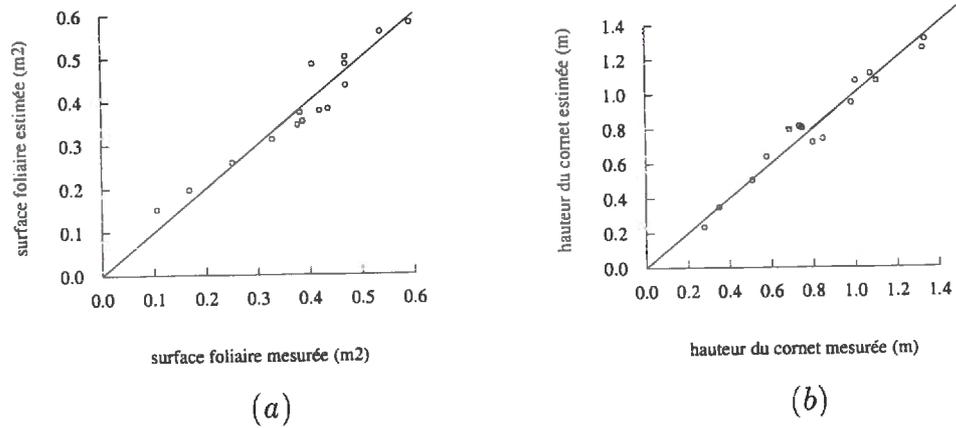


FIG. 6.6 – Alpilles 97: (a) Surface foliaire mesurée et celle estimée à partir de la hauteur des plantes, (b) hauteur mesurée des cornets des plantes et celle estimée à partir de la hauteur totale

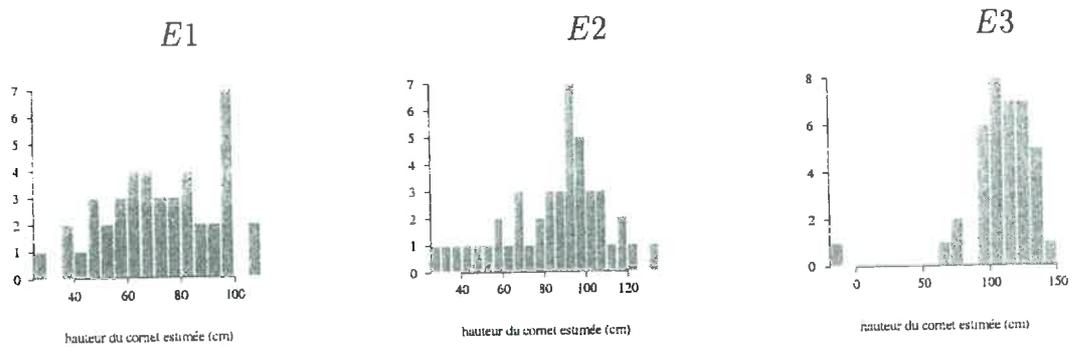


FIG. 6.7 – Alpilles 97: Histogrammes de la hauteur estimée des cornets des plantes

– 13 h : 25.2° de zénith et 172.8° d'azimut

Régulièrement, la réflectance du panneau de référence (halon) était mesurée, ce qui a permis de calculer les facteurs de réflectance.

Propriétés optiques

Les spectres de réflectance de plusieurs feuilles ont été obtenus avec un spectro-radiomètre *NIRS* 6500. Le modèle *PROSPECT* (Jacquemoud et Baret, 1990) a été utilisé pour estimer la transmittance en fonction de la réflectance mesurée ($\tau/\rho = 1.23$). On a ainsi estimé les propriétés optiques de la végétation :

bande spectrale	réflectance	transmittance
rouge	0.099	0.114
proche infra-rouge	0.426	0.524

Afin de caractériser la réflectance du sol, des mesures ont été réalisées sur du sol nu. Lors de la première série de mesures (10h), il y avait beaucoup d'ombre portée sur les inter-rangs, étant donnée leur orientation E-W. La réflectance du sol a été mesurée dans une zone en dehors des échantillons, dans laquelle on a enlevé les plantes juste au moment des mesures. Lors de la deuxième série de mesures (13h), l'ombre des plantes tombait sur les rangs, en laissant les inter-rangs bien éclairés. On a pu ainsi mesurer la réflectance du sol dans le visible directement sur les inter-rangs, où la contribution de la diffusion multiple est négligeable, en supposant que la contribution du diffus incident est également négligeable. La réflectance dans le proche infra-rouge est estimée à partir de la droite du sol.

bande	10h	13h E1	13h E2	13h E3
rouge	0.119	0.220	0.199	0.204
proche infra-rouge	0.204	0.299	0.272	0.282

Le tableau suivant résume l'ensemble des expérimentations réalisées :

exp	LAI	densité	Soleil	observateur	rangs
INRA 90	0.57	12	55.76°, 95.00°	0°, 0°	N-S
	1.3		42.15°, 111.50°	45°, 0°	
			31.15°, 133.65°	45°, 90°	E-W
INRA 97	3.2	8.5	56.40°, 101.3°	-60°, 105°	N-S
			43.16°, 119.0°	-50°, 105°	
			28.61°, 179.0°	...	
	4.5		61.83°, 102.08°	0°, 105°	N-S
			54.75°, 110.48°	...	
43.47°, 128.57°	50°, 105°	60°, 105°			
Alpilles 97	2.34	7	45.00°, 108.50°	0°, 0°	N-S
	2.86		N-S		
	3.26		25.14°, 172.81°		N-S

6.3 Résultats

Pour chaque cas, une maquette d'une petite parcelle est construite avec le modèle du **chapitre 3**, selon les techniques du **chapitre 4** (24 plantes, représentées avec la triangulation de référence, sans gaufrage). Cette maquette reproduit au mieux la forme des plantes, en utilisant comme entrée le stade phénologique et la densité et en ajustant le LAI et la hauteur finale de telle manière que le LAI de la maquette et la hauteur du cornet des plantes qui la composent correspondent le mieux aux valeurs observées au moment de la mesure radiométrique. De même, les fonctions de distribution des paramètres qui décrivent la forme des feuilles ont été adaptées de manière à reproduire le plus précisément la silhouette des plantes observées (azimut des feuilles, proportion de feuilles cassées, forme du cornet, ...)

À partir du P_0 directionnel, obtenu par projection, on estime un LAI effectif et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. La réflectance est estimée avec le modèle de transfert radiatif présenté au **chapitre**

5 (réflectance simple par double projection, réflectance multiple par le modèle *SAIL*, en considérant le *LAI* effectif et une *LIDF* ellipsoïdale ajustée à partir de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles), pour les mêmes positions du Soleil et de l'observateur que sur le terrain.

6.3.1 Construction des maquettes

INRA 90

Une maquette a été construite pour chacune des parcelles, en essayant de créer des plantes qui ressemblent aux plantes photographiées (fig. 6.1) et d'approcher au mieux la valeur du *LAI* estimé à partir des mesures biologiques. Les mesures de longueurs des feuilles correspondent aux parties vues. De manière à obtenir le *LAI* correspondant aux plantes complètes, c'est-à-dire en incluant les parties cachées et la tige, on a considéré pour la construction des maquettes une augmentation d'environ 30% de la surface foliaire estimée.

Les valeurs suivantes ont été attribuées aux variables d'entrée du modèle :

parcelle	phyllochrone	nb feuilles	vigueur	hauteur finale
<i>NS</i>	10.0	19-22	0.18	2.2
<i>EW</i>	10.0	21-23	0.24	2.4

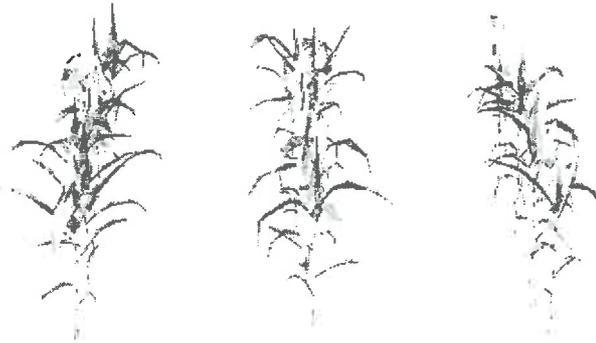
La hauteur moyenne du cornet des plantes simulées est de 0.28 m pour la parcelle *NS* et 0.4 m pour la parcelle *EW*, ce qui correspond bien aux plantes observées.

Les distances mesurées entre plantes et entre rangs ont été reproduites dans les maquettes, de manière à simuler la densité de plantes observée.

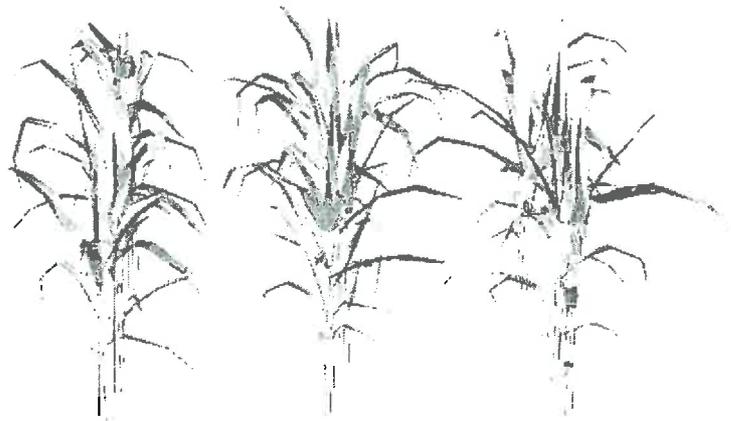
Une représentation des maquettes apparaît à la figure 6.8. On constate la différence de vigueur entre les deux parcelles.

INRA 97

Deux maquettes ont été construites, qui représentent le couvert dans les deux stades phénologiques étudiés. La différence d'espacement entre



parcelle NS



parcelle EW

FIG. 6.8 - INRA 90 : Maquettes générées correspondant aux 2 parcelles



(a)



(b)

FIG. 6.9 – INRA 97: Exemple de plantes correspondant à la première date d'expérimentation : (a) photos de silhouettes, (b) simulation du modèle

les 3 rangs observés par le radiomètre (0.7 et 0.8 *m* respectivement) a été reproduite sur les maquettes.

Pour la première date on a pris comme référence les photos des silhouettes, de manière à reproduire au mieux les plantes mesurées, ainsi que le *LAI* estimé. La figure 6.9 montre la photo des silhouettes et trois plantes de la maquette, avec les 2 rangs différemment espacés.

Lors de la deuxième date d'expérimentation de nombreuses photos de la zone de mesure ont été prises, ce qui a permis de faire une maquette très ressemblante: différents espacements des rangs, différentes hauteurs des plantes des 3 rangs, quelques trous dans la végétation, qu'on a simulé en enlevant les plantes correspondantes, orientation préférentielle des feuilles perpendiculaire aux rangs, ... À la figure 6.10 apparaît un exemple d'une plantes photographiée, ainsi que quelques plantes de la maquette.

Les valeurs des variables d'entrée du modèle de construction de la maquette ont été les suivantes :

date	phyllochrone	nb feuilles	vigueur	hauteur finale
1	13.0	19	0.6	1.9
2	17.8	19	0.6	3

Dans les deux cas, on a considéré la même vigueur des plantes. En revanche, la variété de maïs n'étant pas la même que celle utilisée pour le développement du modèle d'évolution temporelle (données 94), il a été nécessaire de considérer des valeurs différentes de hauteur finale des plantes, de manière à bien ajuster la hauteur du cornet des plantes mesurées (0.45 et 1.40, respectivement).

Alpilles 97

On a considéré la même date de semis pour les 3 échantillons et par conséquent le même stade phénologique. Les valeurs des variables d'entrée du modèle ont été les suivantes :

échantillon	phyllochrone	nb feuilles	vigueur	hauteur finale
1	15.4	17	0.34	2
2	15.4	17	0.41	3
3	15.4	17	0.44	3.6

On a pu ainsi ajuster les valeurs de LAI estimées sur le terrain et obtenir des plantes dont la hauteur moyenne du cornet correspond bien aux hauteurs observées : entre 60 et 70 *cm* pour l'échantillon 1, autour d'un mètre pour l'échantillon 2 et entre 1.2 et 1.4 *m* pour l'échantillon 3.

Le LAI des maquettes (2.35, 2.84 et 3.26), très proches de celles mesurées, incluent les tiges et supposent donc une légère sous-estimation des LAI s réels.

6.3.2 Estimation du LAI effectif et de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles

À partir des maquettes, le P_0 directionnel a été estimé par projection (§ 5.4.2), en considérant plusieurs angles zénithaux repartis uniformément entre 0 et 75°. L'angle azimutal a été considéré supérieur à 40°, étant donné la faible dépendance du P_0 directionnel à l'orientation azimutale dans ce cas (Andrieu et Sinoquet, 1993).

