

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VII

Spécialité :

METHODES PHYSIQUES EN TELEDETECTION

présentée par :

Geneviève RONDEAUX

Bibliothèque
I.N.R.A. - C.S.E.
Unité Climat Sol et Environnement
Bâtiment Climat
Site Agroparc
F. 84914 AVIGNON CEDEX 9
FRANCE

POLARISATION DE LA LUMIERE REFLECHIE
PAR UN COUVERT VEGETAL

Soutenu le 26 mars 1990 devant la Commission d'Examen:

MM. C. KLAPISZ	Président
A. CHEDIN	Rapporteur
P.Y. DESCHAMPS	Rapporteur
G. GUYOT	Examineur
M. HERMAN	Examineur

Je tiens à remercier tous ceux qui ont permis la réalisation de ce travail, et plus particulièrement:

- M. M. HERMAN qui a accepté de diriger ce travail et m'a accueillie au Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

- M. G. GUYOT (I.N.R.A.) pour son soutien constant et son appui efficace lors des campagnes expérimentales.

- M. A. CHEDIN (L.M.D.) qui a accepté de parrainer ce travail, et d'en être rapporteur.

- M. P.Y. DESCHAMPS (L.E.R.T.S.) pour le temps consacré à la lecture de ce mémoire.

- M. V.C. VANDERBILT (NASA A.R.C.) qui a aussi accepté de relire ce travail.

- M. C. KLAPISZ (C.N.E.T.) qui me fait l'honneur de présider ce jury.

Mes sincères remerciements vont également à:

- MM. P. LECOMTE et C. VERWAERDE du L.O.A. de Lille, qui ont mis au point le radiomètre-polarimètre *RADISOL*.

- MM. C. SARROUY et J.F. HANOCQ de la station de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. d'Avignon, qui ont réalisé les montages mécaniques nécessaires à l'installation du radiomètre, et qui furent efficacement présents pendant les campagnes de mesures.

- Tous les stagiaires et personnels de l'I.N.R.A. qui participèrent pendant les étés 1987 et 1988 aux collectes et dépouillements des données biologiques, et dont la bonne humeur s'est ajoutée à la qualité de leur travail.

- Mme J. SAUMADE pour son aide inestimable dans la réalisation des illustrations de ce mémoire.

- Toutes les personnes des stations de Bioclimatologie, du STEFCE et de Biométrie de l'I.N.R.A. d'Avignon pour leur soutien amical.

INTRODUCTION

La lumière est une onde électromagnétique représentée par deux vecteurs: un champ électrique et un champ magnétique, orthogonaux entre eux et à la direction de propagation. Son état de polarisation est caractérisé par la direction du champ électrique dans son plan de vibration (plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde). Si, pendant une période, cette direction reste constante, l'onde est polarisée linéairement. De façon générale, l'extrémité du vecteur électrique décrit une ellipse, et l'onde est dite polarisée elliptiquement.

La lumière dite naturelle, n'est pas polarisée: son champ électrique n'a pas de direction privilégiée, ses vibrations sont incohérentes et polarisées aléatoirement. Mais une seule interaction rayonnement-matière suffit à transformer ses propriétés physiques. Celles-ci dépendent alors de l'obstacle rencontré. Une surface lisse réfléchit spéculairement, comme un miroir, et polarise une lumière naturelle, tandis qu'une surface très rugueuse diffuse dans toutes les directions et tend plutôt à dépolariser une lumière incidente polarisée.

La télédétection, qui, par définition, étudie les objets à distance, sans contact matériel avec ceux-ci, utilise ces phénomènes, principalement pour caractériser l'état de rugosité et d'humidité des sols à partir d'ondes radar de polarisation incidente connue. De récents travaux (CURRAN, 1981, 1982; GRANT, 1985, 1987; VANDERBILT et al., 1981, 1984, 1985; WOESSNER et HAPKE, 1987) ont montré que la polarisation pouvait aussi être une source d'information dans les courtes longueurs d'onde, et particulièrement pour l'étude des couverts végétaux.

A l'échelle spatiale, les capteurs actuels des satellites d'observation de la Terre sont en effet essentiellement passifs, et recueillent des données dans les domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge. Le signal radiométrique reçu dans ces longueurs d'onde renseigne en

particulier sur les propriétés optiques des éléments de la surface visée. Il est donc bien adapté à l'étude des couverts végétaux dont les propriétés évoluent au cours du temps en fonction de l'état des plantes.

De nombreuses expériences effectuées dans le monde cherchent ainsi, à partir des informations spectrales, à estimer la phytomasse aérienne chlorophyllienne des couverts végétaux et à déterminer l'état des plantes à un instant donné (GUYOT et SEGUIN, 1988). Une des principales applications se situe dans le domaine agricole et a pour but l'estimation, voire la prévision des productions céréalières qui représentent des surfaces importantes au niveau mondial .

L'interprétation des données satellitaires nécessite la connaissance des relations entre la réflectance spectrale des couverts et leurs paramètres caractéristiques biologiques et structuraux. La complexité des phénomènes mis en jeu a conduit à l'élaboration de modèles mathématiques essayant de rendre compte des principales causes tant physiques que biologiques des valeurs de réflectance. Ces modèles sont validés à partir de mesures au sol ou aéroportées réalisées au-dessus de couverts spécifiques dont les caractéristiques biologiques sont étudiées par ailleurs.

Les connaissances deviennent ainsi de plus en plus précises. Or les bandes spectrales des capteurs embarqués sur satellite sont larges (70 à 200 nm), peu nombreuses (3 pour SPOT, 4 pour LANDSAT MSS, 6 pour LANDSAT TM) et fournissent donc une information limitée. De nouveaux capteurs à bandes spectrales très fines (spectro-imageurs) sont en cours de mise au point (VANE et GOETZ, 1988; JACQUEMOUD, 1988). De son côté, la mesure de polarisation, plus simple à réaliser, peut constituer un complément aux mesures radiométriques habituelles.

Les mesures simultanées de polarisation et de réflectance permettent en effet de séparer la réflectance des couverts en deux composantes: l'une polarisée, et l'autre non polarisée. La lumière polarisée, très directionnelle, provient essentiellement de la réflexion sur la surface des feuilles (GRANT, 1985, 1987). Elle n'est pas corrélée à l'absorption chlorophyllienne. Son estimation apporterait donc une meilleure connaissance d'une part des phénomènes expliquant les effets

directionnels observés, et d'autre part des relations entre la réflectance et le rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.).

Enfin, les capteurs à grand champ, qui permettent un bon suivi de l'évolution de la végétation, sont munis de systèmes optiques pouvant présenter des effets polarisants. Des mesures précises impliquent donc la prise en compte de l'état de polarisation en entrée. La polarisation de ce rayonnement provient de la réflexion sur la surface terrestre, mais aussi de la diffusion subie lors de sa traversée de l'atmosphère (DEUZE et al, 1989). L'évaluation du signal qui parvient au satellite nécessite la connaissance de l'ensemble de ces phénomènes qui se produisent entre la surface du sol et le satellite.

L'analyse de ces phénomènes est le but du programme de recherche "POLDER" (Polarisation et Directionnalité des Réflectances), lancé par le C.N.E.S., le laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale (L.E.R.T.S.) à Toulouse et le laboratoire d'Optique Atmosphérique (L.O.A.) de l'université de Lille.

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre de ce programme en essayant d'analyser la polarisation de la lumière réfléchiée par les couverts végétaux. Il est supporté par l'ATP "Télédétection 87", et a été développé en collaboration avec le L.O.A. et la station de Bioclimatologie de l'I.N.R.A. d'Avignon-Montfavet.

La première partie consiste en une synthèse bibliographique, apparue nécessaire d'une part pour rappeler les éléments de base tant physiques que biologiques qui nous permettront d'interpréter la réflectance polarisée d'un couvert végétal, et d'autre part afin de donner une idée de l'avancement actuel des recherches dans ce domaine.

La deuxième partie débute par l'analyse des résultats de deux campagnes de mesures réalisées sur les terrains expérimentaux de l'I.N.R.A.. Elle est suivie par un essai de modélisation de la composante polarisée de la réflectance d'un couvert végétal, puis de sa composante diffuse. La comparaison de ces théories aux résultats expérimentaux permettra d'estimer dans quelle proportion les effets polarisants sont maîtrisés par ces modèles.

PLAN

I BASES BIBLIOGRAPHIQUES	8
1.1. INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE: POLARISATION DE LA LUMIERE	
1.1.1. Lumière polarisée linéairement	9
1.1.2. Polarisation par réflexion	12
1.1.2.1. Réflexion spéculaire. Equations de FRESNEL	13
1.1.2.1. Polarisation quelconque. Paramètres de STOKES	16
1.1.2.3. Polarisation par diffusion	19
1.1.3. Conclusions pratiques	20
1.2. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR UN SOL NU	21
1.2.1. Définition de la réflectance	21
1.2.2. Propriétés optiques des sols	21
1.2.3. Effets polarisants	22
1.2.4. L'effet "UMOV"	23
1.3. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR LES FEUILLES	26
1.3.1. Structure biologique d'une feuille	26
1.3.2. Propriétés optiques des feuilles	26
1.3.2.1. Signature spectrale d'une feuille	27
1.3.2.2. Effets directionnels	29
1.3.3. Réflectance spéculaire et réflectance diffuse	31
1.3.3.1. Réflexion de surface et réflexion de volume	31
1.3.3.2. Réflectance non-lambertienne	33
1.3.3.3. Réflectance polarisée et réflectance non-polarisée	34
1.4. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR LES COUVERTS VEGETAUX	37
1.4.1. Réflectance d'une culture annuelle	37
1.4.1.1. Signature spectrale	37

1.4.1.2. Effets directionnels	38
1.4.2. Réponse polarisée d'un couvert	40
1.4.2.1. Caractères généraux	40
1.4.2.2. Rôle joué par la géométrie du couvert	41
1.4.2.2.1. Inclinaison des feuilles	41
1.4.2.2.2. Fonction d'inclinaison des feuilles	44
1.4.2.2.3. Autres facteurs	44
1.4.2.3. Evolution du taux de polarisation au cours du temps	45
1.4.3. Application à la télédétection	49
1.5. PASSAGE DES MESURES AU SOL AUX MESURES SATELLITAIRES	51
CONCLUSION PARTIELLE	52
II ANALYSE DE LA REPOSE POLARISEE DE DIFFERENTS COUVERTS AGRICOLES. ESSAI DE MODELISATION.	55
2.1. LA MESURE DE POLARISATION	56
2.1.1. Le système RADISOL	56
2.1.2. Principe de la mesure	58
2.1.3. Etalonnage du radiomètre	59
2.1.3.1. Etalonnage énergétique	59
2.1.3.2. Etalonnage en polarisation	60
2.1.3.3. Repérage du plan de polarisation	64
2.1.4. La mesure	65
2.2. L'EXPERIMENTATION	65
2.2.1. Campagne "Eté 1987"	66
2.2.1.1. Le dispositif expérimental	66
2.2.1.2. Les mesures physiques obtenues	69
2.2.1.3. Premières remarques sur le taux de polarisation	72
2.2.1.4. La réflectance et sa composante polarisée	78
2.2.1.5. Les mesures biologiques	83
2.2.2. Campagne "Printemps-Eté 1988"	88
2.2.2.1. L'expérimentation	88
2.2.2.2. Résultats et analyse	91
2.2.3. Conclusions	97

2.3. MODELISATION DE LA REPONSE POLARISEE D'UN COUVERT	100
2.3.1. Le modèle mathématique	100
2.3.1.1. Géométrie du problème	100
2.3.1.2. Luminance primaire d'un couvert végétal	103
2.3.1.3. Réflectance et polarisation	107
2.3.1.4. Choix de la fonction d'inclinaison des feuilles	109
2.3.2. Résultats du modèle	112
2.3.2.1. La fonction "G" de l'orientation des feuilles	112
2.3.2.2. Le taux de polarisation	114
2.3.2.3. La réflectance polarisée	114
2.3.3. Confrontation aux mesures expérimentales	118
2.3.3.1. Réflectances polarisées "semi-expérimentales"	118
2.3.3.2. Comparaison des réflectances polarisées	122
2.3.3.3. Les taux de polarisation	132
2.3.3.4. Les luminances	139
 CONCLUSION PARTIELLE	 146
 III MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF AU SEIN D'UN COUVERT VEGETAL	 150
 3.1. LE TRANSFERT RADIATIF	 151
3.1.1. Introduction	151
3.1.2. Transfert Radiatif dans un milieu absorbant et diffusant	153
3.1.3. Equation de Transfert dans une atmosphère "plan-parallèle"	154
3.1.4. Transfert Radiatif dans la végétation	158
3.1.4.1. Transmission d'un rayonnement: <i>l'épaisseur optique</i>	158
3.1.4.2. Diffusion d'un rayonnement: <i>la fonction de phase</i>	160
3.1.4.3. Equation de Transfert dans un couvert végétal	163
3.1.4.4. Résolution par la méthode des ordres successifs	165
 3.2. DIFFUSION DE LA LUMIERE PAR UN COUVERT VEGETAL	 169
3.2.1. Le modèle	169
3.2.2. Validation du modèle	169
3.2.2.1. Comparaison à la diffusion moléculaire	169
3.2.2.2. Comparaison au modèle <i>SAIL</i>	173

3.2.3. Diffusion primaire et ordres successifs	175
3.2.4. Comparaison aux luminances expérimentales	177
CONCLUSION PARTIELLE	182
CONCLUSION GENERALE	184
Annexe 1	187
Annexe 2	195
BIBLIOGRAPHIE.	203

PARTIE I

BASES BIBLIOGRAPHIQUES

La caractérisation de l'état d'une culture par sa signature spectrale n'est pas directe. La réflectance du couvert provient de toutes les réflexions et diffusions élémentaires du rayonnement incident d'une part sur les composants du couvert (feuilles, tiges, épis...) et d'autre part sur le sol après la traversée éventuelle d'un certain nombre de surfaces foliaires.

Les phénomènes mis en jeu appartiennent à deux domaines d'études différents, mais ici complémentaires:

- la biologie traduit les relations entre l'état de la culture (âge, santé, rendement) et l'évolution de ses paramètres caractéristiques (indice foliaire, biomasse, contenu en eau...). Son étude se situe d'abord à l'échelle des éléments du couvert (principalement les feuilles) dont les propriétés optiques dépendent de leur structure interne, puis au niveau de l'ensemble du couvert par un suivi du développement des plantes.

- la physique, de son côté, essaie de rendre compte de toutes les interactions, entre la lumière et les tissus biologiques ou le sol, qui sont responsables de la réflectance mesurée. Elle travaille aussi au niveau de la feuille (réflexion de surface, diffusion interne) et au niveau de la structure du couvert (inclinaison des feuilles, densité, taux de recouvrement...).

Toute interprétation des mesures radiométriques de la réflectance polarisée nécessite donc l'étude des mécanismes de la réflexion et de la polarisation de la lumière d'une part par le sol nu, et d'autre part, par les feuilles, avant de synthétiser ces informations au niveau du couvert végétal.

Nous allons, dans un premier temps, rappeler qualitativement les phénomènes physiques qui interviennent dans la polarisation, et examiner leurs conséquences au niveau du sol. Dans un deuxième temps, nous verrons comment une feuille, comme toute surface, peut polariser la lumière, et quelles peuvent être alors les conséquences au niveau de la réponse d'un couvert végétal.

1.1. INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE: POLARISATION DE LA LUMIERE

1.1.1. lumière polarisée linéairement

Selon la théorie électromagnétique de Maxwell, la lumière, comme toute autre radiation électromagnétique, est une onde transversale, puisque les vecteurs électrique \vec{E} et magnétique \vec{H} sont perpendiculaires à la direction de propagation, et non parallèles à celle-ci, comme dans le cas des ondes longitudinales. L'onde transversale de la figure 1.1 a une caractéristique supplémentaire: elle est polarisée linéairement: en tout point de l'espace, le vecteur \vec{E} a la même direction. Le vecteur \vec{E} qui oscille et la direction de propagation forment un plan, appelé plan de vibration. Tous les plans de ce type, à chaque position de l'onde, sont ici parallèles.

La lumière naturelle qui se propage dans une direction donnée consiste en des trains d'ondes indépendants: elle peut être assimilée à une superposition de lumières polarisées linéairement, de directions aléatoires (Figure 1.2b). Cette lumière est encore une onde transversale, mais elle n'est pas polarisée.

Une lumière non polarisée qui traverse une lame polarisante, appelée polariseur, devient polarisée linéairement (Figure 1.3a). Cette lame ne transmet que les composantes du train d'ondes dont le vecteur électrique vibre parallèlement à sa direction de polarisation indiquée par les lignes parallèles (Figure 1.3b). Elle absorbe les composantes perpendiculaires.

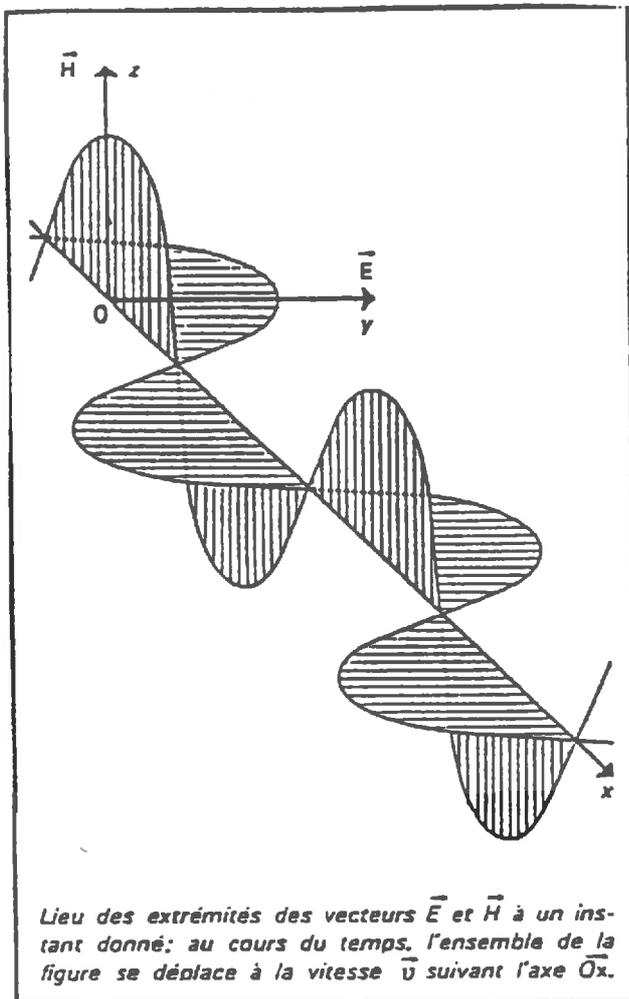


Figure 1.1

Onde transversale polarisée linéairement qui se déplace suivant l'axe Ox .

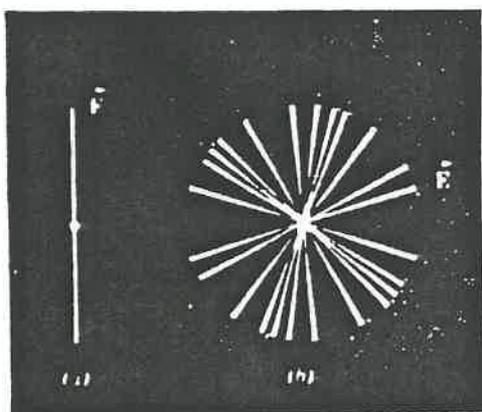
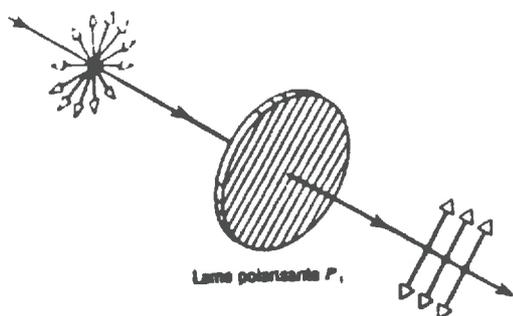


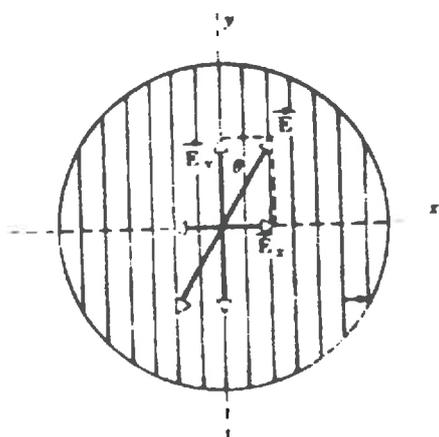
Figure 1.2

(a) Onde transversale polarisée linéairement qui se déplace vers nous, et qui ne montre que le vecteur électrique.

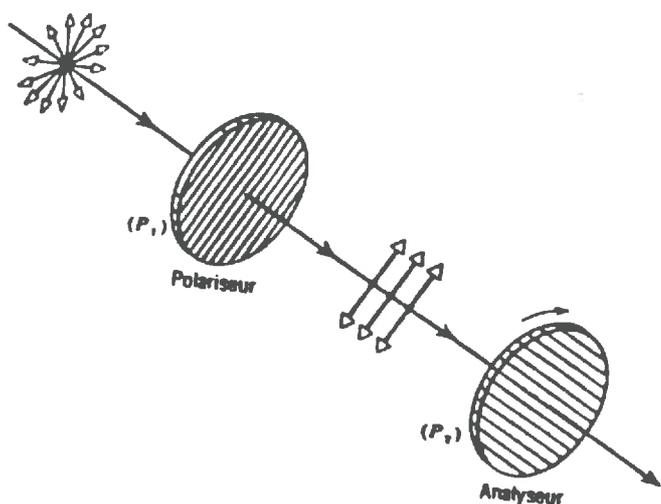
(b) Onde transversale non polarisée, considérée comme une superposition au hasard de plusieurs trains d'ondes polarisés linéairement.



(a) Une lame polarisante produit de la lumière polarisée linéairement à partir de la lumière non polarisée. Les lignes parallèles, qui ne sont pas réellement visibles sur la lame, suggèrent la direction caractéristique de la polarisation de la lame.



(b) Un train d'ondes \vec{E} est l'équivalent de deux composantes \vec{E}_x et \vec{E}_y . Seulement \vec{E}_y est transmis par le polariseur



(c) La lumière non polarisée n'est pas transmise par des lames polarisantes croisées.

Figure 1.3 : Polarisation par des lames polarisantes

Lorsqu'une deuxième lame (appelée analyseur) est placée derrière la première (Figure 1.3c), la lumière émergente ne change pas d'état si les directions de polarisation des deux lames sont parallèles. Mais si ces directions sont perpendiculaires, on observe l'extinction du faisceau. Cet analyseur permet ainsi de repérer la direction de polarisation de la lumière à la sortie du polariseur. Et si θ est l'angle formé par les directions de polarisation du polariseur et de l'analyseur, l'intensité transmise I varie selon l'équation:

$$I = I_m \cos^2\theta \quad (\text{Loi de MALUS})$$

où I_m est la valeur maximale de I , atteinte quand les deux directions sont parallèles ($\theta=0^\circ$ ou $\theta=180^\circ$).

Cette expérience est très facilement réalisable avec des lames polarisantes commerciales (polaroïd) dont la direction de polarisation est établie lors de la fabrication: des molécules à longues chaînes sont encastrées dans une lame mince de plastique flexible, puis étirées afin d'être alignées parallèlement les unes par rapport aux autres.

Mais il existe, dans la nature, de nombreux matériaux qui polarisent la lumière, et de façon plus au moins complexe. Nous allons voir comment toute réflexion sur une surface quelconque peut aussi polariser un rayonnement.

1.1.2. Polarisation par réflexion

La réflectance d'un milieu, représentative du rayonnement mesuré à distance, provenant de ce milieu, résulte des aptitudes de celui-ci dans l'un des mécanismes suivants (ou plusieurs simultanément):

- réflexion ou diffusion de surface des rayons solaires incidents
- absorption de ce rayonnement
- réflexions et/ou diffusions de ce rayonnement sur les constituants internes du milieu.

Le phénomène de réflexion ou de diffusion est conditionné par l'état des surfaces et la dimension des aspérités que rencontrent une longueur d'onde incidente.

1.1.2.1. Réflexion spéculaire. Equations de FRESNEL.

Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre une surface plane et lisse, qui sépare deux milieux d'indices de réfraction n_1 et n_2 ($n_2 > n_1$), une fraction est réfléchi et l'autre est réfractée (Figure 1.4). Les trois rayons sont dans le même plan. Le rayon réfléchi fait le même angle avec la normale à la surface que le rayon incident. Si θ_i est l'angle d'incidence, et θ_t l'angle de réfraction, ils sont liés par la relation de SNELL-DESCARTES:

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$

L'analyse du faisceau réfléchi à l'aide d'une lame polarisante montre que celui-ci est totalement polarisé linéairement, uniquement lorsque les faisceaux réfléchis et réfractés sont perpendiculaires; et son plan de vibration est alors perpendiculaire au plan d'incidence. Ce phénomène se produit donc quand:

$$\operatorname{tg}\theta_i = n_2/n_1 = n$$

c'est-à-dire $\theta_i = \theta_B$, angle de BREWSTER.

Aux autres angles d'incidence, le rayon réfléchi n'est jamais complètement éteint lorsqu'on lui fait traverser un analyseur tournant: l'intensité sortante passe par un minimum. On dit que le faisceau est partiellement polarisé.

Ces lois de la réflexion est résolues mathématiquement par les équations de FRESNEL.

Les champs électrique et magnétique d'une onde sont représentés par des fonctions sinusoïdales de double périodicité (dans le temps et dans l'espace). Une lumière monochromatique naturelle peut être regardée comme formée à chaque instant par deux vibrations transversales, polarisées rectilignement dans deux azimuts quelconques perpendiculaires entre eux. Ces deux vibrations sont incohérentes, c'est-à-dire que leur amplitude et leur phase changent, de façon parfaitement aléatoire, plusieurs milliards de fois par seconde, mais en gardant une intensité moyenne constante.

Lors du passage d'un milieu à un autre, si les champs électrique et magnétique incidents sont décomposés suivant les axes perpendiculaire (R) et parallèle (L) au plan de réflexion, la continuité de leurs composantes tangentielles (parallèles à la surface de séparation) impose

les conditions suivantes entre les champs incidents (indice i) et réfléchi (indice r):

$$\frac{E_r^R}{E_i^R} = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} = R_R$$

$$\frac{E_r^L}{E_i^L} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} - n^2\cos\theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i} + n^2\cos\theta_i} = R_L$$

Le facteur de réflexion est alors: $R = \sqrt{R_R^2 + R_L^2}$

et le taux de polarisation: $P = \frac{R_R^2 - R_L^2}{R_R^2 + R_L^2}$

Les facteurs R , R_R^2 , R_L^2 sont représentés sur la figure 1.5, en fonction de l'angle d'incidence θ_i , pour $n=1,50$. R_R^2 est le facteur de réflexion correspondant à une vibration incidente polarisée rectilignement, perpendiculaire au plan d'incidence; R_L^2 correspond à une vibration parallèle au plan d'incidence (c'est-à-dire contenue dans ce plan).

- Sous incidence normale ($\theta_i=0^\circ$), ces facteurs sont identiques car le plan d'incidence n'est pas défini: les deux vibrations sont symétriques.

- Sous incidence rasante, $R_R^2 = R_L^2 = 1$.

- Pour des angles intermédiaires, les courbes se séparent: R_R^2 croît régulièrement, R_L^2 s'annule à l'angle de BREWSTER (ici voisin de 57°), puis croît plus rapidement. (FLEURY et MATHIEU, 1959).

Ces variations entraînent celles du taux de polarisation (figure 1.6):

- Pour l'incidence normale, $R_R^2=R_L^2$ et la réflexion d'une lumière naturelle est naturelle.

- Lorsque l'incidence augmente, R_L^2 est toujours inférieur à R_R^2 : la réflexion donne de la lumière partiellement polarisée, dans laquelle prédomine la vibration perpendiculaire au plan d'incidence.

- A l'angle de BREWSTER, $R_L^2=0$ et la polarisation rectiligne de la lumière est complète, la vibration étant normale au plan d'incidence.

Dans l'air, $n_1=1$. L'indice n (n_2) des surfaces naturelles est une fonction de la longueur d'onde. Mais les variations de n sont toujours très faibles, et si la polarisation est complète pour une radiation, elle est à peu près complète pour toutes les autres radiations du spectre visible.

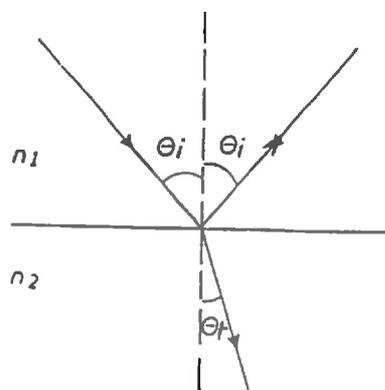


Figure 1.4
Réflexion et réfraction
d'un rayon lumineux.

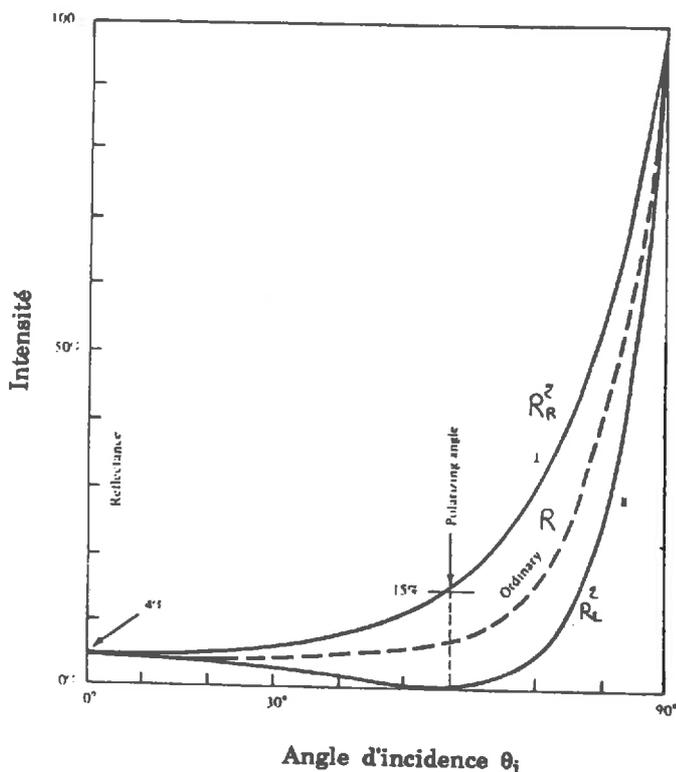


Figure 1.5
Variation des facteurs de
réflexion en fonction de l'angle
d'incidence θ_i :
cas où $n_2/n_1 = 1.5$
(d'après Jenkins and White, 1957
Egan, 1985)

Taux de polarisation

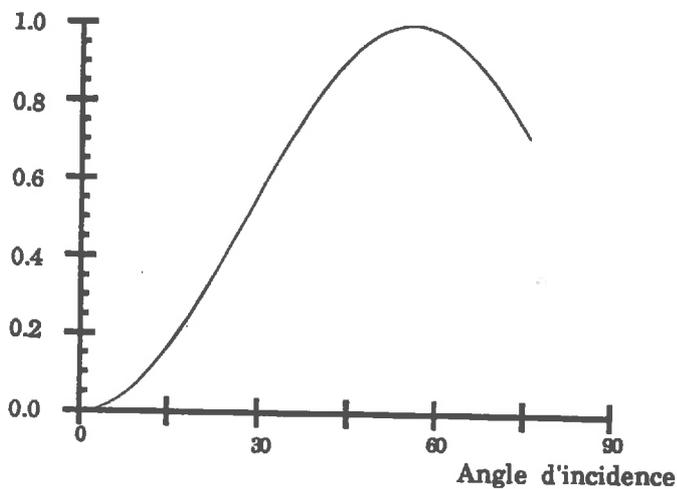


Figure 1.6
Variation du taux de polarisa-
tion du rayonnement réfléchi en
fonction de θ_i .

Lorsque la lumière se réfléchit sur un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$), la loi de SNELL-DESCARTES s'applique encore; mais si θ_i augmente, il arrive un moment où $\sin\theta_t$ doit être supérieur à 1. Il n'existe alors plus de rayon réfracté. La lumière est totalement réfléchie. L'angle limite est donc tel que:

$$\sin\theta_i = n_2/n_1.$$

Si la lumière incidente est de la lumière naturelle, la lumière totalement réfléchie reste naturelle. Si la lumière incidente est polarisée rectilignement, le faisceau réfléchi est partiellement polarisé (BRUHAT et KASTLER, 1959).

1.1.2.2. Polarisation quelconque. Paramètres de STOKES

Jusqu'ici, nous nous sommes contentés de traiter l'état de polarisation linéaire d'un rayonnement. Mais plus généralement, la polarisation linéaire n'est qu'un cas particulier de la polarisation circulaire, elle-même cas particulier d'une vibration elliptique (Figure 1.7).

La description générale de l'état de polarisation d'un faisceau lumineux n'est donc pas directe. Elle nécessite de connaître quatre paramètres:

- l'intensité totale du rayonnement
- le pourcentage de lumière polarisée
- le plan de polarisation
- l'ellipticité.

Comme il est impossible de faire apparaître ces quatre quantités différentes dans une même équation physique, celles-ci sont représentées mathématiquement par les paramètres de STOKES, définis par:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = E_L E_L^* + E_R E_R^* = I_L + I_R \\ Q = E_L E_L^* - E_R E_R^* = I_L - I_R \\ U = E_L E_R^* + E_L^* E_R \\ V = i(E_L E_R^* - E_L^* E_R) \end{array} \right.$$

où E^* désigne le conjugué de E , E_L la composante de E suivant un axe de référence \vec{L} (figure 1.8) et E_R sa composante perpendiculaire.

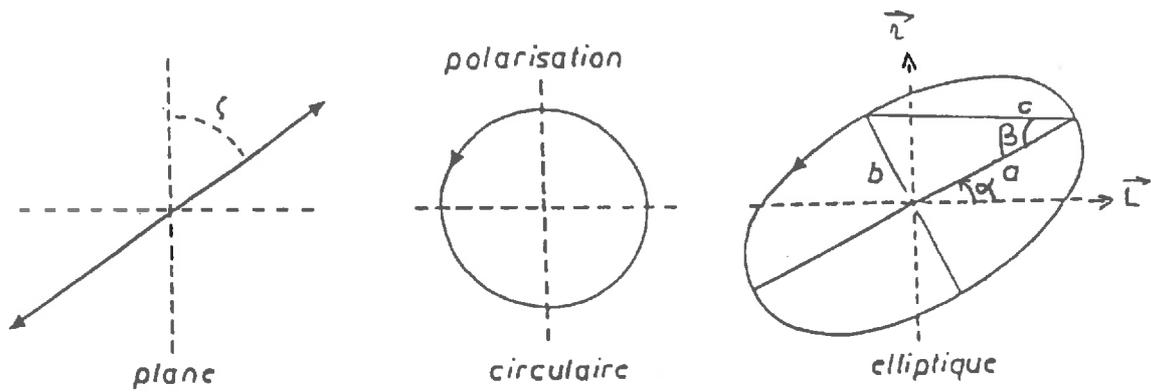


Figure 1.7

Les différents états de polarisation d'une onde électromagnétique.

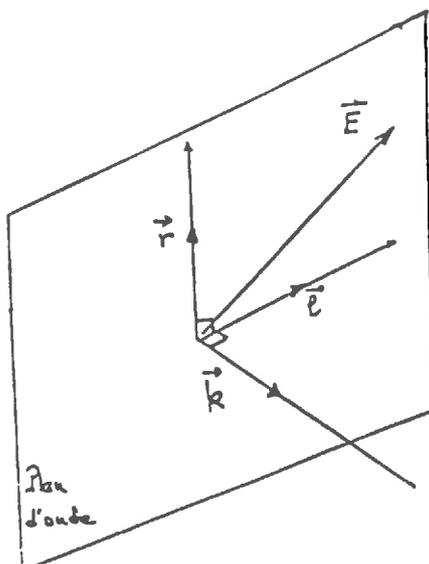


Figure 1.8

Le vecteur électrique \vec{E} peut être décomposé suivant deux axes arbitraires perpendiculaires, dans le plan d'onde; l'onde se propageant dans la direction \vec{k} .

Ces paramètres sont reliés à ceux de l'ellipse (Figure 1.7) par:

$$\begin{cases} I = c^2 = a^2 + b^2 \\ Q = c^2 \cos^2\beta \cos^2\alpha \\ U = c^2 \cos^2\beta \sin^2\alpha \\ V = c^2 \sin^2\beta \end{cases}$$

I est l'intensité totale du rayonnement; Q , U et V n'ont pas de signification physique propre: ils permettent de retrouver la direction du grand axe de l'ellipse et l'ellipticité:

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{U}{Q} \quad \sin 2\beta = \frac{V}{I} = \frac{V}{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}$$

Pour un rayonnement totalement polarisé, les quatre paramètres sont liés par la relation: $I^2 = Q^2 + U^2 + V^2$.

Pour une vibration linéaire, il est clair que $V=0$.

La lumière naturelle n'a pas de direction privilégiée: elle est caractérisée par les paramètres $(I,0,0,0)$.

En général, un rayonnement est partiellement polarisé. Il est considéré comme la superposition d'une lumière naturelle et d'une vibration elliptique:

$$(I,Q,U,V) = (I_{\text{nat}},0,0,0) + (I_{\text{pol}},Q,U,V)$$

L'additivité des paramètres de STOKES impose alors que:

$$I^2 > Q^2 + U^2 + V^2$$

et le pourcentage de lumière polarisée est:

$$P = \frac{I_{\text{pol}}}{I} = \frac{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}{I}$$

Lorsqu'on s'intéresse aux effets naturels, la nature elle-même nous offre une simplification: les interactions du rayonnement solaire en lumière naturelle, avec le sol ou l'atmosphère, ne génèrent aucune ellipticité, et, dans les différents calculs, nous pouvons donc omettre le paramètre V , égal à zéro (DEUZE et al., 1988).

1.1.2.3. Polarisation par diffusion

Contrairement au phénomène de réflexion spéculaire, la diffusion engendre une distribution angulaire de l'énergie: le rayonnement est réfléchi dans toutes les directions, avec une probabilité variable selon le type d'obstacle rencontré.

Ainsi, au cours de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules gazeuses et les particules en suspension:

- la diffusion de Rayleigh est causée par de petites particules, de dimension caractéristique "d" bien inférieure à la longueur d'onde incidente ($\lambda > d$). Par rapport à la source lumineuse, l'intensité diffusée vers l'avant et vers l'arrière est deux fois plus importante que celle diffusée perpendiculairement au rayonnement incident, mais seule cette dernière est totalement polarisée.

- la diffusion de Mie provient de particules de taille un peu plus grande par rapport à la longueur d'onde ($d/2 < \lambda < d$). L'intensité diffusée est essentiellement concentrée vers l'avant, c'est-à-dire autour de la direction du rayonnement incident.

Ces phénomènes se retrouvent sur une surface rugueuse.

- Si la surface présente des rugosités de dimensions caractéristiques petites devant la longueur d'onde du rayonnement incident, celui-ci est réfléchi selon une diffusion de Rayleigh. Le spectre d'une lumière blanche s'enrichit alors dans le bleu. Seul le rayonnement diffusé perpendiculairement à la direction incidente est totalement polarisé. Il est partiellement polarisé dans les autres directions, quel que soit le plan d'observation. Mais si la densité des particules sur la surface augmente, la polarisation diminue.

- Si la taille caractéristique des rugosités est comparable à la longueur d'onde incidente, la surface est un diffuseur de Mie. Le rayonnement est diffusé sans direction privilégiée nette: il est partiellement polarisé et sa composition spectrale n'est pas affectée.

- Si les rugosités sont de dimensions très supérieures à la longueur d'onde, la réflexion est spéculaire (cf. 1.1.2.1).

1.1.3. Conclusions pratiques

Ces rappels ont mis en évidence le fait que la polarisation est d'abord un phénomène de surface. Elle dépend de la taille des rugosités rencontrées par l'onde incidente. Mais ces rugosités sont rarement régulières. Si une surface rugueuse contient deux échelles de rugosité distinctes: une grande et une petite comparées à la longueur d'onde incidente, la diffusion proche de la direction spéculaire est alors dominée par une rugosité de grande échelle, et la diffusion éloignée de la direction spéculaire est déterminée par la rugosité de petite échelle (FUNG, 1984). Pour plus de précision, il faudrait aussi distinguer une échelle de rugosité verticale, et une horizontale. Mais sauf si elles sont très grandes par rapport à la longueur d'onde, les dimensions caractéristiques de ces rugosités sont conditionnées par l'angle sous lequel elles sont vues.

Dans tous les cas, la polarisation du rayonnement réfléchi dans une direction donnée dépend donc surtout de l'angle du rayonnement incident avec la surface étudiée (repérée par sa normale). La polarisation est en effet totale uniquement à l'angle de Brewster pour la réflexion spéculaire, et à angle droit de la direction incidente en diffusion de Rayleigh.

Cet angle d'incidence est le principal facteur responsable de l'état de polarisation de faisceau réfléchi. La direction et l'intensité de ce faisceau polarisé caractérisent l'état de la surface réfléchissante.

Il apparaît maintenant de façon plus claire comment l'étude de l'état de polarisation du rayonnement réfléchi par une surface peut rendre compte de certaines propriétés de cette surface. Nous allons voir d'abord comment appliquer ces phénomènes à l'étude d'un sol nu par télédétection, avant de passer à un sol recouvert de végétation.

1.2. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR UN SOL NU.

Les premières mesures de polarisation de la lumière réfléchiée par les surfaces naturelles ont été réalisées dans un but astronomique, pour l'étude de la Lune et des planètes (DOLLFUS, 1961). Les recherches actuelles sur la surface terrestre pourront apporter une base solide à la continuation de ces études.

Il existe de nombreux types de sol. Nous n'aborderons pas ici les surfaces minérales et nous nous limiterons à des sols agricoles (mélanges d'éléments minéraux plus ou moins grossiers et de matière organique), susceptibles d'être le support d'un couvert végétal.

Avant de présenter les effets polarisants de ces sols, il est d'abord nécessaire de rappeler brièvement leurs propriétés optiques, qui dépendent de leurs caractéristiques physiques.

1.2.1. Définition de la réflectance

Le facteur de réflectance est le rapport du flux énergétique réfléchi par un élément de surface, dans un cône dont le sommet est sur l'élément de surface, au flux énergétique qui serait réfléchi dans le même angle solide par un réflecteur diffusant parfait recevant le même éclairement (GUYOT, 1989).

Par définition, un diffuseur parfait, ou surface lambertienne, diffuse de façon identique en tout point de l'espace. Sa luminance (flux émis par unité d'angle solide et de surface apparente de la source) est indépendante de l'angle de visée.

La réflectance dite hémisphérique, ne dépend pas de la géométrie de l'éclairement. Mais si celui-ci provient d'une direction donnée (soleil), on définit alors la réflectance bidirectionnelle (Figure 1.9).

1.2.2. Propriétés optiques des sols

La réflectance d'un sol, quelle que soit sa nature, croît progressivement du visible à l'infrarouge moyen. La figure 10 présente les propriétés de quelques sols particuliers.

Le limon considéré est très clair; le sable, par contre, doit être chargé en oxydes métalliques et est sombre. Les bandes d'absorption de l'eau sont peu marquées ou absentes pour le limon, le sable et le terreau. Les mesures ont dû être effectuées sur des sols secs. L'argile présente par contre des bandes d'absorption caractéristiques à cause de l'eau fixée par le matériau.

La réflectance d'un sol est en effet conditionnée par la teneur en eau de celui-ci: les valeurs sont d'autant plus faibles que le sol est plus humide. Plus le sol est humide, plus les bandes intenses d'absorption de l'eau (1450, 1950 et 2500 nm) se retrouvent sur la courbe de réflectance, et même entre ces bandes, l'absorption par l'eau n'est pas nulle. Ce phénomène est illustré sur la figure 1.11 qui représente les spectres de réflectance d'un limon sableux à différentes humidités. Toutefois, il ne rend compte que de l'humidité surfacique et non de l'état réel de l'eau dans le sol.

La rugosité influe aussi sur la réflectance, en modifiant la distribution des zones éclairées et ombrées. D'une façon générale, lorsque la rugosité du sol augmente, sa réflectance diminue, et les variations observées peuvent être importantes (GUYOT, 1989).

1.2.3. Effets polarisants

Comme on l'a vu précédemment, le taux de polarisation de la lumière réfléchi par un sol nu est fonction de l'inclinaison du rayonnement incident, de la direction d'observation et de la nature de la surface.