En ajustant l'expression 5.1 ($P_0(\theta_p) = e^{-\lambda_0 \times \frac{G(\theta_p, g(\theta_l))}{\cos(\theta_p)} \times LAI}$) on a obtenu les LAI effectifs (LAI_{eff}) et les angles moyens d'inclinaison des feuilles (θ_l) pour chaque parcelle étudiée (§ 5.4.2).

Le taux de couverture, C , est estimé comme :

$$C = 1 - P_0(0) \quad (6.1)$$

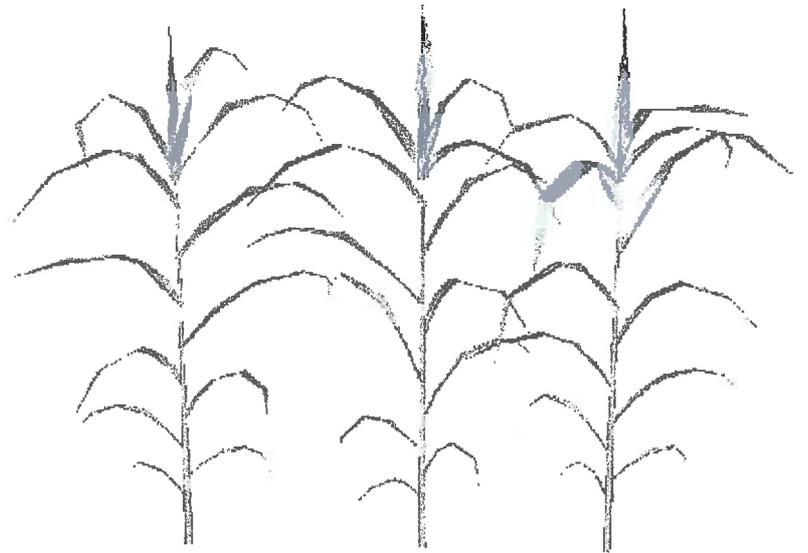
Comme la fraction de trous, le taux de couverture peut être relié au LAI (, 19) :

$$C = 1 - e^{-K \times LAI} \quad (6.2)$$

la valeur moyenne de K pour un couvert réel de maïs étant de 0.34 (Andrieu, communication personnelle).



(a)



(b)

FIG. 6.10 – INRA 97: Exemple de plantes correspondant à la deuxième date d'expérimentation: (a) photos de silhouettes, (b) simulation du modèle

INRA 90

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour les paramètres ajustés :

parcelle	λ_0	LAI_{eff}	θ_l	C	K
NS	0.93	0.53	67°	0.14	0.38
EW	0.78	1.02	74°	0.31	0.34

Les valeurs de λ_0 , inférieures à 1 dans les deux cas, indiquent un caractère agrégé des deux parcelles, en particulier de la parcelle NS, qui a le plus petit LAI et un faible taux de couverture. Les valeurs du paramètre K sont en bon accord avec les valeurs expérimentales mesurées sur le maïs.

La comparaison entre le P_0 estimé par projection et l'ajustement de l'expression 5.1 apparaît à la figure 6.11. On constate le bon accord entre les valeurs estimées et ajustées, notamment à 0° et 45°.

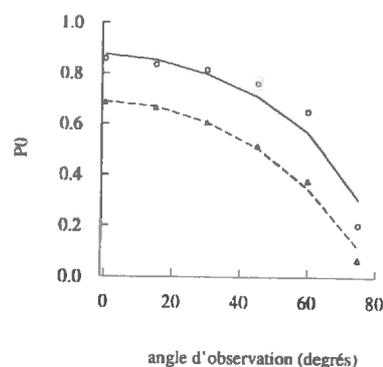


FIG. 6.11 – INRA 90 : P_0 directionnel estimé par projection (o : parcelle NS, Δ : parcelle EW) et ajusté selon l'expression théorique (— : parcelle NS, : parcelle EW)

On observe en projection verticale des maquettes (fig. 6.12) une position azimutale des plantes aléatoire et une rotation azimutale importante des feuilles, qui fait qu'elles ne se trouvent pas sur un seul plan vertical. Cela est assez réaliste, étant données les faibles valeurs de LAI.

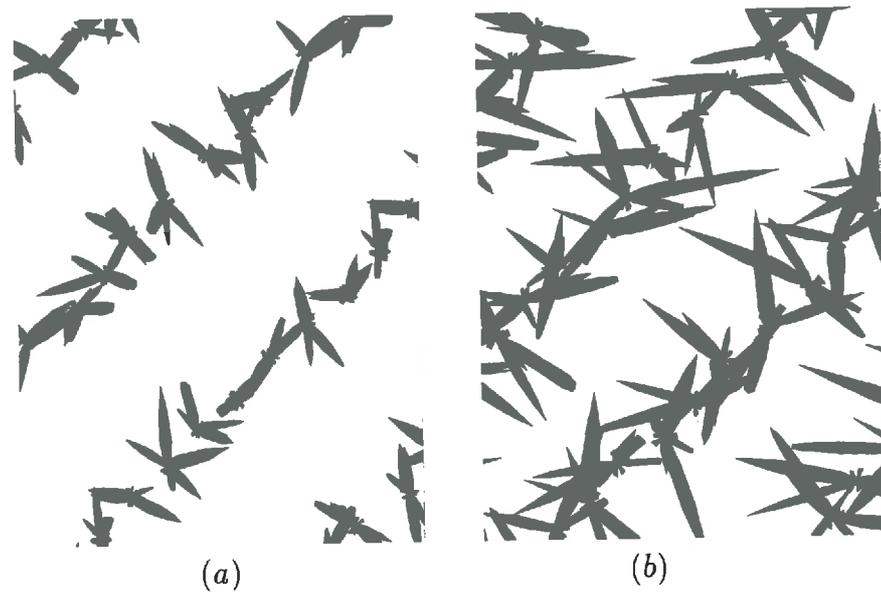


FIG. 6.12 – INRA 90: Projection verticale des maquettes ((a) parcelle NS, (b) parcelle EW)

INRA 97

Les valeurs suivantes ont été obtenues à partir des maquettes :

date	λ_0	LAI_{eff}	θ_l	C	K
1	0.61	2.06	48°	0.63	0.32
2	0.85	4.16	70°	0.71	0.25

On constate le caractère agrégé des plantes dans les deux dates ($\lambda_0 < 1$), plus marqué quand les plantes sont petites à cause de la plus grande proportion de feuilles dans le cornet. Le taux de couverture augmente logiquement avec l'augmentation de la surface foliaire. La valeur du paramètre K est inférieure à la valeur moyenne pour un champ de maïs adulte, ce qui s'explique par la prise en compte dans le calcul du LAI des parties cachées des feuilles, ainsi que de la surface des tiges. L'angle moyen d'inclinaison des feuilles des plantes adultes est du même ordre que pour les parcelles l'expérimentation INRA 90, et inférieur dans le cas des jeunes plantes.

La figure 6.13 montre les valeurs de P_0 estimées par projection et ajustées.

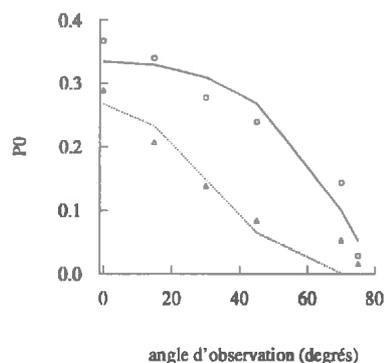


FIG. 6.13 – INRA 97: P_0 directionnel estimé par projection (○ : date 1, △ : date 2) et ajusté selon l'expression théorique (— : date 1, - - - : date 2)

La figure 6.14 montre la projection verticale des maquettes. Le taux de couverture correspond à la proportion de noir sur le total de l'image. On constate l'important écartement des feuilles de la première maquette. Quant à la deuxième, on peut comparer la figure 6.14 (b) à la figure 6.4, qui est une photo de la zone de mesure à la verticale, et observer le différent espacement entre les rangs, l'orientation des feuilles perpendiculaire aux rangs et l'existence de trous dans la végétation.

Alpilles 97

À partir du P_0 directionnel on a ajusté les valeurs suivantes (fig. 6.15):

échantillon	λ_0	LAI_{eff}	θ_l	C	K
1	0.71	1.06	61°	0.49	0.24
2	0.74	2.10	60°	0.57	0.30
3	0.75	2.46	63°	0.59	0.27

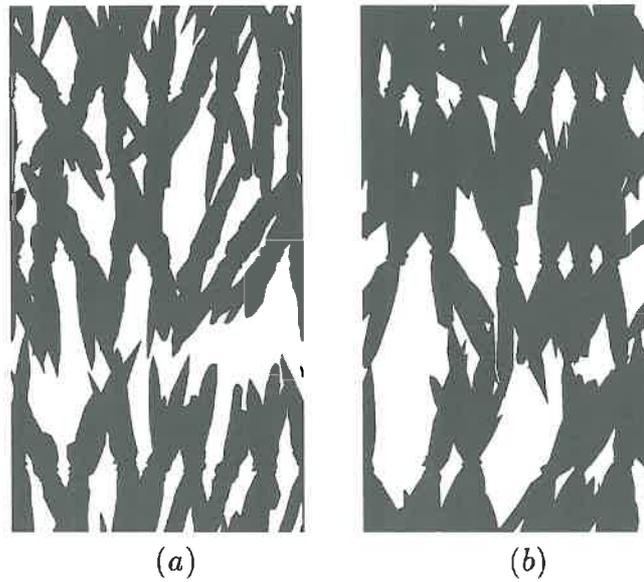


FIG. 6.14 – INRA 97: Projection verticale des maquettes ((a) date 1, (b) date 2)

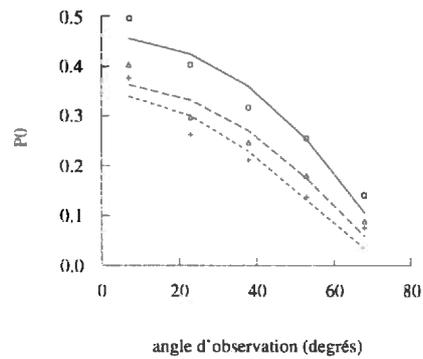


FIG. 6.15 – Alpillles 97: P_0 directionnel estimé par projection (\circ : échantillon 1, Δ : échantillon 2, $+$: échantillon 3) et ajusté selon l'expression théorique (—: échantillon 1, ---: échantillon 2, - - - -: échantillon 3)

La valeur du λ_0 est similaire pour les trois échantillons, en augmentant légèrement avec le *LAI*. Ceci indique que l'agrégation des feuilles est plus importante lorsque les plantes sont plus vigoureuses et le taux de couverture plus fort. Comme précédemment et pour les mêmes raisons, le paramètre K prend des valeurs inférieures à la moyenne expérimentale de 0.34. L'angle moyen des feuilles estimé est similaire dans les trois cas.

6.3.3 Simulation de la réflectance

Selon le modèle présenté dans le chapitre précédent :

- la réflectance simple est estimée par double projection avec le modèle *bvis*, en considérant les positions des radiomètres et du Soleil au moment des mesures et, dans chaque cas, les propriétés optiques du sol qui apparaissent dans les tableaux précédents ;
- la réflectance multiple est estimée avec le modèle *SAIL*, en considérant les valeurs de θ_l et λ_0 ajustées par rapport au P_0 estimé par projection, et une valeur du paramètre de *hot-spot* de 0.3, correspondant approximativement au rapport entre longueur moyenne des feuilles et hauteur du couvert. On a utilisé dans ce cas, lorsque cela a été possible, les propriétés du sol hémisphériques.

Les mêmes simulations sont réalisées avec le modèle *SAIL*, en considérant les valeurs de *LAI* mesurées et des *LIDF* ellipsoïdales (Campbell, 1988) ayant un angle moyen d'inclinaison des feuilles de 57° , correspondant à l'angle moyen ajusté dans le chapitre précédent sur l'ensemble des stades phénologiques.

INRA 90

Les résultats des simulations apparaissent à la figure 6.18, qui montre les régressions par parcelle et par position du Soleil. On distingue à chaque fois les 4 répétitions de chaque mesure.

Dans le cas de la parcelle *NS*, le *LAI* est faible et on a une grande proportion de sol vu. Étant donné que le sol est plus réfléchissant que la végétation dans le visible, contrairement au proche infra-rouge, l'écart

entre les réponses dans ces deux bandes est peu important. En revanche, le LAI de la parcelle EW étant plus grand, les réponses du couvert dans le visible et le proche infra-rouge sont assez différentes, et on distingue bien les deux nuages de points qui correspondent aux deux domaines spectraux.

Lors de la première série de mesures, (Soleil à $55^\circ, 95^\circ$), le radiomètre Est ($45^\circ, 90^\circ$) se trouve dans une position proche du *hot-spot*. Sa réponse est plus forte que celle des autres radiomètres, aussi bien dans le visible que dans le proche infra-rouge. Les figures 6.16 et 6.17 illustrent ce que voit chaque radiomètre dans ce cas, pour les deux parcelles. Le même phénomène, mais moins marqué, se produit également lors de la deuxième série de mesures, réalisée avec le Soleil à 42° de zénith et 112° d'azimut. Le visible étant correctement estimé (sauf une sur-estimation au niveau du *hot-spot*), la maquette semble représenter correctement le couvert étudié.

La figure 6.19 (a) montre la régression totale, estimée à partir des moyennes des 4 répétitions. Le visible est mieux estimé que le proche infra-rouge.

$$RMSE=0.034, R^2 = 0.92, n = 55$$

$$RMSE_{vis} = 0.018, RMSE_{nir} = 0.042$$

L'estimation de la réflectance totale avec le modèle *SAIL* (LAI et $\theta_l = 57^\circ$) conduit à la régression globale qui apparaît à la figure 6.19 (b), avec :

$$RMSE=0.037, R^2 = 0.91, n = 55$$

$$RMSE_{vis} = 0.027, RMSE_{nir} = 0.043$$

L'écart entre réflectance mesurée et estimée est plus faible avec le modèle proposé qu'avec le modèle *SAIL*. Cette différence est plus marquée dans le visible, alors qu'elle est du même ordre de grandeur dans le proche infra-rouge.

INRA 97

À la figure 6.20 on voit l'évolution de la réponse spectrale du couvert avec le LAI , pour la même position du Soleil (102° d'azimut) et

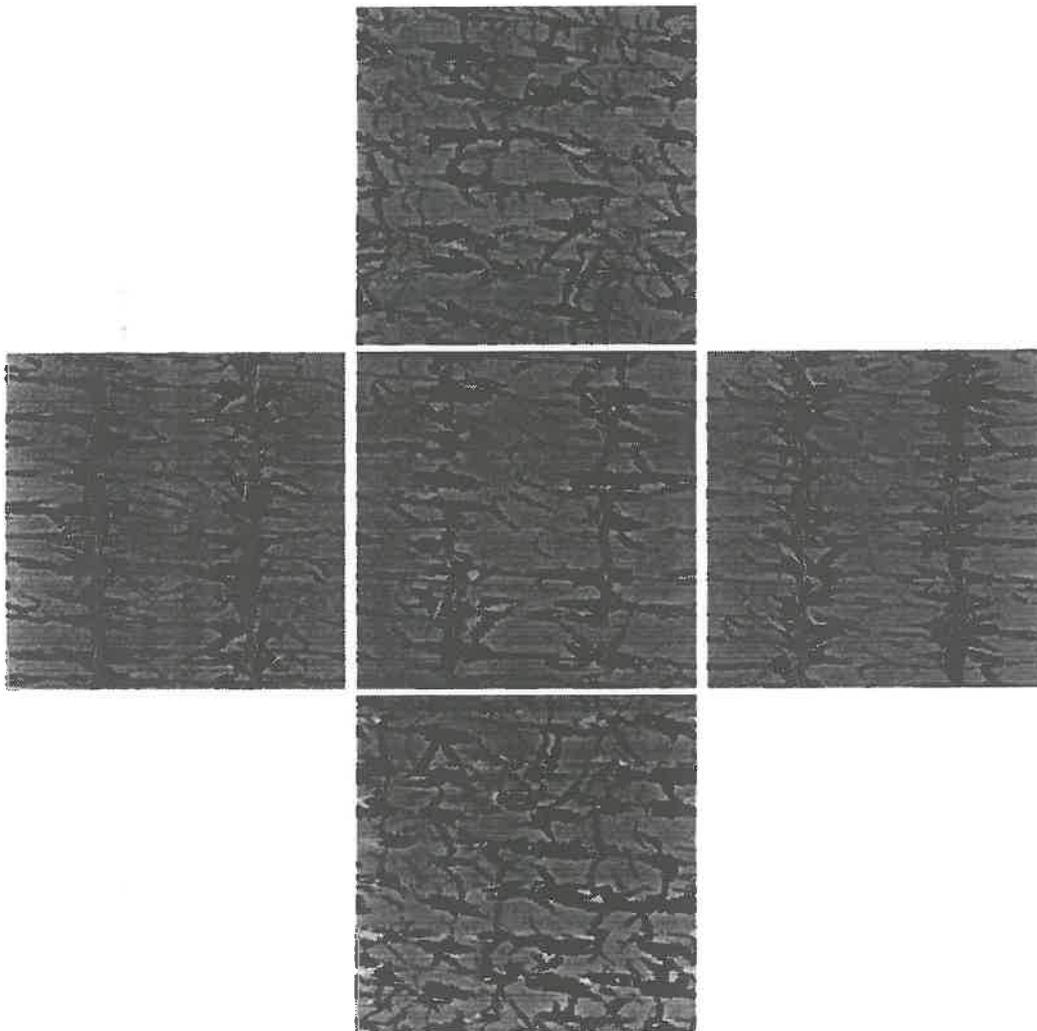


FIG. 6.16 – INRA 90 : Simulation par double projection des vues des 5 radiomètres (N, W, nadir, E, S) (parcelle NS, soleil à 60°)

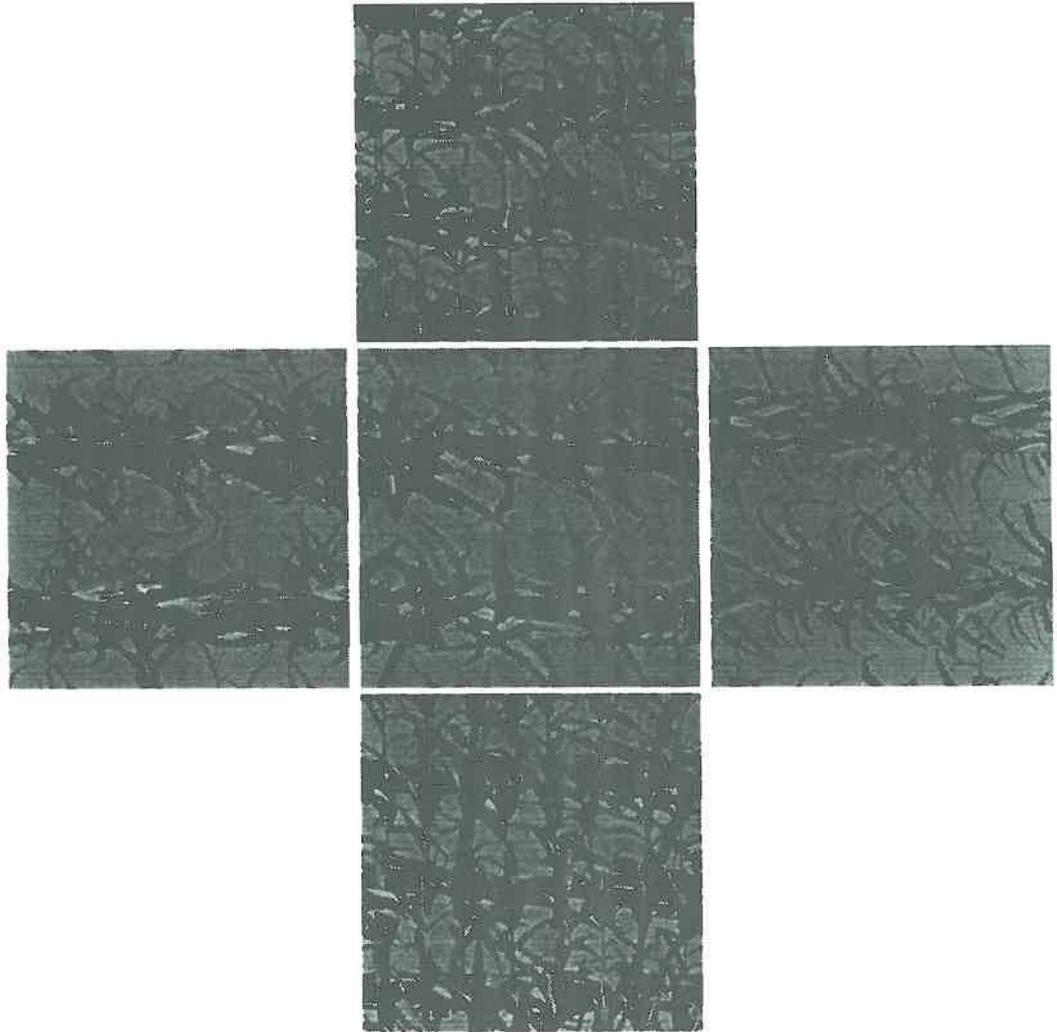


FIG. 6.17 – *INRA 90* : Simulation par double projection des vues des 5 radiomètres (*N, W, nadir, E, S*) (parcelle *EW*, soleil à 60°)

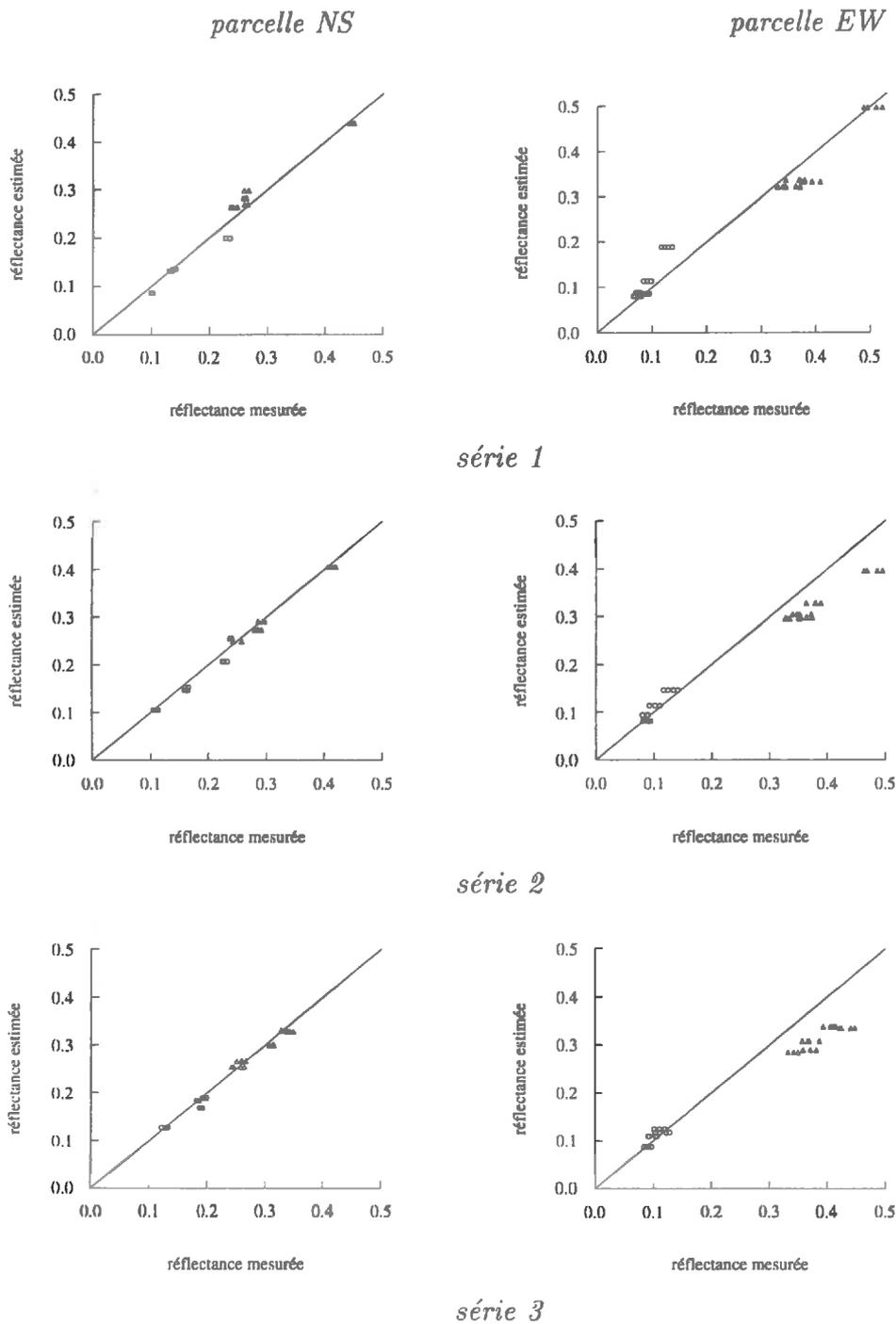


FIG. 6.18 - INRA 90: Comparaison entre la réflectance mesurée et celle estimée par le modèle proposé (o : rouge, Δ : IR)

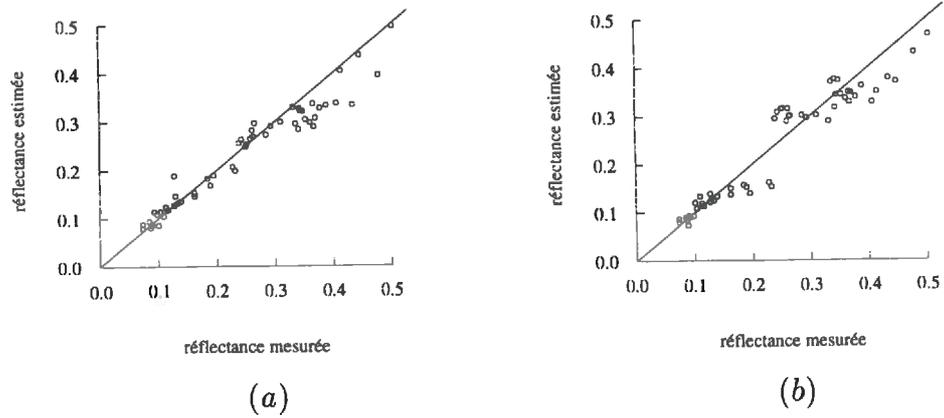


FIG. 6.19 – INRA 90: Comparaison de l'ensemble des mesures et des simulations réalisées ((a) modèle proposé, (b) SAIL)

l'observateur situé dans le plan du Soleil (105° d'azimut). Le facteur de réflectance est normalisé par rapport à sa valeur à la verticale. C'est dans ce cas que la réflectance a le caractère directionnel le plus marqué, avec comportement presque symétrique par rapport à la verticale, où se produit un minimum. Plus le Soleil est bas, plus la réflectance du couvert est forte pour les forts angles zénithaux d'observation. On constate un aplatissement des courbes avec le Soleil proche du nadir.