La figure 1.12 présente les taux de polarisation mesurés en laboratoire sur du sable désertique (a) et un terreau sombre (b), pour différentes longueurs d'onde, et en fonction de l'angle d'observation. Ces angles sont repérés dans le plan d'éclairement incident. $\theta=0^\circ$ représente une visée verticale. Pour $\phi=180^\circ$ l'observation est réalisée face à la source lumineuse, et pour $\phi=0^\circ$ dans la direction de cette source (TALMAGE et CURRAN, 1986). Sur les deux séries de courbes, la polarisation décroît lorsque la longueur d'onde augmente. A chaque longueur d'onde, le maximum est observé dans la direction spéculaire. Les valeurs négatives

traduisent une rotation de 180° du plan de polarisation: elles sont obtenues en rétrodiffusion, "derrière" la source lumineuse.

La terre grasse polarise beaucoup plus le rayonnement réfléchi que le sable, alors que sa réflectance est plus faible (figure 1.10). Ceci s'explique par la différence des particules qui les composent. Les particules translucides du sable diffusent beaucoup la lumière par leur structure interne, alors que les particules opaques de matière organique du terreau l'absorbent plus: la radiation émergente provient donc surtout de la réflexion de surface et est polarisée. Si la réflectance d'une surface sombre est faible, sa polarisation est forte.

Comme la réflectance, la polarisation est aussi influencée par la teneur en eau du sol, mais de façon inverse. L'humidité et les agrégats du sol déterminent en effet sa rugosité. Un sol sec diffuse la lumière alors qu'une surface d'eau la réfléchit spéculairement. Lorsque le sol s'humidifie, l'eau remplit progressivement les micropores, et augmente alors la réflexion dans la direction spéculaire, donc la polarisation. Ces phénomènes sont confirmés par les données expérimentales de la figure 1.13 (CURRAN, 1978). Ces courbes représentent les variations du taux de polarisation, mesuré dans la direction spéculaire, sur des mottes de tourbe, en fonction de l'humidité pondérale. Elles sont tracées pour différentes longueurs d'onde. Et comme les courbes de la figure 1.12, elles montrent aussi une diminution du taux de polarisation lorsque la longueur d'onde augmente.

1.2.4. L'effet "UMOV"

L'ensemble de ces résultats suggère l'existence d'une relation inverse entre le taux de polarisation et le facteur de réflectance. Le comportement spectral de ces deux quantités est en effet opposé. Et une réflectance faible conduit à un taux de polarisation relativement élevé; une réflectance importante à une faible polarisation.

Cette relation est connue sous le nom de l'effet "UMOV", du nom de l'astronome Russe qui fut le premier à la remarquer, en 1905, sur la surface de la Lune (WOESSNER et HAPKE, 1987). Elle est apparue par la suite être une propriété générale des surfaces diffusantes éclairées par le rayonnement solaire.

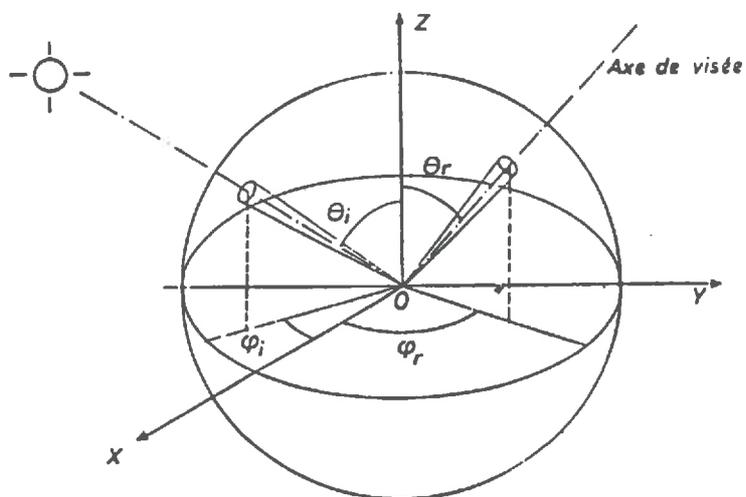


Figure 1.9: Le concept de réflectance bidirectionnelle

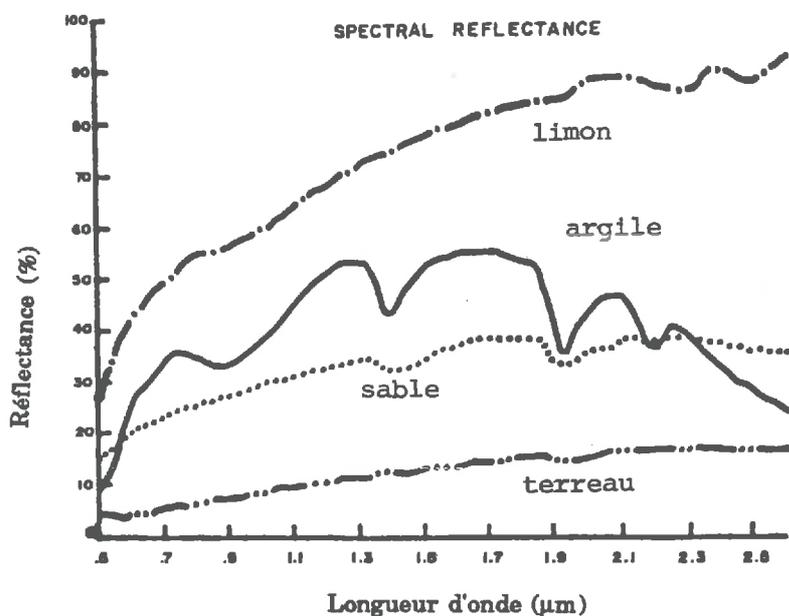


Figure 1.10 : Réflectances de différents types de sol, au même taux d'humidité (d'après JOHANNSON et BAUMGARDNER, 1968).

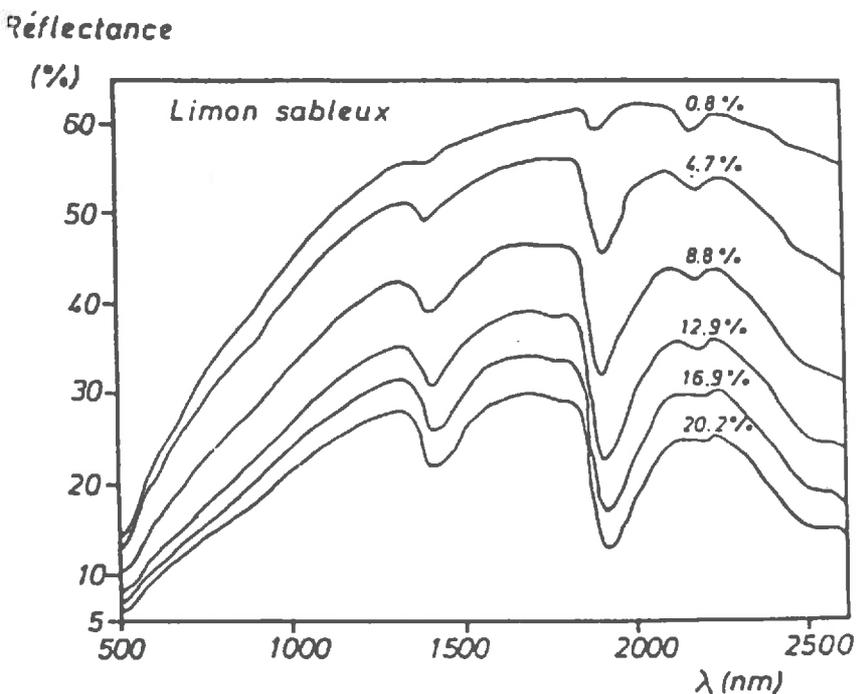


Figure 1.11: Evolution du spectre de réflectance d'un limon sableux en fonction de son humidité (d'après BOWERS et HANKS, 1965).

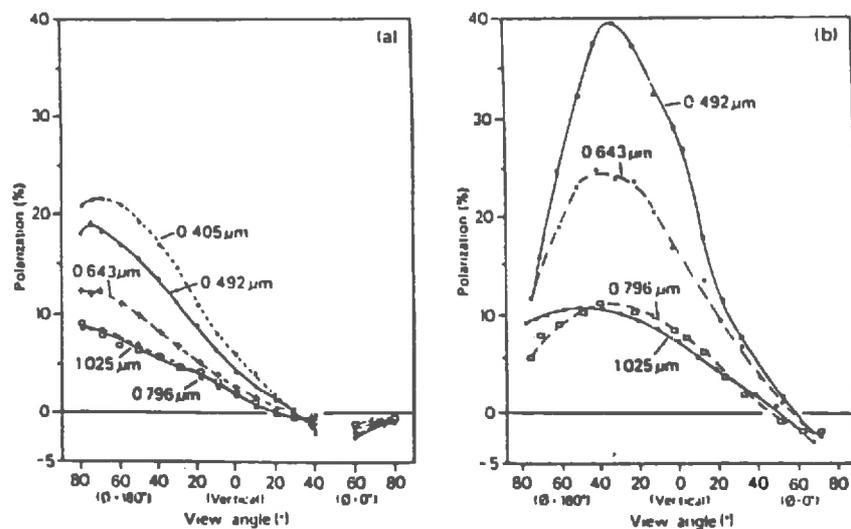


Figure 1.12

Mesures de taux de polarisation (en laboratoire) sur du sable de désert (a) et un terreau sombre (b), à différentes longueurs d'onde et pour différents angles d'observation dans le plan d'incidence du soleil.

(modifié de COULSON, 1966, d'après TALMAGE et CURRAN, 1986)

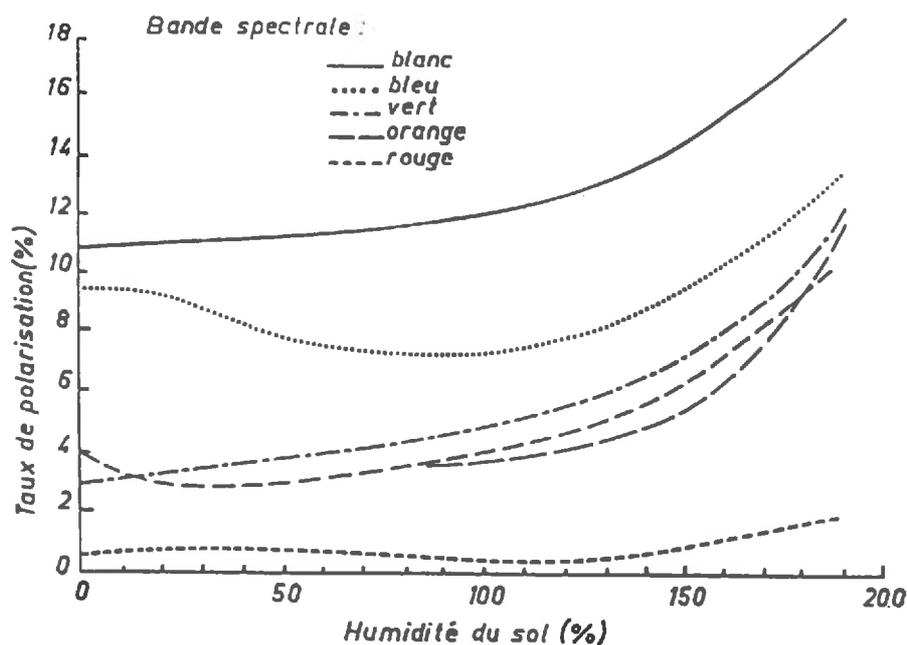


Figure 1.13

Variation du taux de polarisation de la lumière en fonction de l'humidité du sol, pour différentes longueurs d'ondes (d'après CURRAN, 1981).

1.3. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR LES FEUILLES.

Le flux réfléchi par un couvert végétal suffisamment dense et en pleine croissance provient essentiellement de la réflexion ou diffusion du rayonnement solaire par les feuilles. Leur réflectance est caractéristique de leur structure.

1.3.1. Structure biologique d'une feuille

La structure d'une feuille est schématisée sur la figure 1.14. Elle est constituée par un épiderme supérieur, un épiderme inférieur, et entre les deux un tissu très chlorophyllien (le mésenchyme) différencié en deux niveaux: un parenchyme palissadique renfermant des cellules régulièrement alignées, riches en chloroplastes, et un parenchyme lacuneux (mésophylle) dont les cellules plutôt sphériques laissent entre elles de larges espaces remplis d'air.

Sur leur face externe, les épidermes sont recouverts d'une couche protectrice: la cuticule (plus épaisse sur la face supérieure), elle-même recouverte de cire formant des projections cristallines. Ces détails de surface sont du niveau microscopique ou optique. Leur composition chimique déterminée génétiquement, est caractéristique d'une espèce donnée.

Un rayon lumineux réfracté par la surface de la feuille peut donc être à nouveau plus ou moins réfléchi, réfracté ou diffusé à chaque discontinuité rencontrée. Chaque rayon suit un cheminement unique dans les tissus foliaires et contribue à la réponse spectrale de la feuille (SINCLAIR et al., 1973).

1.3.2. Propriétés optiques des feuilles.

Dans le domaine spectral des courtes longueurs d'onde (du visible à l'infrarouge moyen), les propriétés optiques des feuilles ont été bien

étudiées dans de nombreux laboratoires, et en particulier à partir de mesures spectrophotométriques.

1.3.2.1. *Signature spectrale d'une feuille*

Les spectres de réflectance et de transmittance des feuilles vertes ont tous, de façon générale la même allure (Figure 1.15). Trois domaines spectraux caractéristiques y sont mis en évidence:

- dans le visible (400 - 700 nm), la réflectance et la transmittance sont faibles (moins de 10%). La majeure partie du rayonnement est absorbée par les pigments foliaires. Les minima observés dans le bleu (450 nm) et le rouge (670 nm) correspondent aux bandes d'absorption intense des chlorophylles qui constituent 65% des pigments foliaires. Celles-ci sont situées dans les chloroplastes des feuilles vertes et assurent, par transformation de l'énergie lumineuse, le phénomène de photosynthèse. Les autres pigments d'une feuille verte (carotènes, xanthophylles, pigments bruns) sont partiellement masqués par les chlorophylles et leur absorption reste faible.

- dans le proche infrarouge (700 - 1300 nm), les pigments foliaires sont transparents ainsi que la cellulose qui constitue les parois cellulaires. Le rayonnement reçu, peu absorbé, est soit réfléchi, soit transmis. La réflectance passe ainsi de quelques % à près de 50%. Ces fortes valeurs s'expliquent surtout par la structure du mésophylle où les espaces d'air entre les cellules entraînent de nombreuses interfaces à indices de réfraction différents, et donc de nombreuses réflexions. D'ailleurs, quand une feuille se dessèche, le mésophylle perd sa structure, et la réflectance dans le proche infrarouge diminue. Le mésophylle est plus ou moins développé selon les espèces et ce "plateau" de réflectance est d'autant plus élevé que sa structure est plus irrégulière.

- dans le moyen infrarouge (1300 - 2500 nm), les niveaux de réflectance sont essentiellement conditionnés par la teneur en eau des feuilles. On observe, comme sur les courbes de réflectance des sols, la présence des bandes d'absorption de l'eau.

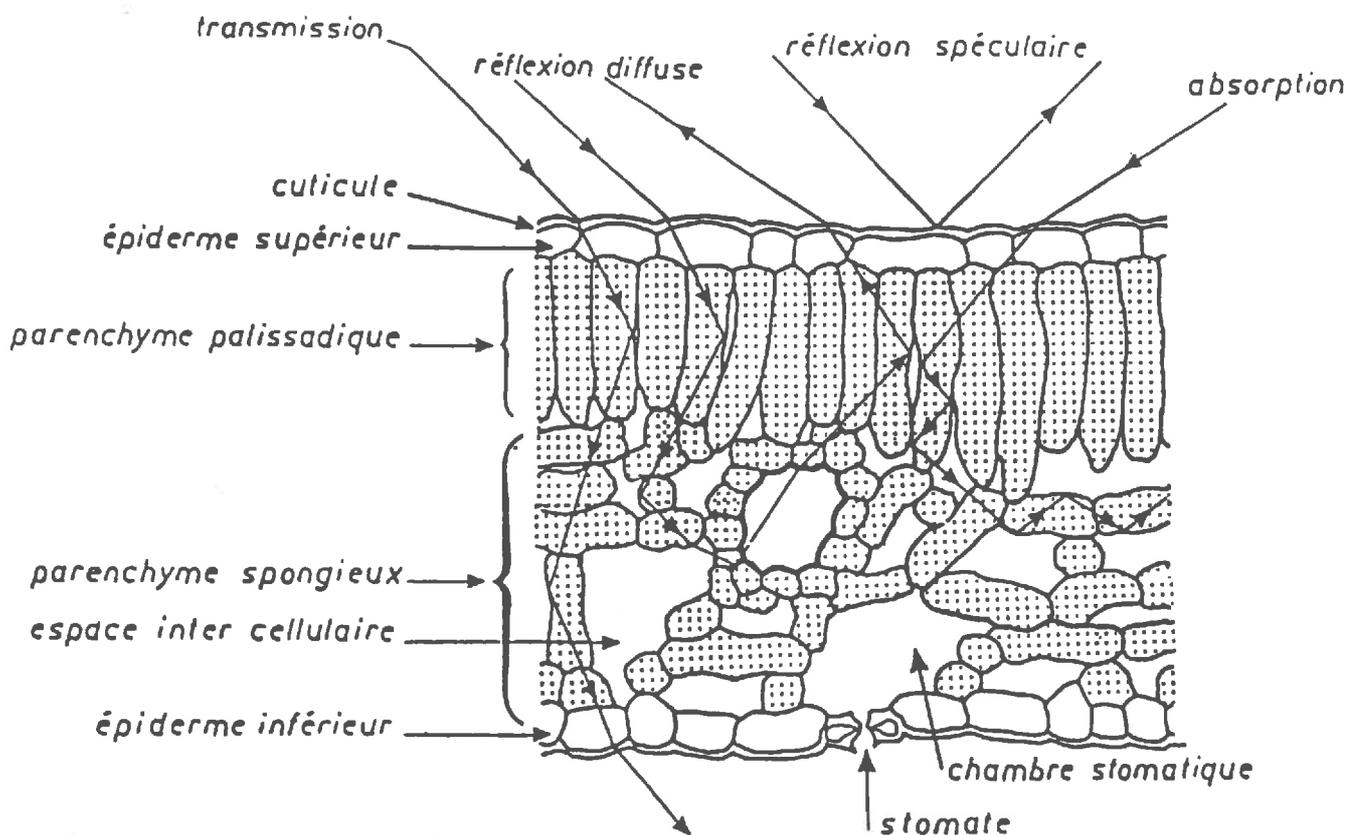


Figure 1.14

Coupe schématique d'une feuille de dicotylédone et représentation des différentes interactions des tissus foliaires avec le rayonnement incident. (d'après LICHTENTHALER et PFISTER, 1978)

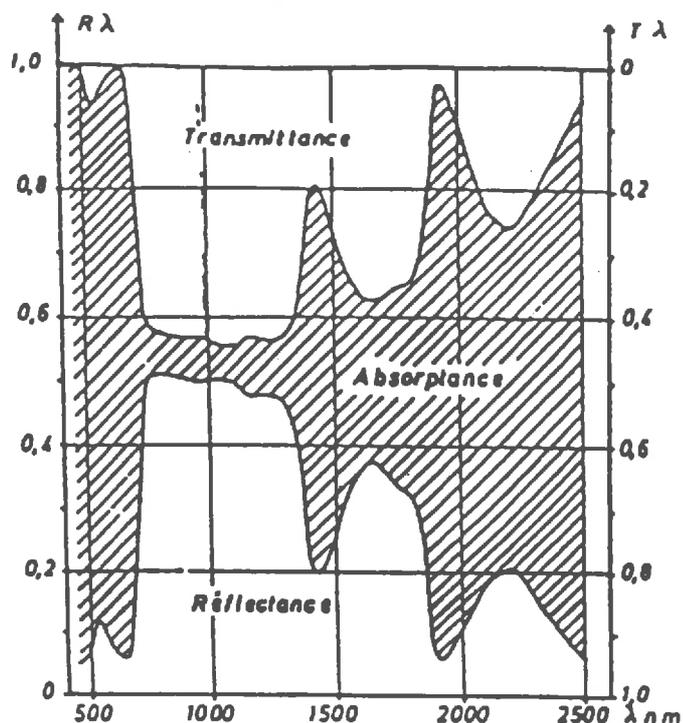


Figure 1.15

Evolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde. L'échelle de gauche correspond à la réflectance, et celle de droite à la transmittance (GUYOT, 1983).

Lorsqu'une feuille devient sénescente, les chlorophylles disparaissent et sont remplacées par les pigments bruns. La réflectance augmente dans le jaune-vert et le rouge, et présente alors une courbe régulièrement croissante entre 400 et 750 nm.

Les points caractéristiques du spectre d'une feuille verte sont donc principalement le petit maximum dans le vert (550 nm), le minimum dans le rouge (650 nm) et la valeur du plateau du proche infrarouge (850 nm). Les bandes spectrales des principaux satellites d'observation de la Terre (LANDSAT et SPOT) sont effectivement centrées sur ces trois points, dont les niveaux de réflectance reflètent l'état des feuilles, donc du couvert végétal.

Ces propriétés optiques des feuilles varient selon les espèces, et selon la face de la feuille éclairée. Leur structure n'est pas symétrique (figure 1.14); les chloroplastes sont souvent plus nombreux sur la face supérieure; l'une des deux faces peut être plus ou moins recouverte de poils interceptant le rayonnement incident.

Ces propriétés dépendent de tous les facteurs pouvant intervenir sur l'anatomie de la feuille: âge, teneur en eau, déficiences minérales, attaques parasitaires... mais elles sont aussi conditionnées par des facteurs externes tels que la position de la source lumineuse et la direction de visée lors d'une prise de mesure.

1.3.2.2. *Effets directionnels*

La figure 1.16 représente les indicatrices de réflectance et de transmittance de feuilles de soja obtenues pour les trois longueurs d'onde caractéristiques et trois directions d'éclairement (d'après BREECE et HOLMES, 1971). La transmittance reste dans tous les cas relativement lambertienne, alors que pour une incidence oblique la réflectance présente une composante importante dans la direction spéculaire. Aux longueurs d'onde du visible (550 et 650 nm), cette composante spéculaire augmente de façon impressionnante d'une part avec l'angle d'incidence et d'autre part avec la direction de visée, mais elle est moins marquée dans le proche infrarouge (850 nm) où la réflectance est plus forte.

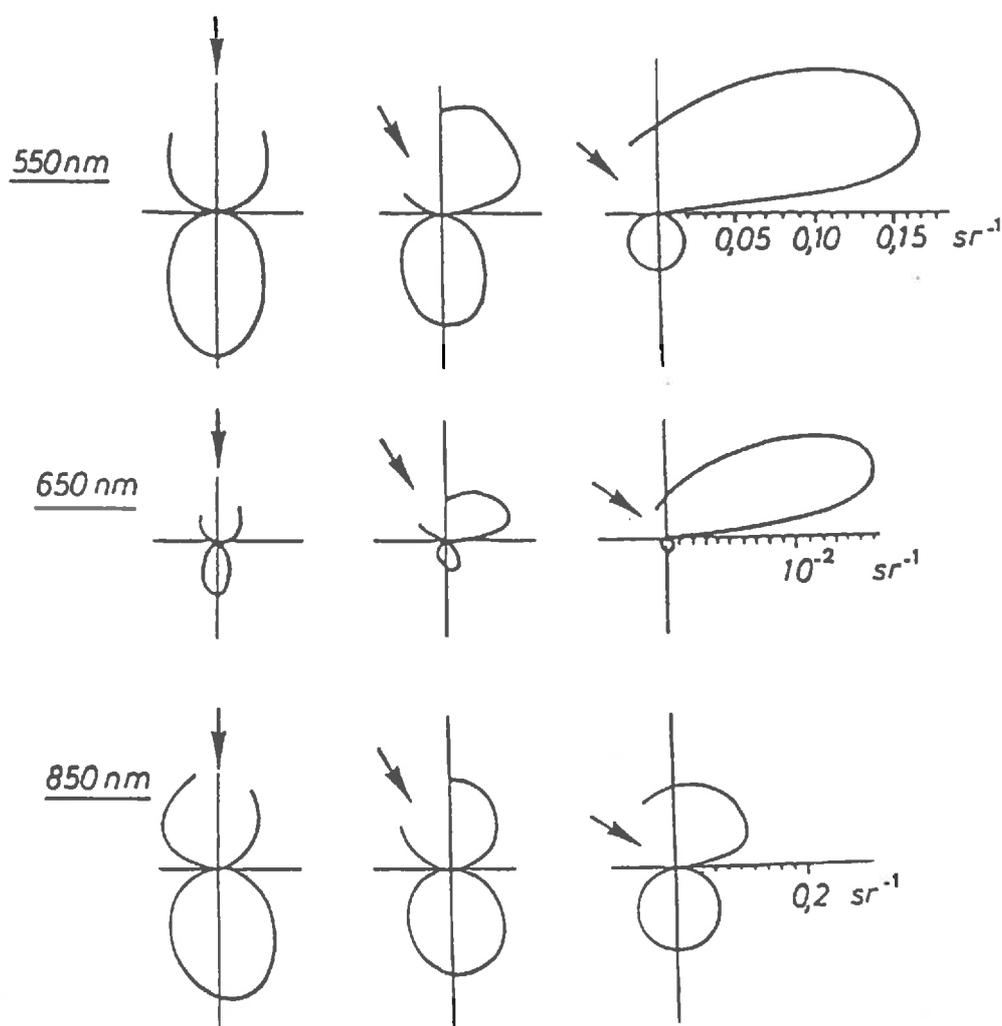


Figure 1.16

Indicatrices de réflectance et de transmittance spectrale de feuilles de soja pour 3 longueurs d'onde et 3 angles d'incidence (indiqués par la flèche: 0° (normale), 30° et 60°).

La figure représente les variations relatives de l'intensité énergétique par unité d'angle solide (sr^{-1}).

(d'après BREECE et HOLMES, 1971)

Donc, même si la réflectance d'une feuille s'explique relativement bien par les interactions de la lumière incidente dans les tissus foliaires internes, et si sous incidence normale, une feuille peut être assimilée à un diffuseur lambertien, cette approximation n'est plus vraie sous incidence oblique. La réflexion spéculaire, qui représente la réflexion de la lumière incidente sur la cuticule de la feuille, n'est alors plus négligeable, surtout dans les régions de faible réflectance, où elle entraîne un effet directionnel important.

Peu d'auteurs ont malheureusement tenu compte de cette composante spéculaire dans l'étude de la réflectance des couverts végétaux. Mais depuis quelques années, le développement important des méthodes de télédétection satellitaire a nécessité l'approfondissement de ces effets directionnels.

1.3.3. Réflectance spéculaire et réflectance diffuse

Une feuille n'est ni un diffuseur parfait, ni un réflecteur purement spéculaire. Sa réflectance présente à la fois des caractéristiques provenant de ces deux phénomènes physiques différents, et peut donc être considérée comme la résultante de deux composantes: une composante spéculaire et une composante diffuse.

1.3.3.1. *Réflexion de surface et réflexion de volume*

La lumière arrivant sur une feuille est soit, totalement ou partiellement:

- réfléchi spéculairement sur la surface
 - diffusée par les éléments rugueux de cette surface
 - transmise dans les tissus foliaires où elle est à nouveau plus ou moins absorbée, réfléchi, diffusée ou transmise à chaque discontinuité rencontrée (cf 1.3.2.1.). Le rayonnement qui éventuellement retourne vers la surface n'a pas de direction privilégiée et est considéré comme diffus.
- La transmittance d'une feuille étant approximativement lambertienne, surtout aux grands angles d'incidence (Figure 1.16), la partie de la réflectance provenant uniquement de la structure interne de la feuille est aussi supposée être lambertienne.

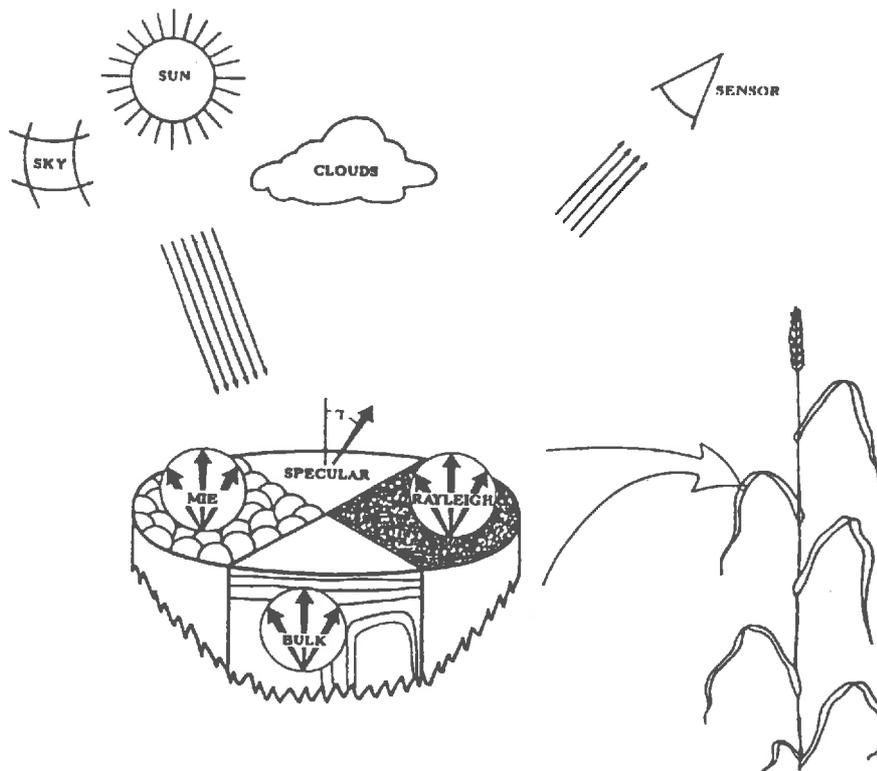


Figure 1.17

Réflexions et diffusions de la lumière par un élément foliaire
(d'après VANDERBILT et GRANT, 1984).

Les effets directionnels de la réflectance totale sont donc dus aux phénomènes de réflexion et diffusion de surface. (Figure 1.17).

1.3.3.2. *Réflectance non-lambertienne*

Le premier phénomène responsable du caractère non-lambertien de la réflectance d'une feuille est la réflexion spéculaire sur la première discontinuité réfringente rencontrée par le rayonnement incident: l'interface air-cuticule. Cette réflexion est régie par les équations de FRESNEL (cf 1.1.2.1.) et est donc d'autant plus importante que l'angle d'incidence est oblique.

Mais la cuticule n'est pas une surface totalement lisse. Elle est recouverte de cire, de protubérances cristallines (cf 1.3.1.) et parfois de poils. Son aptitude à réfléchir ou diffuser la lumière est conditionnée par la taille de ces rugosités devant la longueur d'onde incidente (cf 1.1.2.3.). La cire épicuticulaire est caractéristique d'une espèce donnée: elle peut être sans forme, semi-cristalline ou cristalline (GRANT, 1985). Sa microtopographie dépend donc de sa composition chimique, qui évolue avec l'âge de la feuille, mais aussi avec les conditions de l'environnement (soleil, température, humidité, vent, maladies, insectes...). L'observation au microscope électronique de feuilles de sorgho (GRANT et al., 1987) a révélé par exemple des écailles de cires épaisses de 100 à 160 nm et dont le diamètre varie entre 200 et 1600 nm. Dans les domaines du visible et du proche infrarouge, ces rugosités sont de taille à engendrer des diffusions de Mie. Elles sont relativement trop grandes pour des diffusions de Rayleigh. De plus, le nombre et la dimension de ces rugosités peuvent changer d'un jour à l'autre (lorsque les feuilles sont étudiées dans des conditions naturelles), et donc modifier la réflectance de surface de la feuille.

Ces effets de surface sont indiscernables à partir des mesures de réflectance classiques (radiométriques ou photométriques) qui englobent à la fois les réflexions de surface et de volume. Ils peuvent être étudiés grâce aux mesures du taux de polarisation: celles-ci sont apparues comme un moyen de séparer, et donc d'estimer, les phénomènes internes et de surface. La réflectance lambertienne due aux nombreuses interactions internes n'est pas polarisée, ou dépolarisée, alors que les

réflexions ou diffusions de surface polarisent directement le rayonnement incident.

1.3.3.3. Réflectance polarisée et réflectance non-polarisée

La mesure du taux de polarisation du rayonnement réfléchi peut être réalisée simplement à partir d'un radiomètre classique, dont le signal en entrée est modulé par la rotation d'un polariseur.

Si R_{\max} et R_{\min} représentent respectivement les valeurs maximale et minimale du rayonnement transmis par le polariseur dans une direction d'observation donnée, on peut alors déduire les grandeurs suivantes:

$$\left| \begin{array}{l} R = (R_{\max} + R_{\min})/2 \\ R_p = (R_{\max} - R_{\min})/2 \\ R_n = R - R_p \\ P = 100 \cdot R_p / R \end{array} \right.$$

où R est le facteur de réflectance de la feuille (équivalent à celui mesuré dans les mêmes conditions, sans polariseur); R_p est la composante polarisée de ce facteur de réflectance, R_n la composante non-polarisée, et P est le taux de polarisation linéaire, rapport de la réflectance polarisée sur la réflectance totale.

Ces quatre quantités sont représentées sur les courbes de la figure 1.18, pour cinq longueurs d'onde (450, 500, 550, 650 et 750 nm), dans le cas de mesures effectuées sur les faces inférieures et supérieures des parties vertes de feuilles de *Coleus Blumei* (GRANT, 1985; GRANT et al., 1987). Ces mesures sont réalisées dans le plan de réflexion de FRESNEL (plan défini par la direction du rayonnement incident et la normale à la feuille), à l'angle de BREWSTER ($\theta_i=55^\circ$ pour un indice de réfraction $n=1,43$).

- En A, on retrouve la signature spectrale caractéristique d'une feuille verte (cf 1.3.2.1.). Les valeurs relativement élevées de la réflectance de la face inférieure sont essentiellement dues à la structure interne de la feuille. Le parenchyme lacuneux de la face inférieure (figure 14) diffuse beaucoup plus la lumière que le parenchyme palissadique de la face supérieure à cause de la forme irrégulière de ses cellules et de la présence de nombreuses interfaces air-cellule.

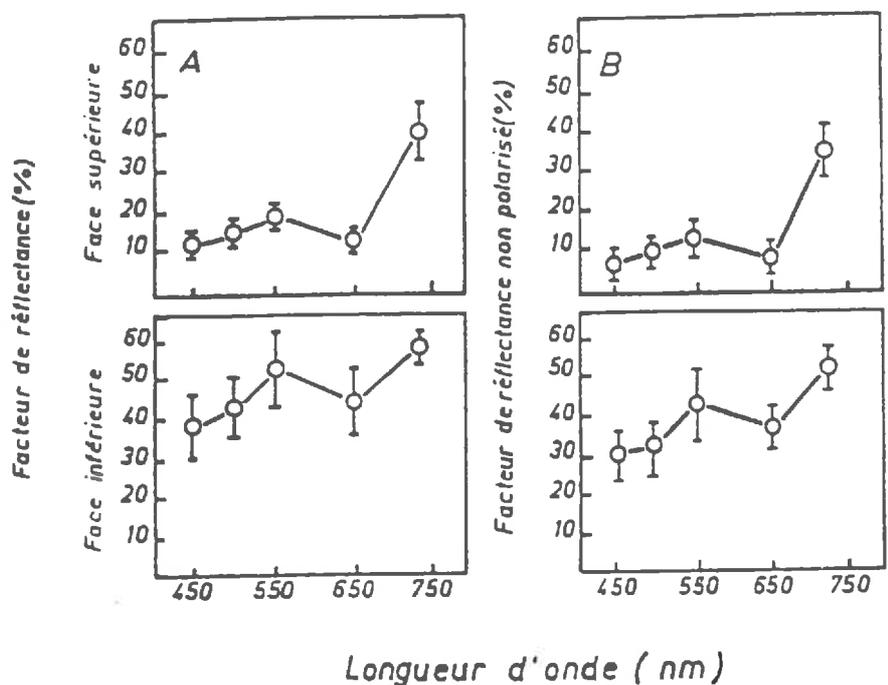


Figure 1.18

Variations du facteur de réflectance et du taux de polarisation de la partie verte des feuilles de *Coleus Blumei* en fonction de la longueur d'onde. Chaque point représente la moyenne de 12 mesures ± 1 écart-type. (d'après GRANT et al., 1987).

- En B, le facteur de réflectance non polarisé (R_n) présente la même dépendance en longueur d'onde que le facteur de réflectance précédent, mais avec des valeurs plus faibles. Cette dépendance suggère donc le fait que ce rayonnement non polarisé provient en majeure partie des tissus internes de la feuille.

- Par contre, sur la partie C, la composante polarisée du facteur de réflectance semble ne pas dépendre de la longueur d'onde. Cette non-dépendance démontre que la polarisation est d'abord un phénomène de surface car on n'observe ni les bandes d'absorption chlorophyllienne dans le domaine visible, ni la forte réflectance dans le proche infrarouge. Le rayonnement n'a pas pénétré dans les tissus internes de la feuille.

- Enfin en D, est représentée la contribution relative de cette composante polarisée de la réflectance. Dans les régions du spectre dominées par l'absorption chlorophyllienne, donc de faible réflectance, le taux de polarisation est élevé, et atteint plus de 40% sur la face supérieure. Mais dans le proche infrarouge où la réflectance est forte, il est relativement très bas. Sur la face inférieure, cette différence est encore sensible, bien que moins importante.

On retrouve ici la relation inverse existant entre le taux de polarisation et le facteur de réflectance, c'est-à-dire l'effet "UMOV", déjà remarqué dans le cas des sols (cf 1.2.4.).

Ces résultats expérimentaux mettent en évidence le contraste entre les composantes polarisée et non-polarisée de la réflectance, et confirment ainsi les remarques physiques théoriques précédentes.

La réflectance polarisée rend compte des interactions du rayonnement incident avec la surface de la feuille. La diffusion de Rayleigh n'est marquée par aucun effet particulier dans le bleu (450 nm) et n'est donc pas significative. Dans le plan de Fresnel, la polarisation est conditionnée tout d'abord par la réflexion spéculaire. La diffusion de Mie permet d'expliquer l'existence d'une polarisation non nulle hors de ce plan.

La réflectance non-polarisée est caractéristique de la structure interne de la feuille. Son estimation est particulièrement intéressante dans les programmes de recherche agronomiques qui tiennent compte du rayonnement photosynthétiquement actif.

1.4. POLARISATION DE LA LUMIERE PAR LES COUVERTS VEGETAUX

Les feuilles sont pour la plante les organes principaux d'échanges radiatifs et énergétiques avec l'atmosphère (PREVOT, 1985), et leur description traduit l'âge et l'état de santé de la plante.

Les surfaces foliaires d'un couvert sont ainsi déterminantes de toute mesure physique effectuée au-dessus du couvert. Le premier paramètre caractéristique de la végétation est donc son indice foliaire (L.A.I. pour *Leaf Area Index*), qui est la surface de feuilles rapportée au m² de sol (une seule face étant prise en compte). Cet indice est aussi un moyen de rendre compte du taux de couverture du sol dont les effets perturbent alors plus ou moins la réponse du couvert.

1.4.1. Réflectance d'une culture annuelle

1.4.1.1. *Signature spectrale*

Nous avons vu que les propriétés optiques des feuilles sont différentes de celles du sol. D'une façon générale, un sol est plus réfléchissant que les feuilles vertes dans le visible, et l'est moins dans le proche infrarouge. Lorsqu'un couvert végétal, de densité normale se développe, l'effet du sol va s'estomper progressivement devant le spectre de réflectance caractéristique des feuilles. Dès que le sol est totalement caché, la réflectance du couvert atteint sa valeur limite : il y a saturation des niveaux de réflectance, même si l'indice foliaire vert du couvert continue d'augmenter. Puis, avec la floraison ou l'épiaison et ensuite la sénescence du couvert, les variations de la réflectance s'inversent.

La figure 1.19 représente ainsi l'évolution de la signature spectrale d'une parcelle de blé de printemps à différentes étapes de sa croissance. Les valeurs extrêmes de la réflectance (minimales dans le visible et maximales dans le proche infrarouge) sont obtenues à la montaison (grossissement et montée de l'épi à l'intérieur de la tige centrale d'un brin de blé). Lorsque les épis sont sortis, l'évolution de la réflectance change de sens: celle-ci diminue dans le proche infrarouge et augmente dans le

visible et le moyen infrarouge. Car les épis, qui ne possèdent pas les pigments contenus dans les feuilles, interceptent les premiers une partie du rayonnement incident; puis les feuilles, de leur côté, commencent à jaunir et à se dessécher.

La réflectance des feuilles jaunes est comparable à celle du sol. L'effet du sol, qui dépend bien-sûr du taux de recouvrement de la végétation, est donc aussi d'autant plus sensible que le contraste entre la réflectance du sol et celle de la végétation est plus marqué. Ce contraste est maximum quand toutes les feuilles sont vertes; et les niveaux de saturation de la réflectance du couvert sont atteints plus rapidement dans le visible (indice foliaire de 2 ou 3 pour des feuilles faisant un angle de 40° avec la tige) que dans le proche infrarouge (indice foliaire de 5 ou 6). Cette valeur limite de l'indice foliaire dépend du port des feuilles: elle sera plus élevée pour un couvert dont les feuilles sont dressées (couvert érectophile) que pour un couvert planophile (feuilles étalées).

1.4.1.2. *Effets directionnels*

La figure 1.20 donne un aperçu général de la distribution angulaire de la réflectance d'un couvert suffisamment homogène. Si l'observateur effectue un balayage dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires, il obtiendra des valeurs symétriques de part et d'autre de la visée verticale, et dont les variations relatives dépendront des effets d'ombre des feuilles les unes sur les autres ou sur le sol. Lorsque les mesures sont effectuées dans le plan d'incidence du soleil, les indicatrices de réflectance présentent une forte dissymétrie. Le maximum observé dans le sens des rayons solaires correspond au phénomène de "tache chaude" (ou "hot spot"). Il est plus marqué dans le visible que dans le proche infrarouge.

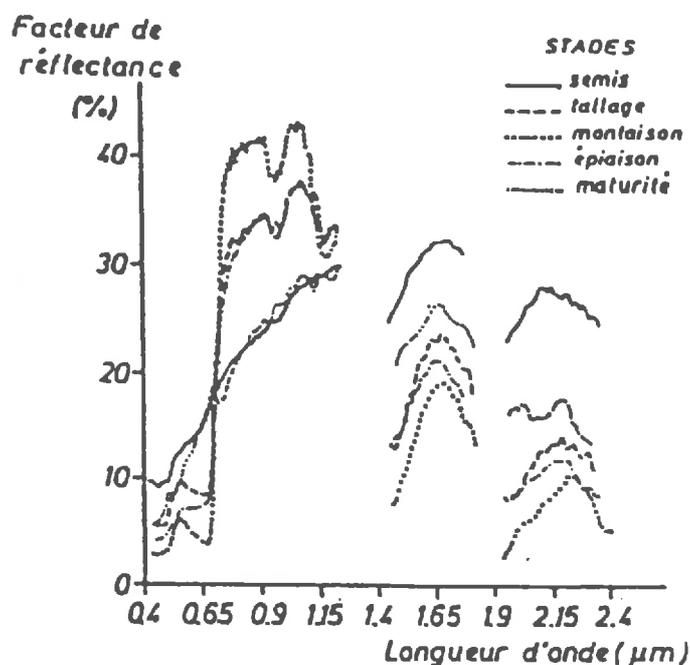


Figure 1.19

Evolution du spectre de réflectance d'un couvert de blé au cours du temps. (d'après BAUER et al., 1981).

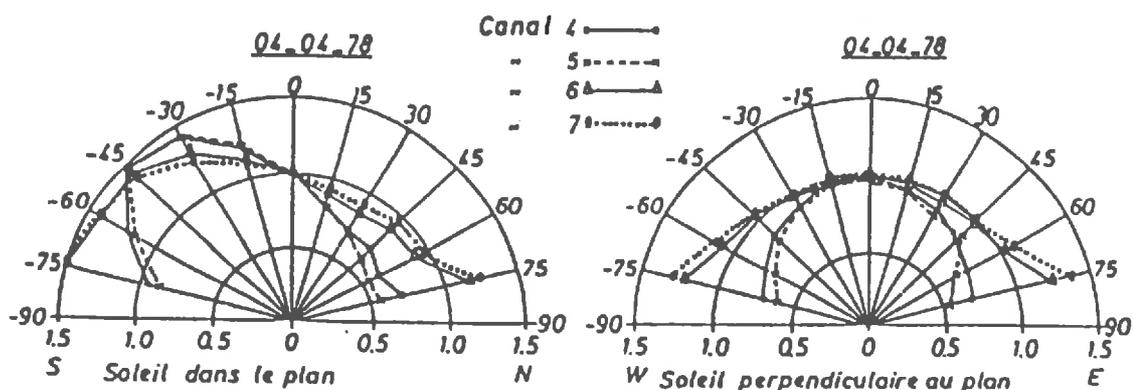


Figure 1.20

Indicatrices de réflexion déterminées sur un couvert de blé *Talent*. La luminance selon la verticale dans chaque bande spectrale (MSS 4, 5, 6 et 7) est prise comme référence et toutes les autres valeurs lui sont rapportées. (L'indicatrice d'une surface lambertienne est un demi-cercle de rayon unitaire). (d'après GUYOT, 1980).