Afin de ne tenir compte que de la surface observée par le radiomètre, on considère pour l'estimation de la réflectance simple des images de projection rectangulaires, dont les dimensions correspondent aux axes de l'ellipse vue par le radiomètre dans chaque position d'observation.

résultats

La figure 6.21 montre les résultats des simulations par date et par bande spectrale. En diffusion avant (visée face au Soleil) le modèle sous-estime systématiquement les mesures, principalement dans les situations où le Soleil est assez bas. Il s'agit de positions d'observation pour lesquelles le radiomètre voit une proportion importante de rayonnement transmis à travers les feuilles. Le modèle est très sensible dans ces cas aux valeurs de transmittance des feuilles données en entrée. Il s'agit en même temps de directions symétriques au Soleil par rapport à la verticale et qui correspondent donc à la réflectance spéculaire.

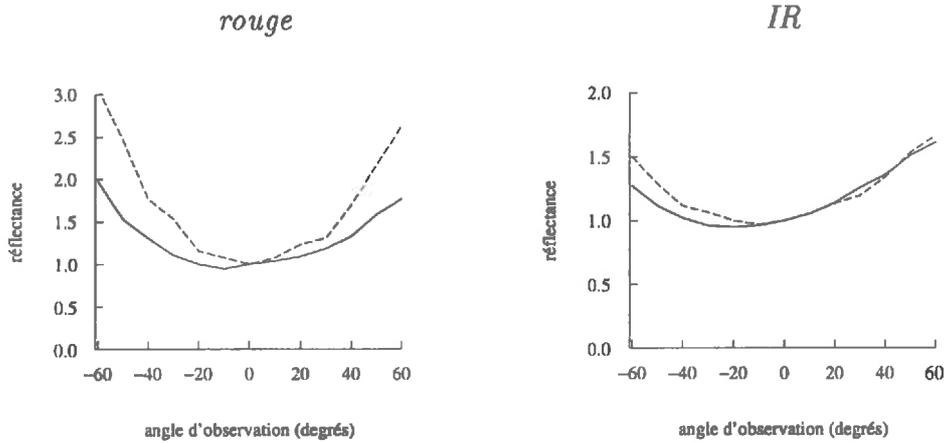


FIG. 6.20 - INRA 97: Mesures de réflectance dans le plan du Soleil, série 1 (— date 1, - - - date 2)

Ce phénomène, très important pour le maïs étant donné les caractéristiques de la surface des feuilles, n'est pas simulé par le modèle, compte tenu de la méconnaissance des propriétés optiques directionnelles des feuilles. Ceci peut expliquer la sous-estimation des simulations pour ces angles d'observation.

Les mesures expérimentales (Sanz, 1997) montrent que la réponse spéculaire des feuilles se traduit par un lobe dont l'axe correspond à la direction spéculaire, donnée par les équations de Fresnel, mais qui présente un certain volume, qui dépend de l'angle d'incidence de la lumière. L'existence de ce lobe indique que la réflectance spéculaire des feuilles ne se limite pas à la direction spéculaire (comme le considèrent les modèles proposés (§ 4.4.4)), mais qu'elle s'étend aux directions adjacentes.

La figure 6.22 illustre le champ d'observation du radiomètre, à 60° et -60° , lors des premières séries de mesure (Soleil bas et observateur dans le plan du Soleil). Ces images ont été obtenues par double projection et correspondent aux simulations de la réflectance simple. À -60° l'énergie reçue par le radiomètre semble beaucoup plus faible qu'à 60° ; alors que les valeurs mesurées dans les deux cas sont presque équivalentes. Il est donc nécessaire de considérer l'effet spéculaire pour arriver à une bonne simulation de la réflectance en rétro-diffusion.

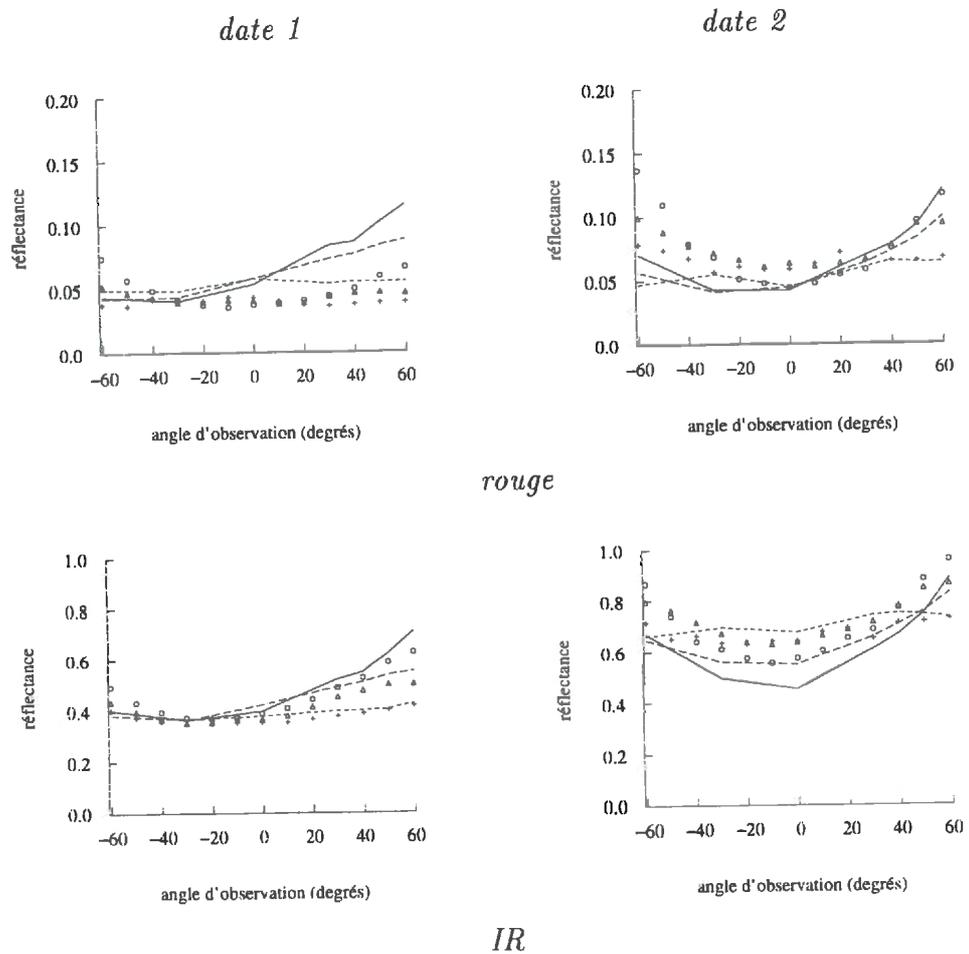
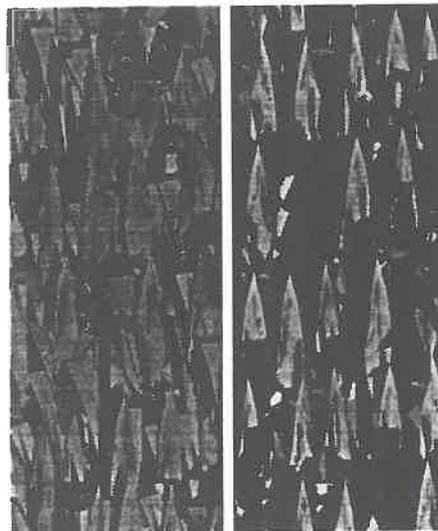


FIG. 6.21 – INRA 97: Superposition des réflectances mesurées (\circ : série 1, Δ : série 2, + : série 3) et estimées par le modèle proposé (— : série 1, - - - : série 2, . . . : série 3)



date 1



date 2

FIG. 6.22 - INRA 97: Simulation par double projection des vues du radiomètre à 60° et -60°

On observe également sur ces images la différence de port des plantes entre les deux stades phénologiques étudiés. Lors de la deuxième date, les feuilles très dressées du cornet contribuent à la réponse spectrale du couvert par leur réflectance, pour les positions d'observation dos au Soleil, mais également par leur transmittance pour les positions face au Soleil. Lors de la première date, la contribution de la réflectance des feuilles semble être prédominante pour toutes les positions d'observation, ce qui veut dire que la réflectance spéculaire serait très importante dans ce cas. La superposition des mesures et des simulations du modèle rapide apparaît à la figure 6.23.

La figure 6.24 (a) montre la régression entre mesures et estimations correspondantes aux résultats qui apparaissent à la figure 6.21.

$$date\ 1 : RMSE = 0.045, R^2 = 0.96, n = 42$$

$$date\ 2 : RMSE = 0.085, R^2 = 0.93, n = 42$$

$$total : RMSE = 0.068, R^2 = 0.94, n = 84$$

$$RMSE_{vis} = 0.026, RMSE_{nir} = 0.093$$

La figure 6.23 montre les résultats obtenus avec le modèle *SAIL* par date et bande spectrale. La régression apparaît à la figure 6.24 (b) :

$$RMSE = 0.064, R^2 = 0.95, n = 84$$

$$RMSE_{vis} = 0.025, RMSE_{nir} = 0.087$$

Alpilles 97

Les propriétés optiques de la végétation et du sol utilisées ont été présentées auparavant. Ne disposant pas de mesures directionnelles de la réflectance du sol, il n'a pas été possible d'estimer la réflectance hémisphérique. C'est pour cette raison que les simulations de la réflectance multiple ont été réalisées avec les mêmes valeurs de réflectance du sol que celles de la réflectance mesurée en visée verticale (hypothèse lambertienne). Ceci ne doit pas conduire à de graves erreurs, dans la mesure où la contribution du sol à la diffusion multiple est relativement faible.