1.4.2. Réponse polarisée d'un couvert

La polarisation par une surface quelconque dépend de sa rugosité (cf 1.1.2.3.). Un couvert végétal peut présenter une surface relativement homogène quand il s'agit d'un pré par exemple ou d'une culture annuelle en pleine période de croissance, alors qu'au contraire une végétation clairsemée (plants ou arbres) ou hétérogène (bosquets dans la campagne) apparaît comme une surface rugueuse.

Le couvert possède aussi une structure interne, représentée par tous les éléments contenus dans la végétation (tiges, feuilles, fleurs, épis, fruits...). Comme à l'intérieur d'une feuille, cette structure est le siège de nombreuses réflexions multiples, mais à une échelle différente. Chaque type de végétation possède une structure particulière qui va conditionner sa réponse polarisée.

1.4.2.1. *Caractères généraux: importance de la géométrie d'observation*

L'étude des mécanismes de la polarisation de la lumière par les feuilles, complétée par différentes expérimentations conduites sur différentes cultures: blé (VANDERBILT et al., 1981, 1985), sorgho (GRANT et al., 1987) ou trèfle (WOESSNER et HAPKE, 1987) a abouti à la conclusion que le taux de polarisation de la lumière réfléchi par un couvert végétal suffisamment dense peut être interprété, avec une assez bonne approximation, comme résultant de la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur toutes les surfaces foliaires éclairées contenues dans le couvert.

Les différents expérimentateurs concluent tous que les variations observées de la réflectance polarisée, mesurée pour différents angles d'incidence et de visée (zénith et azimuth), dépendent uniquement d'une seule variable: l'angle de phase (g) entre la direction incidente et la direction d'observation (figure 1.21); ces deux directions formant le plan de réflexion.

La figure 1.22 présente les résultats obtenus par WOESSNER et HAPKE sur un champ de trèfle. Le taux de polarisation augmente avec l'angle de phase jusqu'à une valeur maximum, puis décroît. Ces résultats rappellent la réflexion de FRESNEL: la polarisation est maximale autour

de la direction spéculaire, et minimale en rétrodiffusion ($g \sim 0$). Le couvert apparaît alors comme une surface relativement homogène. Les valeurs négatives, obtenues pour des angles de phase négatifs, correspondent en fait à une rotation de 180° du plan de polarisation.

On retrouve aussi sur ces courbes le comportement spectral du taux de polarisation déjà observé sur les feuilles: polarisation importante dans le bleu et le rouge, plus faible dans le vert et minimale dans le proche infrarouge (effet UMOV).

1.4.2.2. Rôle joué par la géométrie du couvert

1.4.2.2.1. Inclinaison des feuilles

Les feuilles sont les principaux réflecteurs d'un couvert végétal dense. Le taux de polarisation mesuré au-dessus du couvert sera maximum lorsque l'observation sera effectuée dans des conditions telles que l'on ait une réflexion spéculaire sur un maximum de surfaces foliaires. Il sera minimum lorsque l'on aura un minimum de réflexions spéculaires.

La direction de la réflexion spéculaire est déterminée par l'angle (ω) et le plan formé par la direction du rayonnement incident et la normale à la surface réfléchissante (plan de réflexion de FRESNEL). Lors d'une prise de mesure (i et e fixés) (figure 1.21), ω est l'angle entre le rayonnement incident et la normale des surfaces de feuilles orientées de façon à réfléchir spéculairement vers le détecteur:

$$\omega = \frac{g}{2}$$

Si la majorité des feuilles sont horizontales (couvert planophile) le taux de polarisation maximum est observé pour un angle de visée égal à l'angle d'incidence i du rayonnement sur le couvert. Si les feuilles sont inclinées, le taux de polarisation est maximum pour une inclinaison de visée plus importante (figure 1.23).

Ainsi deux couverts à ports foliaires différents n'auront pas la même réponse polarisée. Le couvert doit donc être caractérisé par son indice foliaire mais aussi par sa fonction de distribution d'inclinaison des feuilles.

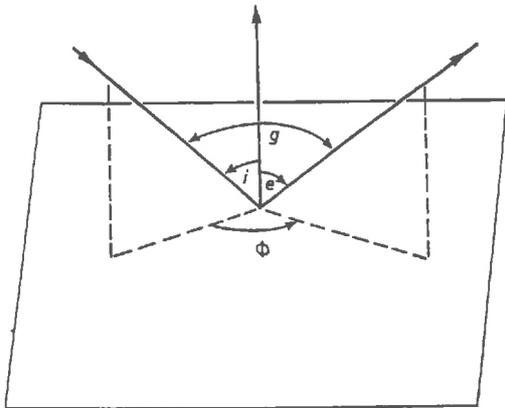


Figure 1.21

Définition de l'angle de phase g :

i = angle d'incidence

e = angle d'observation

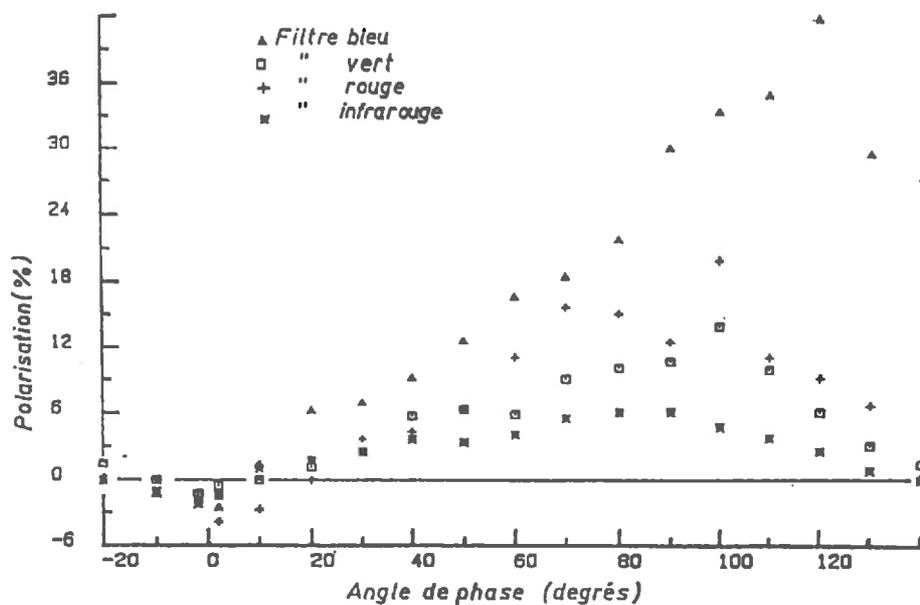


Figure 1.22

Variation du taux de polarisation en fonction de l'angle de phase g , pour un couvert de trèfle. (L'angle d'incidence du rayonnement solaire est 60°). (d'après WOESSNER et HAPKE, 1987).

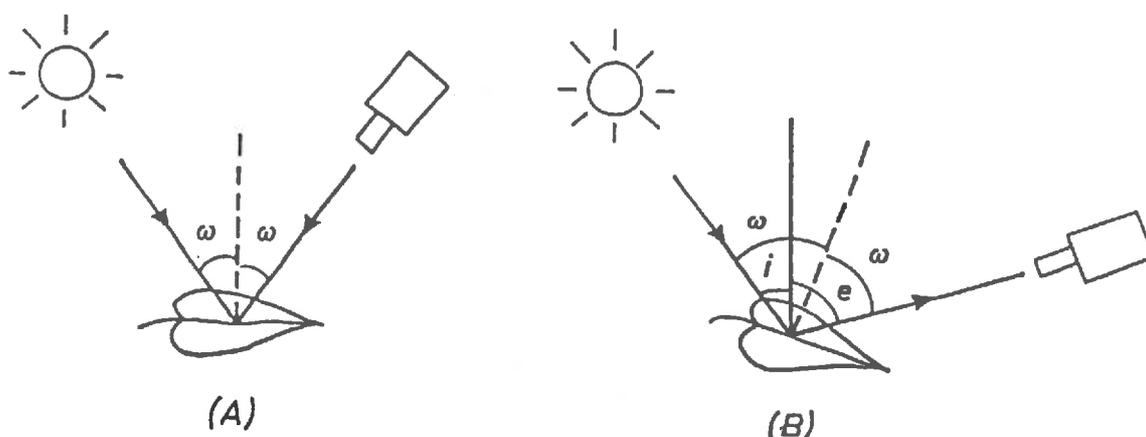


Figure 1.23

Réflexion du rayonnement solaire sur une feuille horizontale (A) et une feuille inclinée (B).

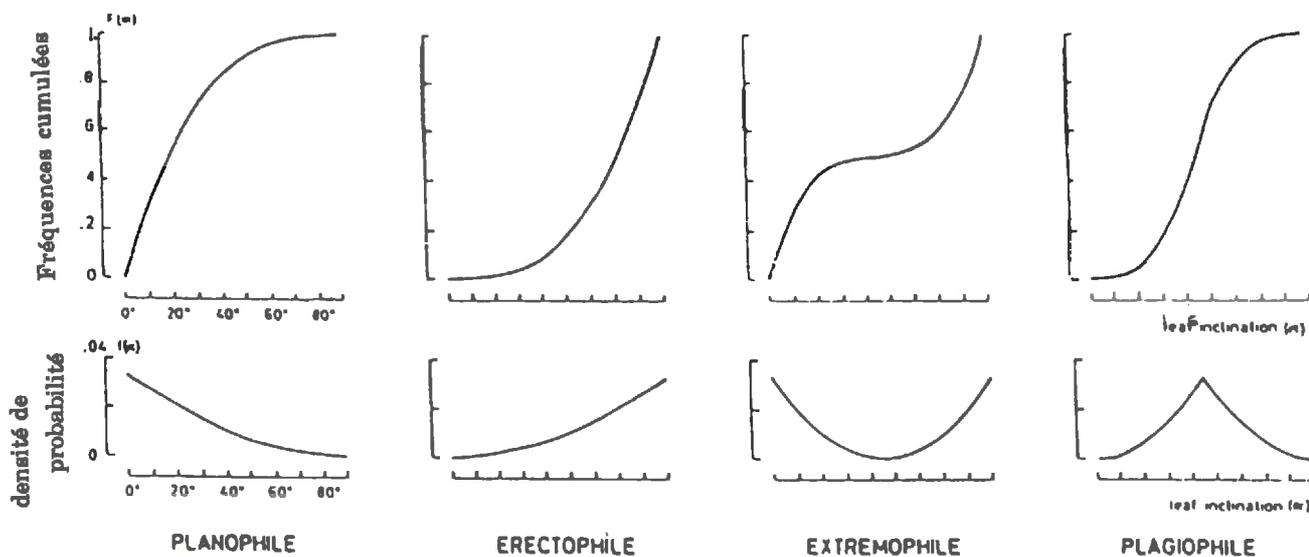


Figure 1.24

Fonction de répartition (cumul de la densité de probabilité) et densité de probabilité des inclinaisons des feuilles pour les 4 couverts définis par DE WIT.

1.4.2.2.2. *Fonction d'inclinaison des feuilles*

La position des feuilles paraît donc être un paramètre essentiel pour l'étude de la polarisation par les couverts végétaux. Mais c'est un paramètre difficile à estimer compte tenu de sa variabilité naturelle et de la courbure éventuelle des feuilles. On le représente généralement sous la forme d'une fonction de distribution d'inclinaison des feuilles (L.I.D.F. pour *Leaf Inclinaison Distribution Function*), c'est-à-dire fonction de probabilités qu'une surface foliaire unité soit orientée dans une direction donnée.

Cette fonction suppose des distributions indépendantes en inclinaison et en azimut, et même dans la plupart des cas, une distribution uniforme en azimut. C'est généralement vrai, sauf par exemple lorsque le vent souffle et oriente toutes les feuilles dans une même direction.

DE WIT (1950) a proposé un classement des couverts en 6 catégories, repris par GOEL et STREBEL (1984):

- couvert planophile : majorité de feuilles horizontales
- couvert érectophile : majorité de feuilles verticales
- couvert plagiophile : majorité des feuilles obliques
- couvert extrêmophile : distribution binomiale (feuilles horizontales et verticales)
- couvert uniforme : distribution uniforme
- couvert sphérique : la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles est la même que celle des éléments de surface d'une sphère.

Les densités de probabilité des quatre premiers cas sont représentées à titre d'exemple sur la figure 1.24.

1.4.2.2.3. *Autres facteurs*

Nous avons jusqu'ici supposé une végétation suffisamment dense. Mais deux autres facteurs liés à la géométrie du couvert, que sont le taux de couverture du sol et l'orientation des rangs de culture, peuvent également jouer un rôle non négligeable.

Lorsque le taux de couverture est faible, la polarisation de la lumière par le sol peut alors plus ou moins intervenir selon l'orientation de la visée par rapport aux rangs de culture.

Les travaux de VANDERBILT et al. (1981) ont en effet montré que l'effet d'orientation des rangs de culture est maximum pour un taux de

couverture du sol compris entre 40 et 60%. Pour un taux de couverture inférieur à 20% ou supérieur de 80%, l'effet des rangs n'est pratiquement plus sensible. Dans le premier cas, on obtient essentiellement des informations dépendant de l'état de la surface du sol (humidité, rugosité); dans le second cas, les mesures sont caractéristiques du couvert végétal. Entre les deux, les informations dépendent à la fois du sol et de la végétation; le poids de chacun d'eux étant fonction de l'orientation des rangs par rapport au soleil. Des cultures identiques, mais dont les rangs ont des orientations différentes peuvent avoir des taux de polarisation différents.

Selon le champ de visée des appareils de mesure utilisés, et selon la surface au sol intégrée pendant une acquisition de données, il pourra donc être difficile d'interpréter des mesures effectuées durant la phase de croissance des cultures. D'une façon pratique, les mesures de polarisation seront surtout intéressantes pour caractériser les sols nus ou peu couverts, et les cultures lorsqu'elles sont couvrantes.

1.4.2.3. *Evolution du taux de polarisation au cours du temps*

Le taux de polarisation de la lumière par un couvert végétal évolue naturellement au cours du temps. Cette évolution suit les cycles saisonniers de la végétation, dont dépend d'une part le taux de couverture du sol et d'autre part le plus ou moins développement de la structure du couvert.

CURRAN (1981) a effectué des mesures de polarisation (à partir de photos aériennes prises avec un filtre polarisant) sur différentes formations végétales naturelles (pâturage, terrain broussailleux, forêt) en été et en hiver. Sur chaque site, il relie le taux de polarisation mesuré à la biomasse du couvert au moment de la mesure (figure 1.25) et obtient d'assez bonnes corrélations. Il retrouve, à l'échelle du couvert, les caractéristiques d'une surface diffusante. En hiver, les taux de polarisation sont faibles, traduisant une surface plus ou moins rugueuse, sans végétation verte, et où, dans certains cas, la présence de rameaux favorise la diffusion de la lumière. En été, la végétation donne au couvert un aspect plus lisse, et donc un taux de polarisation plus élevé.

L'auteur montre par ailleurs (1982), grâce à des études statistiques sur de nombreuses surfaces naturelles, que ces mesures de polarisation permettent une meilleure distinction des différents types de couverts que les seules mesures de réflectance. Lorsque le sol est complètement couvert, il n'est en effet pas possible de suivre l'évolution de la biomasse aérienne d'un couvert à partir des mesures de réflectance (BARET et GUYOT, 1986; GUYOT et SEGUIN, 1988). Par contre, le développement des différentes plantes d'un biotope se traduit par des changements de la rugosité de la surface du couvert qui peuvent donc être détectés à l'aide des mesures de polarisation.

Cette méthode d'estimation de la biomasse est donc surtout intéressante dans le cas de formations végétales naturelles, car celles-ci sont hétérogènes à l'échelle locale (plantes de différentes formes et différentes hauteurs).

Dans le cas de cultures annuelles, déjà relativement bien couvrantes, les variations du taux de polarisation au cours du temps devraient plutôt permettre le suivi de différents stades phénologiques caractérisés par un net changement géométrique dans la structure du couvert. Ainsi, l'épiaison d'un champ de blé, par exemple, fait diminuer fortement son taux de polarisation. C'est ce que montrent les données expérimentales de la figure 1.26, acquises pour différents angles d'incidence et de visée, sur deux champs de blé: l'un déjà épié (A), l'autre pas encore épié (B), à la longueur d'onde de 620 nm (rouge) (VANDERBILT et al., 1981).

La distinction des deux états différents des couverts est surtout mise en évidence pour des grands angles d'incidence du rayonnement solaire et de visée. En (B), le rayonnement solaire incident oblique est alors en grande partie capté par les épis. Ce phénomène se remarque d'ailleurs visuellement: en visée oblique, face au soleil, l'aspect brillant du couvert est beaucoup moins net.

L'auteur précise toutefois que ces données sont acquises sur deux champs différents et qu'il n'est pas certain qu'un facteur autre que les épis n'a pas affecté ces mesures. Le suivi régulier d'une même parcelle pendant son développement serait plus significatif.

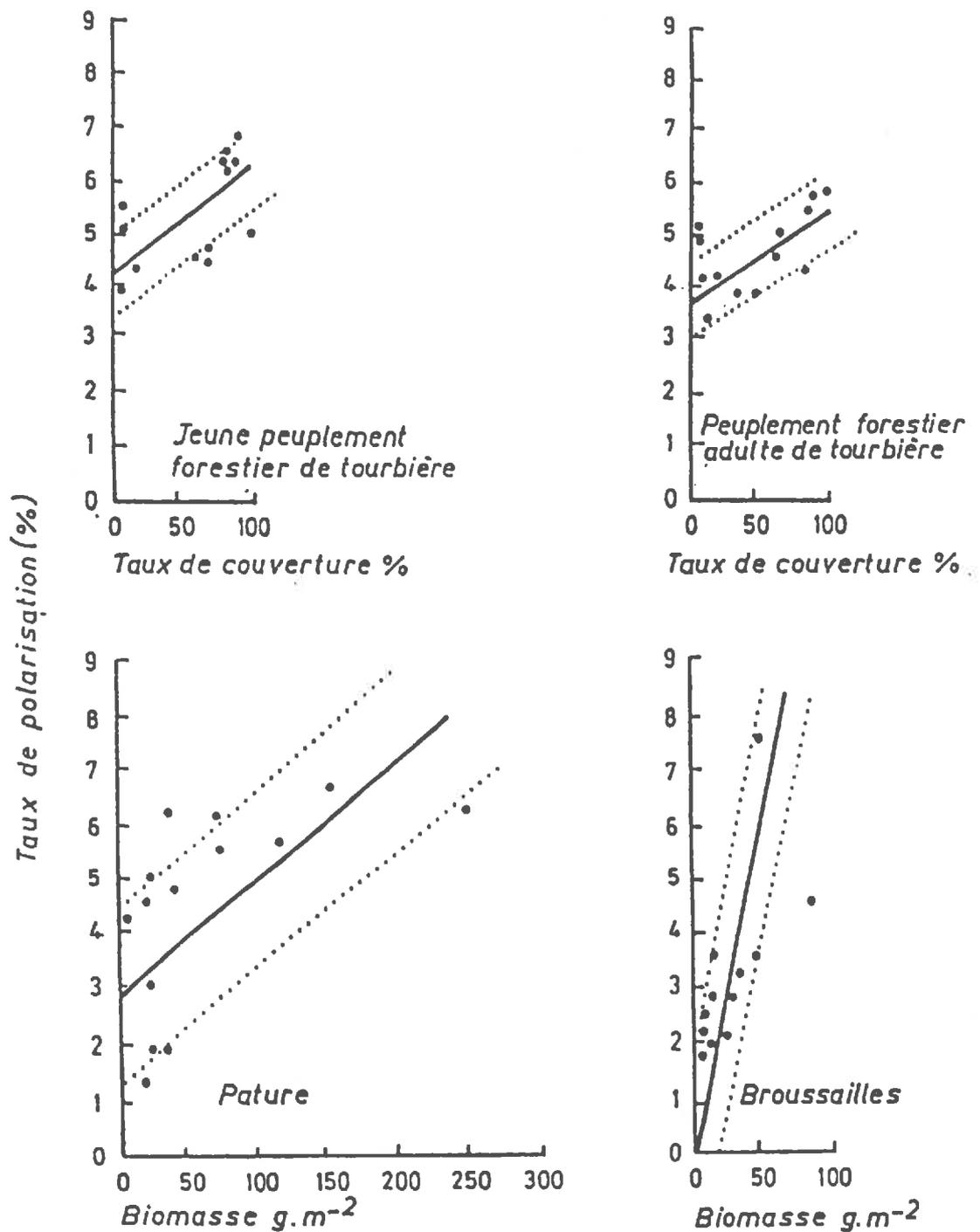


Figure 1.25

Relation entre le taux de polarisation de la lumière visible et la biomasse aérienne pour 4 types de formations végétales.

(d'après CURRAN, 1981)

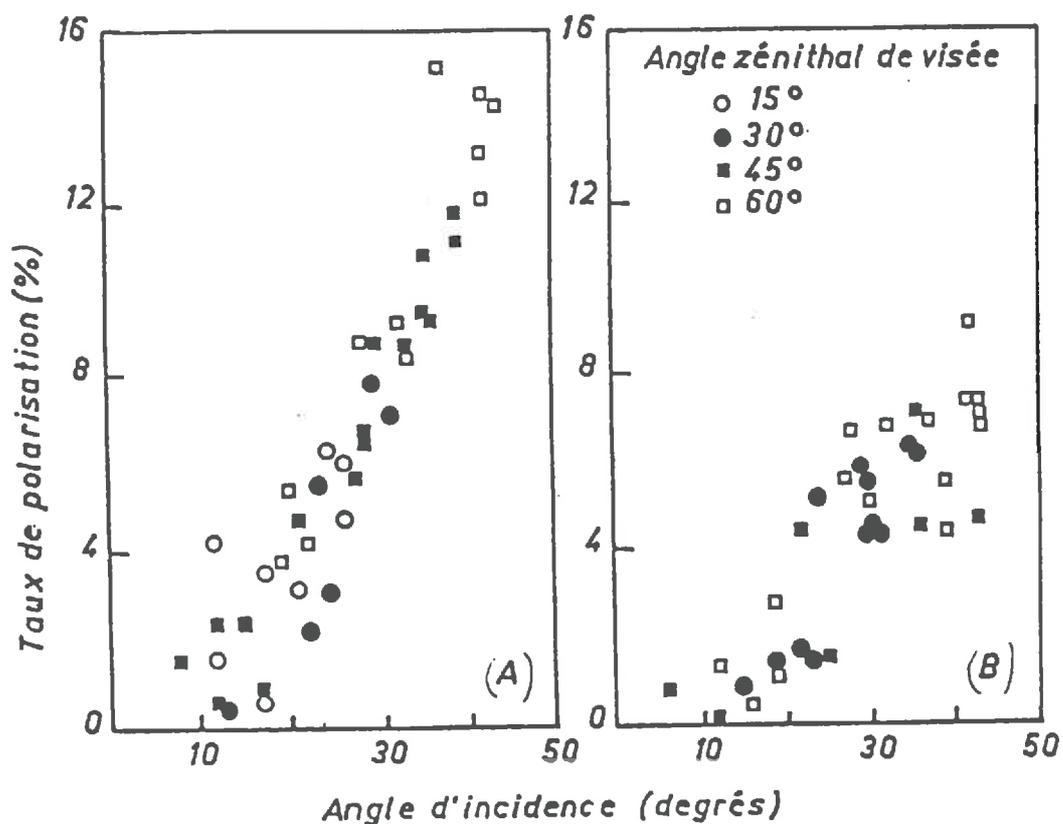


Figure 1.26

Taux de polarisation linéaire pour différents angles d'incidence des rayons solaires et différents angles de visée, sur un couvert de blé avant (A) et après épisaison (B). (d'après VANDERBILT et al., 1981).

Peu d'expérimentateurs ont jusqu'ici essayé de différencier des stades phénologiques d'un même couvert à partir des mesures de polarisation. Mais ces phénomènes, qui arrivent comme conclusion des études théoriques, paraissent donc être quantifiables et pouvoir apporter de nouvelles informations dans l'étude des couverts végétaux par télédétection.

1.4.3. Application à la télédétection

L'ensemble des résultats précédents suggère finalement que la mesure du taux de polarisation de la lumière réfléchi par un couvert végétal peut être une source d'informations complémentaires de celles fournies par la simple mesure de réflectance. Le facteur de réflectance est en effet surtout relié aux propriétés optiques du couvert, et en particulier des feuilles, alors que la polarisation rend compte plutôt des propriétés géométriques de la structure du couvert.

La polarisation peut s'écrire sous deux formes équivalentes que sont le taux de polarisation et la composante polarisée de la réflectance, ou réflectance polarisée (cf 1.3.3.3.). Comme dans le cas d'une feuille, en soustrayant cette réflectance polarisée de la réflectance totale, on peut estimer le facteur de réflectance non-polarisé du couvert. Si la polarisation est supposée contenir la plupart des effets directionnels observés sur l'indicatrice de réflectance d'un couvert, ce facteur de réflectance non-polarisé est alors caractéristique des phénomènes biologiques de la végétation. Il pourrait donc être utilisé dans les différentes recherches actuelles d'estimation du rendement final des cultures, qui nécessitent l'estimation de la partie photosynthétiquement active de l'énergie solaire absorbée par le couvert. Jusqu'à présent, ces recherches sont basées sur des indices de végétation, qui sont des rapports ou combinaisons des valeurs de réflectance obtenues dans différentes bandes spectrales, et permettent ainsi de minimiser l'influence des facteurs externes tels que la géométrie d'éclairement et d'observation, et les effets du sol sous-jacent (BARET, 1986). La correction de la partie spéculaire de la réflectance dans ces indices de végétation améliorerait encore l'estimation du P.A.R.

Le taux de polarisation, ou la réflectance polarisée, traduit les réflexions du rayonnement incident sur les différentes surfaces rencontrées. Il apporte déjà, dans un premier temps, des informations supplémentaires dans la discrimination des différents types d'occupation du sol, selon la rugosité et la biomasse rencontrées (cf 1.4.3.2.). Dans un deuxième temps, il devrait permettre l'amélioration du suivi du développement d'une culture. Lorsque le couvert est bien couvrant, et que la réflectance a atteint son niveau de saturation (cf 1.4.1.1.), les mesures de polarisation pourraient détecter par exemple des changements de port des feuilles de la partie supérieure du couvert, ou l'apparition d'organes nouveaux (épis de blé, panicules mâles du maïs...).

L'interprétation des mesures expérimentales en fonction des paramètres du couvert passe par l'élaboration de modèles mathématiques essayant de rendre compte des phénomènes physiques mis en jeu.

Un premier modèle expliquant les effets polarisants a été mis au point par VANDERBILT et GRANT (1985). Le taux de polarisation, dans une direction donnée, est supposé provenir de la réflexion spéculaire du rayonnement sur les surfaces de feuilles orientées effectivement de façon à réfléchir spéculairement vers le détecteur. Le couvert étudié est alors caractérisé principalement par sa fonction de distribution d'inclinaison des feuilles (cf 1.4.2.2.2.). Les résultats d'un tel modèle sont encourageants: ils confirment l'importance du phénomène de réflexion de surface, et prédisent les principales variations du taux de polarisation selon la géométrie de mesure (éclairage et visée) par rapport à l'inclinaison moyenne des feuilles du couvert.

De leur côté, WOESSNER et HAPKE (1987) se basent sur des calculs de la réflectance bidirectionnelle des surfaces planétaires, en supposant, comme précédemment, que la polarisation provient de la réflexion spéculaire sur les facettes des feuilles correctement orientées. Les résultats obtenus pour un couvert uniforme sont en bon accord avec les données expérimentales mesurées par exemple sur un couvert de trèfles (WOESSNER et HAPKE, 1987).

Ces recherches en cours, qui appartiennent à un domaine encore peu exploité, apparaissent donc assez prometteuses dans leurs potentialités d'application à la télédétection.

1.5. PASSAGE DES MESURES AU SOL AUX MESURES SATELLITAIRES

Lorsque l'on passe des mesures au sol aux mesures à bord des satellites, la polarisation du rayonnement reçu peut être considérée soit comme un élément d'information supplémentaire, soit aussi comme un facteur perturbateur.

Le signal qui parvient à un satellite comporte le rayonnement réfléchi par la surface du sol, plus ou moins atténué par sa traversée de l'atmosphère, auquel s'ajoute une contribution supplémentaire due à la diffusion du rayonnement solaire incident par l'atmosphère (figure 1.27) (HERMAN et al., 1986). La diffusion atmosphérique (diffusion de Rayleigh par les molécules gazeuses, diffusion de Mie par les aérosols) s'accompagne également d'une polarisation du rayonnement solaire diffusé (cf 1.1.2.3.) et aussi d'une dépolarisation du rayonnement réfléchi par le sol.

L'information que peut apporter la mesure de la polarisation au niveau du satellite est donc complexe et ne peut pas être reliée directement aux phénomènes qui sont observés au sol. Pour l'interpréter, il est donc nécessaire de disposer d'un modèle qui représente l'ensemble des phénomènes qui se produisent entre la surface du sol et le satellite.

La description de ce signal hors atmosphère peut aussi aider à tenir compte des effets introduits par les objectifs des capteurs.

Les systèmes optiques des satellites actuels comportent en effet généralement des surfaces réfléchissantes donc polarisantes, qui peuvent plus ou moins modifier le flux lumineux reçu selon sa polarisation initiale. Des différences artificielles peuvent ainsi apparaître entre des mesures réalisées à différentes positions sur différents couverts végétaux. Ces phénomènes sont limités lorsque l'on considère des satellites à petit champ qui visent verticalement la surface de la Terre (LANDSAT Thematic Mapper, SPOT en visée verticale). Mais pour des satellites à grand champ comme NOAA-AVHRR ou des satellites qui visent obliquement la surface terrestre, comme SPOT, les perturbations peuvent ne plus être négligeables. Il serait alors intéressant de connaître l'état de

polarisation du rayonnement atteignant les capteurs, afin de corriger éventuellement les effets perturbateurs "mécaniques" qu'ils introduisent.

L'ensemble de ces phénomènes est la raison pour laquelle le programme d'étude "POLDER" (POLarisation et Directionnalité des Réflectances) a été lancé. Ces travaux ont en particulier pour but l'évaluation et la description des phénomènes responsables de la polarisation du rayonnement qui parvient au satellite, et donc l'estimation des possibilités réelles de leurs applications en télédétection. Selon ce dernier point, ces travaux pourraient aboutir à la définition de l'instrument POLDER qui pourrait être embarqué, comme "passager" sur les satellites SPOT 4 et 5, après qu'un premier prototype embarquable sur ballon ou sur avion ait été testé.

CONCLUSION PARTIELLE

Cette analyse bibliographique met en évidence les avantages que pourrait théoriquement apporter l'introduction de la mesure de polarisation dans les mesures radiométriques actuelles sur les couverts végétaux, et en particulier les cultures annuelles telles que les céréales.

Les mesures de polarisation présentent l'intérêt d'être assez faciles à mettre en œuvre car elles ne demandent pas d'utiliser des détecteurs très sensibles dans des bandes spectrales étroites. Nous avons vu en effet, que la composante polarisée de la réflectance (cf 1.3.3.3.) est relativement constante en fonction de la longueur d'onde.

La mesure du taux de polarisation complète la mesure de réflectance dans ce sens que les composantes polarisée et non-polarisée de la réflectance ne rendent pas compte des mêmes interactions du rayonnement solaire avec les éléments du couvert, et peuvent donc être reliées à des paramètres différents, que sont les paramètres biologiques et les paramètres de structure, tous caractéristiques du couvert. Cette complémentarité paraît donc offrir de nouvelles potentialités dans le suivi des cultures par télédétection.

Mais si la polarisation semble provenir essentiellement d'un phénomène physique simple, qu'est la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur les éléments du couvert, la complexité de la structure de la végétation doit poser des problèmes dans l'interprétation des mesures. Des mesures réalisées sur un couvert planophile, bien couvrant, par beau temps sans vent, seront simples à décrire. Mais il semble évident qu'un couvert plutôt plagiophile ou uniforme, mesuré par vent léger ou par mistral, donnera des taux de polarisation beaucoup plus aléatoires!. Les effets directionnels observés ne seraient alors pas caractéristiques de la structure de la végétation, déformée par le vent.

L'intérêt de ces mesures résiderait donc plutôt dans le fait qu'elles permettent d'évaluer la composante non-polarisée de la réflectance, utile dans les recherches faisant intervenir le P.A.R. (Rayonnement photosynthétiquement actif).

Le travail, actuellement poursuivi par les équipes participant au programme POLDER, est destiné à mettre au point un ensemble de modèles permettant de décrire le signal qui pourrait être mesuré par un satellite hors de l'atmosphère. Cette mise au point nécessite l'utilisation de données de calage obtenues à partir de mesures effectuées au voisinage du sol. Deux campagnes de mesures ont ainsi été réalisées durant les étés 1987 et 1988 sur différentes cultures. La présentation de ces résultats expérimentaux fait l'objet de notre partie suivante. Ces résultats sont analysés à l'aide d'un essai de modélisation basé sur le principe de la réflexion spéculaire, et qui fournit donc la composante polarisée de la réflectance.

La dernière partie présente le développement d'un modèle mathématique essayant de rendre compte de la composante non-polarisée de la réflectance mesurée au voisinage du sol. Ce modèle est une application du Transfert Radiatif dans la végétation. L'ensemble de ces deux modèles devrait pouvoir fournir une évaluation de l'importance respective de ces deux composantes de la réflectance directionnelle d'un couvert.

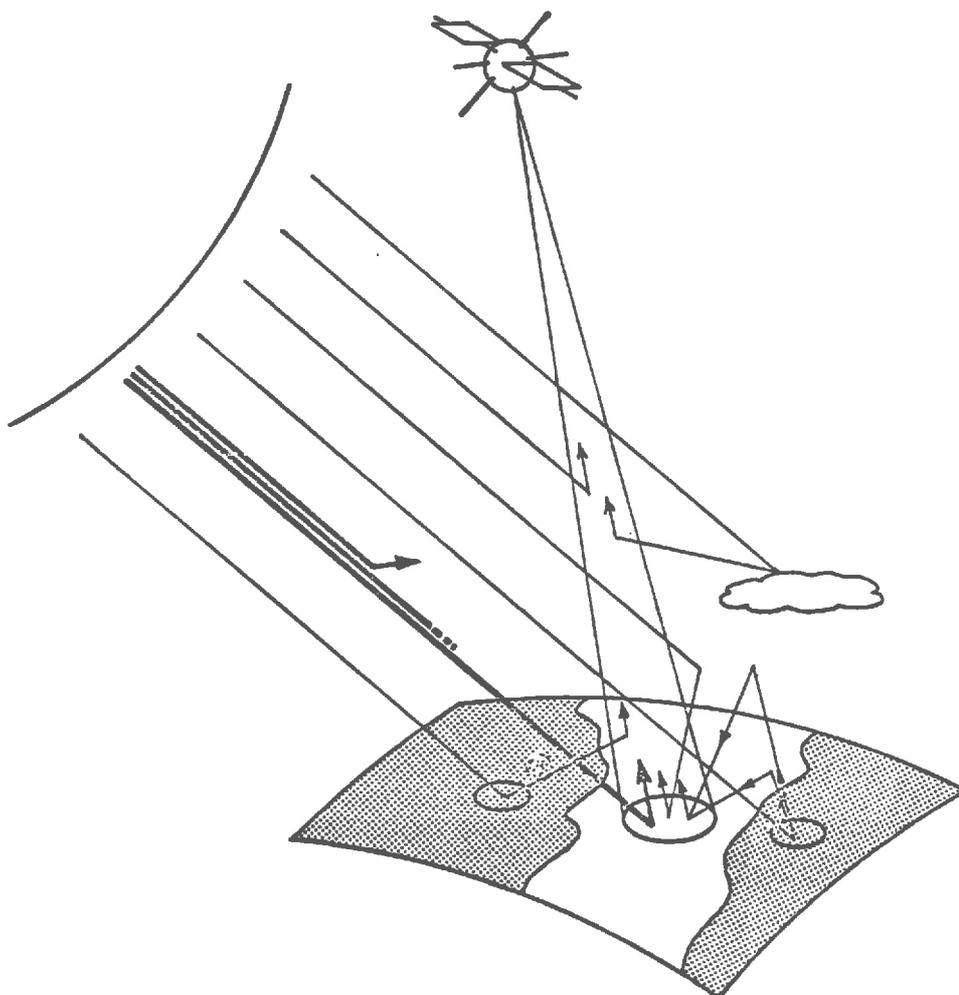


Figure 1.27:

Schématisation du bilan radiatif (d'après DESCHAMPS et al, 1983)

PARTIE 2

ANALYSE DE LA REPONSE POLARISEE DE DIFFERENTS COUVERTS AGRICOLES. ESSAI DE MODELISATION.

L'expérience reste le point de départ de tout essai de description des phénomènes naturels qui nous entourent. Sans cette possibilité d'appréhension de ces phénomènes, l'approche théorique ne pourrait rendre compte de l'observation, ni donc permettre l'utilisation de ces phénomènes dans de nouvelles applications. Mais comme le disait Albert EINSTEIN, *"une théorie scientifique peut être vérifiée par l'expérience, mais aucun chemin ne mène de l'expérience à la création d'une théorie"*.

L'analyse expérimentale apparaît donc, dans un premier temps, nécessaire pour mettre en évidence les différents paramètres qui peuvent plus ou moins affecter la réponse polarisée d'un couvert. Nous allons d'abord décrire succinctement le matériel utilisé, ainsi que les protocoles d'acquisition des données, d'une part physiques et d'autre part biologiques, qui permettent la mise en valeur de ces paramètres.

Dans un deuxième temps, la confrontation de ces expériences à une modélisation simple, essayant de traduire les phénomènes physiques responsables de la polarisation, c'est-à-dire les réflexions sur les feuilles, va permettre l'analyse de ces résultats selon les différents paramètres influants.

2.1. LA MESURE DE POLARISATION

Nous avons vu que la mesure de polarisation pouvait être réalisée simplement à partir d'un radiomètre classique dont le signal en entrée est modulé par la rotation d'un analyseur (cf 1.3.3.3.).

Le système d'acquisition de mesures physiques utilisé ici est le radiomètre-polarimètre "*RADISOL*", conçu et réalisé au L.O.A. de l'université de Lille.

2.1.1. Le système RADISOL

RADISOL est utilisé, comme son nom l'indique, pour l'acquisition de données au voisinage du sol. Il a été réalisé sur le modèle de son grand-frère, le prototype *RADIBAL*, conçu pour l'étude des aérosols stratosphériques par la mesure de la polarisation et de la lumière qu'ils diffusent, et pour cela, embarqué dans la nacelle d'un ballon (BALOIS, 1985).

Le système dispose de trois canaux d'acquisition de données, matérialisés par trois filtres doublés d'un polariseur. Ces filtres sont montés sur une roue tournant à la vitesse de 1 tour par seconde. Cette roue (figure 2.1) est divisée en quatre zones: un logement pour chacun des trois filtres, et une portion pleine qui donne le zéro optique de l'appareil (filtre 0). Devant cette roue porte-filtres, tourne un filtre polarisant (analyseur) à la vitesse de 10 tours par seconde. Cet ensemble est précédé par des lentilles définissant le champ de visée (5°), et enfin une photodiode au silicium utilisée comme détecteur (figure 2.2).

Pour *RADISOL*, les trois filtres utilisés sont centrés respectivement sur les longueurs d'onde de 550 nm (filtre 1), 630 nm (filtre 2) et 790 nm (filtre 3). Ces bandes spectrales sont celles caractéristiques d'une végétation verte: vert, rouge et proche infrarouge (cf 1.3.2.1) et correspondent aux trois canaux du satellite SPOT.

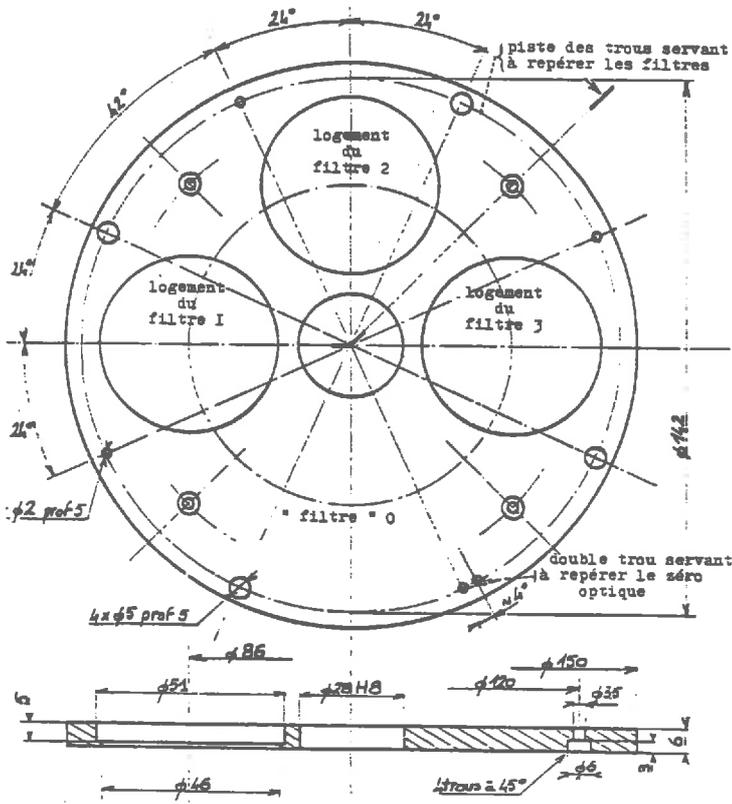


Figure 2.1:
Schéma de la roue porte-filtres.

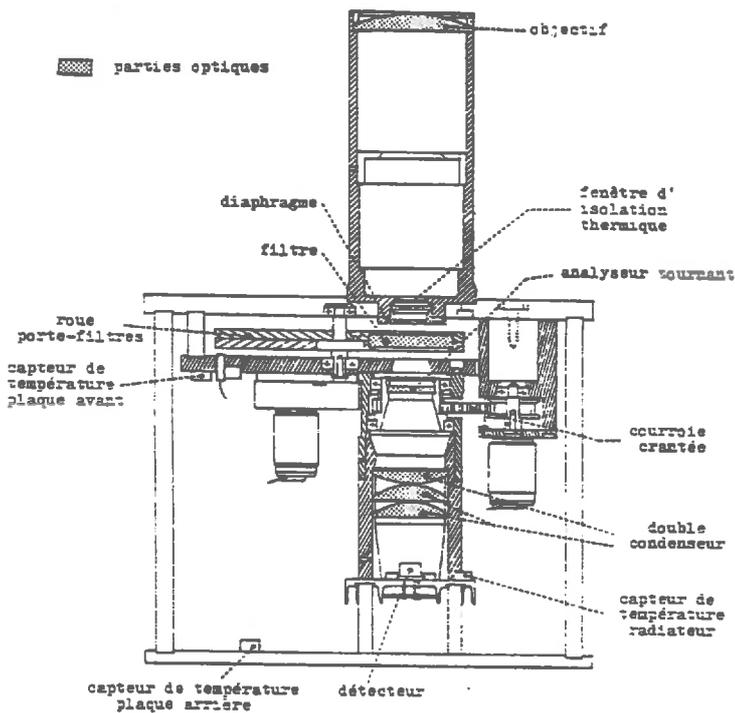


Figure 2.2:
Maquette du système d'acquisition de données "RADIBAL".

2.1.2. Principe de la mesure

Soit une lumière partiellement polarisée, formée de la superposition de lumière naturelle I_{nat} et de lumière polarisée linéairement I_{pol} . Après la traversée d'un analyseur, selon la loi de MALUS (cf 1.1.1.), l'intensité sortante se met sous la forme:

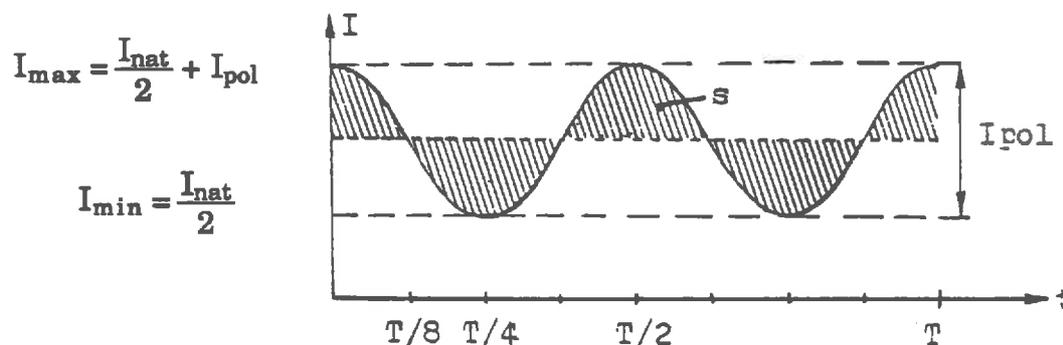
$$I = \frac{I_{nat}}{2} + I_{pol} \cdot \cos^2\beta$$

où β est l'angle entre le plan de polarisation de la lumière incidente et l'axe privilégié de l'analyseur.

Si l'analyseur tourne autour de l'axe optique avec une période T , β sera une fonction du temps: $\beta = \frac{2\pi}{T} \cdot t$

et on aura: $I = \frac{I_{nat}}{2} + \frac{I_{pol}}{2} (1 + \cos\frac{4\pi}{T} \cdot t)$

représenté sur la figure suivante:



Il existe ainsi une modulation du faisceau par la rotation de l'analyseur tournant. Pour mesurer le taux de polarisation P d'un tel signal, soit par définition:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

il suffirait donc de mesurer les valeurs maximale et minimale du signal. Mais dans ce cas, le bruit aléatoire sur ces deux valeurs entraînerait une forte erreur sur le taux de polarisation.

On utilise donc une technique d'échantillonnage, qui tient compte d'un grand nombre de points pour minimiser l'effet du bruit. Pour une période, on mesure en fait n valeurs discrètes du signal, notées x_i :

leur moyenne est : $M = \frac{\sum x_i}{n}$

l'écart moyen: $E = \frac{\sum_i^n |x_i - M|}{n}$

Si n est suffisamment grand (fréquence d'échantillonnage très supérieure à la fréquence de modulation, afin de respecter la condition de Shannon), et si le nombre de périodes échantillonnées est entier, on montre que:

$$P = \frac{\pi \cdot E}{2M} \quad (\text{BALOIS, 1985})$$

En corrigeant M de la valeur (Z) du signal de sortie pour le zéro optique, et en exprimant le taux de polarisation en pourcentage, on a finalement:

$$P = \frac{50 \cdot \pi \cdot E}{M - Z}$$

où $(M-Z)$ représente, à un coefficient d'étalonnage près, l'intensité ou la luminance du signal reçu.

2.1.3. Etalonnage du radiomètre

L'étalonnage se fait en laboratoire, d'une part en énergie à partir d'une lampe de luminance donnée, et d'autre part en polarisation sur des lames polarisantes connues.

2.1.3.1. Etalonnage énergétique

Il est réalisé selon la méthode présentée sur la figure 2.3, à l'aide d'une lampe d'éclairage monochromatique E_λ connu, et d'une plaque de BaSO_4 . Cette plaque est lambertienne, et transforme le flux lumineux E_λ en une luminance sensiblement isotrope L_λ :

$$L_\lambda = E_\lambda \cdot \frac{\rho_\lambda}{\pi} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$$

où ρ_λ est le coefficient de réflexion de la plaque (théoriquement égal à 1).
La valeur de L_λ est alors la luminance correspondant au signal (en digits) mesuré par le radiomètre.

Compte-tenu de la lampe et de la plaque de sulfate de Barium utilisées, la précision de cet étalonnage est évaluée à 15%.

2.1.3.2. Etalonnage en polarisation

Cet étalonnage nécessite un dispositif permettant de polariser la lumière selon un taux connu et réglable. Ce dispositif est une boîte contenant deux lames de silice pouvant tourner autour de deux axes de rotation parallèles, et dont les angles de rotation peuvent être mesurés grâce à deux rapporteurs (figure 2.4a).

La polarisation, dite par transmission vitreuse, à la sortie d'une lame "à faces parallèles" peut être calculée à partir des équations de Fresnel. La lumière émergente est en effet la somme de tous les faisceaux successivement transmis, réfléchis n fois et transmis par les deux faces (figure 2.4b). La composante polarisée parallèlement au plan de la figure, notée I_L , a pour intensité (si $I_{oL}=1$):

$$I_L = T_L^2 + T_L^2 \cdot R_L^2 + T_L^2 \cdot R_L^4 + T_L^2 \cdot R_L^6 + \dots = \frac{T_L^2}{1 - R_L^2}$$

(progression géométrique de raison $R_L^2 < 1$)

où R et T sont les coefficients de réflexion et de transmission:

$$T_L = 1 - R_L \quad \text{d'où} \quad I_L = \frac{1 - R_L}{1 + R_L}$$

De même pour la composante polarisée perpendiculairement:

$$I_R = \frac{1 - R_R}{1 + R_R}$$

d'où la proportion de lumière polarisée:

$$P = \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} = \frac{R_R - R_L}{1 - R_R \cdot R_L}$$

A partir des équations de Fresnel (cf 1.1.2.1.), ce taux de polarisation est déterminé en fonction de l'angle d'incidence i , et de l'indice de réfraction n de la lame.

Si maintenant une deuxième lame identique, mais d'inclinaison symétrique (figure 2.4c) est placée derrière la première, le taux de polarisation sera:

$$\text{à la sortie de la première lame: } P_1 = \frac{I_{1L} - I_{1R}}{I_{1L} + I_{1R}} \quad \text{soit} \quad \frac{I_{1L}}{I_{1R}} = \frac{1 + P_1}{1 - P_1}$$

$$\text{à la sortie de la deuxième lame: } P_2 \quad \text{tel que} \quad \frac{I_{2L}}{I_{2R}} = \frac{1 + P_2}{1 - P_2}$$

$$\text{d'où le rapport final: } \frac{I_L}{I_R} = \frac{1 + P_1}{1 - P_1} \cdot \frac{1 + P_2}{1 - P_2}$$

$$\text{soit} \quad P = \frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} = \frac{P_1 + P_2}{1 + P_1 \cdot P_2}$$

Pour un faisceau peu divergent (h petit) et dont les inclinaisons sont égales, P est sensiblement constant dans le champ et vaut:

$$P = \frac{2P_1}{1 + P_1^2}$$

La polarisation de la lumière émergente dans l'axe de la lumière incidente est ainsi connue uniquement en fonction de l'angle d'inclinaison des lames (et de leur indice).

Pour des raisons de dimension du faisceau, ce dispositif ne peut pas être utilisé avec des angles supérieurs à 60° , c'est-à-dire qu'il permet des taux de polarisation de 0 à 30%, avec une précision de 0,15%.

La figure 2.5 représente par exemple un étalonnage de RADISOL réalisé le 27/04/88 avant le début d'une campagne de mesures. Dans les trois canaux, les résultats sont très satisfaisants au-moins pour des taux de polarisation supérieurs à 5%. La limite inférieure du domaine de polarisation mesurable se situe autour de 2%, qui correspond à la valeur moyenne du bruit de l'appareil (BALOIS, 1985).

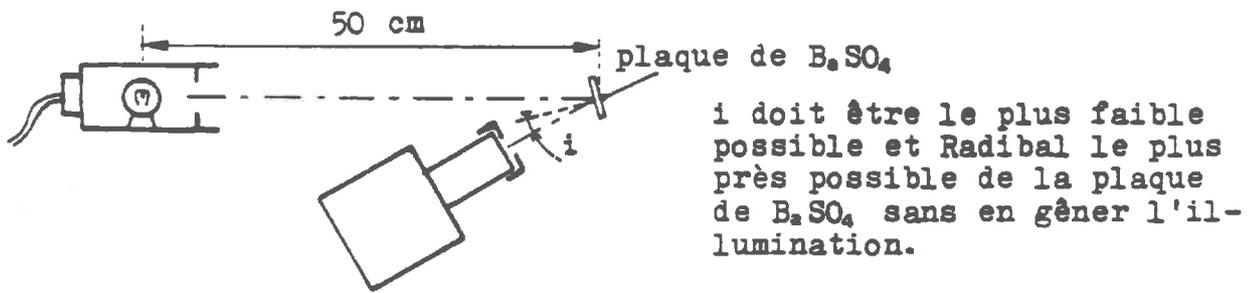
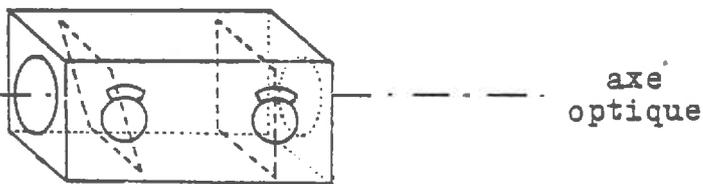
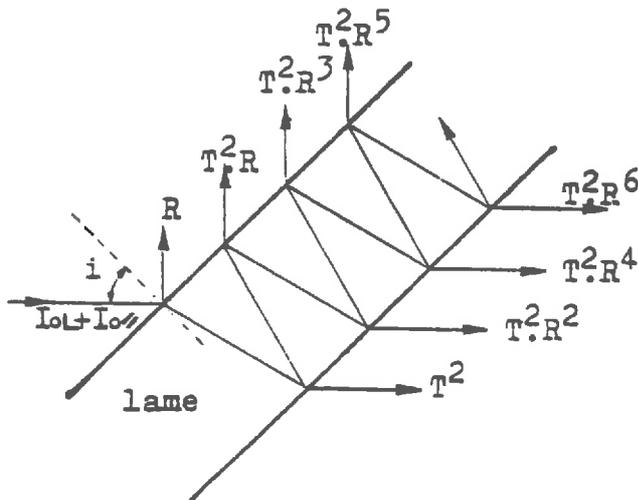


Figure 2.3: Etalonnage énergétique de RADISOL.

boîte polarisante



(a) Boîte contenant 2 lames de silice, en rotation autour de 2 axes parallèles.



(b) Réflexion et transmission de la lumière par une lame à faces parallèles.

(c) Cas de 2 lames inclinées par rapport à l'axe optique, d'angles égaux mais de sens inverses.

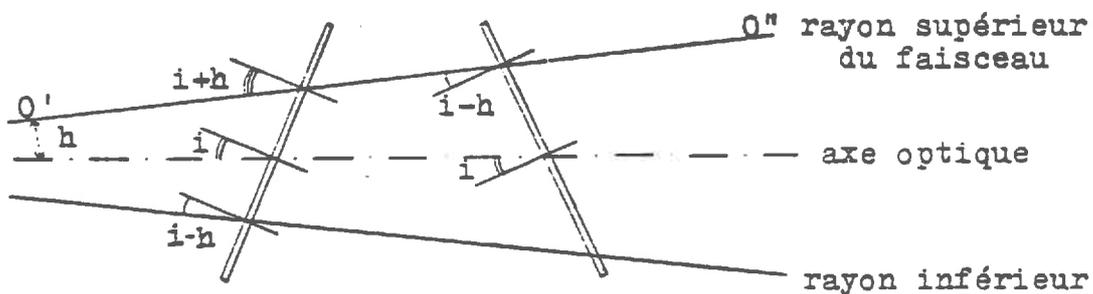


Figure 2.4 : Etalonnage en polarisation.

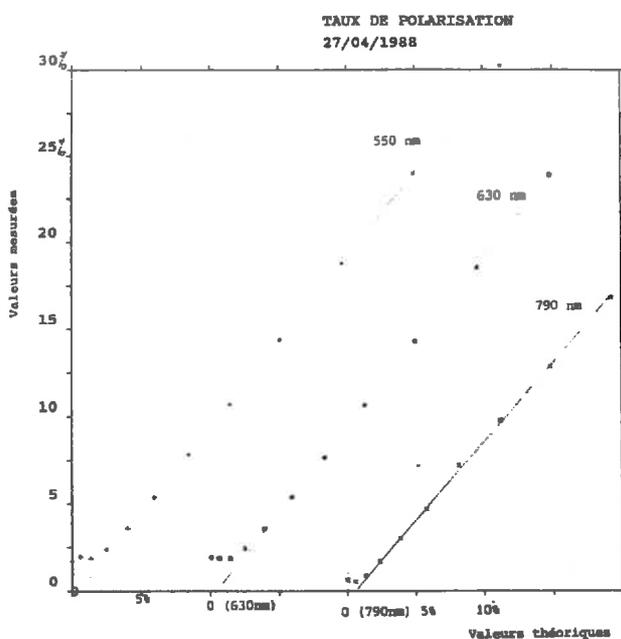


Figure 2.5 :
Résultats de l'étalonnage de RADISOL en polarisation, le 27/04/88

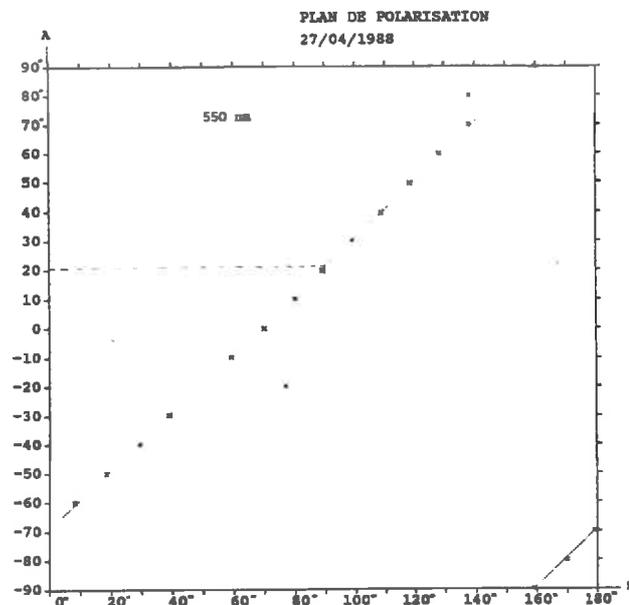
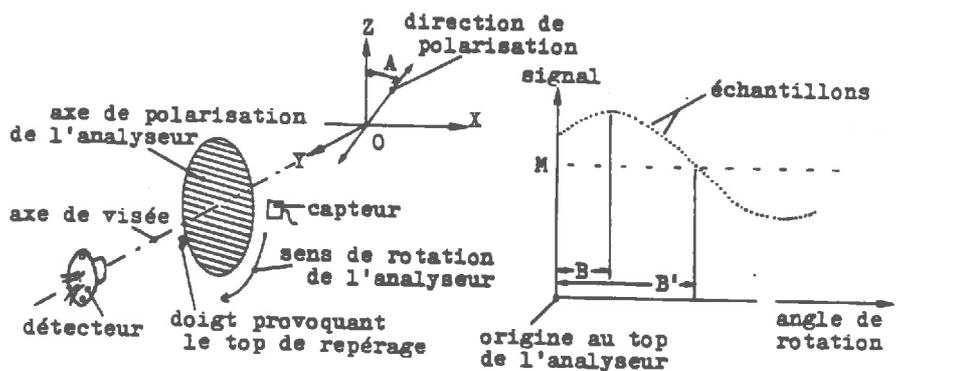


Figure 2.7 :
Repérage du plan de polarisation.



OZ est la verticale du lieu ,la direction de polarisation est dans le plan ZOx.

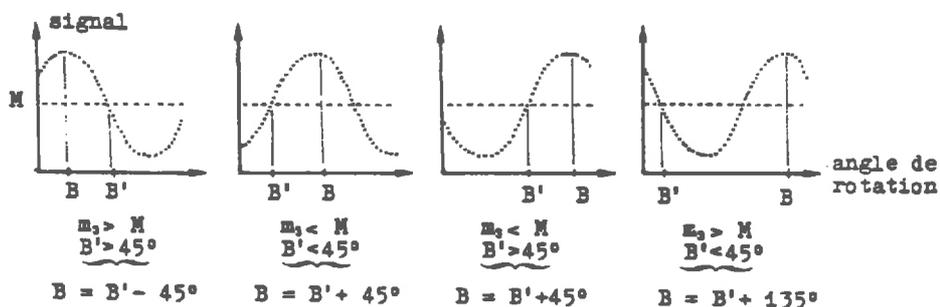


Figure 2.6 :
Repérage de la direction de polarisation du rayonnement reçu.

2.1.3.3. Repérage du plan de polarisation

La direction de polarisation du rayonnement reçu par le radiomètre dépend de la réflexion ou de la diffusion qu'il a subi (cf 1.1.2.). Cette direction peut être repérée par rapport à l'axe de polarisation de l'analyseur à l'instant de son top de repérage (top qui est lié à une certaine position de l'analyseur, constante par construction).

Soit B l'angle entre ces deux directions. La figure 2.6a présente la position relative des éléments optiques, ainsi que la forme du signal qui en découle. B correspond à la position de l'analyseur pour laquelle le signal reçu est maximum.

Il est pratiquement plus rapide et plus précis de déterminer B' , angle dont a tourné l'analyseur entre le top de repérage de sa position et le premier passage du signal par sa valeur moyenne M . La mesure d'échantillons suffisamment rapprochés les uns des autres, et la valeur moyenne des trois premiers échantillons (notée m_3) permet alors simplement de retrouver B (figure 2.6b) (B étant compté entre 0 et 180°).

Des mesures ont ainsi été effectuées en utilisant la boîte polarisante à lames de silice. En tournant l'ensemble de la boîte de -90° à $+90^\circ$ autour de son axe optique (0° correspond à la position verticale), on fait varier l'orientation de la vibration polarisée.

Les résultats de l'étalonnage du 27/04/88 sont présentés sur la figure 2.7 qui donne les valeurs de B déduites des données RADISOL (en abscisses) en fonction de l'angle A de rotation de la boîte (en ordonnées). On constate que A vaut 21° pour $B=90^\circ$, ce qui implique que, au top de repérage, l'axe de l'analyseur est décalé de 21° par rapport à l'horizontale. Les deux points éloignés de la droite proviennent du bruit sur M et m_3 (BALOIS, 1985) qui, si ces deux valeurs sont proches, introduit une mauvaise prise en compte des critères exposés sur la figure 2.6b.

Ce repérage est quand-même relativement délicat, et n'est correct que pour des taux de polarisation suffisamment élevés (supérieurs à 5 ou 10%).

2.1.4. La mesure

Chaque mesure effectuée par le radiomètre consiste en l'acquisition d'une trentaine de données dans les quatre canaux (3 filtres et le zéro optique), prises alternativement dans chacun d'eux (rotation de la roue porte-filtres). Chaque donnée est enregistrée sur 88 octets, et fournit un ensemble de valeurs, dont en particulier:

- secondes et centièmes de seconde de l'heure de la mesure
- numéro du filtre
- n: nombre d'échantillons constituant la mesure
- M: valeur moyenne
- E: écart moyen
- m₃ moyenne des trois premiers échantillons
- nombre de passage par la moyenne ...

Ces valeurs permettent de remonter aux grandeurs physiques qui nous intéressent, c'est-à-dire la luminance du rayonnement reçu, ou sa réflectance équivalente, son taux de polarisation et, si le signal est suffisant, la direction de cette polarisation

2.2. L'EXPERIMENTATION

A l'aide de ce radiomètre-polarimètre *RADISOL*, deux campagnes de mesures de polarisation sur différents couverts végétaux ont été réalisées en 87 et 88. Ces campagnes se sont déroulées sur les terrains de l'I.N.R.A. d'Avignon-Montfavet, profitant ainsi du dispositif expérimental en place utilisé pour les expériences radar "*RAMSES*" du C.N.E.S..

Les mesures de l'été 1987 ont surtout servi à cerner les problèmes soulevés par le dispositif. Elles ont permis de faire une première évaluation des résultats qu'il est donc possible d'obtenir, avec un tel instrument, sur des couverts végétaux, et par conséquent de préparer un protocole de mesures plus précises pour toute la saison végétative (printemps et été) 1988.

2.2.1. Campagne "Eté 1987"

2.2.1.1. *Le dispositif expérimental*

Ce dispositif apparaît sur la photo 2.1. Les instruments de mesures physiques sont placés à 14.5 m du sol, sous le chariot de flèche d'une grue de chantier, qui se déplace sur deux rails perpendiculaires aux parcelles expérimentales. Ces instruments sont reliés directement par câbles aux systèmes informatiques d'acquisition de données situés dans la cabane (climatisée!) au pied de la grue (photo 2.2).

Les parcelles, de dimension respectivement 20x40 m, sont orientées comme l'indique la figure 2.8. Les parcelles utilisables durant l'été 87 sont celles numérotées de 3 à 6 avec:

- en 3 : du soja (*Weber*)
- en 4 : le même soja, mais à un stade d'évolution différent (plus jeune)
- en 5 : du maïs (*Adda*) (pas encore "fleuri" en début de campagne)
- en 6 : le même maïs (déjà "fleuri" en début de campagne (présence des panicules), mais pas encore "épié").

La platine porteuse des instruments peut être animée de deux mouvements: un mouvement de rotation dans le plan horizontal permet de positionner les appareils de mesure par rapport au soleil, et un mouvement d'inclinaison autour de la position verticale permet une observation de la cible sous plusieurs angles de visée. Pour chaque géométrie de mesure, ces positions nécessitent le déplacement du chariot sous la flèche et/ou celui de la grue sur ses rails, afin de viser toujours approximativement le centre de la parcelle étudiée.

Le protocole de mesures retenu (et possible compte-tenu de la mécanique des mouvements expliqués ci-dessus) est celui d'un balayage de visée de 60° de part et d'autre de la position verticale (maximum d'inclinaison de la platine) soit dans le plan solaire, soit dans le plan perpendiculaire.

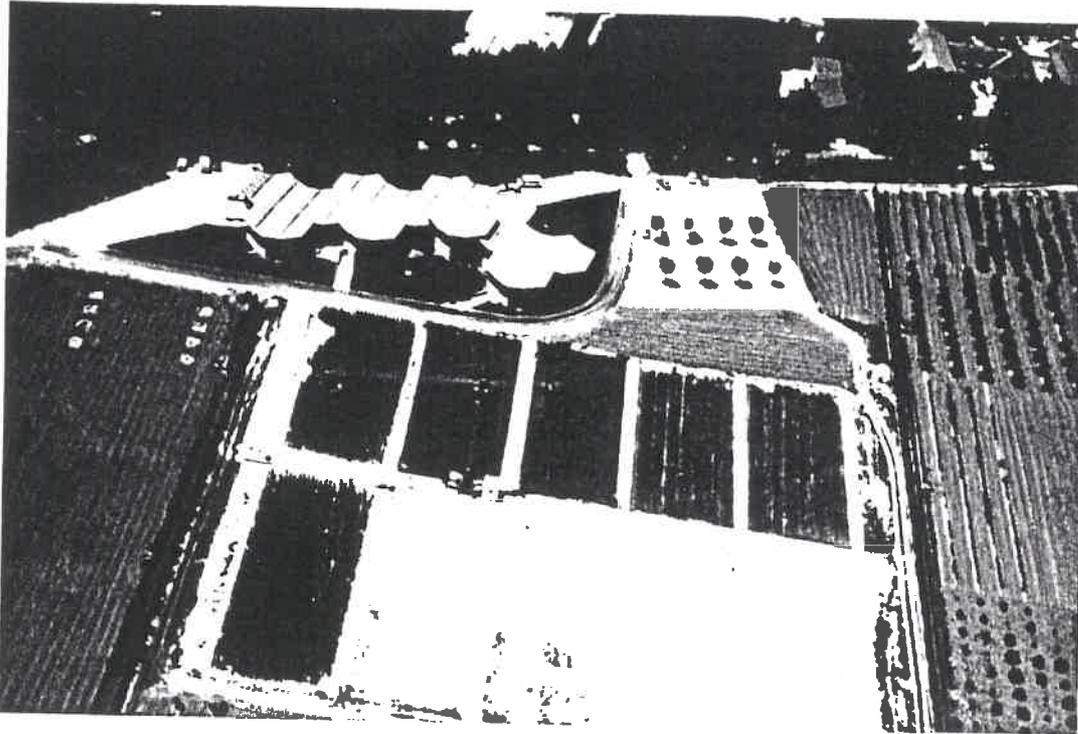


Photo 2.1 :
Parcelles expérimentales.
(I.N.R.A., Avignon, centre de Montfavet).

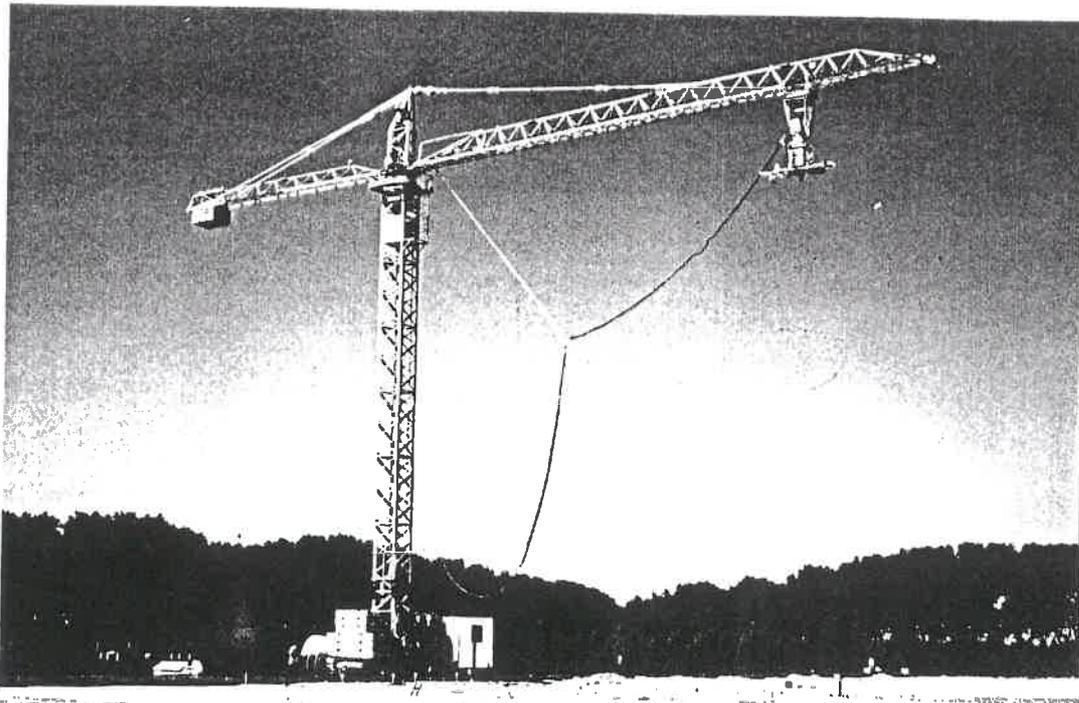


Photo 2.2 :
Les instruments de mesures physiques sont placés sous le chariot
de flèche d'une grue de chantier.

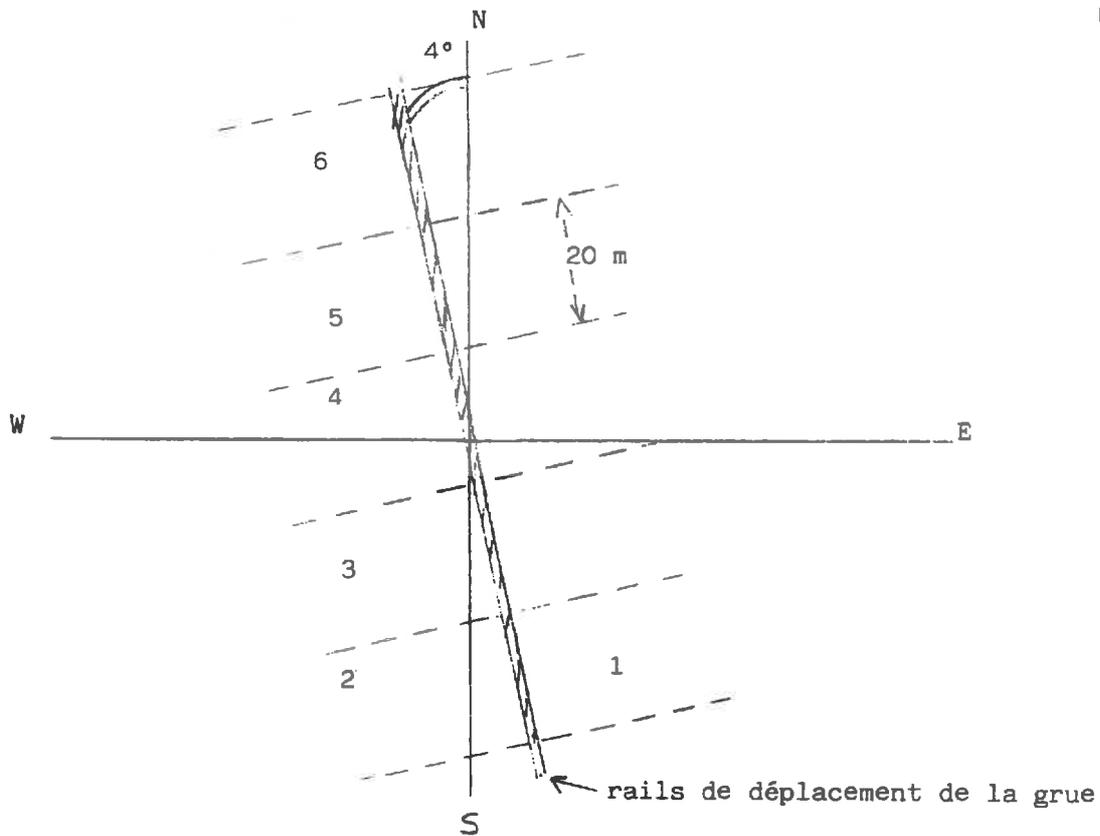


Figure 2.8 :
Disposition des parcelles expérimentales.

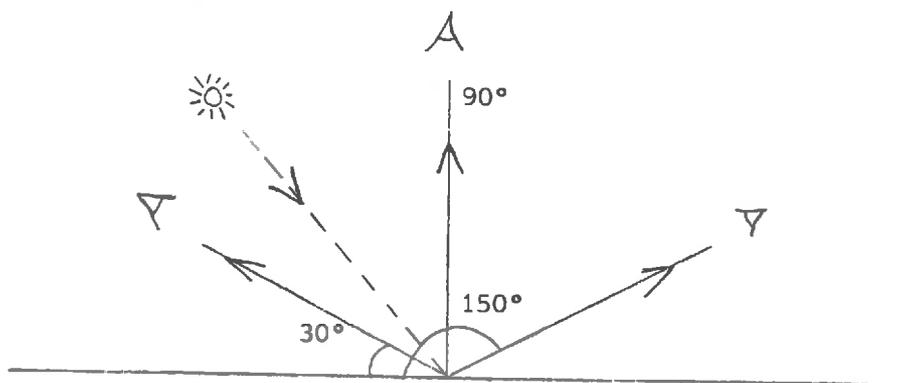


Figure 2.9 :
Repérage de l'angle de visée dans le plan d'incidence du rayonnement solaire: 90° correspond à une visée verticale.

2.2.1.2. Les mesures physiques obtenues

L'ensemble des mesures est résumé dans le tableau 2.1; l'angle de visée (ou inclinaison i de la platine) étant repéré par rapport à l'horizontale (figure 2.9).

A titre d'exemple, quelques données ainsi obtenues sont présentées sous leur forme finale (tableau 2.2). Chaque groupe de valeurs correspond à une mesure. La première ligne donne le numéro de la parcelle, l'inclinaison de la platine (I), l'azimut (A) du soleil ($A=0^\circ$ est pris dans la direction Sud), la date (mois-jour-année) et l'heure locale au moment où débute la mesure. Sont indiqués ensuite le numéro d'ordre des données successives, les taux de polarisation (%) obtenus dans les trois canaux, et les signaux correspondants reçus par RADISOL (en $W.m^{-2}.sr^{-1}$). En bas de chaque fichier, nous avons noté la polarisation moyenne et la luminance moyenne dans chaque bande spectrale, résultant de la mesure.

Mais si certains fichiers apparemment cohérents (parcelles 4 et 6 du tableau 2.2) ne posent pas de problème, d'autres présentent des fluctuations importantes de valeurs (parcelles 3 et 5). Ces fluctuations n'apparaissent pas régulièrement, et sont supposées provenir d'un mauvais fonctionnement de RADISOL.

Lorsque ces variations apparaissent pour de faibles taux de polarisation (inférieur à 2 ou 3%) (parcelle 3, $i=60^\circ$, le 13/08 à 14h), l'étalonnage de RADISOL a montré que les valeurs obtenues n'étaient de toute façon pas significatives, et plutôt dues au bruit de l'appareil. Mais ce n'est plus le cas quand les taux de polarisation atteignent 10 ou 20% (parcelle 5, $i=110^\circ$, le 13/08 à 18h). Ces sautes "d'humeur" de RADISOL restent encore mystérieuses, car variables d'un jour à l'autre (pas de problème le 18/08 par exemple!).

Ce dysfonctionnement de l'appareil a obligé à analyser chacun des résultats en détail, en écartant les données visiblement erronées. La moyenne calculée n'est donc qu'une moyenne probable.

Date	Temps	H. locale (à $i=90^\circ$)	Hauteur du soleil	Parcelle	Géométrie de la mesure (i = inclinaison platine)
13/08	ciel dégagé pas de vent	14h20	60,3°	3	Balayage dans plan solaire $i = 50^\circ$ à 140° (par 10°) 40° à 140° 40° à 140° 40° à 140°
		15h00	57,2°	5	
		17h18	36,8°	3	
		18h00	29,4°	5	
18/08	ciel dégagé, se voilant de quelques cirrus Mistral	17h00	38,6°	5	Balayage dans le plan solaire $i = 40^\circ$ à 140° (par 10°) 50° à 140° 50° à 140° 40° à 140°
		17h25	34,5°	4	
		17h40	31,5°	6	
		18h05	27,2°	3	
19/08	ciel dégagé Mistral	14h17	58,5°	3	Balayage dans le plan solaire $i = 40^\circ$ à 140° 50° à 140° 60° à 150°
		15h00	55,3°	4	
		15h15	53,7°	5	
20/08	ciel dégagé Peu de vent	14h05	58,7°	4	Balayage perpendiculaire au plan solaire $i = 40^\circ$ à 150° 30° à 150° 30° à 150° 30° à 150°
		14h25	57,8°	5	
		14h45	56,5°	6	
		15h05	54,4°	3	
29/09		14h48	41,5°	6	Balayage dans plan solaire $i = 30, 50, 90, 110, 140$ 30 à 150 (par 20°) 30 à 150° " 30 à 150° "
		15h03	40,0°	5	
		15h17	38,7°	4	
		15h31	37,3°	3	
09/10	présence d'une voilette nuageuse	13h50	40,7°	6	Balayage dans plan solaire $i = 30^\circ$ à 150° (par 20°) 30° à 150° " 30° à 150° " 30° à 150° "
		14h04	40,2°	5	
		14h17	39,8°	4	
		14h30	39°	3	

Tableau 2.1 : Mesures RADISOL - Avignon 1987

3 I=060 A=11.5 D=08-13-1987 T=14:03:18

n	pol(1)	pol(2)	pol(3)	sgn(1)	sgn(2)	sgn(3)
1	2.515	.847	1.090	31.000	16.740	176.668
2	2.724	1.128	1.033	31.100	16.740	176.610
3	2.095	3.489	.938	31.450	16.860	176.842
4	2.729	4.629	1.216	31.200	17.220	177.190
5	1.720	16.874	2.292	38.000	18.420	180.438
6	2.036	3.686	.926	36.850	23.820	176.900
7	3.212	.257	.983	30.750	16.560	176.320
8	.505	3.266	.930	31.200	17.460	176.320
9	2.514	1.238	.983	31.500	18.060	176.320
10	.938	1.798	1.031	31.050	16.440	176.900
11	2.046	.847	1.031	30.950	16.740	176.900
12	2.017	2.885	.869	30.250	15.600	176.900
13	2.745	1.762	.930	30.900	16.020	176.320
14	1.379	2.710	.930	29.950	16.260	176.320
15	2.115	2.111	.873	29.900	15.780	176.320
16	1.213	2.390	.873	30.950	16.740	176.320
17	12.382	41.148	.930	29.100	13.380	176.320
18	24.473	7.600	.980	32.200	24.240	176.900
19	2.256	1.830	1.031	31.000	16.260	176.900
20	2.092	2.250	1.031	31.100	16.260	176.900
21	2.325	6.469	.926	30.900	17.100	176.900
22	2.209	1.970	.930	30.450	16.140	176.320
23	2.758	2.540	.869	30.550	16.320	176.900
24	1.138	3.772	.869	32.450	18.540	176.900
25	1.299	.404	.930	30.900	16.740	176.320
26	30.535	2.678	.983	29.750	9.900	176.320
27	2.603	2.179	.873	25.350	10.320	176.320
28	2.625	1.128	1.083	31.100	16.740	176.320
29	2.547	.857	1.034	30.950	16.620	176.320
30	2.451	3.725	.983	31.100	17.220	176.320

polarisation moyenne (et ecart-type) :
 2.320 2.073 .976
 .483 1.243 .090
 signal moyen (et ecart-type) :
 30.990 16.729 176.610
 1.886 2.243 .301

4 I=120 A=74 D=08-18-1987 T=17:20:36

n	pol(1)	pol(2)	pol(3)	sgn(1)	sgn(2)	sgn(3)
1	16.845	32.392	2.282	17.250	8.040	114.956
2	17.361	32.892	2.182	16.800	7.920	114.782
3	17.125	32.762	2.164	16.750	7.980	114.840
4	17.236	33.382	2.125	16.600	7.920	114.608
5	17.143	32.535	2.205	16.550	7.800	114.956
6	17.463	33.370	2.160	16.750	7.980	115.478
7	17.494	33.504	2.127	16.900	7.920	114.956
8	17.446	33.479	2.133	16.900	8.040	115.072
9	17.870	33.811	2.213	16.950	8.160	117.044
10	17.625	33.599	2.147	17.000	8.040	115.710
11	17.596	33.479	2.083	16.850	8.040	115.014
12	16.749	32.032	2.067	16.600	7.980	113.158
13	17.001	32.156	2.182	16.500	7.920	114.782
14	17.500	33.107	2.165	16.850	8.100	115.652
15	17.536	32.987	2.160	16.950	8.100	115.014
16	17.409	33.382	2.153	16.800	7.920	115.362
17	17.560	33.335	2.154	17.150	8.160	116.638
18	17.431	33.248	2.128	16.600	7.980	116.232
19	17.792	32.477	2.097	17.550	8.460	115.594
20	17.661	33.195	2.210	17.100	8.280	115.536
21	17.625	33.454	2.185	17.000	8.160	116.348
22	17.571	33.504	2.133	16.650	7.920	115.536
23	17.661	32.944	2.128	17.100	8.400	115.768
24	17.517	33.641	2.126	16.700	7.860	115.014
25	17.746	33.117	2.061	16.800	8.040	114.376
26	17.904	33.995	2.069	16.700	7.920	114.376
27	17.465	33.872	2.109	16.300	7.920	113.680
28	17.651	33.282	2.117	16.400	7.800	112.868
29	17.792	33.764	2.131	16.450	7.860	113.912
30	17.638	33.544	2.084	16.500	7.740	111.418

polarisation moyenne (et ecart-type) :
 17.480 33.208 2.143
 .281 .500 .049
 signal moyen (et ecart-type) :
 16.800 8.012 114.956
 .273 .165 1.142

5 I=110 A=84.37 D=08-13-1987 T=18:11:04

n	pol(1)	pol(2)	pol(3)	sgn(1)	sgn(2)	sgn(3)
1	10.944	20.263	1.335	9.250	4.380	58.696
2	10.769	19.545	1.480	9.250	4.440	58.696
3	11.134	19.820	22.496	9.100	4.380	-19.256
4	10.743	19.820	1.809	9.200	4.380	57.942
5	11.445	20.778	1.523	9.000	4.320	58.348
6	10.957	20.328	1.486	9.100	4.320	58.464
7	10.743	20.553	15.259	9.200	4.320	53.534
8	10.567	21.078	1.651	9.200	4.260	58.058
9	11.693	21.078	1.636	8.950	4.260	58.000
10	11.693	22.081	1.597	8.950	4.200	58.174
11	10.868	20.553	22.582	9.100	4.320	-19.198
12	10.717	19.820	1.532	9.150	4.380	58.058
13	11.175	19.879	1.727	9.000	4.320	57.826
14	10.743	21.387	1.571	9.200	4.200	57.884
15	11.020	22.644	1.746	9.050	4.140	57.768
16	11.241	19.879	1.370	8.950	4.320	58.058
17	11.223	20.328	1.781	9.100	4.320	57.768
18	11.312	20.553	22.208	9.100	4.320	-19.198
19	10.831	19.982	1.533	9.200	4.440	58.000
20	11.020	20.485	1.895	9.050	4.380	57.942
21	27.036	19.708	1.345	-17.450	4.500	58.174
22	3.160	1.971	1.028	26.850	25.500	78.590
23	3.136	1.971	1.016	26.800	25.500	78.590
24	3.095	1.950	1.126	26.850	25.560	78.474
25	26.535	20.103	1.535	-17.550	4.320	57.942
26	10.982	22.175	1.712	9.150	4.140	57.768
27	10.893	21.078	1.804	9.150	4.260	57.594
28	10.805	20.553	1.710	9.150	4.320	57.826
29	10.805	20.042	2.827	9.150	4.380	57.130

polarisation moyenne (et ecart-type) :
 11.031 20.745 1.717
 .325 .872 .308
 signal moyen (et ecart-type) :
 9.094 4.297 57.923
 .092 .085 .291

6 I=90 A=78 D=08-18-1987 T=17:42:39

n	pol(1)	pol(2)	pol(3)	sgn(1)	sgn(2)	sgn(3)
1	5.386	8.742	1.041	15.000	8.340	83.404
2	5.440	8.926	1.104	15.000	8.280	83.288
3	5.541	8.868	1.330	15.150	8.640	84.970
4	5.657	9.010	.975	16.550	9.120	83.578
5	5.505	8.509	1.166	15.900	8.340	82.882
6	5.512	8.495	1.654	15.750	8.460	82.592
7	6.312	8.575	1.250	16.150	8.280	82.708
8	6.394	9.005	.774	17.350	8.820	79.460
9	5.564	8.858	1.024	16.800	8.340	83.984
10	5.461	8.481	1.014	15.750	8.580	83.926
11	6.891	9.572	.960	15.550	8.040	87.464
12	5.840	8.809	1.375	15.200	8.280	83.346
13	5.317	8.947	1.194	15.450	8.160	84.332
14	5.151	8.848	2.279	15.050	8.040	83.810
15	5.672	9.253	2.013	17.800	10.080	89.030
16	9.766	9.715	1.342	16.700	8.400	85.260
17	5.610	9.369	1.040	14.850	8.400	84.332
18	5.726	9.159	.955	15.600	8.880	83.346
19	5.580	8.773	1.094	16.100	8.520	84.854
20	5.724	9.253	1.826	15.350	8.400	84.912
21	5.646	9.767	1.071	15.800	8.640	85.956
22	5.635	9.071	3.553	15.700	8.760	87.116
23	5.928	8.675	1.144	17.350	8.820	83.926
24	5.915	8.322	1.349	14.900	7.860	84.738
25	5.274	8.926	1.072	15.150	8.280	84.216
26	5.380	8.839	1.098	15.150	8.460	82.128
27	5.369	8.538	1.153	15.450	8.100	82.418
28	5.467	8.797	1.854	14.800	7.980	82.766
29	5.500	8.975	1.033	15.250	8.340	83.230
30	5.426	9.044	1.043	14.900	8.280	83.288

polarisation moyenne (et ecart-type) :
 5.649 8.911 1.325
 .364 .327 .554
 signal moyen (et ecart-type) :
 15.683 8.466 84.000
 .803 .425 1.795

Tableau 2.2 : Exemples de données obtenues.

2.2.1.3. *Premières remarques sur le taux de polarisation*

Les taux de polarisation moyens sont présentés en fonction de l'angle de visée sur les courbes des figures 2.10 à 2.14, pour chaque parcelle et chaque date de mesure, et pour les trois bandes spectrales (1=vert, 2=rouge, 3=proche infrarouge).

Les courbes présentent toutes les mêmes variations en fonction de la longueur d'onde: le taux de polarisation est important dans le rouge (630 nm) qui correspond à une bande d'absorption de la chlorophylle, est plus faible dans le vert, et insignifiant dans le proche infrarouge. Ce comportement est celui déjà souligné dans la partie I, comme étant l'inverse des variations spectrales du facteur de réflectance d'une végétation verte.

Malgré les fluctuations mentionnées ci-dessus, leurs allures générales continues semblent prouver, a posteriori, que l'élimination "à la main" des données visiblement fausses, donne des résultats corrects.

Sur les indicatrices mesurées dans le plan solaire, il est intéressant de repérer la position du soleil (par son inclinaison par rapport à la verticale du lieu). Une augmentation significative du taux de polarisation apparaît, comme attendu, dans la direction de réflexion spéculaire. Cette croissance se retrouve avec une relativement bonne symétrie lors du balayage dans le plan perpendiculaire (mesures du 20/08).