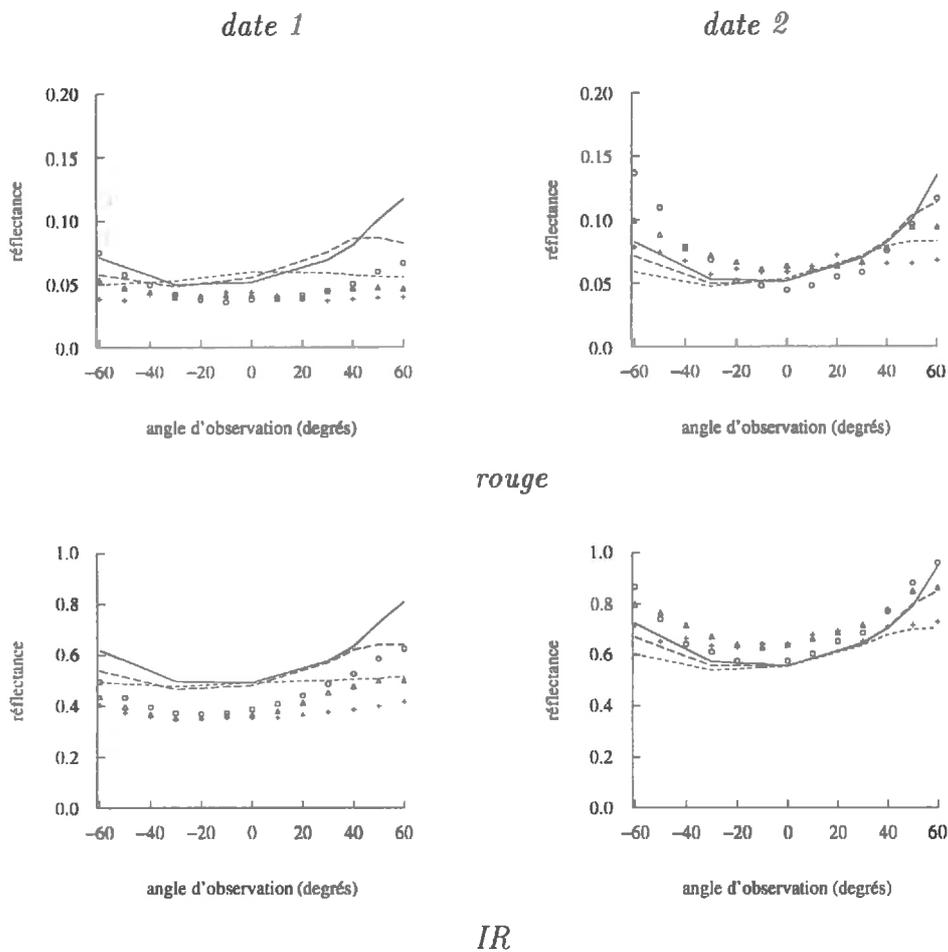


FIG. 6.23 - INRA 97: Superposition des valeurs mesurées (o : série 1, Δ : série 2, + : série 3) et estimées par le modèle SAIL (— : série 1, --- : série 2, - - - : série 3)

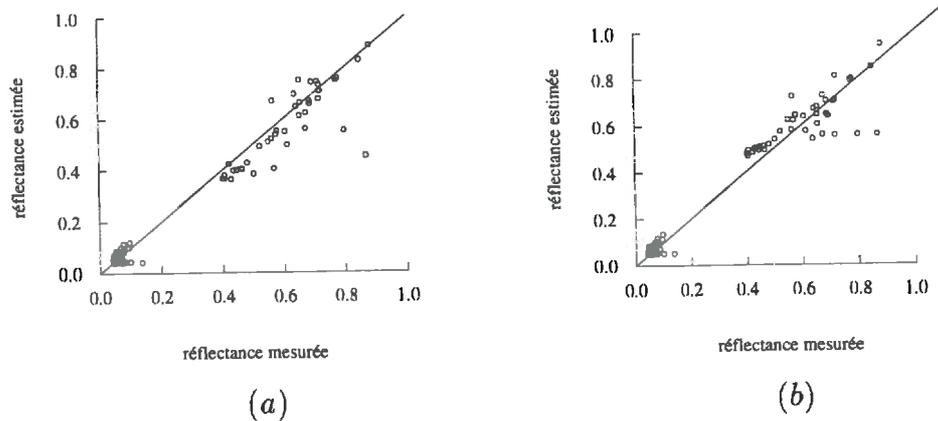


FIG. 6.24 – INRA 97: Comparaison entre l'ensemble des mesures et les résultats des simulations ((a) modèle rapide, (b) SAIL)

Les régressions entre les mesures et les estimations apparaissent à la figure 6.25, par échantillon et position du Soleil. Les figures 6.27 et 6.28 illustrent ce que voit le radiomètre dans chaque cas.

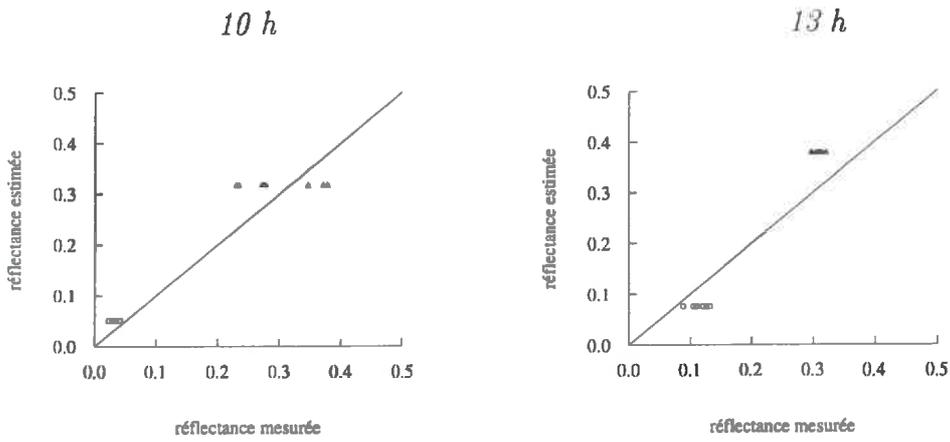
La différence entre les échantillons n'est pas très importante, étant donné que les *LAI*s sont proches et que toutes les mesures sont faites à la verticale. Dans tous les cas on a un écart important entre les valeurs du visible et du proche infra-rouge, du fait des assez forts *LAI*s (supérieurs à 1).

Par rapport à la situation de 10h, à 13h les valeurs de réflectance sont plus fortes dans le cas de l'échantillon 1, qui a le plus petit *LAI*, les autres échantillons ayant des valeurs assez proches (fig. 6.27 et 6.28). À 10h le Soleil est perpendiculaire aux rangs, qui sont orientés N-S; la plupart du sol est à l'ombre et il ne contribue donc que peu à la réflectance. À 13h l'ombre des plantes tombe sur le rang même, laissant plus de sol éclairé entre les rangs.

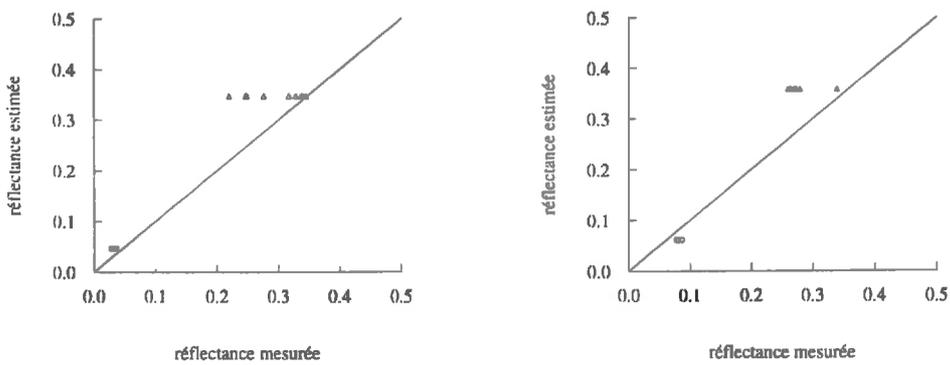
La figure 6.26 (a) montre la régression globale, en considérant la moyenne des répétitions :

$$RMSE = 0.038, R^2 = 0.92, n = 12$$

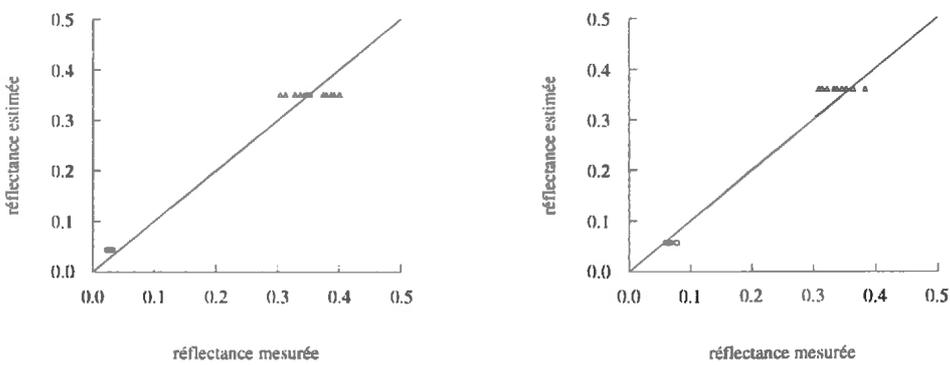
$$RMSE_{vis} = 0.022, RMSE_{nir} = 0.049$$



Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 3

FIG. 6.25 – Alpilles 97: Comparaison entre la réflectance mesurée et celle estimée par le modèle proposé

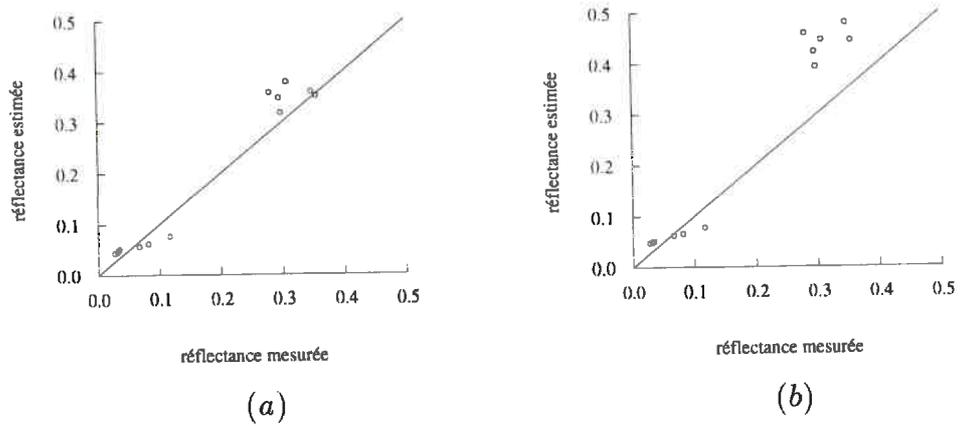


FIG. 6.26 – Alpillles 97: Comparaison entre l'ensemble des mesures et les simulations ((a) modèle proposé, (b) SAIL)

Avec le modèle SAIL, pour les LAIs mesurés, les θ_l estimés et un paramètre de *hot-spot* de 0.3, on obtient (fig. 6.26 (b)) :

$$RMSE=0.094, R^2 = 0.49, n = 12$$

$$RMSE_{vis} = 0.022, RMSE_{nir} = 0.130$$

Par rapport à notre modèle, le proche infra-rouge est sur-estimé et on n'observe pas de différence significative dans le visible.

D'une manière globale, en considérant l'ensemble des expérimentations réalisées, la précision du modèle rapide proposé est (fig. 6.29 (a)) :

$$RMSE = 0.056, R^2 = 0.94, n = 151$$

$$RMSE_{vis} = 0.023, RMSE_{nir} = 0.058$$

et pour le modèle SAIL (fig. 6.29 (b)) :

$$RMSE = 0.059, R^2 = 0.94, n = 151$$

$$RMSE_{vis} = 0.025, RMSE_{nir} = 0.068$$



Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 3

FIG. 6.27 - *Alpilles 97: Simulation par double projection des vues des radiomètres à 10h*



Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 3

FIG. 6.28 - *Alpilles 97: Simulation par double projection des vues des radiomètres à 13h*

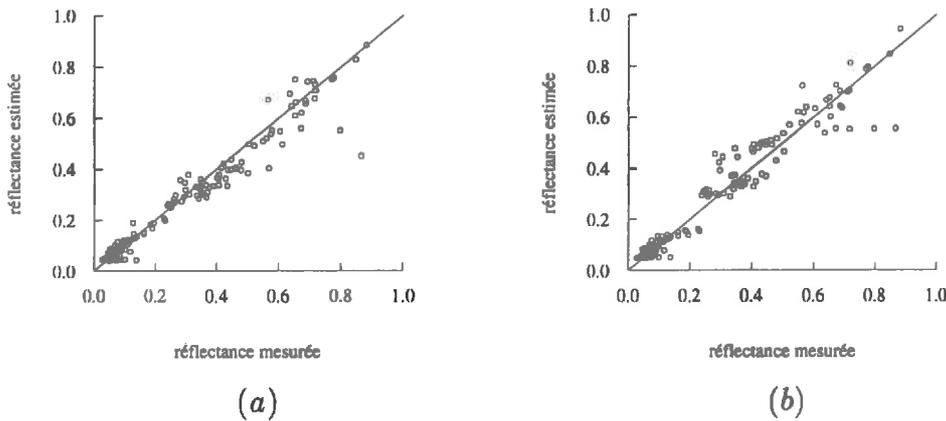


FIG. 6.29 – Régression globale, en considérant l'ensemble des expérimentations : comparaison entre les mesures et les simulations réalisées ((a) modèle rapide, (b) modèle SAIL)

6.4 Discussion

6.4.1 Représentation de la structure

Dans l'ensemble des cas considérés, le modèle de construction de maquettes a permis de simuler des plantes (hauteur, surface foliaire, nombre de feuilles de la plante, nombre de feuilles présentes sur la plante, forme et hauteur du cornet, rotation azimutale des feuilles, ...) et des parcelles (*LAI*, densité, largeur des inter-rangs, distance entre plantes, orientation des rangs, orientation des plantes dans les rangs, ...) très proches de celles observées. Les variables d'entrée du modèle semblent pertinentes et suffisantes.