Les mesures acquises aux environs de 14h (heure locale) débutent au midi solaire, et présentent un taux de polarisation moins élevé que celles effectuées en fin d'après-midi, lorsque le soleil est plus bas et donc l'angle d'incidence des rayons solaires sur la cible est plus important. Dans ce cas, les taux de polarisation mesurés atteignent 40% (à 630nm).

On peut remarquer que la différence des taux obtenus entre les deux parcelles de soja (3 et 4) est moins sensible que celle entre les parcelles de maïs (5 et 6). Les deux parcelles de soja formaient en effet un couvert assez homogène, alors que pour le maïs, la parcelle 6 plus en avance et surtout déjà fleurie (présence des panicules mâles) polarise nettement moins que la parcelle 5, et en particulier dans le deuxième canal (630 nm).

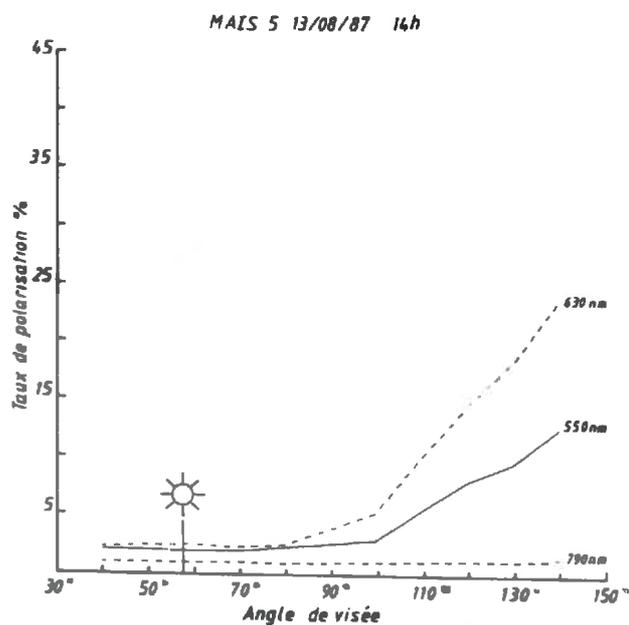
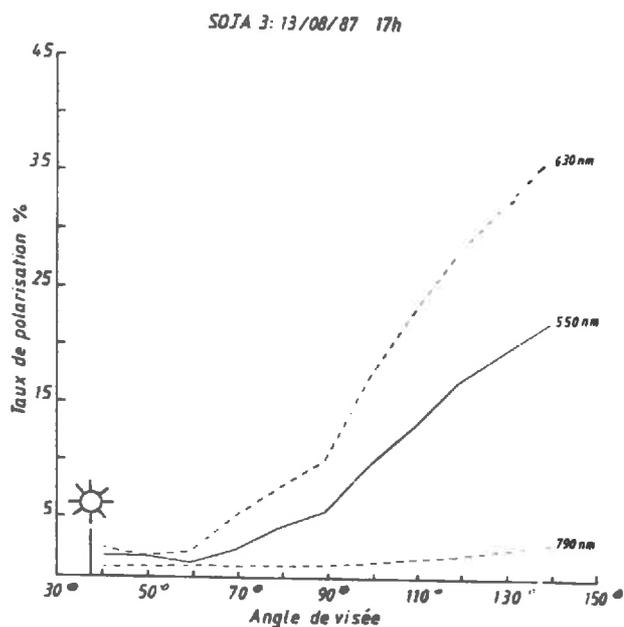
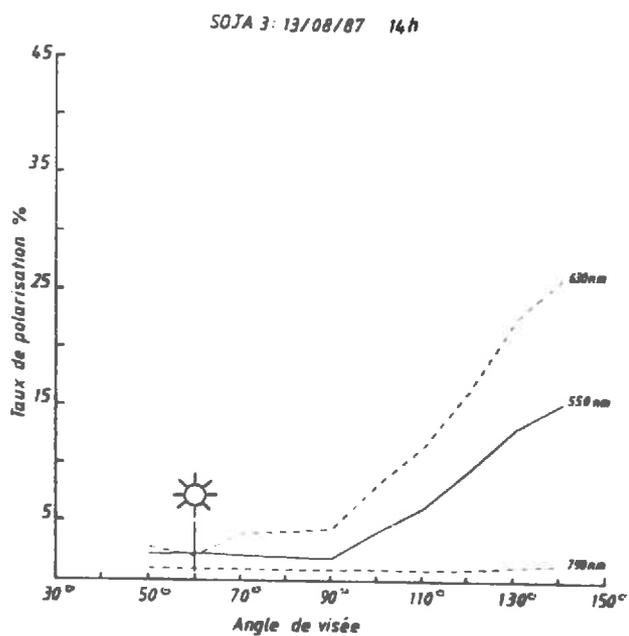


Figure 2.10 :

Taux de polarisation mesurés sur les parcelles de soja et maïs pour différents angles de visée dans le plan solaire, le 13/08/87.

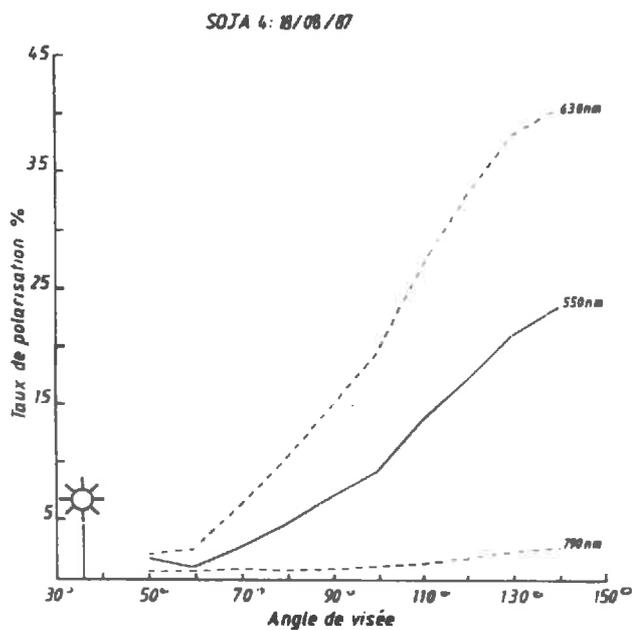
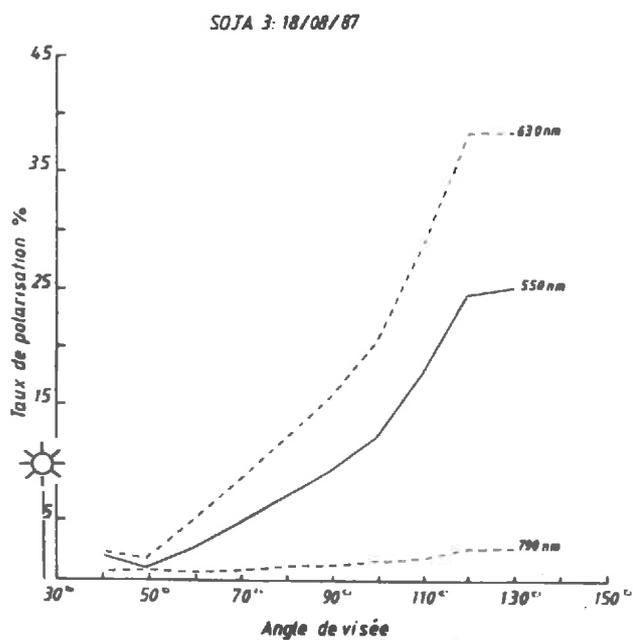
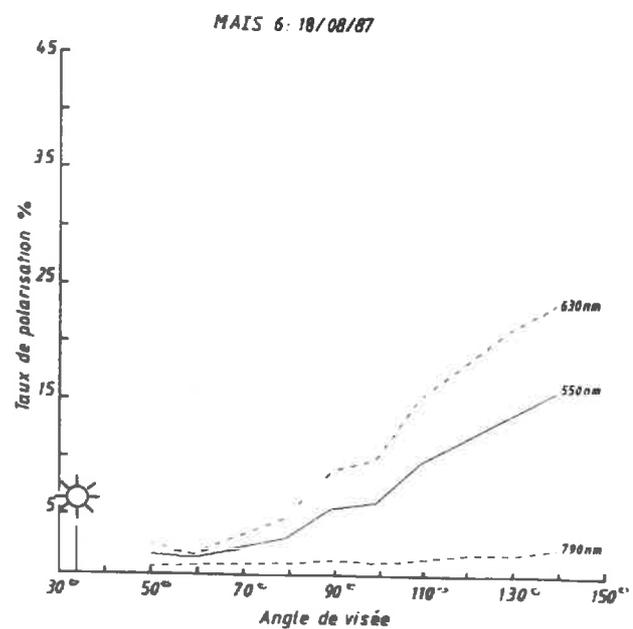
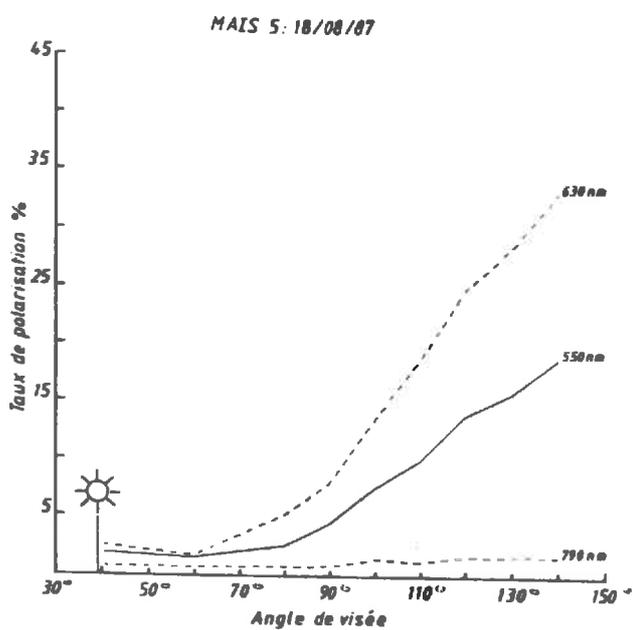


Figure 2.11 : Taux de polarisation mesurés dans le plan solaire, le 18/08/87.



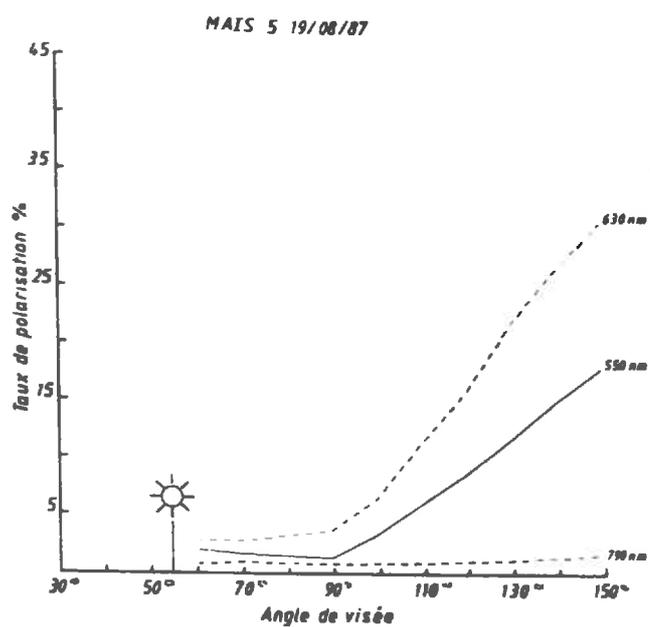
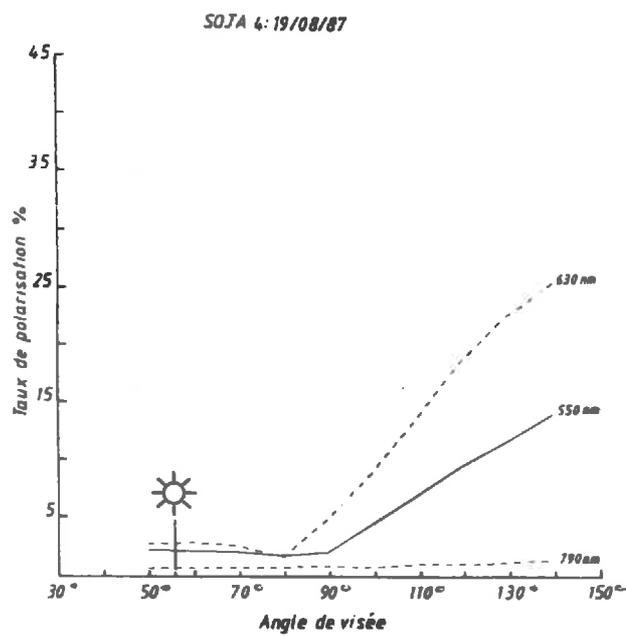
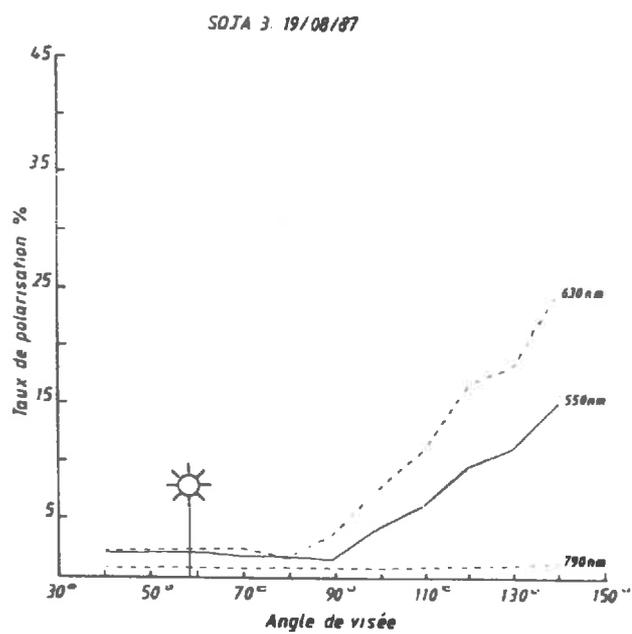


Figure 2.12:
Taux de polarisation mesurés
dans le plan solaire, le 19/08/87.

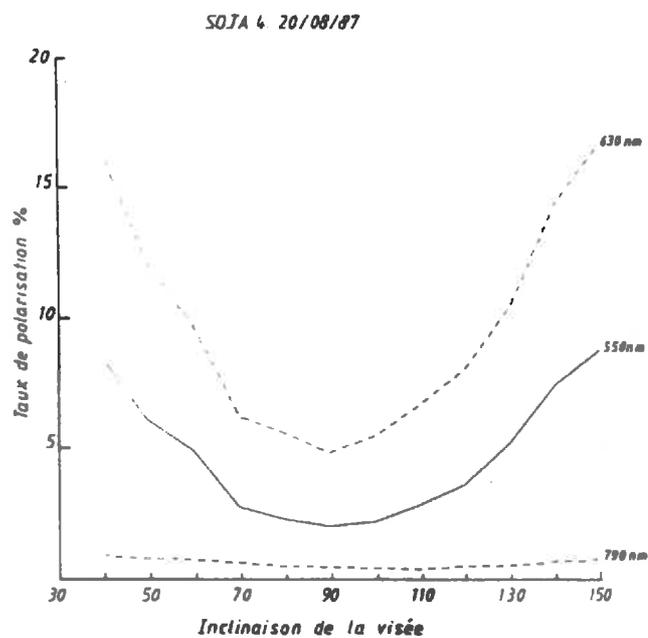
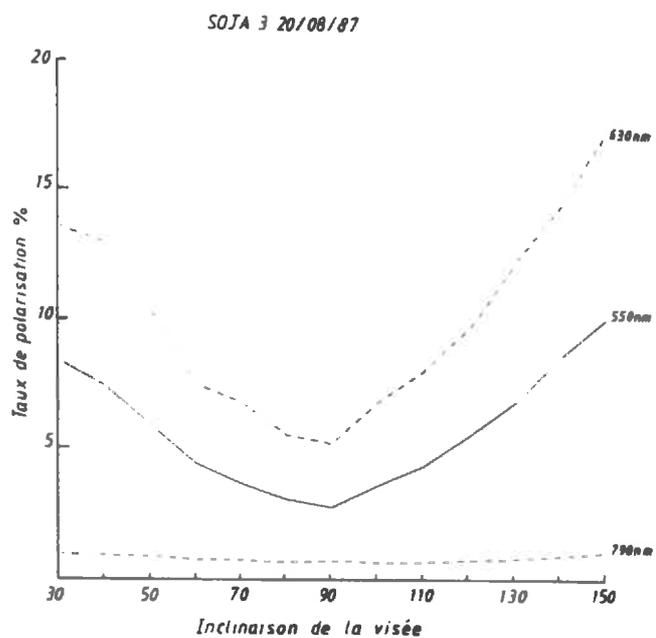
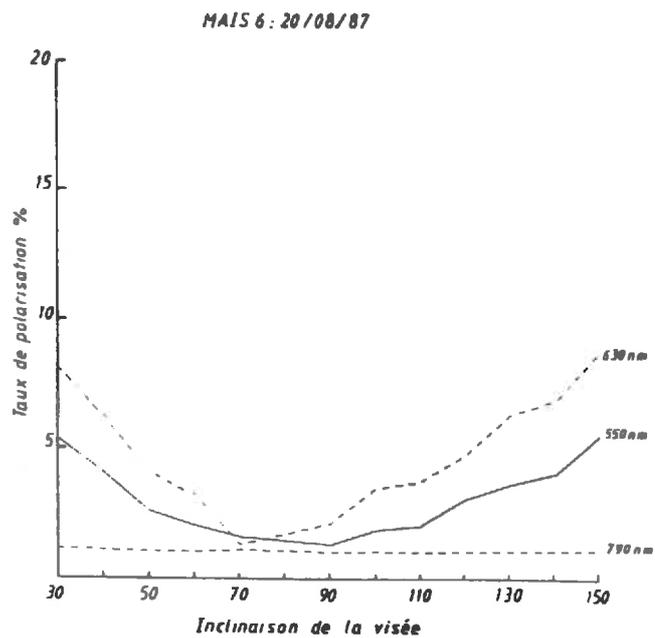
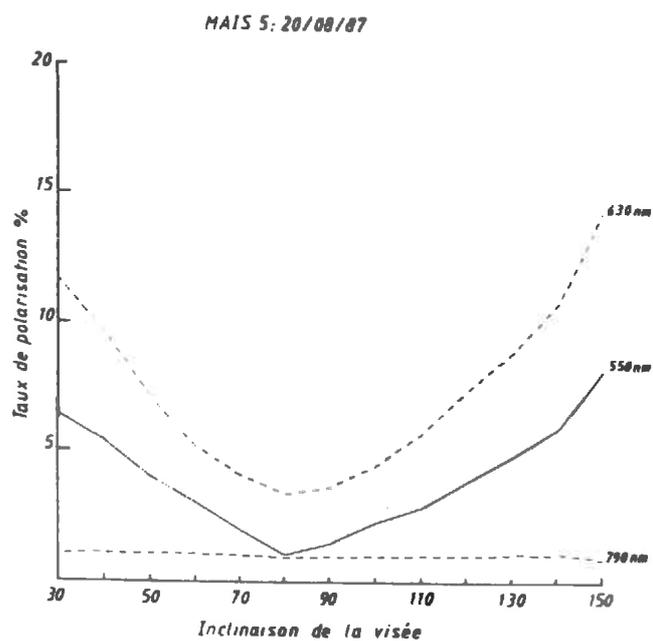


Figure 2.13 : Taux de polarisation mesurés dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires, le 20/08/87.



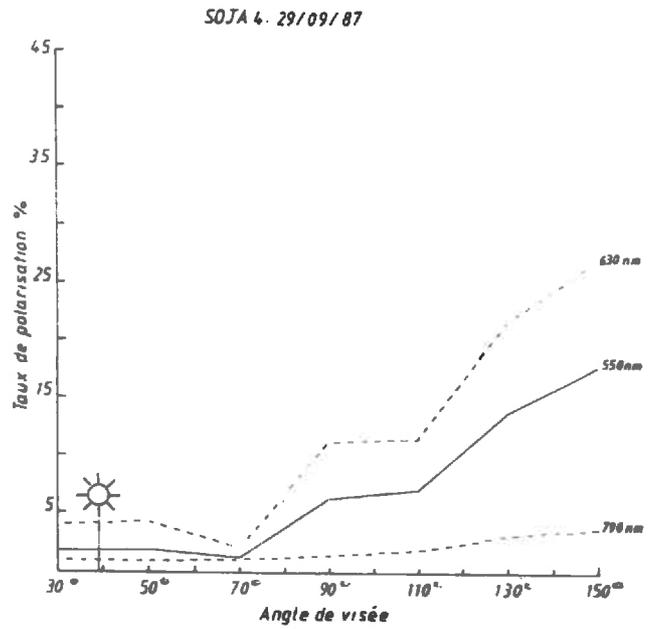
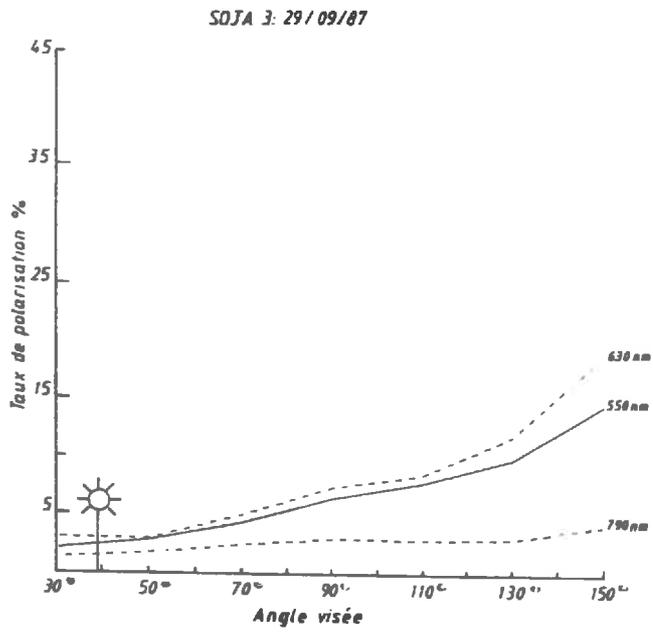
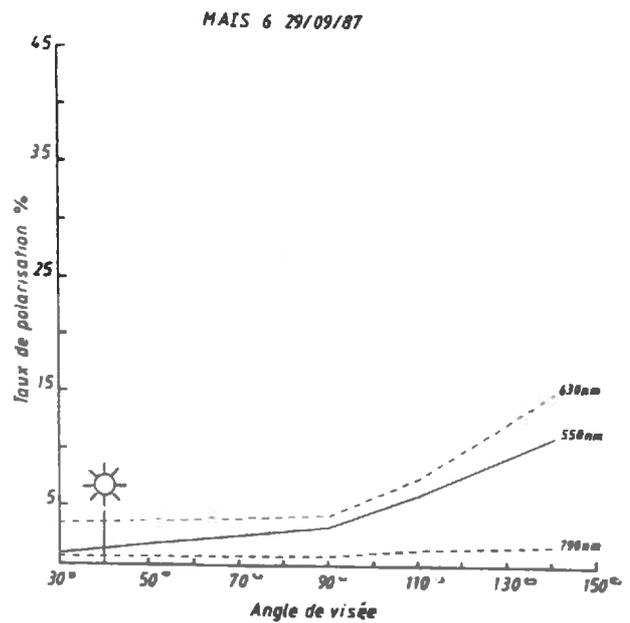
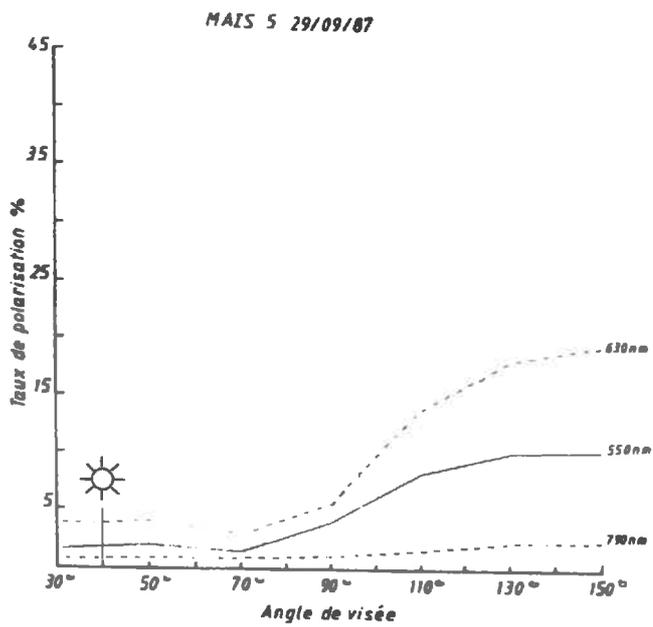


Figure 2.14 : Taux de polarisation mesurés dans le plan solaire, le 29/09/87.



Le 29/09 (figure 2.14) toutes les parcelles sont en fin de phase végétative et commencent à jaunir. Mais on distingue encore les deux parcelles plus jeunes (soja 4 et maïs 5) dont les taux de polarisation restent légèrement supérieurs.

2.2.1.4. La réflectance et sa composante polarisée

Le facteur de réflectance (ρ_λ) du couvert peut être obtenu à partir de la luminance (L_λ) mesurée par RADISOL, par la relation:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_\lambda}$$

où E_λ est l'éclairement monochromatique incident directionnel reçu par la cible ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$).

Mais le radiomètre ayant été conçu au départ pour des études stratosphériques (RADIBAL), E_λ est étalonné à partir de l'éclairement hors atmosphère. Or la mesure au sol nécessite la prise en compte de l'atténuation de ce rayonnement pendant sa traversée atmosphérique. Faute de mesures in situ de l'éclairement solaire, ce facteur d'atténuation est calculé théoriquement, à partir de modèles d'atmosphère.

Pour cette première analyse uniquement expérimentale, nous avons donc plutôt utilisé les mesures de réflectance fournies par un radiomètre *CIMEL* (radiomètre de simulation de SPOT), dont la tête de luminance (mesurant le rayonnement montant) était fixée sur la platine porteuse de RADISOL, et la tête d'éclairement (qui mesure le rayonnement descendant) placée horizontalement sur un mât rattaché à la grue. Le facteur de réflectance correspond au rapport de ces deux mesures, compte-tenu bien-sûr d'un étalonnage standard effectué sur une surface de BaSO_4 . Les mesures ont été réalisées simultanément aux mesures RADISOL, et donc exactement dans les mêmes conditions. Seulement le champ d'ouverture du *CIMEL* (1°) est inférieur à celui de RADISOL.

Ces réflectances sont reportées sur les courbes de la figure 2.15 pour les deux parcelles de soja à quelques dates, en fonction des angles de visée. L'échelle logarithmique favorise la visualisation des indicatrices dans le visible, bien qu'au dépens de celles dans le proche infrarouge.

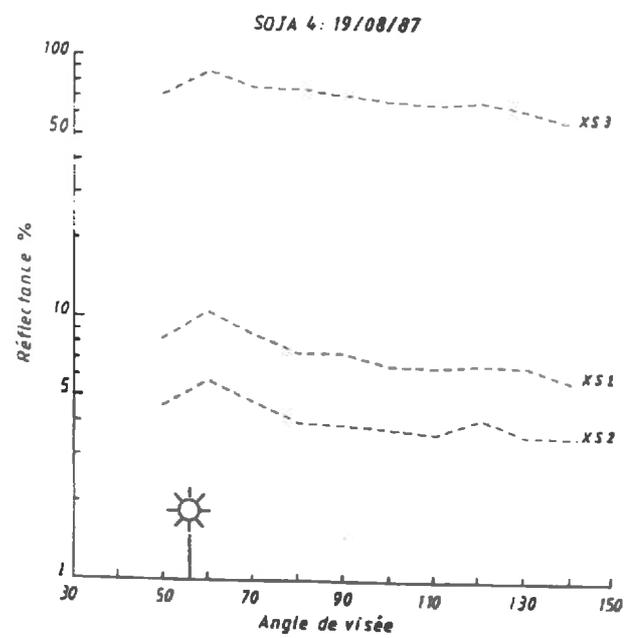
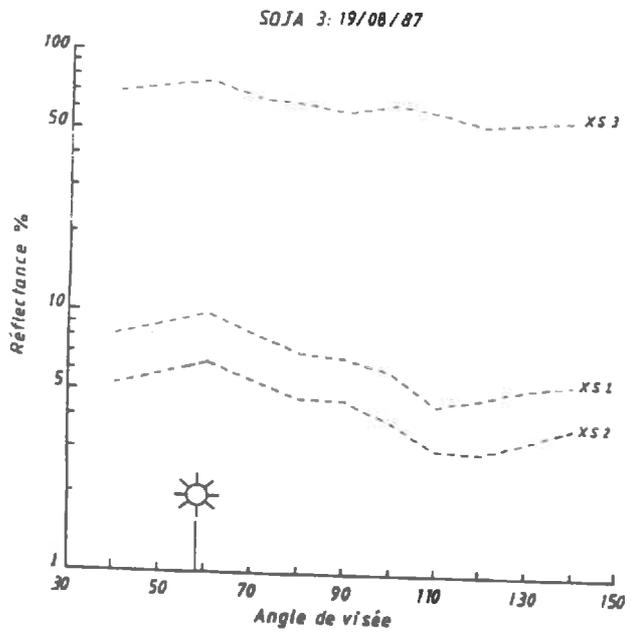
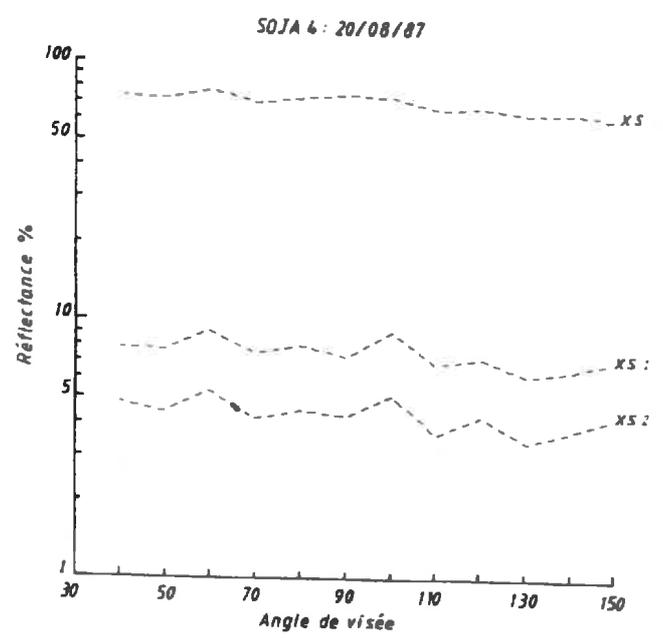
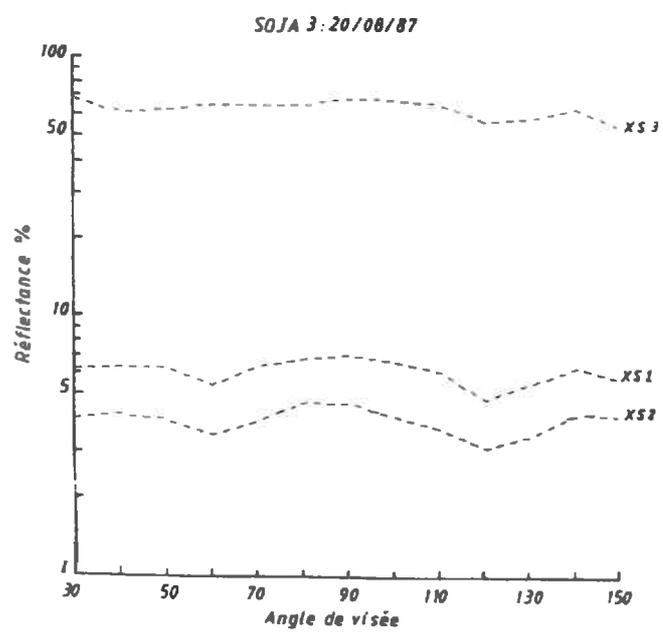


Figure 2.15 : Facteurs de réflectance mesurés sur les couverts de soja avec le radiomètre CIMEL:
 le 19/08/87 : visées dans le plan solaire
 le 20/08/87 : visées dans le plan perpendiculaire.



Dans le plan d'incidence des rayons solaires, le signal est maximum en rétrodiffusion, et diminue ensuite avec l'augmentation de l'inclinaison de visée par rapport à celle du soleil. Le fait que cet effet directionnel soit habituellement plus marqué dans le visible que dans le proche infrarouge (GUYOT, 1984) n'apparaît pas de façon évidente ici. Dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires, on retrouve à peu près (surtout sur la parcelle 3) le fait que dans le visible, le facteur de réflectance diminue lorsqu'on s'écarte de la verticale, puis augmente pour les fortes inclinaisons (même si cet effet ne ressort pas clairement en échelle log).

Les deux couverts se distinguent par des valeurs de réflectance différentes surtout dans le proche infrarouge, bien que dans cette bande spectrale, ces indicatrices apparaissent très élevées par rapport à celles remarquées généralement dans la littérature.

A partir de ces mesures, associées aux mesures de polarisation, il est maintenant possible d'évaluer la composante polarisée de la réflectance. Les taux de polarisation obtenus dans le proche infrarouge étant trop imprécis, cette composante n'est déterminée que dans les deux canaux du visible.

Elle est tracée sur les courbes des figures 2.16a et b pour les parcelles de soja 3 et maïs 5, dans ces deux bandes spectrales, en fonction de l'inclinaison de visée. On retrouve les mêmes allures que celles des taux de polarisation: cette réflectance polarisée croît avec l'augmentation de l'angle de visée par rapport au soleil, et avec l'inclinaison du soleil. Elle atteint des valeurs de l'ordre de 2%, ce qui n'est pas négligeable par rapport au facteur de réflectance global, qui, dans ces longueurs d'onde, est de l'ordre de 5%.

Elle est représentée aussi, pour chaque date (correspondant à des hauteurs du soleil différentes) et chaque angle de visée, en fonction de la longueur d'onde (c'est-à dire ici deux points). Ces courbes sont relativement constantes, même si aux fortes inclinaisons, un maximum de 0,25% de variation apparaît.

Ceci confirmerait l'hypothèse d'une lumière polarisée due à la réflexion spéculaire, et donc spectralement neutre.

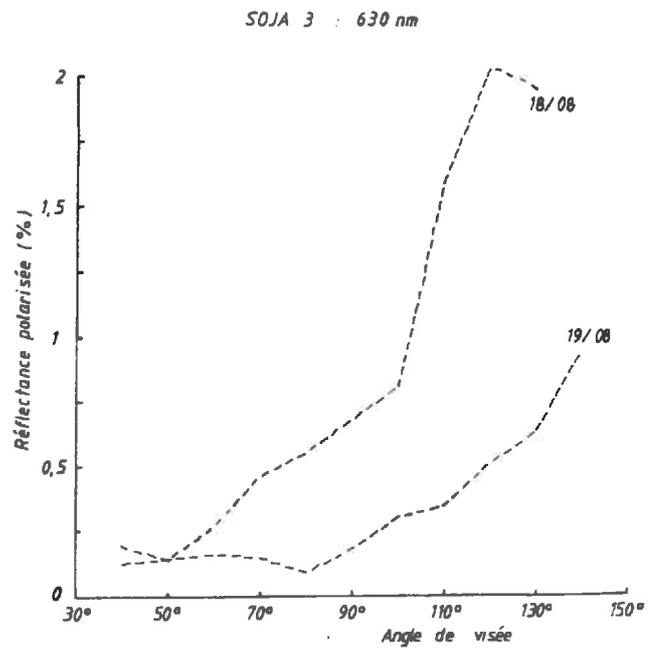
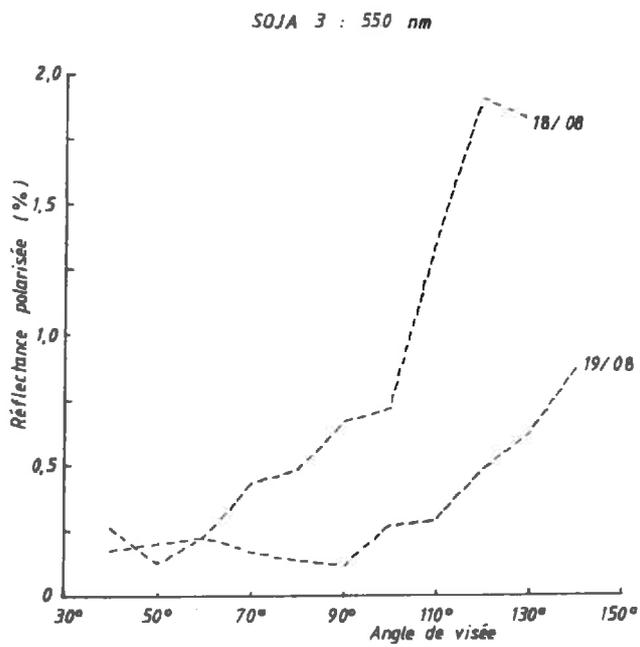
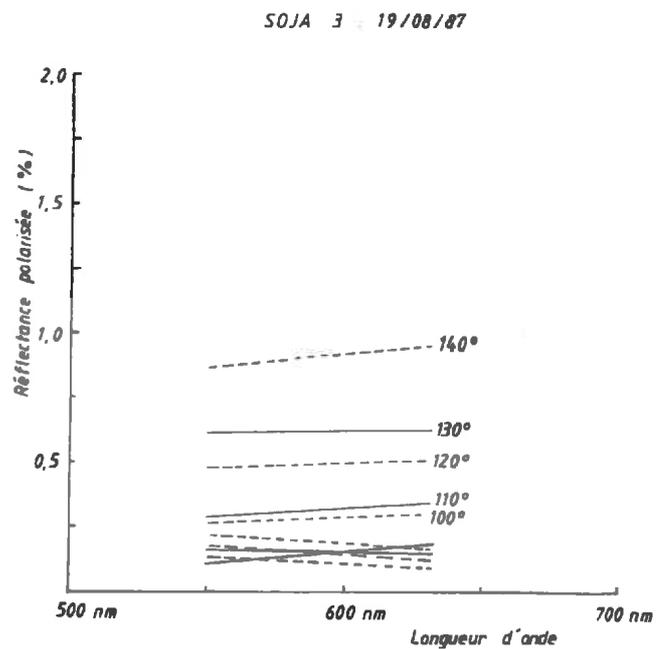
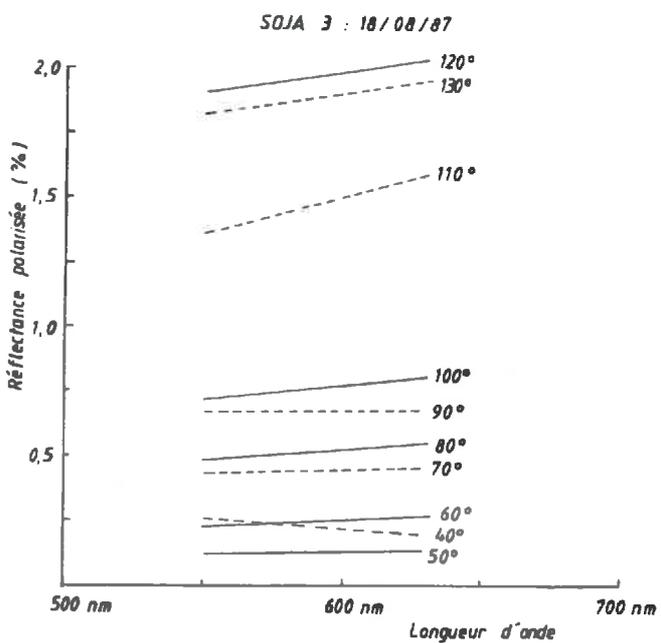


Figure 2.16 (a): Composante polarisée de la réflectance sur la parcelle de soja 3, dans le plan solaire.



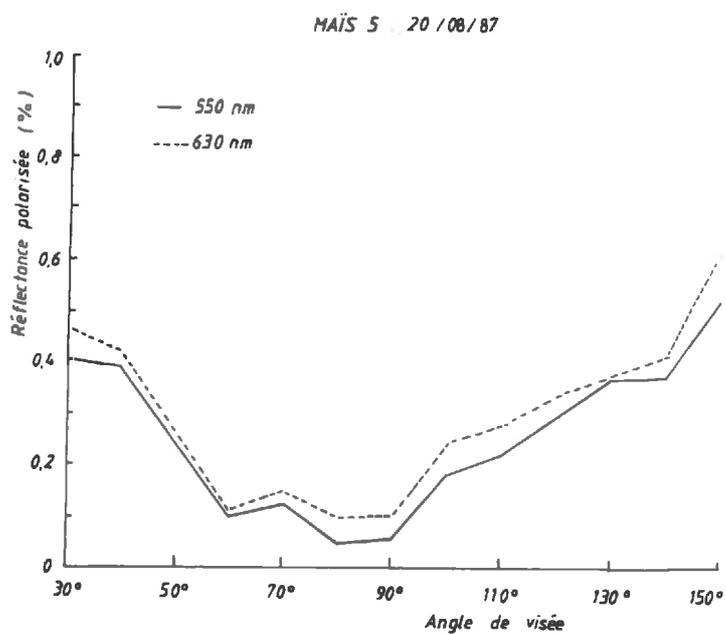
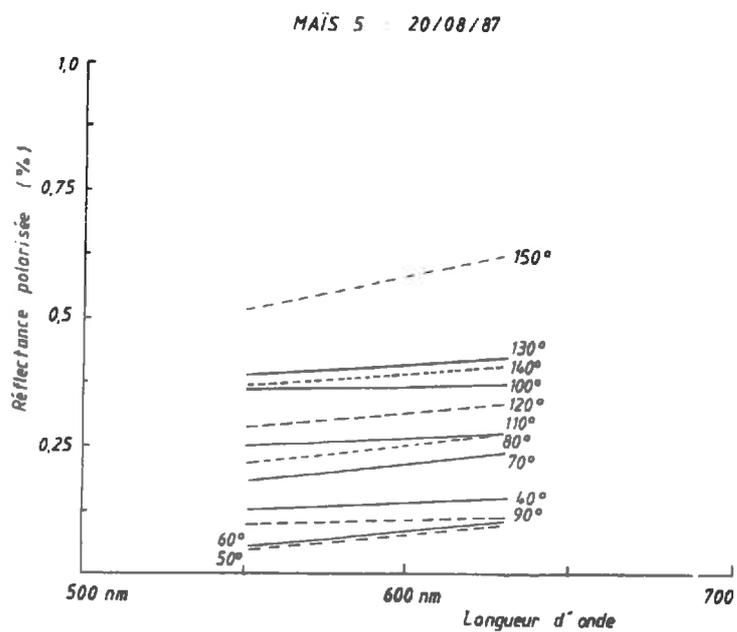


Figure 2.16 (b) : Réflectance polarisée de la parcelle de maïs 5, dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires.



2.2.1.5. *Les mesures biologiques*

Conduites parallèlement à ces mesures physiques, les mesures biologiques réalisées dans la végétation, sont indispensables pour connaître les paramètres caractéristiques du couvert (biomasse, indice foliaire, inclinaison des feuilles) au moment de la mesure physique. En fournissant les informations nécessaires sur le développement et l'évolution du couvert, elles permettent le suivi régulier de la culture.

Le protocole de mesures est celui déjà utilisé les années précédentes dans le cadre d'expérimentations radiométriques et micro-ondes. Il comprend l'observation des différents stades de développement de la plante et l'estimation des paramètres biologiques du couvert à chacun de ces stades (CIHLAR et al., 1987).

Compte-tenu de la variabilité naturelle importante de ces paramètres, les mesures sont réalisées au-moins une fois par semaine (2 quand c'est possible) sur chaque parcelle. Elles nécessitent en effet beaucoup de temps (1/2 journée par parcelle de soja, 1 journée pour une parcelle de maïs déjà grand), bien que les échantillons prélevés soient limités: une surface de 50x50 cm dans chaque soja; 10 plants de maïs dans chaque parcelle.

Pour chaque parcelle de soja, sont mesurés:

- le poids frais total de l'échantillon
- son indice foliaire (L.A.I.): chaque feuille verte est passée au planimètre photoélectrique.
- le poids frais, puis sec (après séchage de 48h à l'étuve)
 - de l'ensemble de feuilles vertes
 - des feuilles jaunes
 - des tiges
 - des gousses lorsqu'elles sont apparues.

Ces différences (poids frais - poids sec) donnent un paramètre important qu'est le contenu en eau des plantes, avec la contribution respective des différents organes.

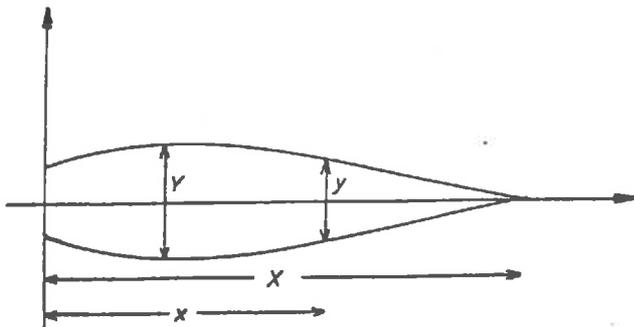
Pour chaque parcelle de maïs, sont mesurés, comme précédemment, le poids frais de l'ensemble des 10 plantes, puis les poids frais et poids secs des feuilles, tiges, fleurs (panicules) et épis lorsqu'ils sont sortis. Mais les

feuilles sont trop grandes pour être passées au planimètre, et l'estimation de l'indice foliaire a donc conduit à utiliser une autre méthode, mise au point justement pour alléger les temps de mesures.

De nombreuses expérimentations précédentes ont en effet abouti à un modèle de la forme du limbe des feuilles de maïs (PREVOT, 1985; BARET, 1986), en caractérisant cette forme par une relation parabolique entre la longueur et la largeur du limbe (figure 2.17). Après avoir vérifié cette relation sur un nombre suffisant de feuilles, pour lesquelles nous avons mesuré la largeur tous les deux centimètres, il suffit ensuite de mesurer la longueur et la largeur maximale de chaque feuille. A l'aide de cette relation, on détermine alors la surface foliaire par segment, et donc l'indice foliaire final recherché.

Un autre paramètre important dans notre étude, qui caractérise aussi la structure géométrique du couvert, est l'angle d'inclinaison des feuilles. Pour le soja, cet angle n'est pas significatif: les feuilles n'ont pas de direction privilégiée (figure 2.18) et le couvert sera relativement uniforme. Les feuilles jeunes des couches supérieures sont toutefois plus horizontales que les feuilles plus âgées. Par contre, un plant de maïs présente une structure bien particulière (figure 2.19a). Les feuilles sont réparties de chaque côté de la tige dans un même plan. Mais compte-tenu de leur courbure, on ne peut se contenter de mesurer l'angle d'insertion sur la tige. Il est nécessaire de diviser la feuille en segments, dont on mesure les inclinaisons respectives. On utilise pour cela la méthode des silhouettes, développée par BONHOMME et VARLET-GRANCHER (1978) (PREVOT, 1985).

Cette méthode consiste à photographier devant une mire quadrillée chaque plante entière venant d'être arrachée (ici 10 par parcelle), puis à déterminer sur ces photos les coordonnées de segments de feuilles supposés plans (figure 2.19b). On obtient ainsi la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles, où chaque angle est pondéré par la surface de feuilles des segments correspondants (surface calculée par le modèle de la forme des limbes, précédemment cité). Cette fonction est calculée en fait par tranches horizontales de végétation: les feuilles sont classées en trois grands lots, à partir de la moyenne des angles des deux premiers segments schématisants la feuille (figure 2.19a).



$$Y_* = a.X_*^2 + b.X_* + c$$

$Y_* = y / Y$ = largeur normalisée
 Y = largeur maximum du limbe
 $X_* = x / X$ = longueur normalisée
 X = longueur totale du limbe

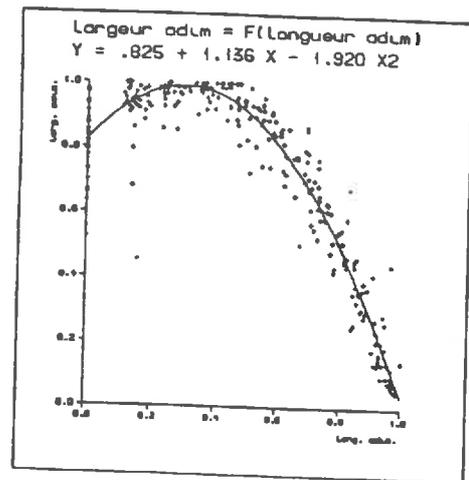


Figure 2.17:

Modèle de forme de limbe d'une feuille de maïs.



Figure 2.18:

Un plant de soja au début de sa floraison (stade "R1" en agronomie)

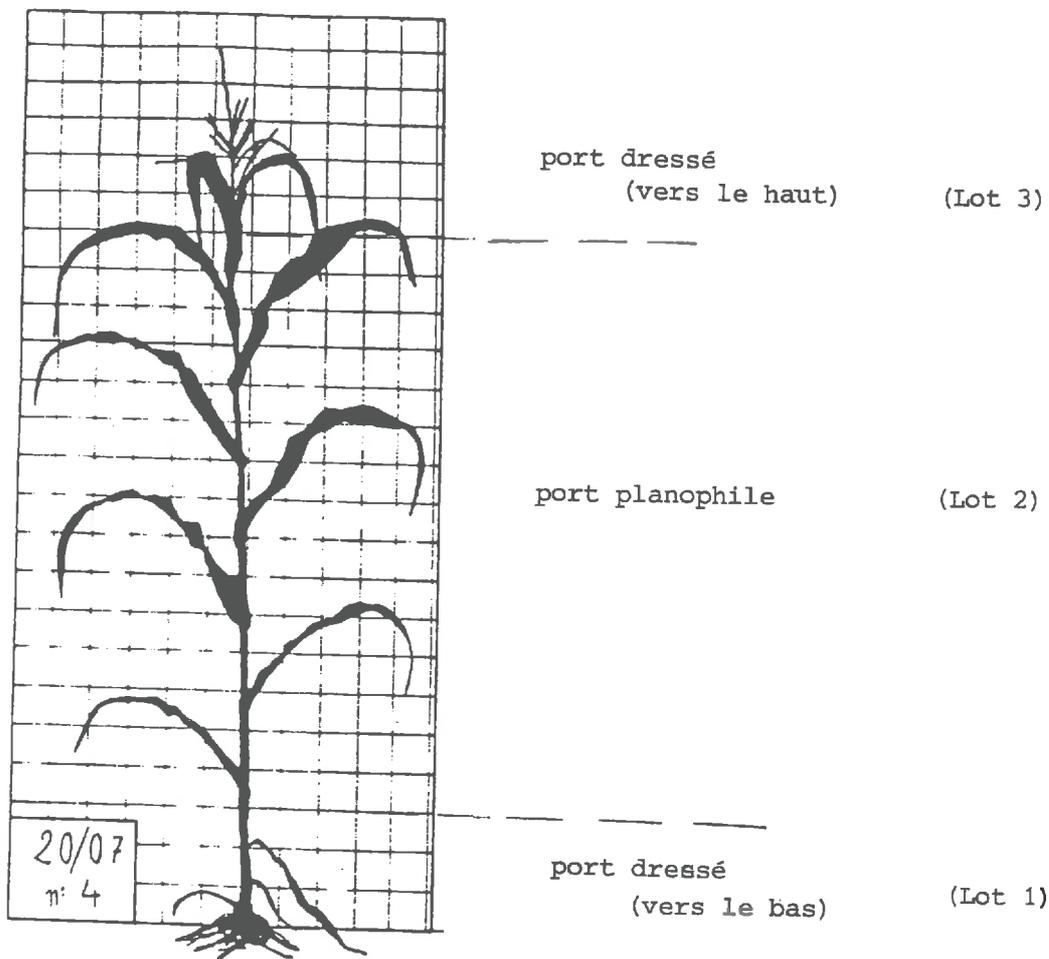


Figure 2.19 (a) :

Photographie d'un pied de maïs devant une mire quadrillée; et observation des différents types de port des feuilles d'un plant.

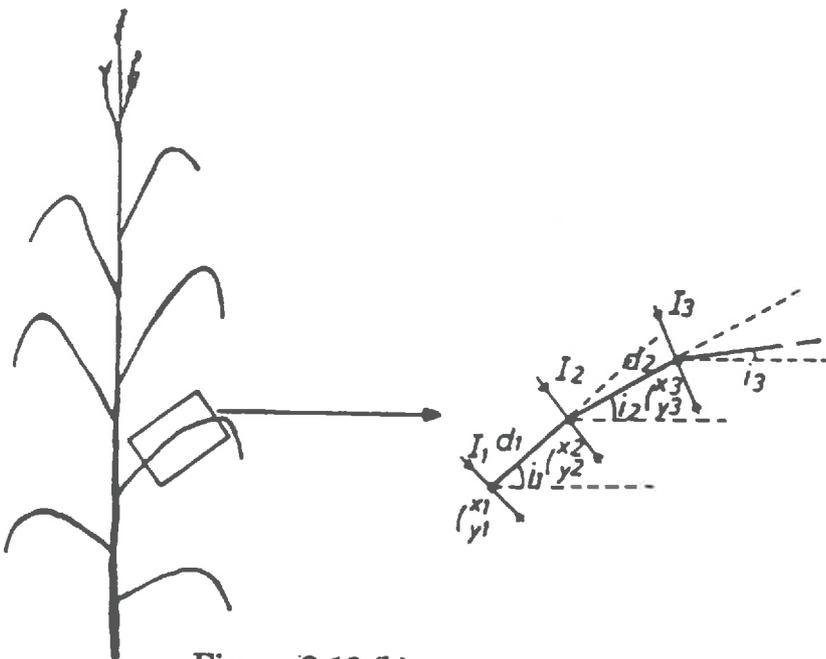


Figure 2.19 (b) :

Méthode des silhouettes: on divise chaque feuille en segments de droite, suivant la nervure centrale, et on détermine la longueur, l'inclinaison ainsi que la hauteur de chacun de ces segments à partir des coordonnées de leurs extrémités.

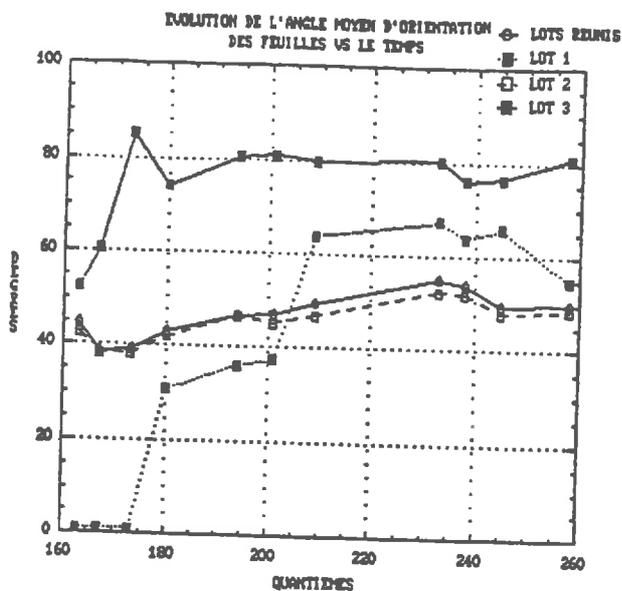


Figure 2.20 :
Evolution de l'angle moyen d'orientation des feuilles de la parcelle de maïs 6 au cours du temps.

Figure 2.21 :
Fonction de distribution d'inclinaison des feuilles de la parcelle de maïs 6 (en fréquences cumulées).

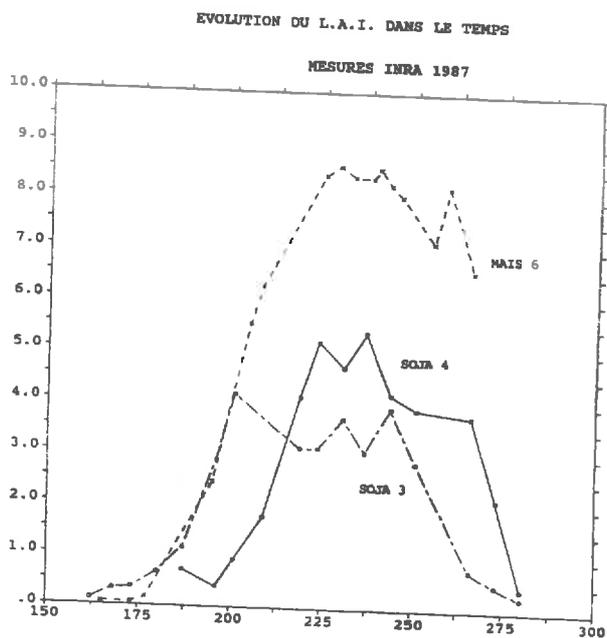
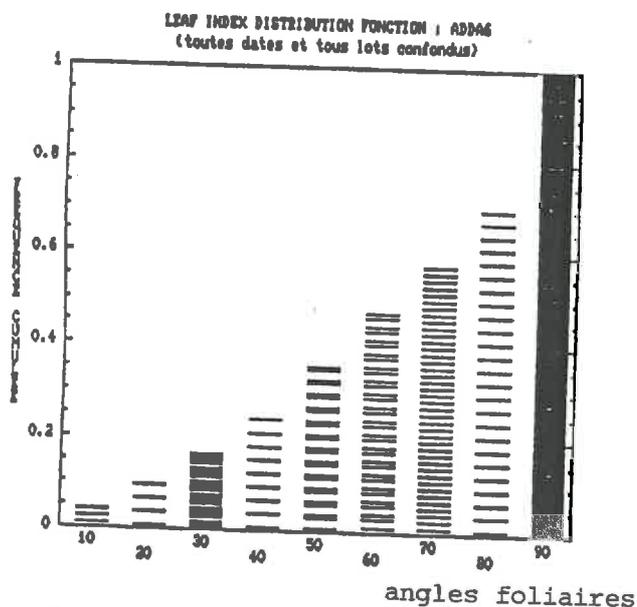


Figure 2.22 :
Evolution de l'indice foliaire de différentes parcelles au cours du temps (dates en quantièmes).

La figure 2.20 présente ainsi l'évolution de l'angle moyen calculé par cette méthode pour chaque lot à chaque date de mesure (en quantèmes) sur la parcelle de maïs 6. L'angle moyen du lot 2 est le plus caractéristique, car très corrélé à l'angle moyen calculé tous lots confondus. La figure suivante (2.21) nous donne la fonction de distribution totale (en fréquences cumulées) toutes dates et tous lots confondus. L'angle moyen d'orientation des feuilles est : $\theta_F = 46,9^\circ$: le couvert est plutôt érectophile.

Les quatre parcelles ont été semées avec des densités agricoles normales, et présentent pendant les mois d'été des végétations bien couvrantes (L.A.I. allant jusqu'à 4 ou 5 pour le soja, (figure 2.22) et 8 pour le maïs), où le sol est donc peu visible et n'affecte que très peu les mesures physiques.

Les structures très différentes de ces deux types de couvert sont intéressantes pour l'interprétation de nos mesures de polarisation. Les différences nettes déjà observées, par exemple entre les parcelles de maïs fleuri et non fleuri, laisse aussi prévoir l'intérêt d'un suivi régulier pendant tout le cycle végétal. C'est la raison pour laquelle une nouvelle campagne de mesures a été programmée pendant la saison printemps-été 1988, avec cette fois le suivi prévu de trois types de culture: blé d'hiver, soja et maïs.

2.2.2. Campagne "Printemps-Eté 1988"

Cette campagne a connu de nombreux problèmes techniques qui ont d'une part retardé le début des mesures, et d'autre part empêché leur déroulement régulier pendant le développement des cultures, d'où peu de résultats par rapport à ceux attendus!

2.2.2.1. L'expérimentation

Durant l'hiver 87-88, la grue a subi une rénovation complète, et a été élevée à 21 m. Compte-tenu de la platine porteuse, les instruments de mesure sont placés maintenant à une hauteur d'environ 19,5 m au-

dessus du sol. La mise en place d'un nouveau radar du C.N.E.S., des problèmes de recablage de ces instruments et d'installation de contre-poids de ces câbles (problèmes auxquels bien-sûr s'est jointe la pluie), ont fait que les mesures n'ont pu vraiment commencer qu'au mois de Juillet. La végétation ne nous a pas attendu pour pousser: le blé prévu était déjà bien jaune et le maïs en pleine épisaison!

Les parcelles étudiées sont présentées sur la figure 2.23. Seule la parcelle de soja Sud a pu subir un semblant de suivi sur un mois. La parcelle de soja Nord étant située à l'extrémité des rails, il était parfois impossible de réaliser des visées à grands angles, à certaines heures (selon la position du soleil). Les parcelles de maïs E et W étaient déjà fleuries et épiées lors du début des mesures. Les maïs N et S ont donc été semés tardivement (après la récolte des blés), et avec une densité très supérieure à la normale (afin d'obtenir des couverts suffisamment couvrants). Lors des prises de mesures, ils ne présentent que de jeunes pousses.

Les séances de mesures sont indiquées sur le tableau 2.3. Toutes les mesures ont été réalisées dans le plan solaire, et dans de bonnes conditions météo: ciel dégagé, peu ou pas de vent. Mais à la fin du mois d'Août, RADISOL a cessé tout simplement de vouloir fonctionner!

De leur côté, les mesures biologiques, qui ne demandent pas de moyens techniques performants, se sont déroulées régulièrement pendant la croissance des végétaux, au rythme d'une ou deux fois par semaine sur chaque parcelle, selon le protocole déjà mis au point l'année précédente (cf 2.2.1.5.)

Toutes les parcelles étaient irriguées régulièrement pendant tout l'été, sauf la parcelle de soja S à laquelle nous avons fait subir un stress hydrique. Ce stress a pour conséquence, d'une part de diminuer le contenu en eau des plantes, et d'autre part de faire "pencher" rapidement toutes les feuilles, et donc de modifier "artificiellement" la structure du couvert, c'est-à-dire ce paramètre qui nous intéresse à priori particulièrement dans l'interprétation des mesures de polarisation.

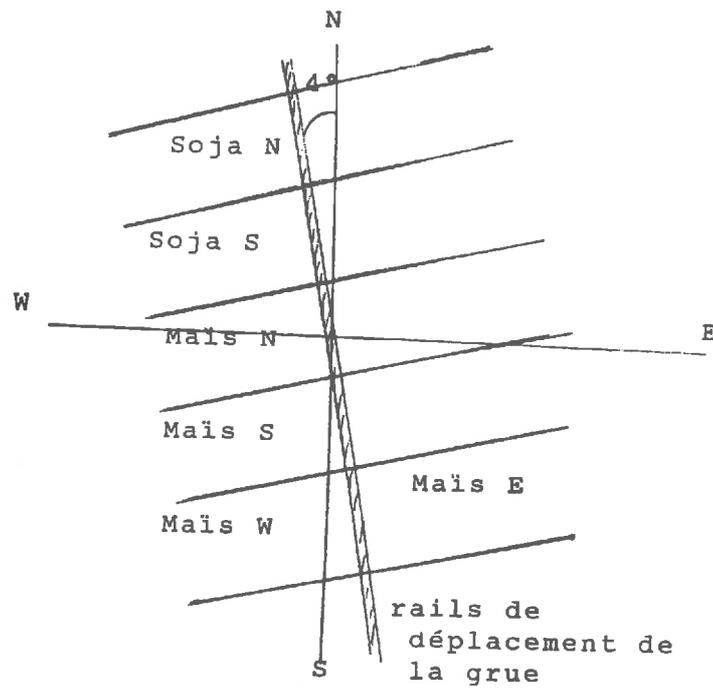


Figure 2.23 :

Disposition des parcelles expérimentales de la campagne 88.

Date	Parcelle	Soleil/horizon
26/07	Soja S	59°
	Soja N	40°
05/08	Soja S	52°
10/08	Soja S	41°
18/08	Maïs N	50
	Soja S	46
	Soja N	41
30/08	Maïs N	45
	Soja S	40

Tableau 2.3 :

Séances de mesures de la campagne 88.

2.2.2.2. Résultats et analyse

RADISOL a été réétalonné en début de campagne. Les mesures fournissent toujours la luminance du couvert observé et son taux de polarisation.

Les courbes des figures 2.24 et 2.25 représentent les luminances L_λ (en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) par parcelle et par date, dans les trois bandes spectrales. Elles sont tracées en fonction de l'angle de visée (balayage dans le plan solaire); 90° correspondant à une visée verticale. Ces luminances sont caractéristiques d'une végétation verte (valeurs plus faibles dans le rouge que dans le vert, et valeurs très importantes dans le proche infrarouge), sauf dans le cas du maïs sortant où ces différences sont moins marquées: les jeunes pousses sont encore peu couvrantes et le signal provient en grande partie du sol.

Les figures suivantes (2.26 et 2.27) présentent les taux de polarisation correspondants, dans les deux canaux du visible. Ils ont toujours la même allure: augmentant vers les grands angles de visée, c'est-à-dire dans la direction de réflexion spéculaire. Dans le proche infrarouge, les valeurs mesurées n'excèdent pas 2 ou 3%; elles ne sont donc pas significatives (cf 2.1.3.2.): et n'ont pas été portées sur ces courbes. Les taux de polarisation sont plus importants dans le rouge que dans le vert, mais sauf dans le cas du maïs sortant (figure 2.27): le 18/08 les deux courbes identiques doivent traduire plutôt la réponse du sol, alors que le 30/08 les jeunes pousses un peu plus grandes commencent naturellement à "cacher" le sol, surtout en visée très oblique, où les taux de polarisation se différencient.

Les deux parcelles de soja (S et N) ont été semées en même temps et présentent pendant les mesures deux couverts bien couvrants, bien verts et relativement homogènes. Les cinq séries de mesures de la figure 2.26 donnent un aperçu de l'évolution du taux de polarisation pendant le développement de la parcelle S. Cette évolution est représentée sur les figures 2.28a et 2.28b pour les grands angles de visée (taux de polarisation maximum). La variation du taux de polarisation avec la hauteur solaire explique la nécessité d'une représentation à trois dimensions.

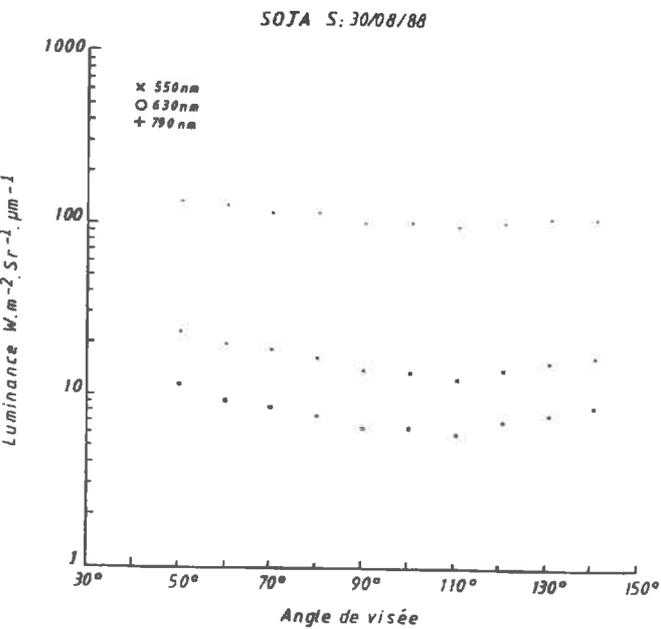
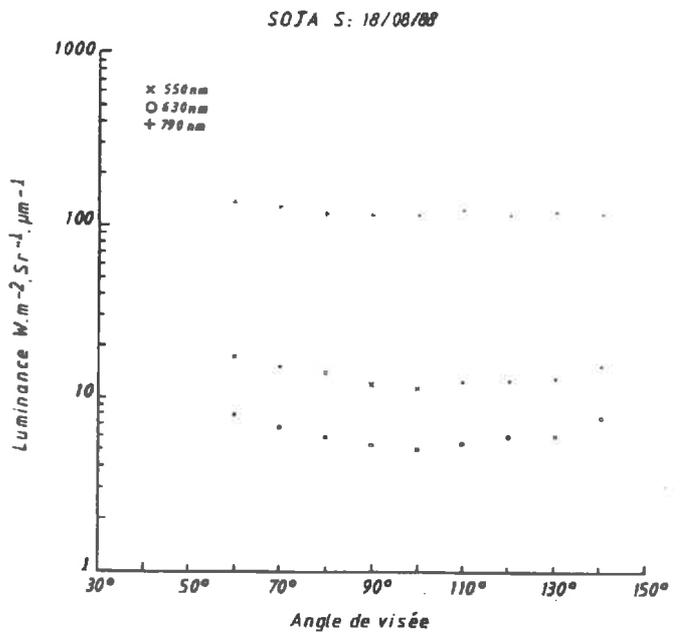
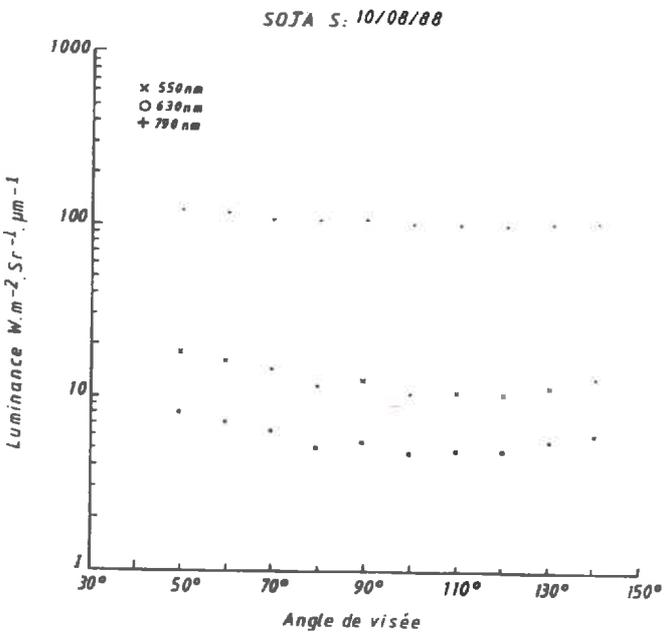
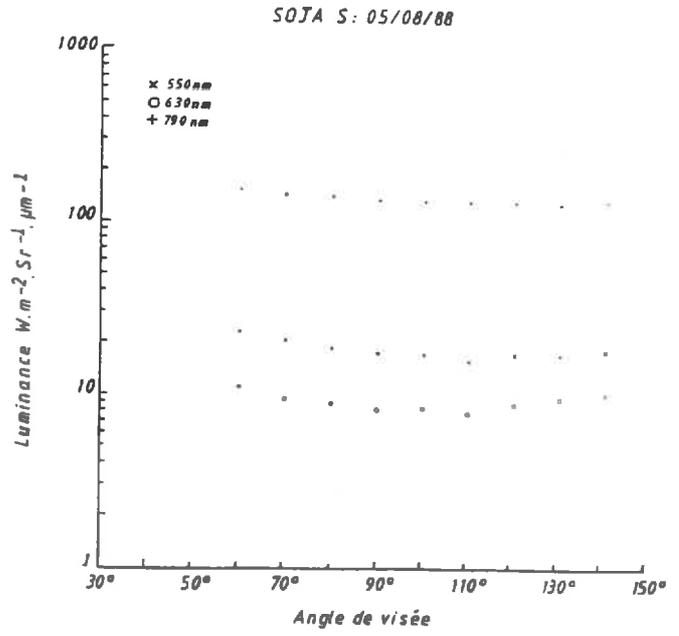
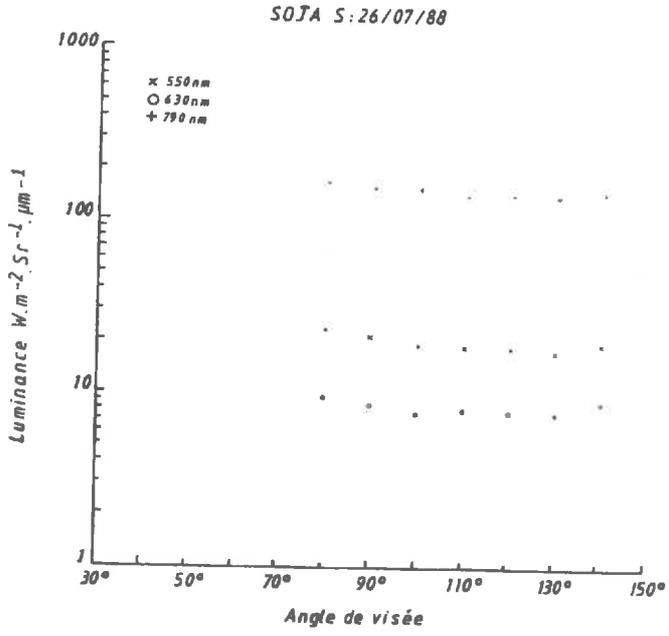


Figure 2.24 :
Luminances mesurées pour chaque date de mesure, sur la parcelle de soja S, dans le plan solaire.

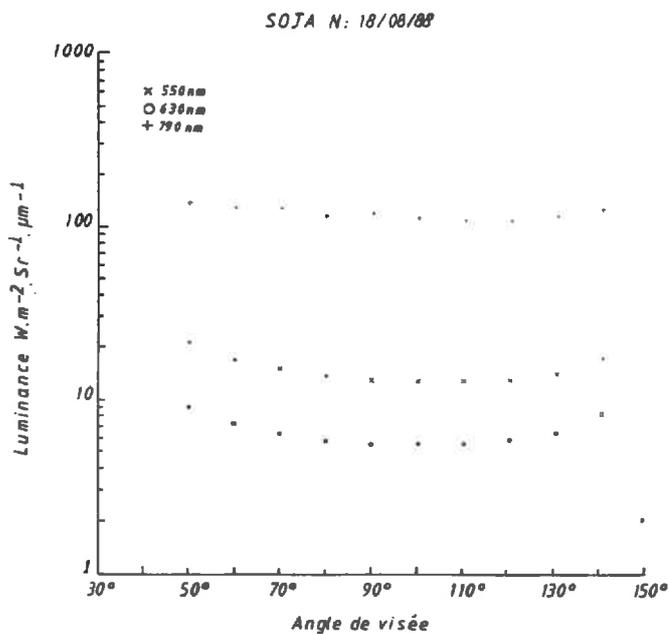
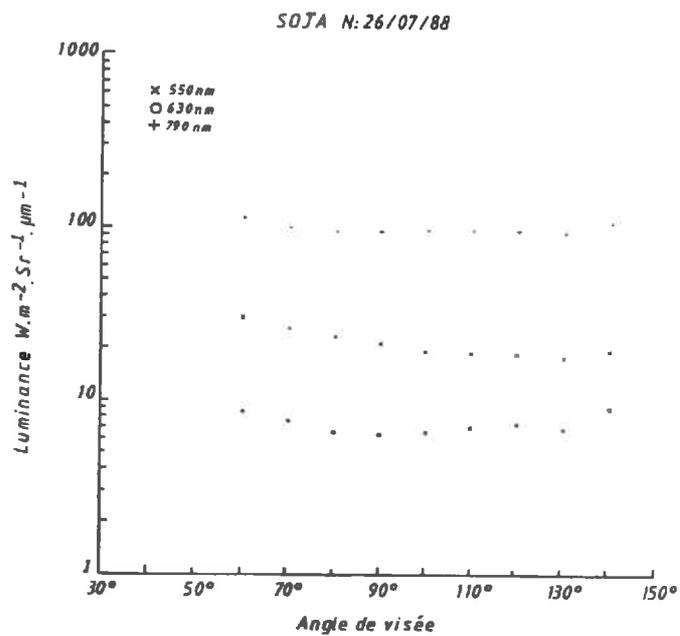
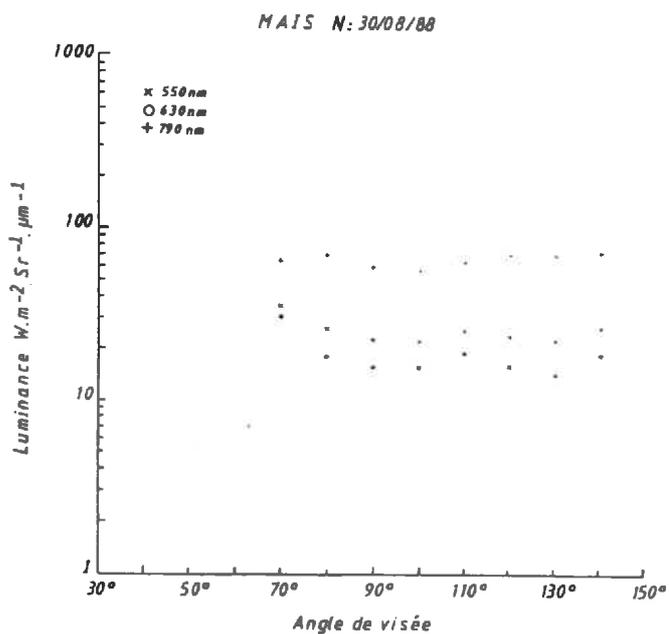
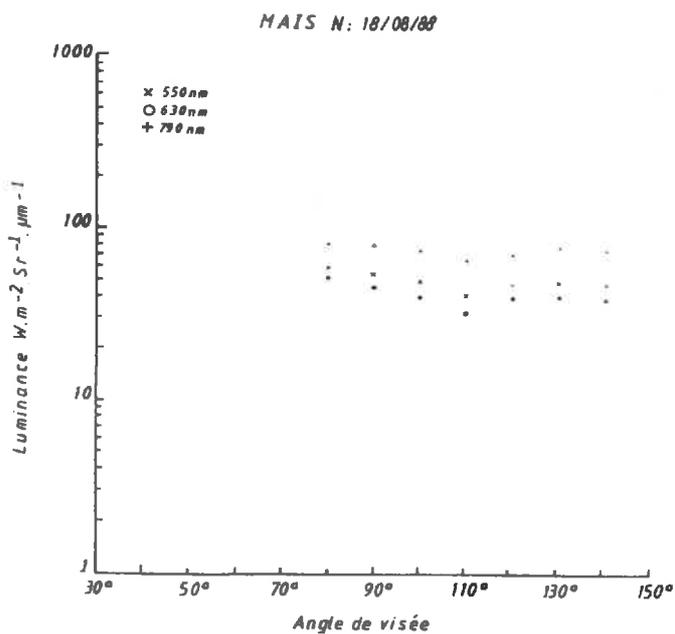
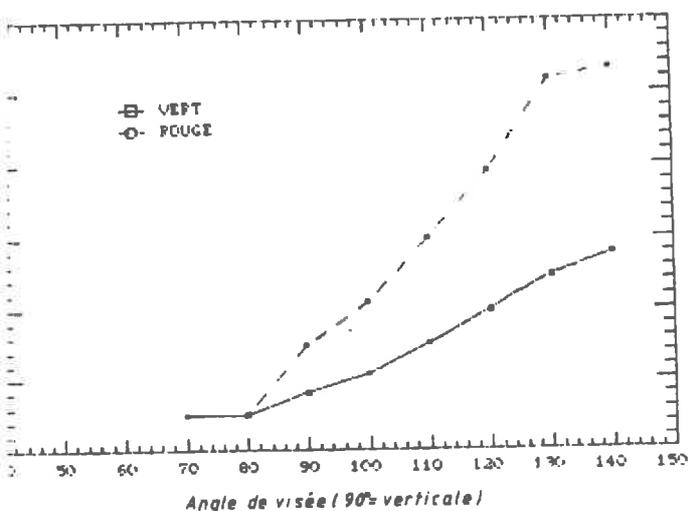


Figure 2.25 :

Luminances mesurées dans le plan solaire sur les parcelles de soja N et de maïs N.



SOJA S 26/07/88



SOJA S 05/08/88

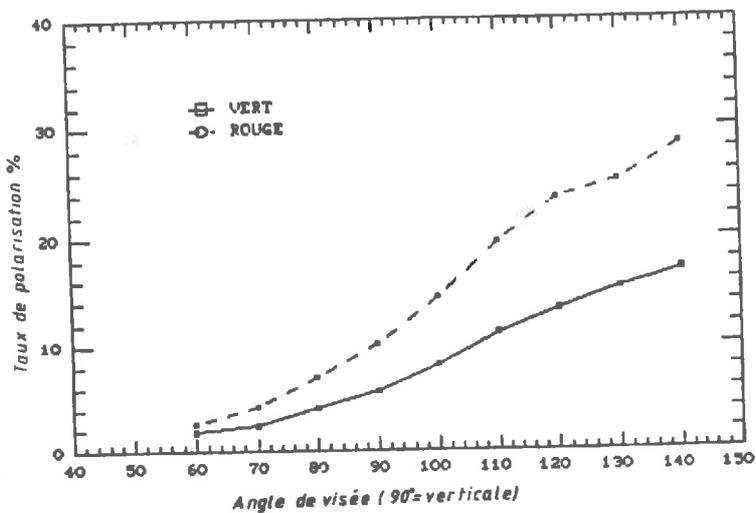
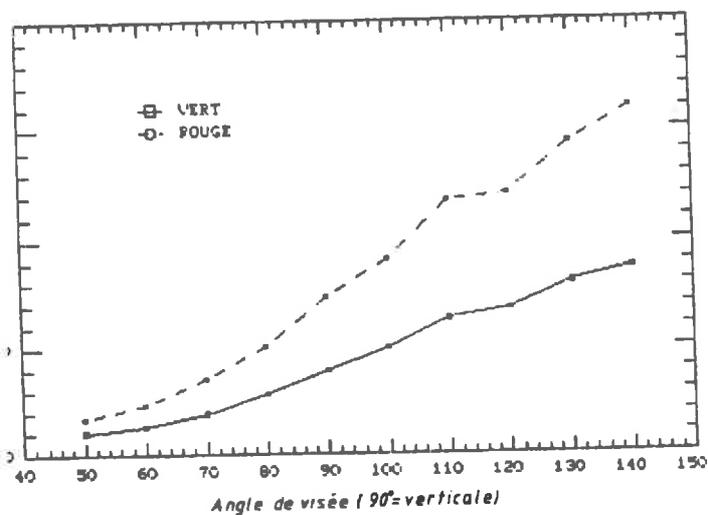
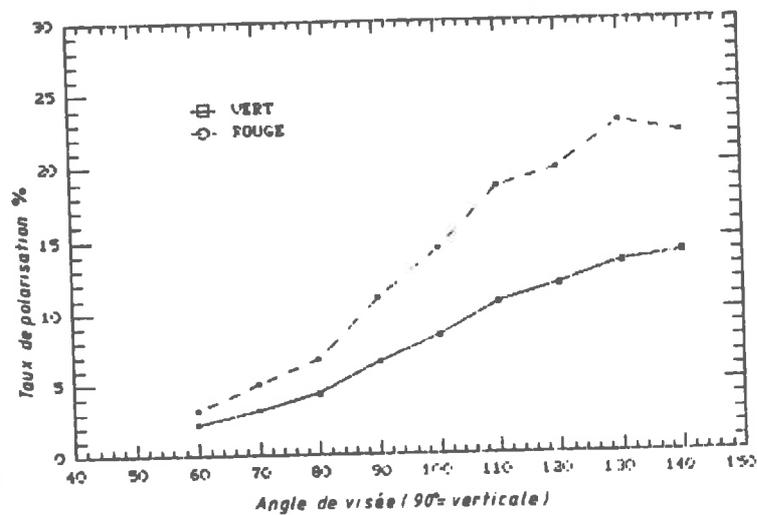


Figure 2.26 :
Taux de polarisation (%) mesurés dans le plan solaire.

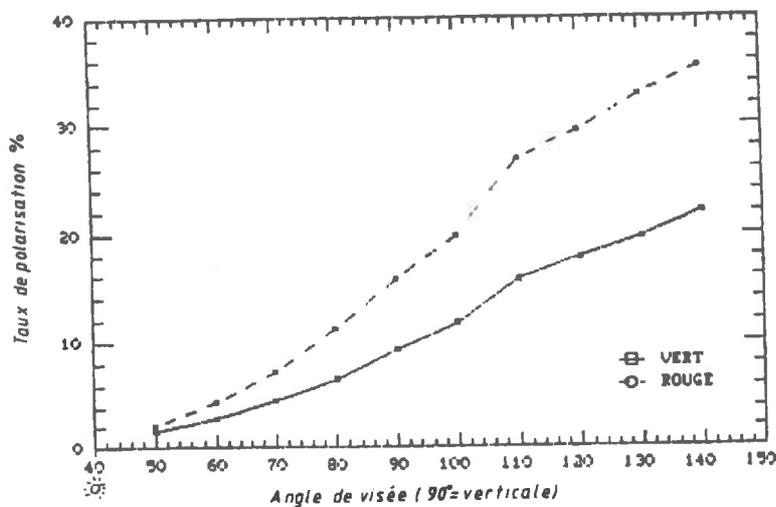
SOJA S 10/08/88



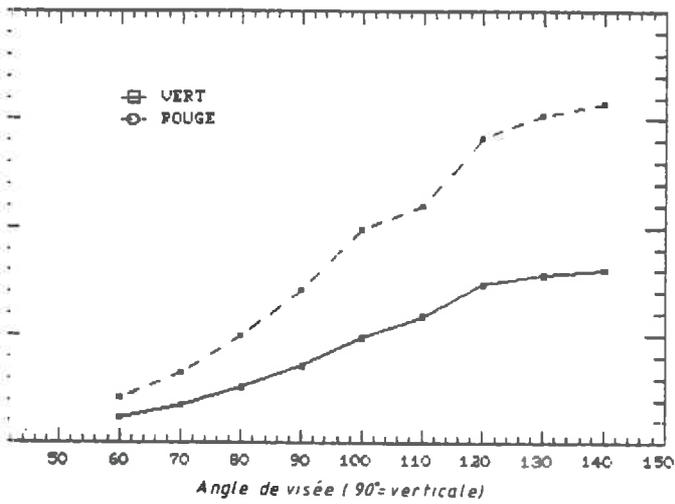
SOJA S 18/08/88



SOJA S 30/08/88



SOJA N. 26/07/88



SOJA N. 18/08/88

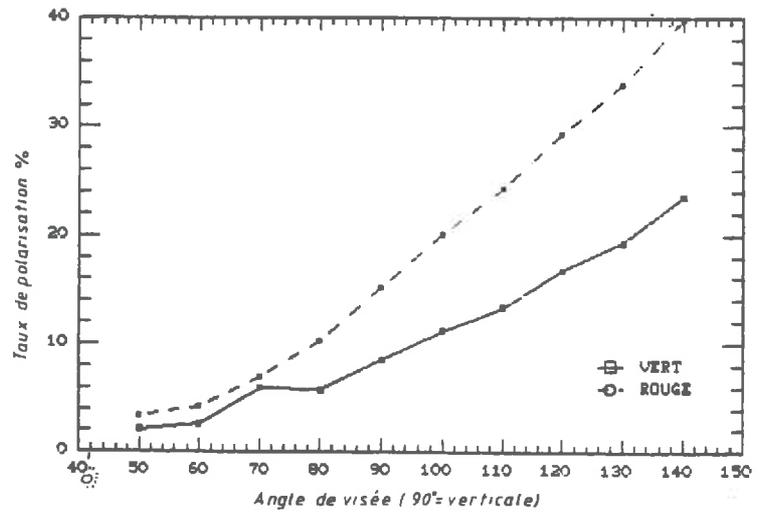
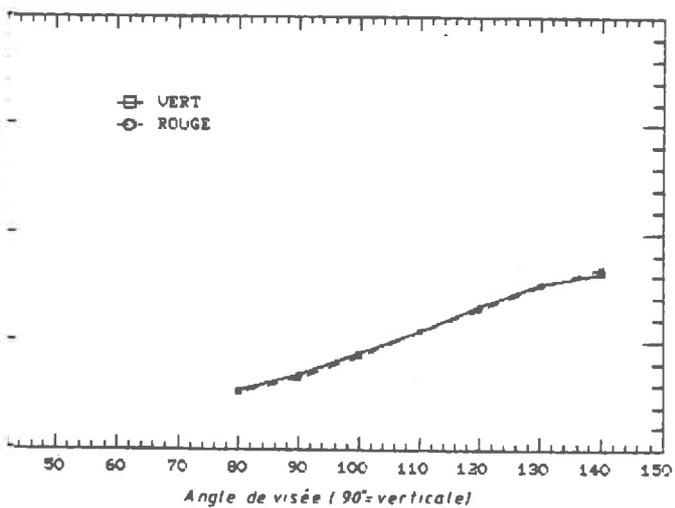


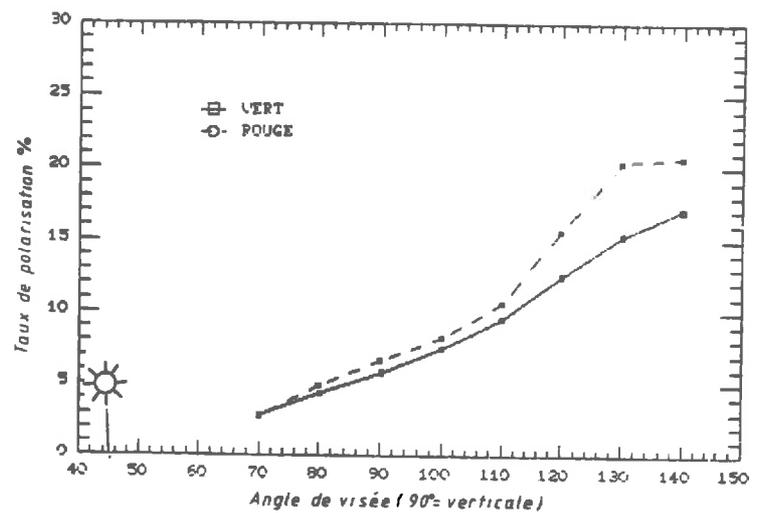
Figure 2.27 :

Taux de polarisation (%) mesurés dans le plan solaire.