Les valeurs données à ces variables n'ont pas toujours été très réalistes, tout en restant dans le domaine du possible. En particulier, la hauteur des feuilles dans les plantes en croissance, et surtout du cornet, à été difficile à simuler et des hauteurs finales des plantes assez importantes (et même différentes pour une même parcelle à deux stades phénologiques (INRA 97)) ont dû être considérées.

De même, le stade phénologique des plantes simulées (caractérisé par la dernière feuille apparue et le nombre de feuilles dans le cornet)

s'est révélé assez dépendant, non seulement de la valeur du phyllochrone donnée en entrée, mais aussi du nombre total de feuilles et de la hauteur finale de la plante.

Une certaine différence a été observée entre la longueur des feuilles réelles et simulées (INRA 97), qui n'a pas eu de répercussions majeures sur l'ajustement du *LAI*. Il serait intéressant d'en analyser les conséquences sur le transfert radiatif.

Les distributions des paramètres qui décrivent la courbure de la nervure centrale des feuilles ont été ajustées pour chaque maquette, principalement au niveau du cornet, de manière à bien reproduire la silhouette des plantes photographiées. Dans le cas de l'expérimentation Alpilles 97, par exemple, on a forcé la courbure des feuilles, en prenant des grandes valeurs de ϕ_0 et de ϕ_{cass} , de manière à simuler des inter-rangs dégagés, tels qu'ils sont observés sur le terrain. Il en a été de même pour les algorithmes de disparition des premières feuilles avec l'apparition des nouvelles.

L'observation montre souvent une orientation préférentielle des feuilles perpendiculaire aux rangs. Ceci a été simulé par une faible rotation azimutale des feuilles et une orientation préférentielle des plantes. De plus amples travaux sont certainement à développer dans ce domaine pour arriver à mieux en comprendre le déterminisme.

6.4.2 Simulation de la réflectance

L'évaluation d'un modèle à partir de données expérimentales nécessite de réaliser un bilan des erreurs possibles.

Sources possibles d'erreur

Plusieurs sources d'erreur doivent être considérées :

1. erreurs de type radiométrique :

- l'erreur liée au fait que les mesures de réflectance sur la végétation, sur le sol nu et sur le panneau de référence ne sont pas forcément réalisées simultanément et que l'éclairement n'est pas constant ;

- l'erreur associée au panneau de référence lui même, qui n'est pas complètement lambertien et dont les caractéristiques optiques absolues sont connues à environ 1 à 2% près ;
- l'erreur associée aux mesures de réflectance, en supposant qu'il n'y a pas de dérive spectrale des filtres et que le bruit du capteur est négligeable ;
- l'erreur associée aux mesures des propriétés optiques lambertiennes des feuilles ;

2. erreurs liées à la représentativité :

- représentativité des mesures des propriétés optiques du sol, prises en dehors de la végétation,
- représentativité des mesures de réflectance : nombre de répétitions, échantillonnage de la zone de mesure, ...
- représentativité des mesures de structure : nombre de plantes mesurées et photographiées et par rapport à la variabilité du champ ;

3. erreurs dues au modèle

- la non prise en compte des propriétés optiques directionnelles des feuilles, ni de leur caractère spéculaire ;
- la capacité du modèle de structure à bien reproduire les plantes observées, principalement à cause de son caractère empirique ;
- imprécision du calcul du transfert radiatif.

En conclusion, il sera difficile de poser un diagnostic sûr pour expliquer d'éventuelles différences entre réflectance mesurée et calculée. Pour mieux comprendre les résultats du modèle il est nécessaire de quantifier ces différentes sources d'erreur.

Évaluation du modèle

La simulation de la réflectance s'est révélée très sensible en visée verticale à la rotation azimutale des feuilles dans la plante (écartement par rapport à un seul plan azimutal) et des plantes dans le champ, car ces deux caractéristiques déterminent le taux de couverture ; pour les simulations en directionnel (notamment en rétro-diffusion) le port des feuilles du cornet a une influence importante sur la variation directionnelle de la réflectance.

Dans l'infra-rouge, où la réflectance multiple est très importante, l'estimation de la réflectance est très sensible à l'ajustement du LAI_{eff} , ce qui pourrait expliquer dans certains cas la sous-estimation (INRA 90, parcelle *EW*) ou la sur-estimation (Alpilles 97, échantillon-2) du modèle par rapport aux mesures.

Les simulations réalisées avec le modèle *SAIL*, en considérant la vraie valeur du LAI , montrent en générale une surestimation dans l'infra-rouge, par rapport au modèle proposé.

6.5 Conclusion

Le modèle de structure permet de construire des maquettes reproduisant, d'une manière suffisamment précise pour nos objectifs, une grande variété de champs de maïs. Mais, une même parcelle (LAI , stade phénologique, hauteur des plantes) peut être représentée avec des combinaisons différentes des paramètres d'entrée (nombre de feuilles, hauteur finale des plantes, phyllochrone, vigueur). Du point de vue de l'éventuelle inversion du modèle, ces ambiguïtés pourraient être levées par la prise en compte de la dimension temporelle dans l'information radiométrique.

Il serait nécessaire de tester la sensibilité du modèle aux différentes variables, en particulier l'azimut des feuilles, l'hauteur du couvert, ...

L'estimation simultanée de λ_0 et de θ_1 à partir du P_0 directionnel a comme conséquence un effet de compensation entre ces deux variables et les rend interdépendantes. Étant donnée que ces deux valeurs interviennent ensemble dans l'estimation de la réflectance (autant simple que multiple), cette dépendance ne devrait pas avoir de conséquences importantes sur les résultats du modèle. En revanche, si on ne s'inté-

resse qu'au LAI_{eff} , ou au θ_1 , il sera nécessaire de les estimer séparément : obtenir, par exemple, le θ_1 à partir de la LIDF de la maquette, ou même le fixer a priori, et n'ajuster que le λ_0 sur le P_0 . Des améliorations sont sans doute encore possibles au niveau de la diffusion multiple, en prenant en compte la fraction de végétation vue.

Nous avons constaté surtout une forte dépendance des résultats aux propriétés optiques des feuilles, ce qui confirme l'intérêt et la nécessité de considérer leur caractère directionnel, avec une description précise du phénomène spéculaire.

Le gain de précision de notre modèle par rapport au modèle SAIL semble venir principalement de la considération du LAI_{eff} et d'une meilleure estimation du hot-spot.

Chapitre 7

Conclusion

La limitation majeure des modèles de transfert radiatif actuels réside souvent dans la manière dont la structure du couvert est prise en compte. Seuls les modèles basés sur les techniques de lancer de rayons ou de radiosité la considère d'une manière détaillée. Ces modèles sont très précis, mais ils ne sont pas opérationnels, car trop *gourmands* en mémoire et en temps de calcul.

L'objectif de ce travail a été de développer un modèle de transfert radiatif opérationnel (rapide, précis et comportant peu de paramètres) pour estimer la variation directionnelle, temporelle et spectrale de la réflectance d'un couvert végétal dans le domaine optique. Nous nous sommes attachés à décrire la structure du couvert de la manière la plus réaliste possible et nous avons développé un modèle de transfert radiatif capable de la prendre en compte explicitement. La plante choisie pour la réalisation de ce travail est le maïs qui, par sa structure et son développement assez simples, convient bien à nos objectifs de modélisation.

Le première étape a consisté à proposer un modèle d'architecture de la plante de maïs. Ainsi, la nervure centrale, la forme de la feuille développée, le gaufrage, la section transversale, ... sont représentés à partir d'expressions simples, comportant un nombre limité de paramètres, dont la signification physique ou géométrique est claire. Par tirage aléatoire dans les fonctions de distributions de ces paramètres, déterminées à partir de nos observations expérimentales, il est possible de générer une population de plantes.

Des lois empiriques, ajustées à partir d'une base de données expérimentale, permettent d'estimer les dimensions de la plante adulte (largeur maximale, longueur et hauteur d'insertion de chaque feuille et diamètre de la tige) en fonction de 3 variables facilement mesurables : la surface foliaire totale, que nous considérons comme un indice de vigueur, la hauteur de la tige et le nombre total de feuilles.

Des expressions empiriques ont été établies pour estimer les dimensions de la plante à tous les stades phénologique, en fonction des valeurs de la plante adulte : la variation de la taille des feuilles et l'élongation de la tige permettent en effet de décrire la croissance de la plante. Les paramètres de forme ne varient donc que peu en fonction du stade phénologique, exception faite des feuilles encore engainées, qui composent le cornet. La disparition des premières feuilles due à la sénescence est également décrite.

Le modèle proposé permet donc de décrire, sous la forme de surface paramétrique 3D, des plantes de maïs différentes et réalistes, à n'importe quel stade phénologique du cycle de développement. Malgré le nombre limité de paramètres et variables d'entrée, le modèle permet une grande souplesse notamment pour la forme des feuilles et la vigueur de la plante.

représentation Afin de rendre la surface paramétrique 3D décrite par le modèle de structure plus facilement utilisable pour les études de transfert radiatif, elle est approchée par des triangles. La triangulation comporte implicitement une perte de précision par rapport à la surface paramétrique initiale, ce qui entraîne nécessairement des erreurs sur le calcul du transfert radiatif.

Des études de sensibilité ont été réalisées dans ce but, à partir de deux variables déterminant le transfert radiatif : la fraction de trous (P_0) et la distribution des inclinaisons foliaires (*LIDF*). Ces variables sont faciles à estimer à partir de la maquette. Un compromis a été établi entre la qualité de la représentation (finesse de la triangulation), associée à un certain coût en mémoire et temps de calcul, et la précision du calcul du transfert radiatif appliqué à la maquette.

La fraction de trous monodirectionnelle est estimée par la méthode des *fantômes*. Cette méthode est basée sur l'obtention des cartes de probabilité de trous de la plante moyenne. Elle permet ainsi de s'affranchir

de la distribution et de l'orientation individuelle des plantes dans la maquette. Chaque carte correspond à une direction d'observation, pour un stade phénologique donné. La *LIDF* est approchée par la distribution des normales des triangles, ce qui représente une estimation non biaisée de la *LIDF* vraie issue de la surface paramétrique.

Les études de sensibilité réalisées montrent qu'avec des maquettes de 24 plantes, représentées avec une triangulation très simplifiée (triangulation de base: 10 triangles par feuille), on a une représentativité suffisante, permettant de respecter les projections des surfaces et les distributions des inclinaisons.

Ce résultat est confirmé par des simulations réalisées par lancer de rayons stochastique (avec le modèle *Parcinopy*), dans le cas où les feuilles sont considérées lambertiennes. En revanche, des simulations réalisées en considérant une composante spéculaire des feuilles indiquent que la dégradation de la représentation de la maquette peut comporter des imprécisions importantes dans l'estimation de la réflectance, en particulier dans la direction spéculaire.

Le modèle de lancer de rayons stochastique *Parcinopy* a servi de référence pour le développement d'un modèle de transfert radiatif opérationnel, basé sur la description détaillée et réaliste du couvert végétal sous la forme de maquette informatique 3D. Le modèle proposé consiste à estimer la réflectance simple par double projection de la maquette (*bvis*) et la réflectance multiple à partir d'un modèle simple de transfert radiatif en milieu turbide (*SAIL*). modèle opérationnel

La simple projection est bien simulée par la double projection, dans la mesure du réalisme de la représentation du couvert par la maquette. La diffusion multiple est estimée en tenant compte du caractère agrégé ou épars (non idéal) du couvert, en considérant une valeur effective du *LAI*. Nous proposons d'estimer le *LAI_{eff}* de la maquette (paramètre λ_0 d'agrégation/dispersion) à partir de sa fraction de trous directionnelle. La méthode des fantômes ou la simple projection peuvent être utilisées pour estimer la fraction de trous directionnelle de la maquette.

L'étude réalisée montre l'intérêt d'estimer ce paramètre pour chaque maquette (associée à un stade phénologique, une densité, etc.), indépendamment de l'angle de visée. La faible sensibilité du P_0 à la représentation de la *LIDF* permet de représenter cette dernière par une loi

ellipsoïdale, à partir d'un angle moyen d'inclinaison des feuilles. Cet angle peut être estimé également à partir du P_0 , ou bien à partir de la *LIDF* de la maquette.

Les estimations de la réflectance bidirectionnelle par le modèle proposé, dans le rouge et le proche infra-rouge, sur des maquettes représentant différents stades phénologiques, ont été comparées aux résultats obtenus avec le modèle de référence. Par rapport au lancer de rayons, le modèle proposé est précis et plus rapide. Quelques améliorations du calcul de la diffusion multiple sont proposées.

Par rapport à notre modèle, le modèle *SAIL* donne des résultats moins précis et plus biaisés (sur-estimation de la réflectance dans le proche infra-rouge), ce qui est en partie expliqué par l'utilisation du *LAI* mesuré, ne prenant pas en compte le caractère agrégé du couvert.

validation

Le modèle a été validé à partir de mesures terrain, qui incluent une gamme représentative de cas : *LAI*, densités, stades phénologiques, positions du Soleil et d'observation, ... Cela nous a permis, d'une part, de tester le modèle de structure du maïs et, d'autre part, d'évaluer la précision et la sensibilité du modèle de transfert radiatif proposé.