MAIS N. 18/08/88



MAIS N. 30/08/88



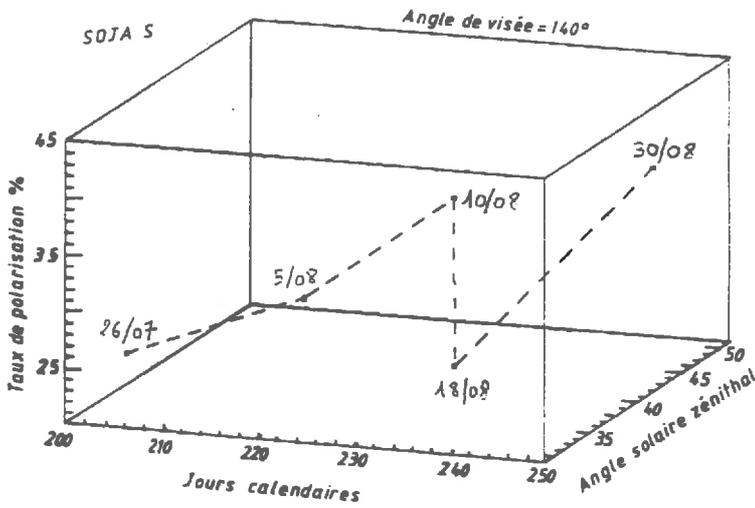


Figure 2.28 (a) :
Evolution du taux de polarisation au cours du temps.

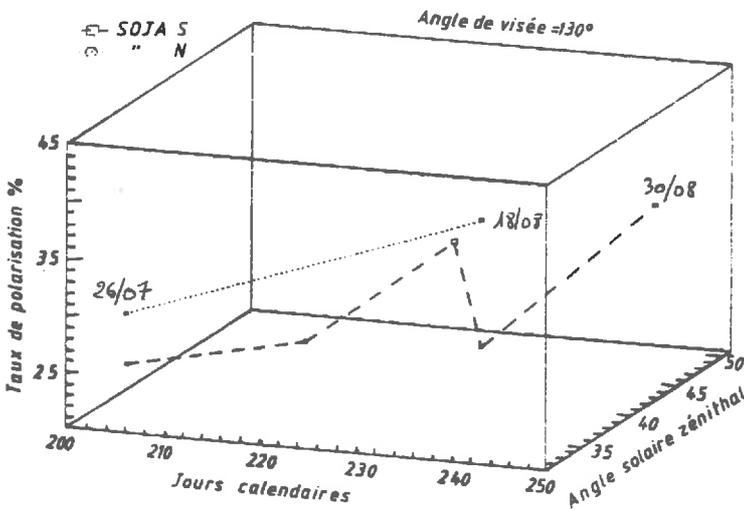


Figure 2.28 (b)

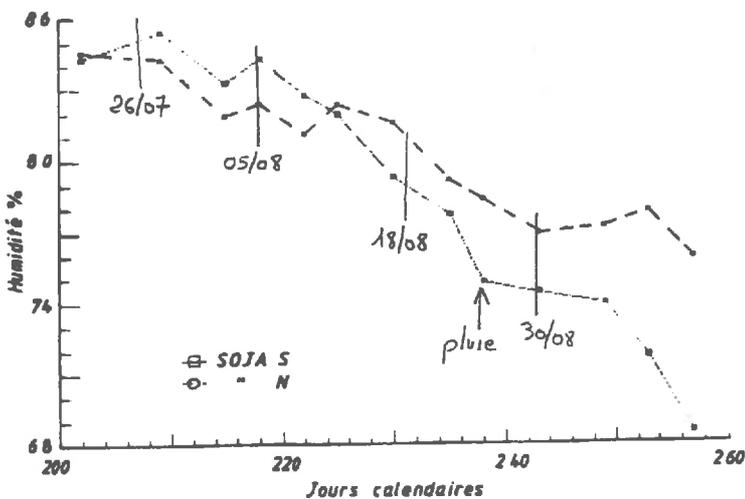


Figure 2.28 (c) :
Variation du contenu en eau des plantes pour les 2 parcelles de soja, au cours du temps.

D'une façon générale, le taux de polarisation augmente dans le temps avec la croissance des plantes, sauf si un changement brutal de leur état apparaît: la chute du 18/08 du soja S s'explique par le stress hydrique subi par la parcelle. La différence avec la valeur mesurée à la même date sur le soja N, arrosé régulièrement, est nette (figure 2.28 b). La remontée du 30/08 a été enregistrée quelques jours après un gros orage, quand les plantes ont retrouvé une certaine vigueur.

L'effet de ce stress est bien-sûr mesuré au niveau biologique: la figure 2.28c montre l'évolution du contenu en eau des plantes de chaque parcelle de soja pendant leur croissance. Jusqu'au 10/08 le taux d'humidité est un peu plus élevé pour la parcelle S que pour la parcelle N, puis il décroît rapidement pour la parcelle stressée (S) jusqu'au jour de pluie. Là un palier se forme qui permet effectivement aux plantes de se redresser momentanément.

Par contre, il est intéressant de noter que l'effet de ce stress n'apparaît pas sur les mesures de luminance (figures 2.24 et 2.25).

2.2.3. Conclusions

Peu de mesures ont malheureusement été réalisées par rapport à celles espérées avec un tel dispositif expérimental, mais les quelques résultats obtenus paraissent relativement fiables et intéressants. Ils confirment, mais aussi complètent nos conclusions bibliographiques présentées dans la partie précédente.

L'importance de la polarisation de la lumière par les couverts végétaux n'est plus à démontrer, puisque l'on atteint un taux de polarisation de plus de 40% en visée oblique sur un couvert bien couvrant et homogène comme le soja (figures 2.11 et 2.27). Le maïs, plus structuré et donc plus hétérogène, polarise un peu moins, mais atteint quand-même 30 à 35% à son maximum d'indice foliaire vert, avant la floraison (figure 2.11).

Dès qu'un changement de structure important apparaît dans le couvert, le taux de polarisation varie rapidement. Il chute à 20, 25% à

l'apparition des panicules du maïs, puis continue à baisser pendant que d'une part ces fleurs se développent, et d'autre part les feuilles commencent à jaunir.

Pour le soja, le taux de polarisation chute aussi aux environs des mêmes valeurs dans le cas du stress hydrique, mais comme la végétation est encore à un stade "bien vert", il réaugmente lorsque le flétrissement temporaire des feuilles cesse, et qu'elles redeviennent turgescentes par un regain d'eau dans les plantes.

Ce dernier exemple met en évidence l'importance de l'inclinaison des feuilles sur la valeur du taux de polarisation, et est en accord avec une polarisation créée par la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur les surfaces des feuilles. Plus les feuilles sont horizontales, plus la polarisation est importante dans une direction d'observation symétrique par rapport au zénith solaire; lorsque les feuilles sont plus inclinées, la polarisation atteindra la même valeur pour un angle d'observation plus important. Cette remarque déjà schématisée sur la figure 1.23, correspond à ce que l'on observe sur les courbes expérimentales. A un angle d'observation donné, l'inclinaison des feuilles de soja, entraîne une diminution du taux de polarisation qui s'expliquerait par "l'inclinaison" des vecteurs de réflexion de FRESNEL.

Un autre paramètre significatif pourrait être défini comme "l'aptitude du couvert à polariser la lumière". L'apparition des fleurs du maïs, non polarisantes, et qui "masquent" une bonne partie des feuilles au rayonnement incident, fait chuter le taux de polarisation. Ce phénomène serait sûrement identique lors de l'épiaison d'un champ de blé, alors que les épis de maïs qui naissent sous les feuilles et après la floraison, ne modifient pas la réponse polarisée du couvert. Cette aptitude à polariser la lumière peut aussi dépendre de l'état de surface de la cuticule des feuilles (cf 1.3.1.). Les feuilles du soja stressé, par exemple, paraissent plus ternes que celles du soja normalement irrigué; les feuilles jaunes polarisent moins que les vertes, et n'ont plus les mêmes propriétés spectrales.

Le taux de polarisation, dans une direction donnée, augmente aussi avec l'angle zénithal du soleil (figure 2.10). Nous sommes toujours en accord avec FRESNEL, car lorsque l'après-midi, le soleil descend sur

l'horizon, il se rapproche de l'angle de BREWSTER. Les maxima de polarisation sont en effet observés pour un angle zénithal entre 50 et 60° (figure 2.11), et lorsque cet angle est juste dépassé (premières courbes de cette figure: soja 3, 18/08/87), le taux de polarisation semble ne plus augmenter; d'après FRESNEL, il devrait diminuer.

Le dispositif expérimental utilisé ne nous permettait pas d'obtenir des mesures aux angles d'inclinaison encore plus importants (et cela paraît d'ailleurs dans tous les cas très difficile), mais ces valeurs auraient été intéressantes afin de localiser sur chaque type de couvert le maximum de polarisation atteint. Il semble que d'après la réflexion de FRESNEL, la position de ce maximum permettrait de différencier ces deux couverts de structure différente: le soja, plutôt planophile, devrait atteindre son maximum pour une inclinaison de visée inférieure à celle correspondant au maximum atteint par le maïs, plus érectophile. Les courbes obtenues, lorsque les deux couverts sont bien développés et le maïs pas encore fleuri, sont en effet très similaires, et il serait impossible de dire à première vue qu'elles proviennent de couverts différents. Les distinctions sont beaucoup plus nettes entre les différents stades phénologiques (naturels ou provoqués) d'un même couvert.

Nous avons vu enfin que la réflectance polarisée d'un couvert (figure 2.16), même calculée à partir de mesures provenant de deux radiomètres différents (cf 2.2.1.4.) était en accord avec les résultats bibliographiques (cf 1.3.3.3.): cette composante polarisée de la réflectance est très peu sensible à la longueur d'onde. Elle confirme donc l'hypothèse d'une réflexion de surface, sans interaction directe avec les structures biologiques internes du couvert.

L'ensemble de ces remarques suggère finalement que le phénomène de polarisation de la lumière par les couverts végétaux est en accord avec les équations de FRESNEL qui traduisent le phénomène de réflexion spéculaire. Les paramètres influants, que sont surtout la géométrie de l'éclairement et de la visée par rapport à l'inclinaison des éléments principaux de la partie supérieure du couvert, correspondent aux angles d'incidence et de réflexion, et définissent le plan de réflexion de FRESNEL.

Cette conclusion est donc l'hypothèse de base que nous avons retenue pour le développement d'un modèle mathématique essayant de rendre compte de ces mesures de polarisation.

2.3. MODELISATION DE LA REPONSE POLARISEE D'UN COUVERT

La réflectance polarisée, mesurée dans une direction donnée, sur un couvert végétal suffisamment dense et donc bien couvrant, est supposée provenir de la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur les surfaces foliaires du couvert orientées de façon à réfléchir la lumière incidente spéculairement vers le détecteur. Cette réflexion est uniquement un phénomène de surface. La lumière réfléchie polarisée n'a pas interagi avec les tissus internes des feuilles. Ces interactions avec la structure biologique des feuilles seront responsables seulement de la composante non-polarisée de la réflectance. Les paramètres déterminants de la réponse polarisée du couvert sont donc simplement son indice foliaire et sa fonction de distribution d'inclinaison des feuilles.

2.3.1. Le modèle mathématique

2.3.1.1. Géométrie du problème

Le rayonnement solaire incident est repéré par son angle zénithal θ_i par rapport à la verticale du lieu. Son azimuth est choisi comme origine des azimuths.

Un élément de surface de feuille dA , orienté par sa normale \vec{N} selon la direction (θ_N, φ_N) , reçoit le rayonnement incident et le réfléchit spéculairement dans la direction (θ_R, φ_R) (figure 2.29).

Les trois vecteurs \vec{I} , \vec{N} , \vec{R} ont respectivement pour coordonnées:

$$\vec{I} \begin{pmatrix} -\sin\theta_i \\ 0 \\ -\cos\theta_i \end{pmatrix} \quad \vec{N} \begin{pmatrix} \cos\varphi_N \sin\theta_N \\ \sin\varphi_N \sin\theta_N \\ \cos\theta_N \end{pmatrix} \quad \vec{R} \begin{pmatrix} \cos\varphi_R \sin\theta_R \\ \sin\varphi_R \sin\theta_R \\ \cos\theta_R \end{pmatrix}$$

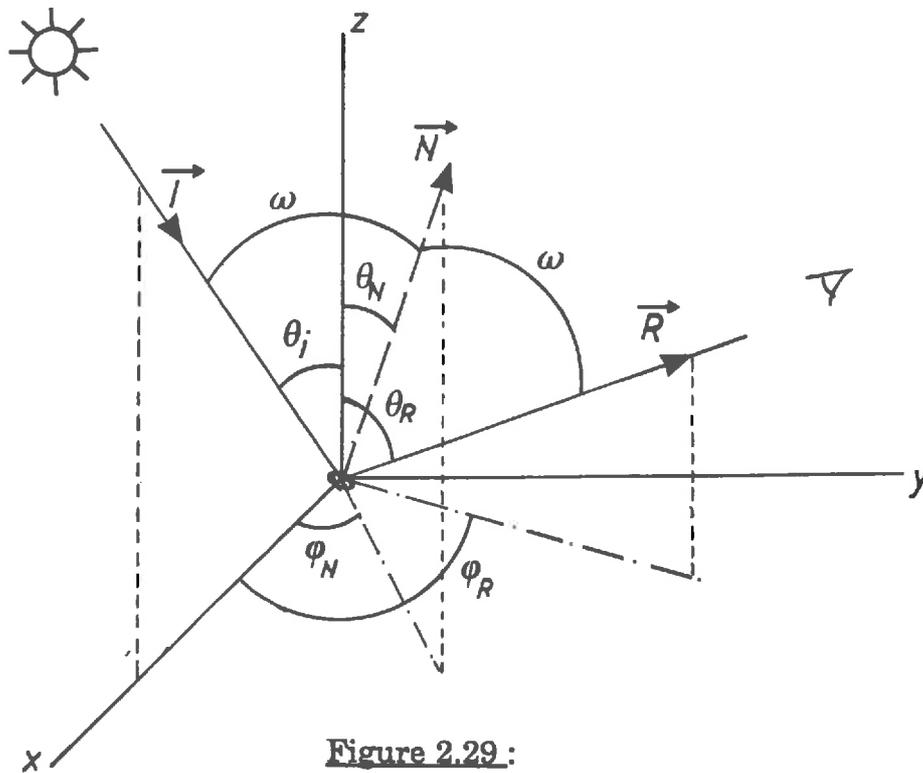


Figure 2.29 :
Géométrie du plan de réflexion de FRESNEL.

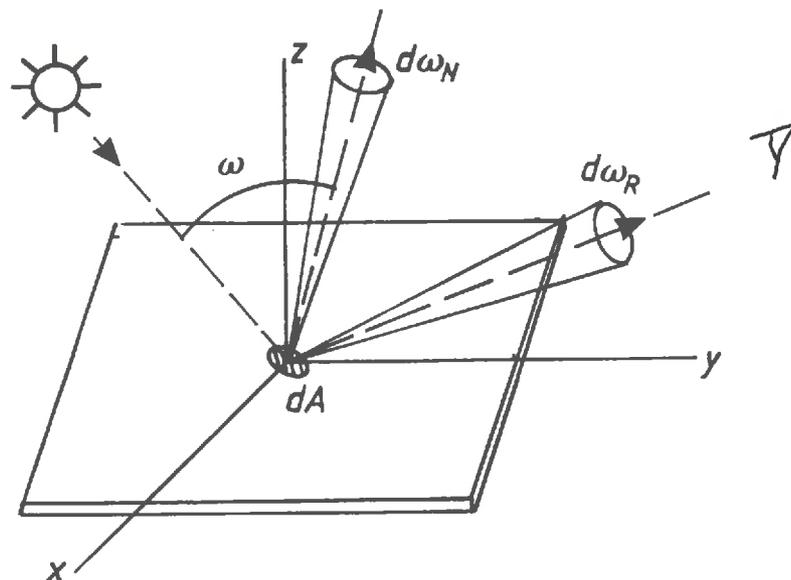


Figure 2.30 :
La radiation incidente est réfléchi dans l'angle solide $d\omega_R$, par les surfaces de feuilles orientées dans l'angle solide $d\omega_N$.

ils sont coplanaires, et les lois de la réflexion (SNELL-DESCARTES) s'écrivent:

$$\vec{R} - \vec{I} = 2 \vec{N} \cos\omega$$

$$\text{avec: } \left\{ \begin{array}{l} \omega = (-\vec{I}, \vec{N}) = (\vec{N}, \vec{R}) \\ \cos\omega = \vec{N} \cdot \vec{R} = \cos\theta_N \cdot \cos\theta_R + \sin\theta_N \cdot \sin\theta_R \cdot \cos(\varphi_R - \varphi_N) \end{array} \right.$$

$$\text{soit: } \left\{ \begin{array}{l} \cos\varphi_R \cdot \sin\theta_R + \sin\theta_i = 2 \cos\omega \cdot \cos\varphi_N \cdot \sin\theta_N \\ \sin\varphi_R \cdot \sin\theta_R = 2 \cos\omega \cdot \sin\varphi_N \cdot \sin\theta_N \\ \cos\theta_R + \cos\theta_i = 2 \cos\omega \cdot \cos\theta_N \end{array} \right.$$

Pratiquement, lors d'une prise de mesure, les paramètres connus sont la position du soleil (θ_i), et la position du détecteur repéré par son angle de visée (θ_R, φ_R). Les surfaces de feuilles qui réfléchissent spéculairement les rayons solaires vers le détecteur sont alors celles orientées selon θ_N , tel que:

$$\cos\theta_N = \frac{\cos\theta_R + \cos\theta_i}{2 \cos\omega}$$

où ω est défini en fonction de θ_i, θ_R et φ_R par:

$$\cos 2\omega = \cos\theta_R \cdot \cos\theta_i + \sin\theta_R \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_R$$

Le détecteur reçoit le rayonnement compris dans un angle solide $d\omega_R$ autour de la direction θ_R , provenant donc de surfaces orientées dans un angle solide $d\omega_N$ autour de θ_N .

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin\theta_N d\theta_N d\varphi_N = d\omega_N \\ \sin\theta_R d\theta_R d\varphi_R = d\omega_R \end{array} \right. \quad \text{et :} \quad d\theta_N d\varphi_N = \frac{|D(\theta_N, \varphi_N)|}{|D(\theta_R, \varphi_R)|} d\theta_R d\varphi_R$$

et en supposant un rayon solaire dans une direction donnée θ_i , on obtient la relation suivante entre les deux angles solides (démontrée par VANDERBILT et GRANT, 1985):

$$\sin\theta_N d\theta_N d\varphi_N = \frac{\sin\theta_R d\theta_R d\varphi_R}{4 \cos\omega}$$

Le rayonnement sortant dans la direction θ_R dépend ainsi de l'angle θ_N , c'est-à-dire de l'orientation des surfaces foliaires réfléchissantes du couvert.

Le couvert est donc caractérisé par sa fonction de distribution des angles foliaires: $f(\theta_N, \varphi_N)$ qui représente la probabilité qu'une surface unité dA ait sa normale orientée selon une direction (θ_N, φ_N) .

$f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N$ est alors la probabilité que dA ait sa normale orientée dans l'angle solide $d\omega_N$, et:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N = 1$$

La densité du couvert est représentée par son indice foliaire (L.A.I.). Si on découpe le couvert dans sa hauteur, en une superposition de couches d'épaisseur infinitésimale dz , à l'altitude z , et d'indice foliaire $S(z)$, on a:

$$\int_0^H S(z) dz = \text{L.A.I.} = \int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S(z) f(\theta_N, \varphi_N) \sin\theta_N d\theta_N d\varphi_N dz$$

où H est la profondeur du couvert

et $S(z).f(\theta_N, \varphi_N).dz$ représente les surfaces de feuilles de la couche d'épaisseur dz , orientées selon (θ_N, φ_N) .

2.3.1.2. Luminance primaire d'un couvert végétal

Soit une couche dz , d'indice foliaire S , à la surface du couvert (figure 2.30). Les directions d'incidence θ_i et d'observation θ_R sont fixées. Le flux énergétique incident intercepté par l'élément de surface dA est:

$$d\Phi_i = E_S dA \cos\omega$$

où E_S est l'éclairement solaire incident (W.m^{-2})

et $dA.\cos\omega$ la surface apparente dans la direction du rayonnement

Le flux réfléchi dans la direction θ_R , dans un angle solide $d\omega_R$, par cet élément dA est :

$$d\Phi_R = R E_S dA \cos\omega$$

où R est le coefficient de réflexion dans la direction considérée: $R(\omega)$.

Le flux total réfléchi par une surface unité de la couche, dans la direction θ_R est alors:

$$d\Phi_z = R(\omega) E_S S(z) dz f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N \cos\omega$$

où $A = S(z) dz \cdot f(\theta_N, \varphi_N) \cdot d\omega_N$ représente les surfaces de feuilles contenues dans dz , orientées dans l'angle solide $d\omega_N$;

et la luminance associée est donc:

$$dL_z(\theta_R, \varphi_R) = \frac{d\Phi_z}{\cos\theta_R d\omega_R} = \frac{R(\omega) E_S S(z) dz f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N \cos\omega}{\cos\theta_R d\omega_R}$$

comme $d\omega_N \cdot 4 \cos\omega = d\omega_R$:

$$dL_z(\theta_R, \varphi_R) = \frac{R(\omega) E_S f(\theta_N, \varphi_N) S(z)}{4 \cos\theta_R} dz$$

En tenant compte maintenant de la profondeur du couvert, la luminance d'une couche inférieure, d'épaisseur infinitésimale dz et d'indice foliaire $S(z)$, sera atténuée par la traversée des couches supérieures sur le trajet incident, puis sur le trajet retour vers le capteur (figure 2.31).

Soient τ_i et τ_r les transmissions respectives sur chaque trajet. La luminance due à la couche située à la hauteur z par rapport au sol est alors:

$$dL(z, \theta_R, \varphi_R) = \tau_i \frac{R(\omega) E_S f(\theta_N, \varphi_N) S(z) dz}{4 \cos\theta_R} \tau_r$$

Ces transmissions dépendent bien-sûr de la quantité et de l'orientation des feuilles rencontrées dans les couches supérieures.

Lorsqu'un rayon lumineux traverse une couche dz , donc une longueur $dl = dz / |\cos\omega|$ du couvert, par rapport à l'orientation des feuilles, la surface de feuilles interceptant le rayonnement dirigé vers elle est: $S(z) \cdot f(\theta_N, \varphi_N) \cdot |\cos\omega|$, où la valeur absolue permet de tenir compte des feuilles réfléchissant sur leur face inférieure. Ces interactions se produisent sur des surfaces d'orientations différentes, et nécessitent donc l'introduction de la fonction G , définie par:

$$G(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S(z) f(\theta_N, \varphi_N) |\cos\omega| \sin\theta_N d\theta_N d\varphi_N$$

qui représente la surface effective interceptant le faisceau incident dans la couche z ; soit:

pour le trajet incident, $G(z) = S(z).G(\theta_i)$

tel que $G(\theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta_N, \varphi_N) |\cos\omega| \sin\theta_N d\theta_N d\varphi_N$

et $\cos\omega = \cos\theta_N \cdot \cos\theta_i + \sin\theta_N \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_N$

et pour le trajet retour: $G(z) = S(z).G(\theta_R)$

tel que $\cos\omega = \cos\theta_N \cdot \cos\theta_R + \sin\theta_N \cdot \sin\theta_R \cdot \cos(\varphi_N - \varphi_R)$

d'où

$$\tau_i = e^{1/\mu_i} G(\theta_i) \int_z^H S(z') dz' \quad \text{avec} \quad \mu = \cos\theta$$

$$\tau_r = e^{1/\mu_r} G(\theta_R) \int_z^H S(z') dz'$$

$\int_z^H G(z) dz$ est appelée *épaisseur optique* du couvert à la profondeur z , par comparaison avec les effets de transmission dans l'atmosphère.

La luminance observée dans un angle solide $d\omega_R$, sur un couvert végétal de hauteur H , est finalement:

$$L(\theta_R, \varphi_R) = \int_0^H dL(z, \theta_R, \varphi_R)$$

$$L(\theta_R, \varphi_R) = \frac{f(\theta_N, \varphi_N)}{4 \cos\theta_R} R(\omega) E_s \int_0^H e^{\left(\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}\right) z} S(z') dz' \cdot S(z) dz$$

Pour un couvert homogène, dont l'indice foliaire est supposé constant d'une couche à l'autre, on pose:

$$S(z)dz = \mathcal{L}(z) \quad \text{soit:} \quad \mathcal{L}(z) = \int_z^H S(z') dz'$$

et l'expression de la luminance devient:

$$L(\theta_R, \varphi_R) = \frac{f(\theta_N, \varphi_N)}{4 \cos \theta_R} R(\omega) E_s \int_0^{\mathcal{L}} e^{-\left(\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}\right) \mathcal{L}'} d\mathcal{L}'$$

$$L(\theta_R, \varphi_R) = \frac{f(\theta_N, \varphi_N)}{4 \cos \theta_R} R(\omega) E_s \frac{1 - e^{-\left(\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}\right) \mathcal{L}}}{\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}}$$

quand l'indice foliaire augmente ($\mathcal{L} \gg 1$) la luminance tend vers un niveau de saturation:

$$L(\theta_R, \varphi_R) = \frac{f(\theta_N, \varphi_N)}{4 \cos \theta_R} \cdot \frac{R(\omega) E_s}{\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}}$$

Pour la lumière polarisée, on se limitera par hypothèse à cette luminance réfléchie une seule fois.

Cette luminance, dans une direction donnée, est donc une fonction simple de la direction du rayonnement incident, de la fonction d'inclinaison des feuilles, de l'indice foliaire du couvert (tant que le couvert n'est pas suffisamment couvrant), et bien-sûr du coefficient de réflexion de l'éclairement incident sur les feuilles.

Dans le cas d'une réflexion spéculaire, ce coefficient se calcule simplement à partir des équations de FRESNEL (cf 1.1.2.1.). L'état de polarisation du rayonnement réfléchi se détermine à l'aide des paramètres de STOKES (cf 1.1.2.2.).

2.3.1.3. Réflectance et polarisation

Si un rayonnement incident connu, caractérisé par les paramètres de STOKES (I_0, Q_0, U_0, V_0) se réfléchit sur un milieu d'indice n ($n > 1$) selon les équations de FRESNEL, de façon que:

$$\begin{cases} R_r R = R_R \cdot E_i R \\ E_r L = R_L \cdot E_i L \end{cases} \quad (\text{cf 1.1.2.1.})$$

Le rayonnement réfléchi (I, Q, U, V) est alors déterminé, d'après la définition même des paramètres de STOKES (cf 1.1.2.2.) par:

$$\begin{vmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_1 & R_2 & 0 & 0 \\ R_2 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & R_4 \\ 0 & 0 & R_4 & R_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{vmatrix}$$

avec:

$$\begin{cases} R_1 = 1/2 (R_R^2 + R_L^2) \\ R_2 = 1/2 (R_L^2 - R_R^2) \\ R_3 = 1/2 (R_L \cdot R_R^* + R_L^* \cdot R_R) = R_L \cdot R_R \\ R_4 = i/2 (R_L \cdot R_R^* - R_L^* \cdot R_R) = 0 \end{cases}$$

soit, pour une lumière incidente naturelle:

$$Q_0 = U_0 = V_0 = 0 \quad \text{et} \quad \begin{cases} I = R_1 \cdot I_0 \\ Q = R_2 \cdot I_0 \\ U = 0 \\ V = 0 \end{cases}$$

Ainsi, en réécrivant la formule précédente de la luminance, sous forme matricielle, dans laquelle les quantités énergétiques sont remplacées par la matrice colonne des paramètres de STOKES correspondants, on obtient:

$$\begin{vmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{vmatrix} = \frac{K}{\mu_r} \cdot \begin{vmatrix} R_1 & R_2 & 0 & 0 \\ R_2 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

avec :

$$\frac{K}{\mu_r} = \frac{f(\theta_N, \varphi_N)}{4 \cos \theta_R} \int_0^H e^{-\left(\frac{G(\theta_i)}{\mu_i} + \frac{G(\theta_R)}{\mu_r}\right)z} S(z') dz' S(z) dz$$

soit:

$$\begin{cases} I = (K/\mu_r) R_1 I_0 \\ Q = (K/\mu_r) R_2 I_0 \\ U = 0 \\ V = 0 \end{cases}$$

Ce rayonnement est polarisé rectilignement, avec un taux de polarisation

$$P = \frac{Q}{I} = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{taux de polarisation de FRESNEL})$$

La réflectance est définie par:

$$\rho = \frac{\pi I}{\mu_i I_0} = \frac{\pi K R_1}{\mu_i \mu_r}$$

Ce facteur de réflectance provient uniquement de la réflexion spéculaire sur les feuilles. Il est polarisé selon le taux de polarisation de FRESNEL:

$$\rho_{pol} = \rho \cdot P = \frac{\pi K R_2}{\mu_i \mu_r}$$

Cette expression de la réflectance polarisée dépend essentiellement de la géométrie de la mesure et de la structure du couvert. Elle fait ressortir l'importance des angles d'incidence et de visée (μ_i et μ_r). Le facteur R_2 dépend de cette géométrie, et aussi de l'indice de réfraction n des feuilles. Cet indice est le seul paramètre vraiment "interne" au couvert qui apparaît ici, et il est donc le seul à pouvoir éventuellement apporter une dépendance spectrale à cette relation.

Les paramètres de structure du couvert (L.A.I. et inclinaison des feuilles) sont présents dans le terme appelé K . Le fonctionnement de ce modèle ne dépend donc plus que de la formulation de la fonction de distribution des inclinaisons de feuilles $f(\theta_N, \varphi_N)$.

2.3.1.4. Choix de la fonction d'inclinaison des feuilles

Cette fonction est difficile à évaluer expérimentalement, et, sauf pour un couvert bien structuré comme le maïs, pour lequel il existe une méthode de numérisation basée sur l'étude des silhouettes des plants (cf 2.2.1.5.), on mesure généralement un angle moyen d'insertion des feuilles sur la tige, ou on se contente d'une observation visuelle de l'aspect général du couvert.

Une première simplification consiste à supposer une distribution uniforme en azimut: $f(\theta_N, \varphi_N) = f(\theta_N)$. C'est généralement vrai, sauf dans le cas par exemple d'un grand coup de vent.

GOEL et STREBEL (1984) ont proposé une distribution "Beta" comme distribution "universelle" d'inclinaison de feuilles, capable de décrire toutes les sortes de couverts végétaux (planophile, érectophile, plagiophile, extrêmophile, uniforme ou sphérique). Cette fonction est représentée dans chacun des cas sur la figure 2.32a:

$$f(\theta_N, \eta, \nu) = \frac{1}{(360)(90)} \frac{\Gamma(\eta + \nu)}{\Gamma(\eta) \cdot \Gamma(\nu)} \left(1 - \frac{\theta_N}{90}\right)^{\eta-1} \left(\frac{\theta_N}{90}\right)^{\nu-1}$$

où η et ν sont deux paramètres reliés à l'angle moyen $\langle \theta_N \rangle = \theta_F$ mais aussi à $\langle \theta_N^2 \rangle$ et à $(\langle \theta_N^2 \rangle - \langle \theta_N \rangle^2)$, difficiles à évaluer simplement dans un champ expérimental.

Ces six classes de distribution déjà proposées par DE WIT (cf 1.4.2.2.2., figure 1.24) sont aussi traduites chacune séparément par une fonction ou une combinaison de fonctions trigonométriques ne dépendant que de l'angle θ_N . Mais 6 représentations analytiques différentes sont donc alors nécessaires, et le fait qu'elles ne dépendent que d'un seul paramètre ne peut pas rendre compte de la variabilité naturelle de ces fonctions de distribution.

Nous avons finalement choisi plus simplement une fonction gaussienne, centrée sur l'angle moyen θ_F , caractéristique du couvert:

$$f(\theta_N) = \frac{1}{A} e^{-\frac{(\theta_N - \theta_F)^2}{2\sigma^2}}$$

avec A une constante de normalisation, telle que:

$$2\pi \int_0^\pi f(\theta_N) \sin\theta_N d\theta_N = 1$$

Cette fonction est représentée sur les courbes de la figure 2.32b, pour un couvert plagiophile ($\theta_F = 45^\circ$).

L'écart-type σ traduit l'uniformité, ou la dispersion zénithale des surfaces de feuilles autour de la position moyenne θ_F :

. $\sigma = 1$ (dispersion de $57,3^\circ$), le couvert est uniforme, quel que soit θ_F

. $\sigma = 0,1$ (dispersion de $5,7^\circ$), le couvert est très extrêmophile dans sa catégorie (cas peu vraisemblable)

. $0,2 < \sigma < 0,5$ couvert caractéristique dans sa catégorie, mais dont la courbure des feuilles par exemple peut rendre compte de surfaces d'orientations différentes.

Pour un couvert planophile, cette gaussienne sera centrée sur des angles θ_F inférieurs à 30° ; pour un couvert érectophile, θ_F sera supérieur à 60° .

On remarque que le couvert plagiophile représenté par la fonction Beta est très proche d'une fonction gaussienne. Les différences entre ces deux représentations se situent surtout aux angles extrêmes (0° et 90°) où, pour les autres types de couvert, la fonction Beta s'annule brutalement alors que la gaussienne gardera sa pente normale.

Cette fonction de distribution gaussienne semble donc assez cohérente avec la structure possible d'un couvert végétal. Les variations des deux paramètres (θ_F et σ) vont conditionner les résultats de notre modélisation.

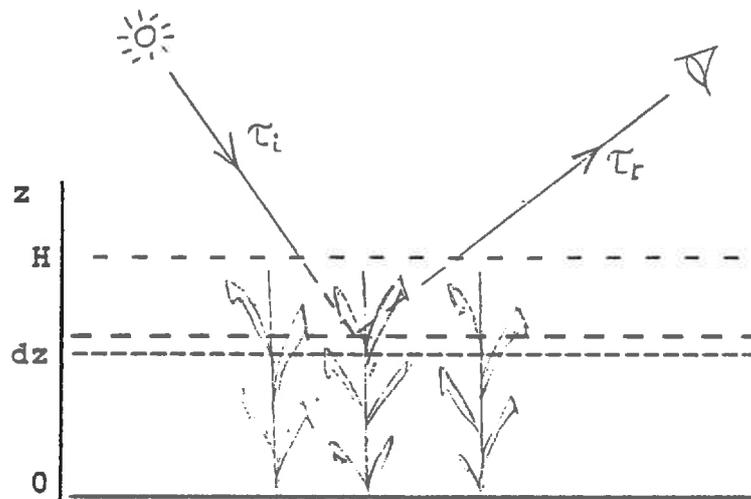


Figure 2.31:
 Dicrétisation du couvert en couches successives d'épaisseur dz .

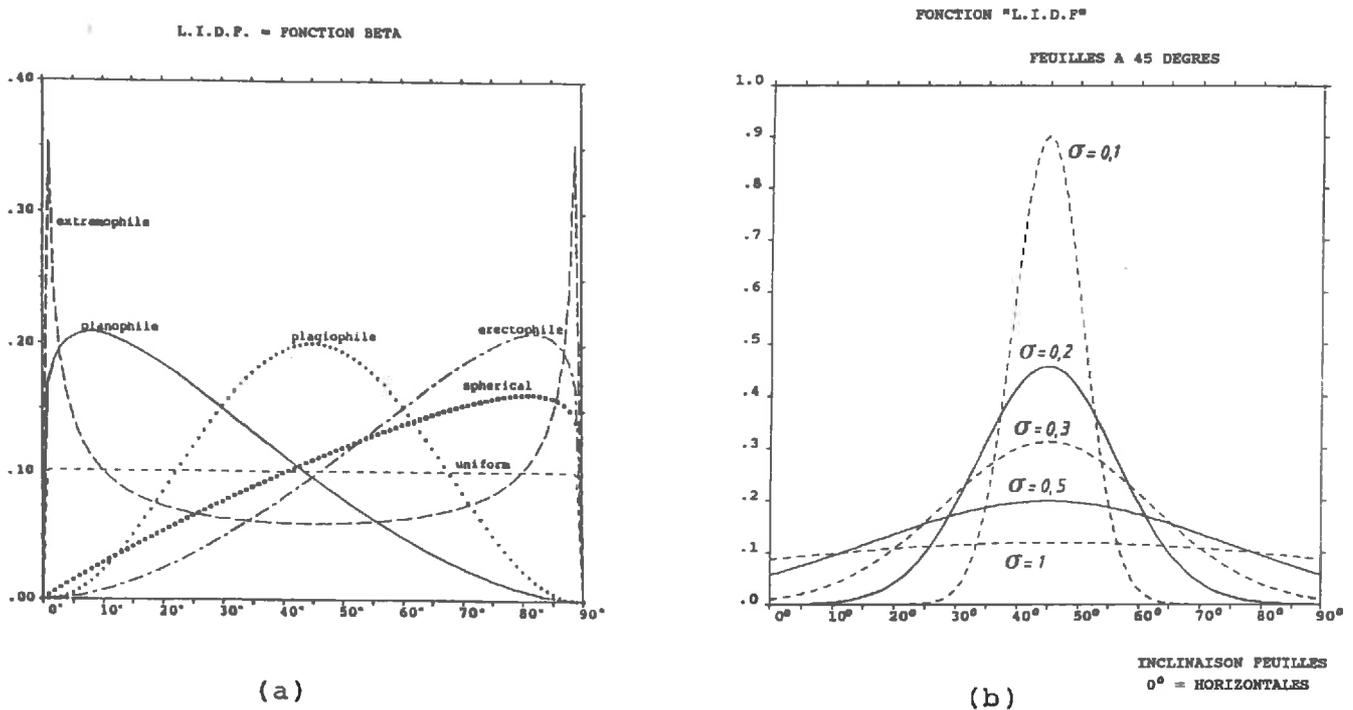


Figure 2.32:

Fonctions de distribution d'inclinaison des feuilles:

(a) Fonctions "Beta" (d'après GOEL et STREBEL, 1984)

(b) Fonctions gaussiennes centrées à $\theta_F=45^\circ$.

2.3.2. Résultats du modèle

Ce modèle a été programmé en langage FORTRAN sur le système UNIX - HP 9000 du L.O.A. de Lille. Ce programme est présenté en annexe

1. D'après le développement précédent, les paramètres d'entrée en sont:

- l'angle zénithal du soleil (θ_i)
- le L.A.I. du couvert
- l'angle moyen θ_F d'inclinaison des feuilles
- la valeur de l'écart-type σ correspondant.

Les calculs des grandeurs finales sont effectués pour l'ensemble des angles de visée (θ_R) constituant un balayage du plan solaire ou du plan perpendiculaire (par pas de 5°).

Les résultats finaux que sont les valeurs de réflectance et de polarisation, ont nécessité le calcul intermédiaire particulier de la fonction "G" du couvert qui intervient dans les épaisseurs optiques.

2.3.2.1. La fonction "G" de l'orientation des feuilles

Dans la direction θ du rayonnement, cette fonction est définie par:

$$G(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f(\theta_N, \varphi_N) |\cos\omega| \sin\theta_N \, d\theta_N \, d\varphi_N$$

$$\text{avec } \cos\omega = \cos\theta_N \cdot \cos\theta + \sin\theta_N \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi_N$$

Le calcul est détaillé dans l'annexe 1. Cette fonction est représentée sur les courbes de la figure 2.33 en fonction de θ pour trois types de couvert (planophile: $\theta_F=0^\circ$, plagiophile: $\theta_F=45^\circ$ et érectophile: $\theta_F=90^\circ$), et différentes valeurs de σ .

Cette fonction apparaît comme un moyen de caractériser l'effet naturel de l'ombre des feuilles les unes sur les autres, selon la position du soleil. Pour $\sigma=1$, on retrouve des courbes pratiquement identiques, quel que soit θ_F . Quand σ diminue, la pente de la courbe augmente, et évidemment en sens inverse pour les deux profils extrêmes (planophile et érectophile). Si le soleil est au zénith ($\theta_i=0^\circ$), l'effet d'ombrage est minimum dans le cas de feuilles dressées; il est maximum sur les feuilles horizontales; et vice-versa lorsque le soleil est bas sur l'horizon.

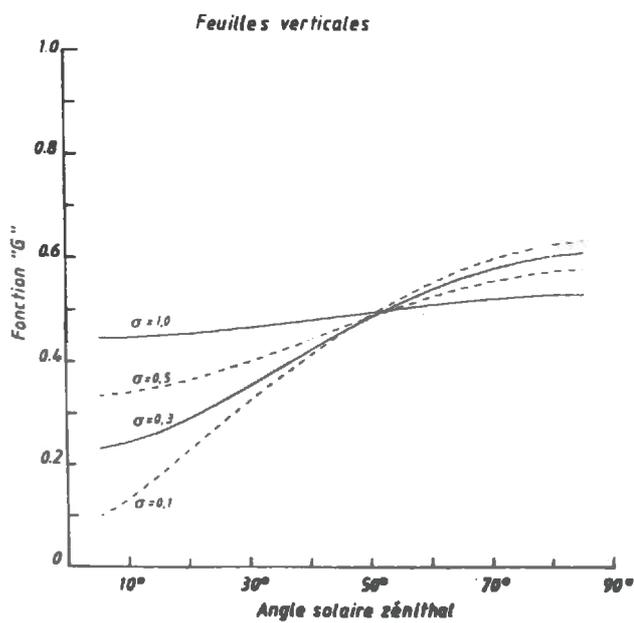
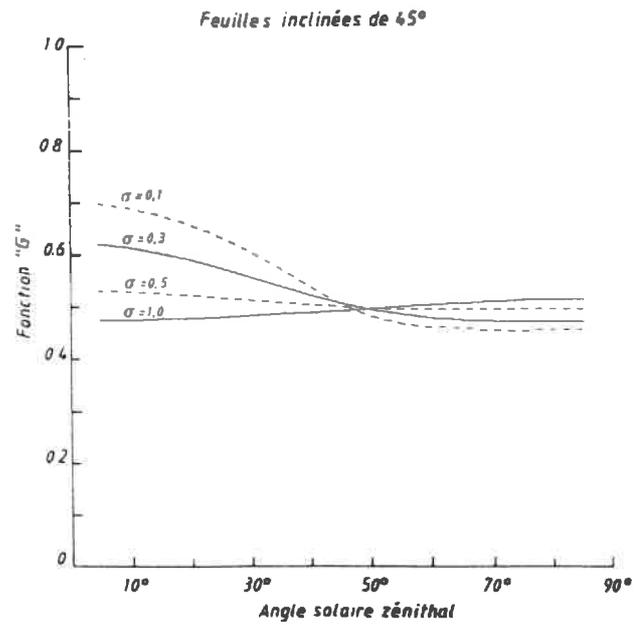
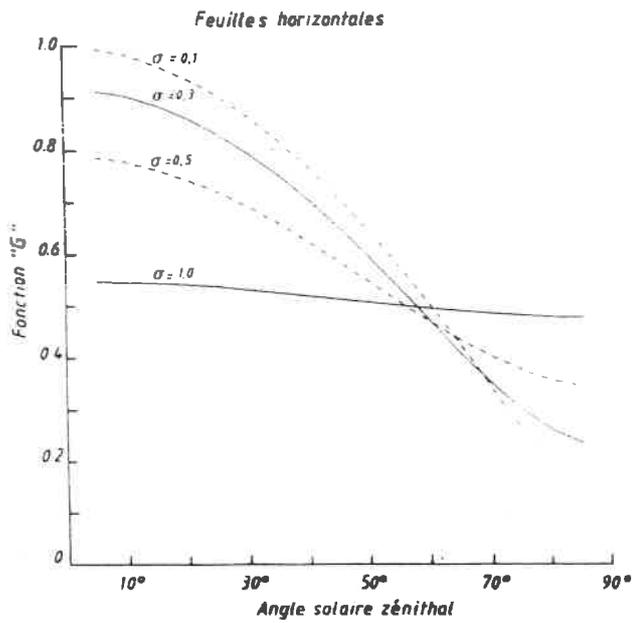


Figure 2.33 :
Fonction "G" de l'orientation des
feuilles, pour une distribution
gaussienne et différents
écart-types σ .