Le modèle de description des plantes s'est révélé assez souple et les variables d'entrée suffisantes pour arriver dans tous les cas à construire une maquette qui reproduit bien le couvert étudié. La vigueur et la hauteur finale moyenne des plantes, données en entrée, ont été ajustées de manière à obtenir des maquettes avec le *LAI* et la hauteur moyenne du cornet des parcelles observées. Ces ajustements aboutissent à des valeurs parfois à la limite du domaine de validité, conséquence du caractère empirique du modèle.

Certaines améliorations ont été introduites dans les fonctions de distribution des paramètres du modèle, afin d'arriver à des représentations plus réalistes qu'avec celles proposées initialement. Encore faudrait-il de nouvelles données pour valider plus complètement le modèle.

Le modèle de transfert radiatif proposé simule avec une assez bonne précision les mesures de réflectance. Son utilisation est facile et rapide.

Le modèle *SAIL*, testé sur le même jeu de données, a donné dans tous les cas des résultats un peu moins précis et plus biaisés que notre modèle. Toutefois, les performances globalement satisfaisantes du modèle *SAIL* montrent qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une très bonne

représentation du couvert pour arriver à de bonnes estimations de la réflectance.

L'intérêt des maquettes reste incontestable comme outil privilégié *perspectives* permettant de mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent dans le transfert radiatif et la sensibilité de la réponse radiométrique du couvert à certains éléments de sa structure.

Des nombreuses sources d'erreur possibles rendent difficile l'évaluation concrète des différents éléments du modèle. Il est impossible d'éliminer complètement les erreurs implicites à la mesure expérimentale de la réflectance. En revanche des améliorations peuvent être apportées au modèle de structure, à partir d'une validation plus poussée que celle préliminaire présentée dans ce travail. Il faudrait dans ce sens continuer les analyses de sensibilité aux différentes variables et paramètres du modèle. La comparaison avec d'autres modèles de structure (comme ceux basés sur les *L-systems*) pourrait apporter des indications intéressantes. Une fois les variables les plus discriminantes déterminées, il serait possible d'étudier la manière de les ajuster au mieux.

Il nous semble indispensable aussi de travailler pour améliorer les modèles de propriétés optiques des feuilles, de manière à bien représenter leur caractère directionnel, plus particulièrement leur comportement vis-à-vis de la specularité.

Quant à l'inversion du modèle, il ne nous semble envisageable d'obtenir que des variables très générales, comme le *LAI*, l'angle moyen d'inclinaison des feuilles et une indication du stade phénologique. L'utilisation de la dimension temporelle de la réponse radiométrique du couvert devrait servir à l'élimination de l'ambiguïté entre les variables d'entrée, constatée lors de la validation du modèle.

Un autre aspect à étudier serait l'importance de l'hétérogénéité de la parcelle, autrement dit, de la représentativité de la maquette, et les répercussions dans le cas d'un changement d'échelle.

RÉFÉRENCES

- Andrieu B., 1997. Fast estimate of first order of scattering on 3D computer models using double z-buffer. *Rapport de recherche*, INRA, U.R. de Bioclimatologie, 78850 Thiverval-Grignon, 8p.
- Andrieu B. and Baret F., 1993. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. *Crop structure and microclimate: characterization and applications*. Varlet-Grancher C., Bonhomme R. and Sinoquet H. Paris (France), INRA edition: 285-322.
- Andrieu B., Baret F., Jacquemoud S., Malthus T. and Steven M.D., 1997. Evaluation of an improved version of SAIL model to simulate bi-directional reflectance of sugar beet canopies. *Remote Sensing of Environment*, 60:247-257.
- Andrieu, B. and N. Ivanov, 1993. Use of radiance measurements to assess the position of phytoelements in a vegetation canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66:139-157.
- Andrieu B. and Sinoquet H., 1993. Evaluation of structure description requirements for predicting gap fraction of vegetation canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:207-227.
- Andrieu B., Y. Sohbi and N. Ivanov, 1994. A direct method to measure bi-directional gap fraction in vegetation canopy. *Remote Sensing of the Environment*.
- Aries F., 1997. Modélisation surfacique de la structure d'un couvert végétal pour l'étude du rayonnement. *Thèse*, Université de Nantes.

- Aries F., Monestiez P., de Reffye Ph. and Prévot L., 1987. Modélisation de la géométrie d'un couvert végétal: cas du maïs. *Actes du colloque MARI'87*, 197-202. CESTA, Paris (France).
- Aries F., Prévot L. and Monestiez P., 1993. Geometrical canopy modeling in radiation simulation studies. *Crop structure and light microclimate. Characterization and applications*, INRA editions, 159-167.
- Baret F., 1992. Franco-English collaborative reflectance experiment. Report and data. *Rapport de recherche*, INRA, U.R. de Bioclimatologie, 84914 Avignon cedex 9, 29p.
- Baret F., Andrieu B. and Steven M.D., 1993. Gap frequency and canopy architecture of sugar beet and beet crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65:261-279.
- Begue A., 1992. Modeling hemispherical and directional radiative fluxes in regular clumped canopies. *Remote Sensing of Environment*, 40:219-230.
- Bonaparte E.E.N.A., 1975. The effects of temperature, daylength, soil fertility and soil moisture on leaf number and duration to tassel emergence in *Zea Mays* L.. *Annales of Botany*, 39:853-861.
- Bonhomme R., Varlet-Grancher C. and Chartier P., 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. *Photosynthetica*, 8(3):299-301.
- Bonhomme R. and Varlet-Grancher C., 1978. Estimation of the gramineous crop geometry by plant profiles including leaf width variations. *Photosynthetica*, 12(2):193-196.
- Bonhomme R., Derieux M., Duburcq J.B. and Ruget F., 1984. Variation in leaf number induced by soil temperature in various corn genotypes. *Photosynthetica*, 18:255-258.
- Bonhomme R., Ruget F., Derieux M. and Vincourt P., 1982. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée

- chez différentes génotypes de maïs, C.R. Acad.Sc. Paris, Ser. III, 294:393-398.
- Borel C.C., Gerstl S.A. and Powers B.J., 1991. The radiosity method in optical remote sensing of structured 3D surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 36:13-44.
- Brakke T.W., 1992. Goniometric measurements of light scattered in the principal plane from leaves. W.R. (Editor). *IGARSS'92, IEEE, South Shore Harbour Resort and Conference center*, Houston (Texas, USA), 508-510.
- Brakke T.W., 1994. Specular and diffuse components of radiation scattered by leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71:283-295.
- Brakke T.W. and Smith J.A., 1987. A ray tracing model for leaf bidirectional scattering studies. *IGARS'87, Annales of Arboriculture*, Mochigan, USA, 643-648.
- Brakke T.W., Smith J.A. and Harmden J.M., 1989. Bidirectional scattering of lighth from tree leaves. *Remote Sensing of Environment*, 29:175-183.
- Bouchon J. and Houllier F., 1993. Une brève histoire de la modélisation de la production des peuplements forestiers: place des méthodes architecturales. *Architecture des arbres fruitiers et forestiers*, Montpellier (France), 23-25 novembre, 1993. Ed. INRA, Paris 1995 (Les Colloques, n°74).
- Campbell G.S., 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36:317-321.
- Chelle M., 1997. Développement d'un modèle de radiosité mixte pour simuler la distribution du rayonnement dans les couverts végétaux. *Thèse*, Université de Rennes I.
- Chen S.G., Impens I., Ceulemans R. and Kockelbergh, 1993. Measurement of gap fraction of fractal generated canopies using digitalized image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64:245-259.

- Chen S.G., Ceulemans R. and Impens I., 1994. A fractal-based *Populus* canopy structure model for the calculation of light interception. *Forest Ecology and Management*, 69:97-110.
- Cierniewski J. and Verbrugghe M., 1994. A geometrical model of soil bidirectional reflectance in the visible and near-infrared ranges. *Proceedings of the Sixth International Symposium. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère FRANCE*, 635-642.
- Colheo D. T., Dale R.F., 1980. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: Planting to silking. *Agronomy Journal*, 72:530-510.
- Crist E.P., 1984. Effects of cultural and environmental factors on corn and soybean spectral development patterns. *Remote Sensing of Environment*, 14:3-13.
- Daynard T.B., 1971. Characterization of corn canopies from measurements of individual plants. *Agronomy Journal*, 63:133-135.
- Dauzat J. and Hautecoeur O., 1991. Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux. *Actes du Colloque International Mesures Physiques et Signatures en Télé-détection*. ESA, Courchevel (France).
- Duburcq J.B., Bonhomme R. and Derieux M., 1983. Durée des phases végétative et reproductrice chez le maïs. *Agronomie*, 3(10):941-946.
- Dwyer L.M., Stewart D.W., Hamilton R.I. and Houwing L., 1992. Ear position and vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal*, 84:430-438.
- Dwyer L.M., Stewart D.W., Hamilton R.I. and Houwing L., 1986. Leaf area development in field grown maize. *Agronomy Journal*, 78:334-343.
- Eik K. and Hanway J.J., 1965. Some factors affecting development and longevity of leaves of corn. *Agronomy Journal*, 57:7-12.

- España M., Aries F., Baret F., Collache L., Bruguier N., 1995. Modeling canopy structure time course of corn crops. *Proceedings of the International Colloquium Photosynthesis and Remote Sensing of Montpellier (France)*, 1995/08/28-30 EARSEL, INRA, 207-213.
- España M., Aries F., Prévot L., Baret F., 1996. Modeling corn canopy 3D architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* (soumis).
- España M., Chelle M., Aries F., Andrieu B., Baret F., 1996. Utilización de maquetas informáticas para simular la variación direccional de la reflectancia en cultivos de maíz. *Photo-Interpretation*, 34:79-87.
- Foley J.D. and van Dam A., 1984. Fundamentals of interactive computers graphics. Addison-Wesley pub., 664p.
- Fournier Ch., 1995. Introduction des réponses écophysologiques à la température dans un modèle de plante à base de L-Systèmes. *Rapport de DEA Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale*, INA-PG, Paris-VI, ENS.
- Françon J., 1991. Sur la modélisation informatique de l'architecture et du développement des végétaux. L'arbre, C. Edelin ed. Naturalia Monspeliensia.
- Gallo K. P., Daughtry S.T. and Bauer M. E., 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing Environ*, 17:221-232.
- Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V. and Zagolski F., 1996. Modeling radiative transfert in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58:131-156.
- Gay J.P., 1980. Le cycle du maïs. *Cultivar*, 33.
- Gerstl S.A.W. and Borel C.C., 1992. Principles of the radiosity method versus radiative transfer for canopy reflectance modeling. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(2):271-275.

- Girardin Ph., Morel-Fourrier B., Jordan M.O. and Millet B., 1987. Developpement des racines adventives chez le maïs. *Agronomie*, 7(5):353-360.
- Gobron N., 1997. A semi-discret model for the scattering of light by vegetation. *Journal of Geophysical Research*, in print.
- 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., Knox L. and Norman J., 1991. From artificial life to real life: Computer simulation of plant growth. *International Journal of General Systems*, 18:291-319.
- Goel N.S. and Kuusk A., 1992. Evaluation of one-dimensional analytical models for vegetation canopies. W.R. Editor. *IGARSS'92, IEEE, South Shore Harbour Resort and Conference center*, Houston (Texas, USA), 505-507.
- Goel N.S., Rozehnal I. and Thompson R.L., 1991. A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36:73-104.
- Govaerts Y., 1996. A model of light scattering in three-dimensional plant canopies: a Monte-Carlo ray tracing approach. *Thèse*, Space Applications Institute, Joint Research Center, European Commission, Ispra (Italy).
- Govaerts Y. and M. Verstraete, 1994. Applications of the L-systems to canopy reflectance modeling in a Monte-Carlo ray tracing technique. *Fractals in geoscience and remote sensing*, Ispra (Italy).
- Govaerts Y., Jacquemoud S., M. Verstraete and Ustin S.L., 1995. Modeling plant leaf bidirectional reflectance and transmittance with a 3-D ray tracing approach. *IGARSS'95*, Firenze (Italy).
- Grant L., 1987. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22:309-322.

- Guyot G., 1997. Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Ed. Masson, Enseignement des sciences de la vie, 505p.
- Hanway J. J., 1966. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Coop. Ext. Serv. Spec. Rep. 48.
- Hégron G., 1985. Synthèse d'image: Algorithmes élémentaires. Dunod pub., Paris. 199p.
- Hubbard J.E. and Leng E., 1955. Leaf number in mature embryos of inbred lines of dent maize. *Agronomy Journal*, 47:40-42.
- Iaquina J. and Pinty B., 1997. Adaptation of a bidirectional reflectance model including the hot-spot to an optically thin canopy. *Remote Sensing Reviews*, 15:195-222.
- Ivanov N., Estimation de paramètres de structure du couvert végétal par stéréovision. Application à l'étude de la pénétration du rayonnement. *Thèse*, Université Denis Diderot, Paris-7.
- Ivanov N., Boissard P., Chapron M. and Valéry P., 1993. 3-D reconstruction of a vegetation canopy using stereovision. *International journal of computer vision*
- Ivanov N., Boissard P., Chapron M. and Valérie P., 1994. Estimation of the height and angles of orientation of the upper leaves in the maize canopy using stereovision. *Agronomie*, 2:183-194.
- Jaeger M. and de Reffye Ph., 1992. Basic concepts of computer simulation of plant growth. *J. Biosciences*, 17(3): 275-291.
- Jaquemoud S., Baret F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34:75-91.
- Jones C. A. and Kiniry J. R., 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A & M University Press.
- Keating B.A. and Wafula B.M., 1992. Modelling the fully expanded area of maize leaves. *Field Crops Research*, 29:136-176.

- Kubelka P. and Munk F., 1931. Ein Beitrag zur optik der farbans-
triche. *Ann. Tech. Phys.*, 11 :593-601.
- Kumar R. and Silva L., 1973. Ligth ray tracing through a leaf cross
section. *Applied Optics*, 12(12):2950-2954.
- Kuusk A., 1993. A multispectral canopy reflectance model. *Remote
Sensing Reviews*, (soumis).
- Kuusk A., 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Remote
Sensing of Environment*, 50:75-82.
- Lang A.R.G. and Yueqin X., 1986. Estimation of leaf area index from
transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricul-
tural and Forest Meteorology*, 27:229-243.
- Lang A.R.G., Yueqin X. and Norman J.M., 1985. Crop structure and
the penetration of direct sunlight. *Agricultural and Forest Meteo-
rology*, 35, 83-101.
- Ledent J.F., Henkart, TH. and Jacobs, B., 1990. Phénologie du maïs,
visualisation de la croissance et du développement. *Landbouwti-
jdschrift, Revue de l'Agriculture*, 43, 3.
- Ledent J.F., 1976. Beam light interception by twisted leaf surfaces.
Agricultural Meteorology, 17:271-280.
- Ledent J.F., 1978. Beam light interception by leaves with undulating
edges. A simulation of maize leaf sections. *Agricultural Meteo-
rology*, 17:271-280.
- Lewis P. and Muller J.P., 1990. Botanical plant modelling system for
remote sensing simulation studies. *Proceedings IGARSS'90*, Wa-
shington DC (USA), May 21-24, 1990, 3:1739-1742.
- Li X. and Strahler A.H., 1992. Mutual shadowing and directional re-
flectance of a rough surface: A geometric-optical model. W.R. Edi-
tor. *IGARS'92. IEEE, South Shore Harbour Resort and Confe-
rence center*, Houston (Texas, USA), 766-768.

- McKee G.W., 1964. A coefficient for computing leaf area in hybrid corn. *Agronomy Journal*, 56:240-241.
- Myneni R.B., Asrar G. and Hall F.G., 1992. A three-dimensional radiative transfert method for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 41:105-121.
- Myneni R.B. and Ross J., 1991. Photon-vegetation interactions. Applications in optical remote sensing and plant ecology. *Springer Verlag, Berlin Heiderberg, New York*, 565 pp.
- Nilson T., 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agri. Meteorol.* 8:25-38.
- Nilson T., 1991. Radiative transfert in non-homogeneous plant canopies, Tartu (Estonia), 1-22.
- Nilson T. and Kuusk A., 1989. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sensing of Environment* 27:157-167.
- Prévoit L., Aries F. and Monestiez P., 1991. Modélisation de la structure géométrique du maïs. *Agronomie Elsevier/INRA*, 11:491-503.
- Prévoit L. and Brunet Y., 1993. Estimating the vertical profil of the leaf inclination distribution function : the silhouette method. *Crop structure and light mocrclimate. Characterization and applications*, 195-200. INRA editions.
- Prusinkiewics P. and Lindenmayer A., 1990. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag New York.
- de Reffye Ph., Edelin C., Françon J., Jaeger M. and Puech C., 1988. Plants models Faithful to Botanical Structure and Development. *Computer Graphics*, 22(4):151-158.
- Ruget F., Bonhomme R. and Chartie M., 1996. Estimation simple de la surface foliaire des plantes de maïs en croissance. *Agronomie*, 16:553-562.

- Sanz Ch., España M., Baret F., Vaillant L., Hanocq JF., Sarrouy C., Clastre Ph., Bruguier N., Chelle M., Andrieu B., Zurfluh O., 1997. Bi-directional characteristics of leaf reflectance and transmittance: measurement and influence on canopy bi-directional reflectance. *Actes du Septième Symposium International de Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, Courchevel FRANCE*, à paraître.
- Sinclair T. R., 1984. Leaf area development in field-grown soybeans. *Agronomy Journal*, 76:141-146.
- Sinclair T. R., Schreiber M.M., Hoffer R.M., 1973. Diffuse reflectance Hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves. *Agronomy Journal*, 65:276-283.
- Sinoquet H. and B. Andrieu, 1993. The geometrical structure of plant canopies: Characterization and direct measurements methods. *Crop structure and light microclimate: Characterization and applications*, INRA editions.
- Sinoquet H. and Bonhomme R., 1989. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs. II. Structure géométrique du couvert et validation du modèle. *Agronomie*, 9:619-628.
- Sinoquet H., Moulia B. and Bonhomme R., 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparaison between three-dimensional digitizing and plant profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55:233-249.
- Sinoquet H., Oliosio A., Guyon D. and Zurfluh O., 1996. Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire: modèles classiques. In: P. Cruziat and J.P. Lagouarde (Editors). *Actes de l'école chercheurs INRA en Bioclimatologie*, Le Croizic, Avril, 1995. INRA Publications, Thiverval-Grignon (France), 333-350.
- Sonohat G., 1997. Analyse des variations de structure aeriennne de peuplements de maïs dans différentes conditions de compétition intraspécifique. *Thèse*, Université de Paris-Sud, U.F.R. Scientifique d'Orsay.

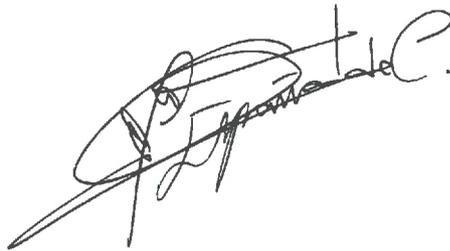
- Stewart D.W. and Lemon F.R., 1969. A simulation of net photosynthesis of field corn, U.S. Army ECOM Technical report 2-681-6, U.S. Army Electronic Command, Fort Huachuca, Arizona.
- Stewart D.W. and Dwyer, L.M., 1993. Mathematical characterization of maize canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66:247-265.
- Stewart D.W. and Dwyer, L.M., 1993. Appearance time, expansion rate and expansion duration leaves of field-grown maize (*Zea mays* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 31-36.
- Suits G.H., 1972a. The calculation of the directional reflectance of vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2:117-125.
- Suits G.H., 1972b. Azimutal variation in directional reflectance of vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2:175-182.
- Thiagarajah M.R. and Hunt L.A., 1981. Effects of temperature on leaf growth in corn (*Zea mays*). *Can. J. Bot.*, 60:1647-1652.
- Tollenaar M., Daynard T. B. and Hunter R. B., 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science*, 19:363-366.
- Vanderbilt V. C., Silva L. F. and Bauer M. E., 1990. Canopy structure measured with a laser. *Applied optics*, 29(I):99-106.
- Vanderbilt V.C., 1985. Measuring plant canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, 18:281-294.
- Vanderbilt V.C. and Grant L., 1985. Plant canopy specular reflectance model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5):722-730.
- Verbrugge M. and Cierniewski J., 1995. A geometrical model of plant bidirectional reflectance. *Proceedings of the International Colloquium Photosynthesis and Remote Sensing of Montpellier FRANCE*, 243-248.

- Verhoef W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: 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.
- Vincourt P., 1984. Relation entre le rythme d'apparition des feuilles, nombre total de feuilles et précocité de floraison chez le maïs. *Agronomie*, 4(8):795-800.
- Walter-Shea E.A., Norman J.M. and Blad B.L., 1989. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. *Remote Sensing of Environment*, 29:161-174.
- Walter-Shea E.A., Norman J.M., Blad B.L. and Robinson B.F., 1990. Leaf reflectance and transmittance in soybean and corn. *Agronomy Journal*, 83(3):631-636.
- Warren Wilson J., 1965. Stand structure and light penetration. I. Analysis by point quadrats. *J. Appl. Ecol.*, 2:383-390.
- Warrington I.J. and Kanemasu E.T., 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agronomy Journal*, 75:749-754.
- Warrington I.J. and Kanemasu E.T., 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod II. Leaf-initiation and leaf-appearance rates. *Agronomy Journal*, 75:755-761.
- Warrington I.J. and Kanemasu E.T., 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod III. Leaf number. *Agronomy Journal*, 75:762-766.
- Watson D. J., 1956. Leaf growth in relation to crop yield. F. L. Milthorpe Ed. *The growth of leaves*. Butterworths, London, 178-191.
- Williams W. A., Loomis R.S., Duncan W.G., Dovrat A. and Núñez F., 1968. Canopy architecture at various population densities and the growth and grain yield of corn. *Crop Science*, 8, May-June, 303-308.

Publications

- España M., Aries F., Baret F., Collache L., Bruguier N., 1995. Modeling canopy structure time course of corn crops. *Proceedings of the International Colloquium Photosynthesis and Remote Sensing of Montpellier FRANCE*, 1995/08/28-30 E.A.R.S.E.L., I.N.R.A., 207-213.
- España M., Chelle M., Aries F., Andrieu B., Baret F., 1996. Utilizacion de maquetas informaticas para simular la variacion direccional de la reflectancia en cultivos de maiz. *Photo-Interpretation*, 3.
- España M., Baret F., Chelle M., Aries F., Andrieu B., 1997. Modélisation 3D du maïs pour la simulation de la reflectance. *Journées Modelisation Architectural, Paris FRANCE*.
- Sanz Ch., España M., Baret F., Vaillant L., Hanocq JF., Sarrouy C., Clastre Ph., Bruguier N., Chelle M., Andrieu A., Zurfluh O., 1997. Bi-directional characteristics of leaf reflectance and transmittance: measurement and influence on canopy bi-directional reflectance. *Proceedings of the Seventh International Symposium. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel FRANCE*.
- España M., Baret F., Aries F., Chelle M., Andrieu B., Prevot L. Modeling corn canopy 3D architecture. Application to reflectance simulation (submitted to *Remote Sensing Reviews*).

*Esto es todo, a mi parecer, salvo etcétera. En Avignon, Francia, el
veintiseis de enero de mil y novecientos y noventa y siete.*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marisa España de Cárdenas'. The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the end.

Marisa España de Cárdenas

Résumé

La télédétection constitue un outil privilégié pour suivre l'évolution de la végétation. L'interprétation des données doit pouvoir bénéficier des connaissances acquises sur la physique du transfert radiatif et sur la dynamique de mise en place de la structure du couvert. L'objectif de ce travail est le développement d'un modèle de transfert radiatif pour la simulation de la variation directionnelle, spectrale et temporelle de la réflectance, s'appuyant sur une description réaliste de la structure du couvert. Cela suppose le développement d'un modèle de description de la plante et d'un outil adapté pour la simulation précise et rapide de la réflectance.

Un modèle de description de la plante de maïs est développé pour décrire la forme des feuilles, leur dimension et leur hauteur d'insertion, tout le long d'un cycle cultural. Les surfaces paramétriques issues de ce modèle sont approchées par des triangles, ce qui permet la construction de maquettes informatiques. Des études de sensibilité indiquent qu'il est possible de travailler avec des maquettes simplifiées, sans renoncer à une bonne précision des estimations de la réflectance.

Un modèle de transfert radiatif est proposé. Il consiste à estimer la réflectance simple par double projection et la réflectance multiple par un modèle de milieu turbide (SAIL), à partir d'un indice foliaire effectif, estimé sur la maquette, qui permet de prendre en compte le caractère agrégé du couvert.

Des mesures de réflectance, sur un ensemble représentatif de parcelles, sont comparées aux estimations du modèle proposé. Les maquettes sont tout d'abord ajustées sur les observations. Le modèle de structure semble suffisamment souple pour représenter les différentes situations testées. Les résultats montrent une bonne adéquation entre mesures et simulations, malgré les imprécisions associées aux mesures expérimentales. Par comparaison, le modèle SAIL fournit également de relativement bonnes estimations de la réflectance du couvert. Les améliorations possibles sont discutées, ainsi que ses applications.