2.3.2.2. *Le taux de polarisation*

Le modèle présenté est basé sur l'hypothèse de la réflexion spéculaire de la lumière solaire sur les feuilles. Pour chaque géométrie de mesure (angle solaire θ_i , et angle de visée θ_R), les coefficients de FRESNEL nous donnent le facteur de réflexion et le taux de polarisation sur une feuille supposée orientée de telle façon que l'angle d'incidence (ω) soit égal à l'angle de réflexion. Ce taux de polarisation direct est indépendant de la fonction de probabilité d'orientation des feuilles. Il correspond à celui qui serait obtenu sur une surface fictive parfaitement spéculaire dans toutes les directions. Ce taux est représenté sur la figure 2.34a en fonction de l'angle de visée (θ_R' pris par rapport à l'horizontale dans le plan solaire: schéma 2.34b), pour différents angles solaires θ_i , et pour un indice de réfraction $n=1,5$. Comme attendu, lorsqu'on se place dans le demi-plan antisolaire, ce taux de polarisation diminue d'abord avec l'élévation du soleil au-dessus de l'horizon (θ_i décroît), puis réaugmente quand le soleil redescend (θ_i croissant). La polarisation est totale à l'angle de BREWSTER:

$$\text{quand } \operatorname{tg}\omega_B = n = 1,5, \text{ soit } \omega_B = 56^\circ$$

c'est-à-dire $2\omega_B = 112^\circ$, angle correspondant sur chaque courbe à l'écart entre les valeurs minimum et maximum.

2.3.2.3. *La réflectance polarisée*

Elle est représentée sur les courbes de la figure 2.35 pour différents types de couverts (différents θ_F) et deux valeurs de σ (0,5 et 0,2) pour un angle zénithal solaire de 30° ; et sur la figure 2.36 pour $\theta_F = 0$ et 45° , différentes valeurs de σ et 2 inclinaisons solaires: 30° et 60° .

On retrouve naturellement sur toutes ces courbes les variations générales du taux de polarisation citées précédemment, mais ici modulées par la fraction de feuilles respectant la condition de réflexion spéculaire. La réflectance polarisée est nulle en rétrodiffusion; elle augmente pour les grands angles de visée et pour une géométrie de mesure se rapprochant de l'angle de BREWSTER:

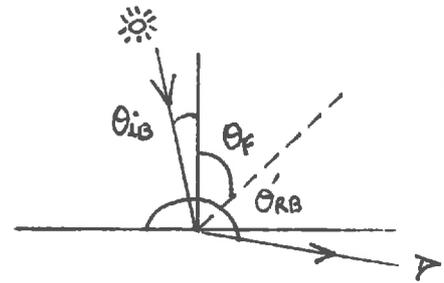
$$\begin{aligned} \text{pour } \theta_F = 0^\circ \quad \omega_B = 56^\circ, \text{ soit } \theta_{iB} &= 56^\circ \\ \theta_{RB}' &= 56+90 = 146^\circ \end{aligned}$$

l'augmentation est effectivement plus rapide sur les courbes obtenues avec $\theta_i = 60^\circ$ qu'avec $\theta_i = 30^\circ$ (figure 2.36)

pour $\theta_F = 45^\circ$

$$\theta_{iB} = 56 - 45 = 11^\circ$$

$$\theta_{RB'} = 45 + 56 + 90 = 191^\circ$$



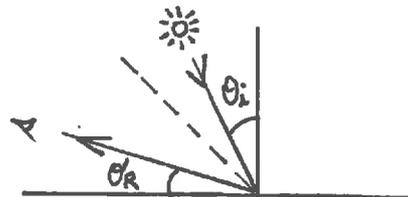
l'augmentation est au contraire plus rapide pour un soleil proche du zénith.

Cet effet dépend bien-sûr également de la valeur de σ . Il est surtout marqué pour σ petit (0,1 ou 0,2). Pour $\sigma=0,5$ le couvert devient plus uniforme: les feuilles ont des orientations plus variées qui modulent la direction de réflexion spéculaire.

Pour $\sigma=0,1$ et $\theta_F=45^\circ$ il apparaît sur les courbes un petit maximum secondaire qui s'explique par l'uniformité azimutale de l'orientation des feuilles:

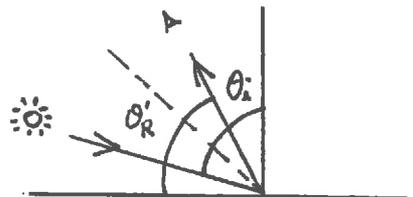
si $\theta_i=30^\circ$, les feuilles orientées "face" au soleil réfléchissent "derrière" le soleil:

$$\theta_{R'} = 90 - 60 = 30^\circ$$



et si $\theta_i=60^\circ$:

$$\theta_{R'} = 60^\circ$$



Ce pic de réflexion spéculaire s'estompe quand σ augmente. Il n'apparaît naturellement pas sur un couvert parfaitement planophile ($\theta_F=0^\circ$).

L'éventuelle possibilité de distinction des différents types de couverts par leur réponse polarisée est mise en évidence sur les courbes de la figure 2.35. L' "effet de limbe", toujours observé aux grands angles de visée, est décalé avec l'inclinaison des feuilles. Quand θ_F augmente cet effet se produit sur un intervalle de plus en plus restreint d'angles de visée vers les grands angles.

TAUX DE POLARISATION

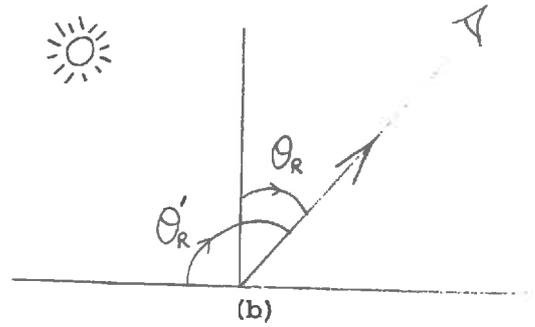
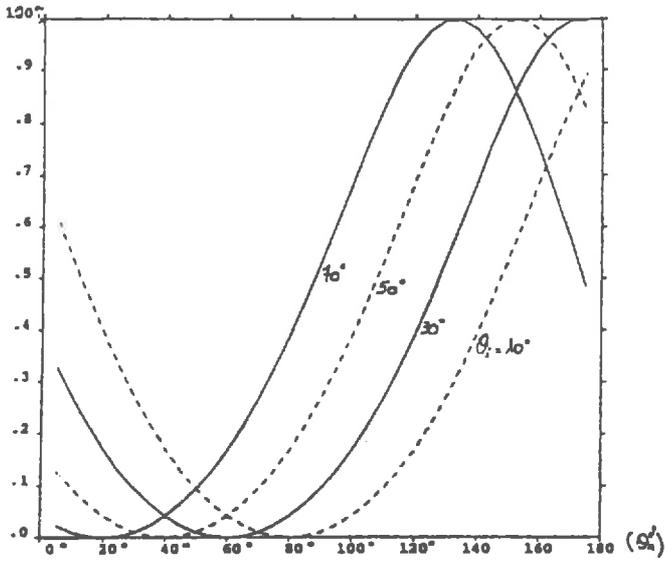


Figure 2.34 :

Taux de polarisation théorique (rapport des coefficients de FRESNEL) pour un balayage du plan solaire (schéma b) à différentes hauteurs du soleil.

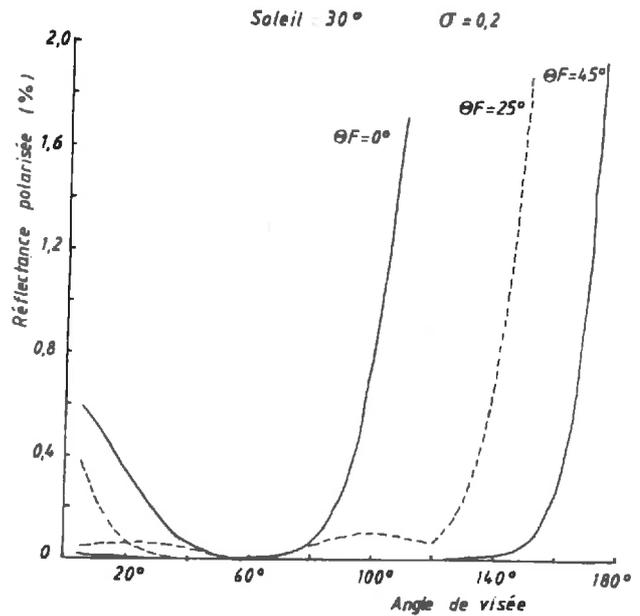
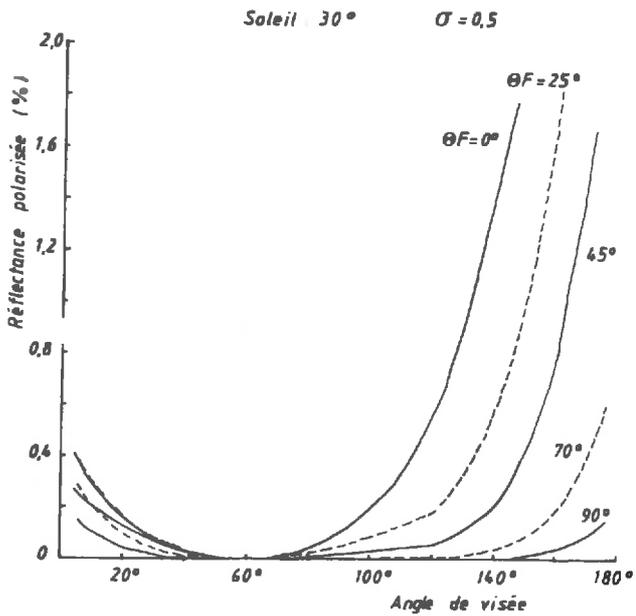


Figure 2.35 :

Réflectance polarisée issue du modèle, pour différents types de couvert.

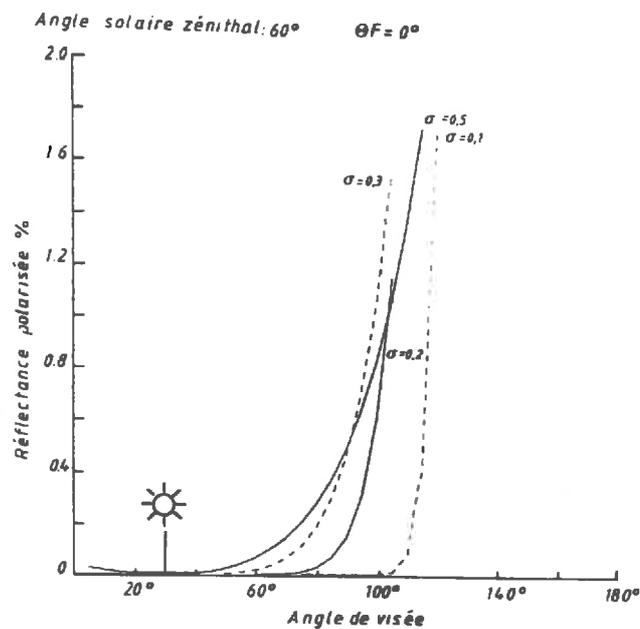
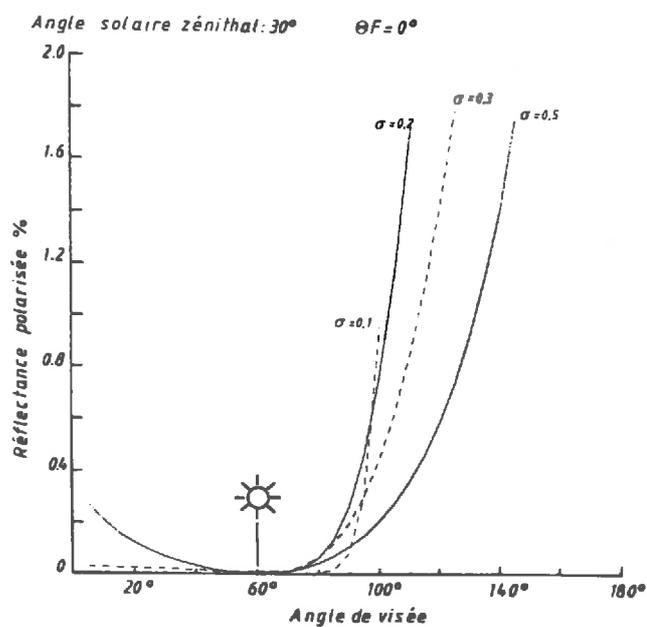
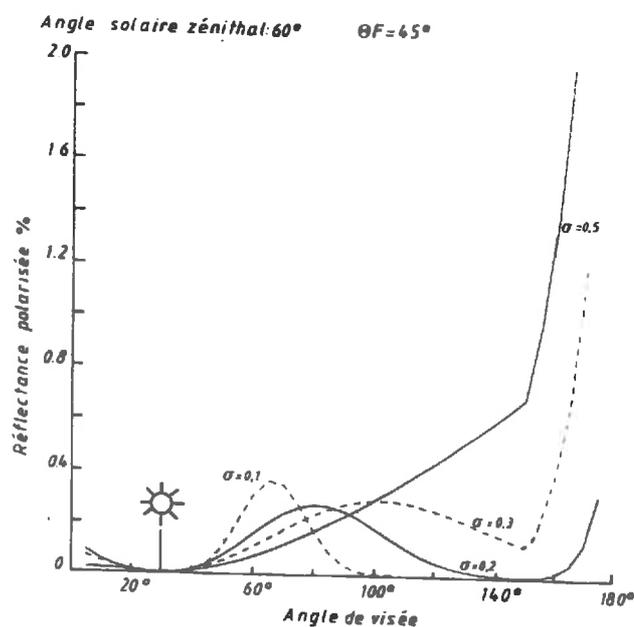
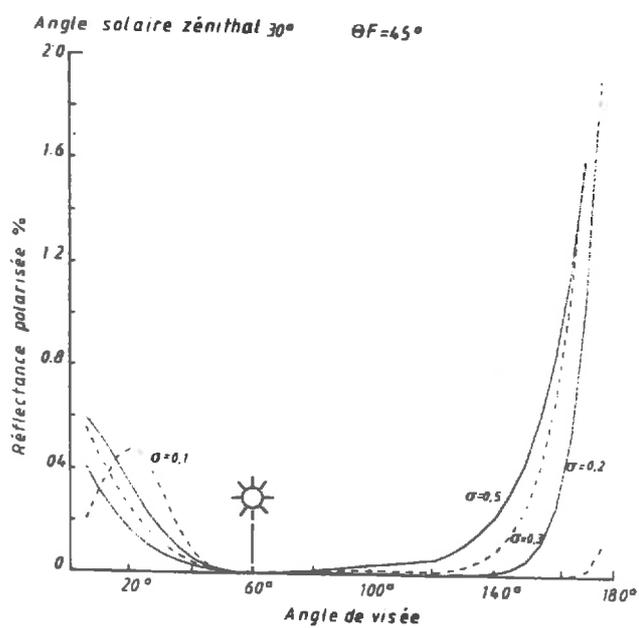


Figure 2.36 :

Réflectance polarisée pour différentes valeurs de σ :

$\theta_i = 30$ et 60° , $\theta_R = 0$ et 45°



Toutes les courbes sont représentées pour des valeurs de réflectance polarisée n'excédant pas 2%, car c'est dans ce domaine que se situent les valeurs expérimentales (cf 2.2.1.4.) et où nous travaillerons donc par la suite.

Mais l'accroissement théorique rapide aux grands angles conduit à des valeurs de 10% ou plus à 170, 180°.

Cette réflectance polarisée est la seule grandeur issue du modèle, directement comparable avec les mesures expérimentales, et c'est donc par elle que nous allons commencer cette confrontation tant attendue!

2.3.3. Confrontation du modèle aux mesures expérimentales

A partir de nos mesures, la réflectance polarisée d'un couvert végétal s'obtient simplement par le calcul du produit du taux de polarisation par le facteur de réflectance. Or, nous avons déjà noté (cf 2.2.1.4.) que la luminance fournie par les données RADISOL n'était pas directement convertible en réflectance équivalente, faute de mesures in situ du rayonnement solaire direct. Il est donc nécessaire de préciser d'abord ce passage des mesures de luminance à des mesures utilisables au sol, afin que nous puissions, pour la facilité de la confrontation au modèle, les convertir en terme de réflectance polarisée.

2.3.3.1. Réflectances polarisées "semi-expérimentales"

Nous rappelons que la réflectance directionnelle se relie à la luminance par:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{\lambda}}$$

où E_{λ} est l'éclairement monochromatique incident directionnel reçu par la cible ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$).

L'étalonnage de RADISOL est fait pour des valeurs de $E_{\lambda} = E_{0\lambda}$ hors atmosphère. L'évaluation des mesures au sol nécessite la prise en compte de l'atténuation de ce rayonnement pendant sa traversée de l'atmosphère.

Selon les conclusions bibliographiques et les hypothèses de notre modèle, la réponse polarisée de la végétation est due à la réflexion spéculaire du rayonnement solaire direct sur les feuilles. Nous avons donc considéré ici uniquement l'atténuation et la direction du rayonnement direct, en supposant que le rayonnement diffus n'était pas, ou de façon négligeable, responsable des phénomènes polarisants. L'éclairement solaire direct au niveau du couvert s'écrit:

$$E_{\lambda} = \cos \theta_i \cdot E_{o\lambda} \cdot e^{-(\tau_m + \tau_p/2)/\cos \theta_i}$$

avec: θ_i : angle zénithal solaire

$E_{o\lambda}$: constante monochromatique solaire hors atmosphère

τ_m : épaisseur optique due à la diffusion par toutes les molécules de l'atmosphère (diffusion de Rayleigh)

$\tau_p/2$: composante due à la diffusion par les aérosols (le facteur 1/2 tenant compte de ce que la moitié environ du rayonnement diffusé par les aérosols est diffusé sous des angles très petits (quelques degrés), et peut être considéré comme directionnel).

Pour un modèle d'atmosphère standard (DESCHAMPS et al, 1983):

$$\left| \begin{array}{l} \tau_m = \frac{0.008}{\lambda^4} \quad (\lambda \text{ en } \mu\text{m}) \\ \frac{\tau_p(\lambda)}{\tau_p(\lambda_0)} = \frac{1.0443}{\lambda} - \frac{0.0443}{\lambda^2} \end{array} \right.$$

avec $\tau_p = 0.13$ à $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$ pour une visibilité de 23 km
(conditions atmosphériques standards)

Ces expressions semi-numériques ont été calculées dans le but de fournir un signal de référence commode, permettant une analyse rapide des performances des capteurs des satellites.

Les luminances indiquées par RADISOL ont donc été corrigées du facteur:

$$e^{+(\tau_m + \tau_p/2)/\cos \theta_i}$$

où τ_p a été calculé pour une visibilité standard de 23 km.

Les réflectances polarisées obtenues à partir de cette évaluation sont présentées sur les courbes de la figure 2.37. Elles correspondent aux différentes dates de mesure sur la parcelle de soja S de la campagne 88.

Ces valeurs sont relativement faibles, dépassant rarement 1%. Un léger décalage apparaît presque sur chaque graphe entre les deux longueurs d'onde représentées (verte et rouge), mais ce décalage n'excède jamais 0,05% et reste constant quel que soit l'angle de visée (les deux courbes sont parallèles). Il est donc difficile de dire s'il s'agit ou non d'un effet spectral. Une part d'erreur peut être due à la correction systématique précédente (la visibilité pouvant être par exemple de 15 ou 40 km plutôt que 23).

Ces résultats sont toutefois très semblables aux réflectances polarisées déjà obtenues avec l'aide supplémentaire d'un autre radiomètre (cf 2.2.1.4.), et nous pouvons maintenant comparer ces valeurs directement aux courbes théoriques issues du modèle.

Cette non-dépendance spectrale de la réflectance polarisée, alors que la luminance totale peut varier d'un facteur 2 entre 550 et 630 nm (figure 2.24), confirmerait à nouveau l'hypothèse de la réflexion spéculaire

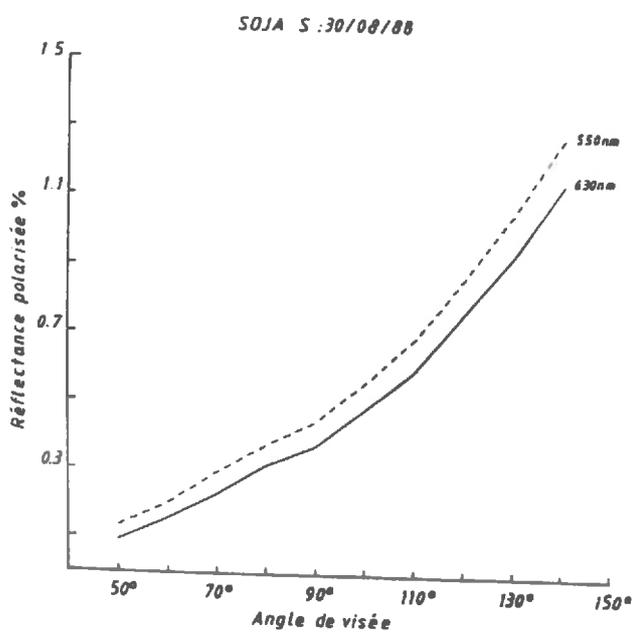
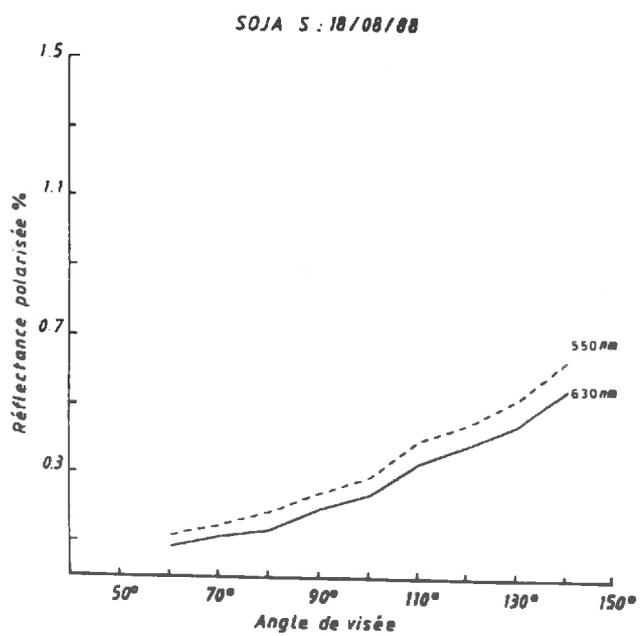
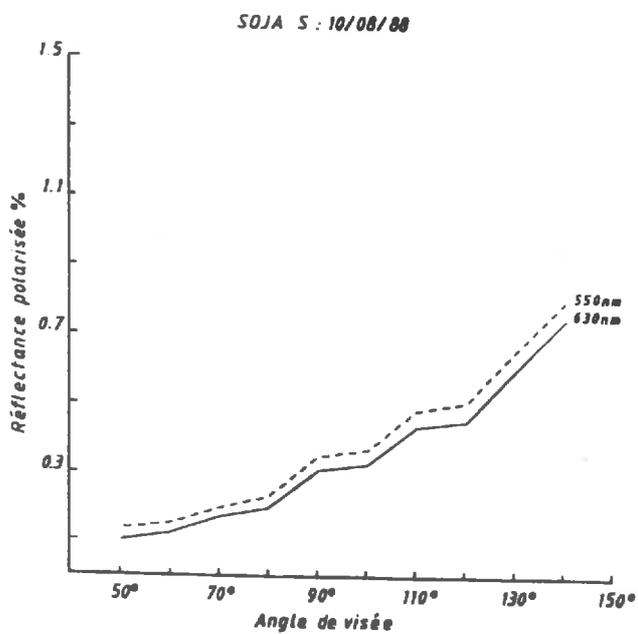
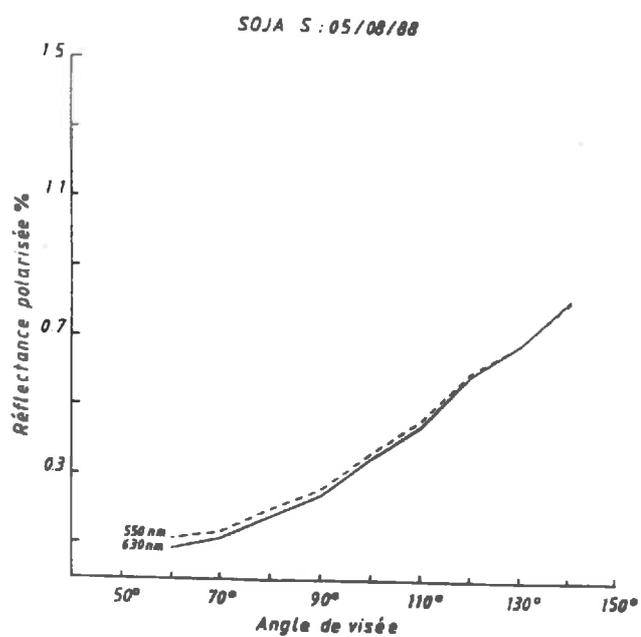
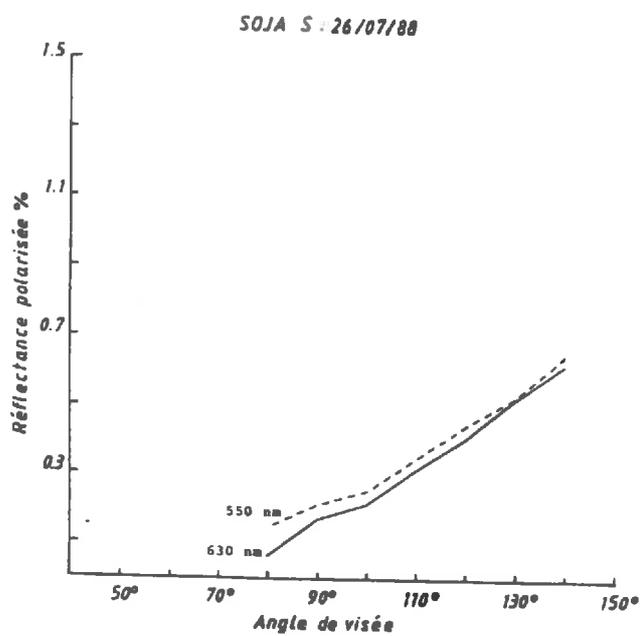


Figure 2.37 :
Réflectance polarisée corrigée
sur la parcelle de soja S.

2.3.3.2. Comparaison des réflectances polarisées et structure des couverts

La confrontation des mesures aux valeurs modélisées a été réalisée en cherchant d'abord (par calcul systématique), pour la hauteur solaire correspondant à l'heure des mesures, la configuration structurale théorique du couvert (θ_F et σ) donnant le meilleur accord avec les points expérimentaux. Les mesures choisies pour cette confrontation sont celles obtenues à 630 nm (rouge), là où la réflectance est la plus basse et la polarisation la plus importante.

L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 2.4. Sur les figures 2.38 à 2.44 sont tracées les courbes théoriques pour l'angle θ_F retenu et trois valeurs de σ (0.3, 0.4 et 0.5), en comparaison avec les points expérimentaux. Ces trois valeurs de σ , qui donnent des courbes relativement proches les unes des autres, permettent la visualisation du plus ou moins bon encadrement des points de mesure.

De façon générale, ces courbes retracent relativement bien l'allure des données expérimentale, sauf en rétrodiffusion où le modèle donne, par hypothèse, une polarisation toujours nulle.

Pour toutes les parcelles de soja (87 ou 88) étudiées dans le plan solaire, cette comparaison nous amène à fixer θ_F entre 20 et 35° selon le jour et l'heure de la mesure, avec σ de l'ordre de 0.4 ou 0.5. Ces valeurs sont plausibles: un couvert de soja est dans l'ensemble planophile mais non structuré. La parcelle en état de stress hydrique (soja S, 18/08/88) se distingue seulement par une valeur de σ inférieure: $\sigma=0.3$.

Pour le maïs, mesuré dans le plan du soleil, l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_F se situe entre 25 et 35° avec $\sigma=0.5$ (dans le cas du maïs N, les valeurs faibles de θ_F proviennent d'un ajustement difficile qui peut traduire l'inhomogénéité de la surface observée: jeunes pousses et sol).

parcelle + date	angle solaire θ_i	angle foliaire θ_f	écart-type σ
13/08/87 soja 3	30°	20°	0.5
soja 3	53°	30°	0.4
maïs 5	33	25	0.4 - 0.5
18/08/87 soja 3	63°	30°	0.4
soja 4	55.5°	25°	0.4
maïs 5	52°	30	0.5
maïs 6	59	35	0.5
19/08/87 soja 3	31.5°	20°	0.5
soja 4	34.5	20	0.5
maïs 5	36.5	25	0.4 - 0.5
20/08/87 soja 3	35.5	10	0.5
soja 4	31.5	5°	0.5
maïs 5	32	35	0.5
maïs 6	33.5	45	0.5
soja S 26/07/88	31°	20°	0.5
05/08/88	38	20	0.5
10/08/88	49	35	0.5
18/08/88	43.5	30	0.3
30/08/88	49.5	25	0.4
soja N 26/07/88	49.5	30	0.4
18/08/88	48.5	30	0.5
maïs N 18/08/88	40	10	0.5
30/08/88	45	20	0.4

Tableau 2.4 : Résultats de la modélisation de la réflectance polarisée

L'angle obtenu sur les parcelles de maïs semble ne pas rendre compte de la structure du couvert. L'angle calculé à partir de la méthode du traitement des silhouettes (cf 2.2.1.5.) est en effet de 46° . La valeur de $\sigma=0.5$ traduit aussi un couvert assez uniforme, ce qui n'est pas le cas d'un champ de maïs.

La différence entre la parcelle fleurie (maïs 6, 18/08/87) et la parcelle non encore fleurie (maïs 5) n'est pas non plus très évidente: pour un même σ ($=0.5$), θ_F passe de 30 à 35° lors de la floraison.

La distinction entre les différentes parcelles est apparemment beaucoup plus nette avec les mesures réalisées dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires (le 20/08/88, figure 2.41). Les parcelles de soja présentent dans ce cas une structure assez uniforme ($\sigma=0.5$) mais très planophile ($\theta_F = 5$ et 10°) alors que les parcelles de maïs sont plus plagiophiles ($\theta_F = 35$ et 45°), avec $\theta_F=45^\circ$ pour la parcelle fleurie; angle qui correspond à celui calculé directement sur les plants (on rappelle que cet angle a été moyenné sur toute la période végétative de la parcelle (cf 2.2.1.5.) et tient donc compte de la floraison, c'est-à-dire des panicules mâles du maïs).

Cette différence de résultats selon le plan d'observation est partiellement artificielle. Dans le plan perpendiculaire, la valeur de θ_F obtenue par comparaison des courbes théoriques avec les mesures, dépend essentiellement des points autour de la visée verticale (90° sur les graphes): les valeurs de réflectance polarisée y sont plus élevées pour le soja que pour le maïs; la valeur de σ détermine ensuite la courbure plus ou moins forte de l'ensemble des points.

Dans le plan solaire, on est plutôt conduit à respecter l'allure générale de la courbe vers les grands angles de visée (face au soleil). Ces points conditionnent à la fois les valeurs de θ_F et σ . Les allures sont peu différentes d'un couvert à l'autre, avec des mesures du même ordre de grandeur, d'où aussi des paramètres d'ajustement θ_F et σ voisins les uns des autres. L'ajustement se fait donc un peu aux dépens des mesures en rétrodiffusion qui sont mal respectées par le modèle .

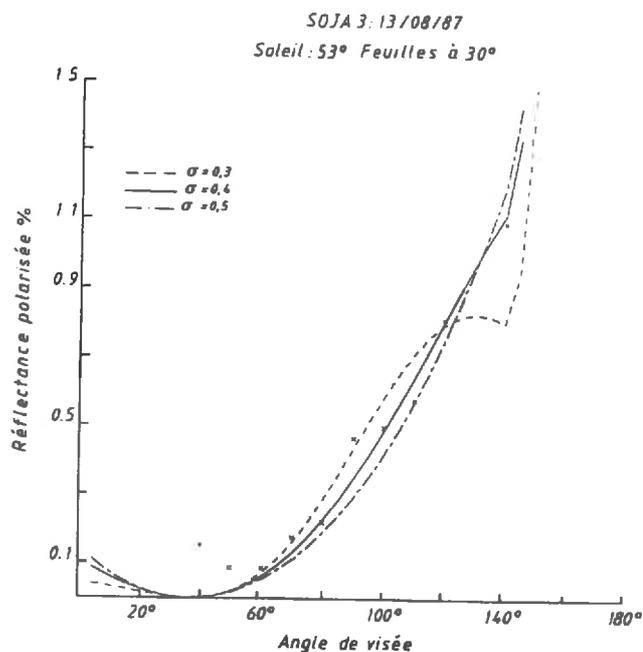
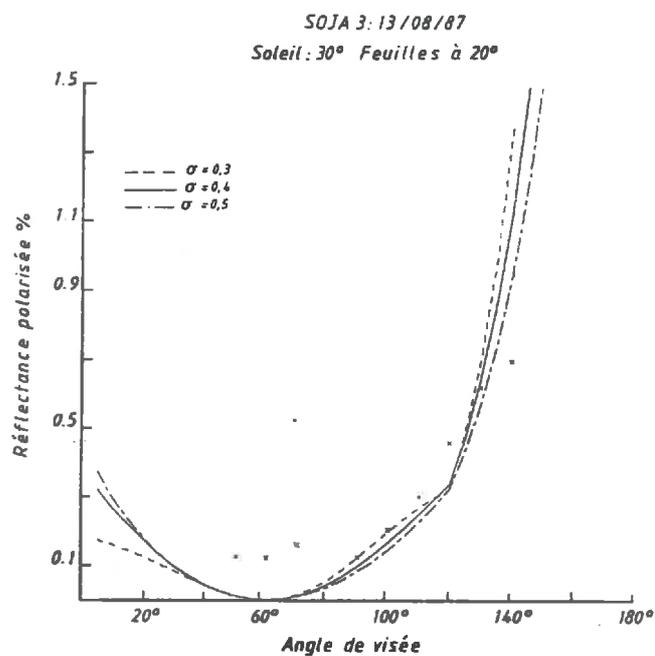
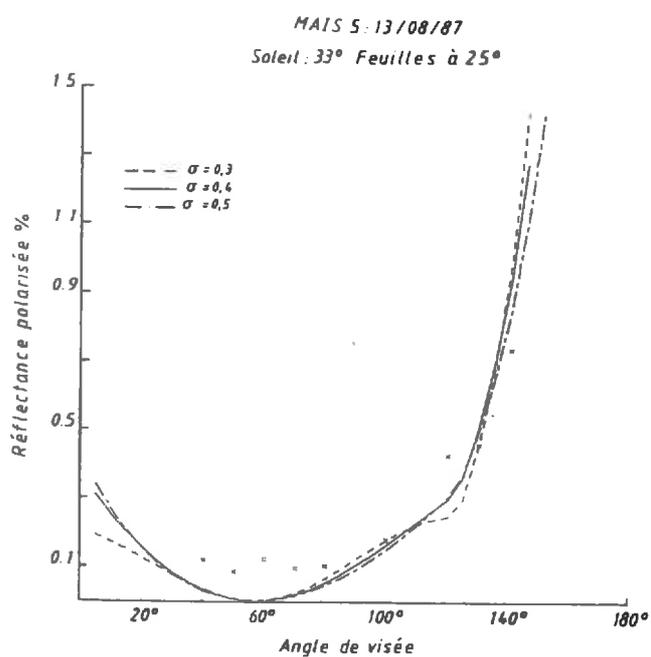


Figure 2.38 :

Confrontation des réflectances polarisées expérimentales aux résultats de la modélisation. Mesures du 13/08/87 dans le plan solaire.



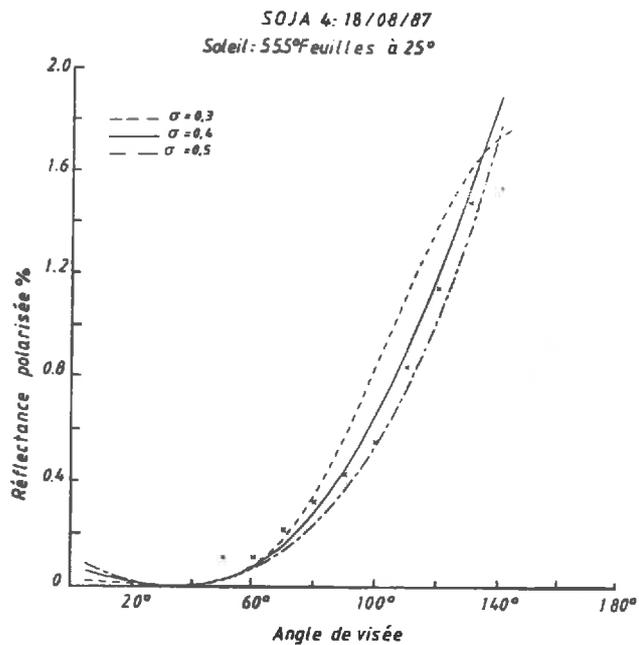
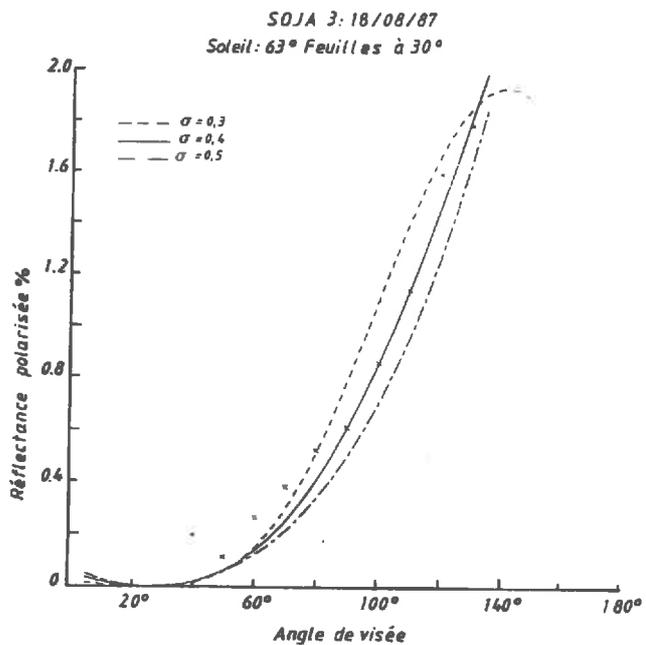
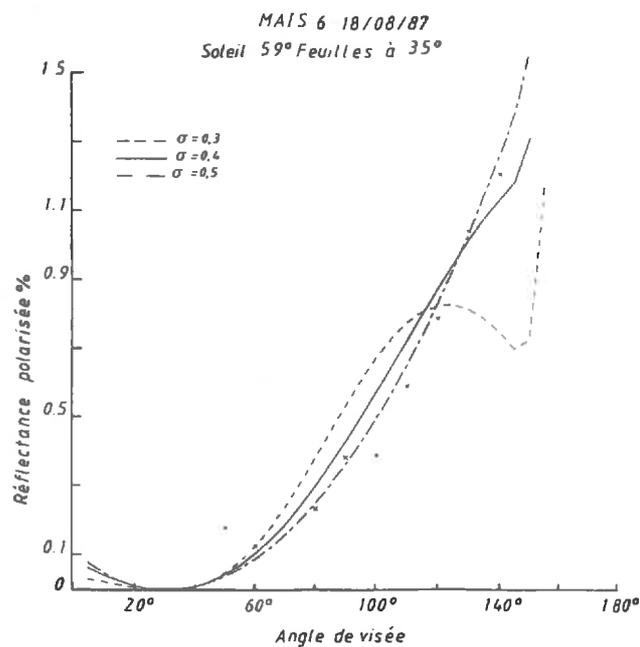
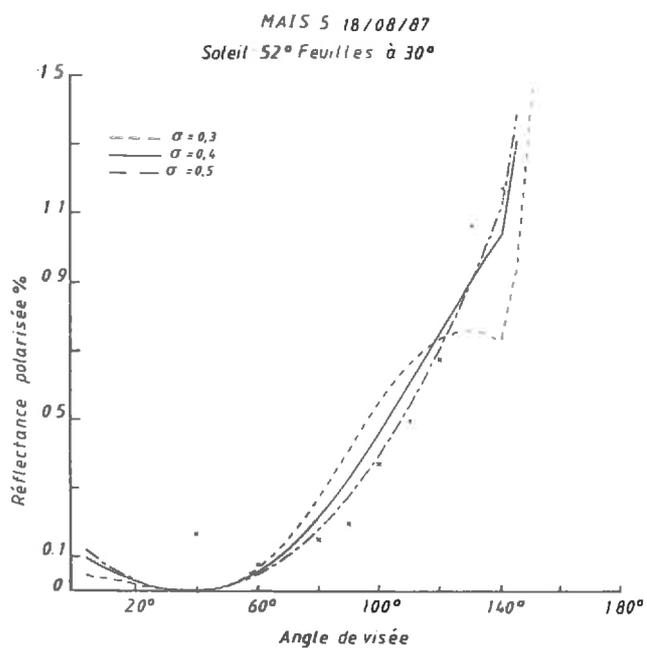


Figure 2.39:

Mesures du 18/08/87, dans le plan solaire.



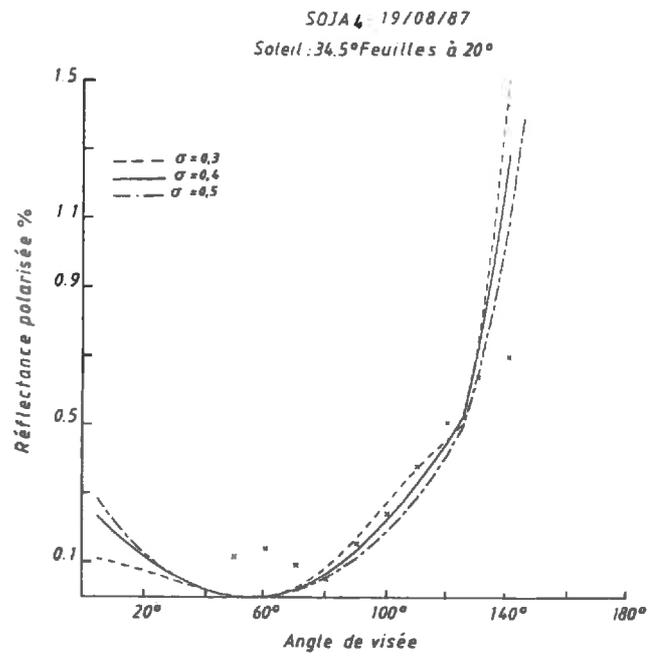
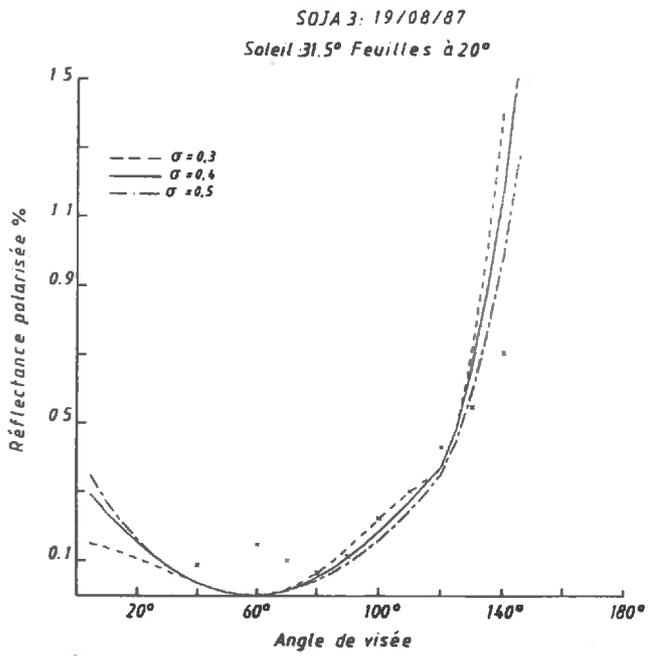
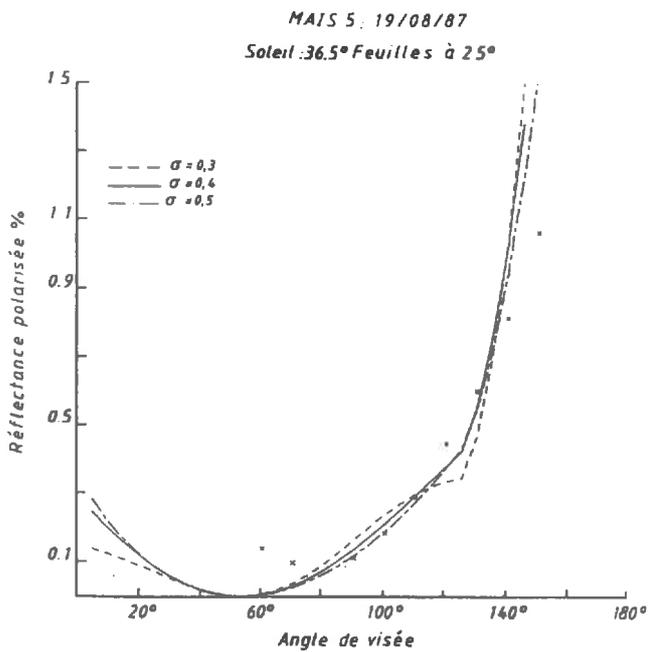


Figure 2.40 :
Mesures du 19/08/87 , dans le plan solaire.



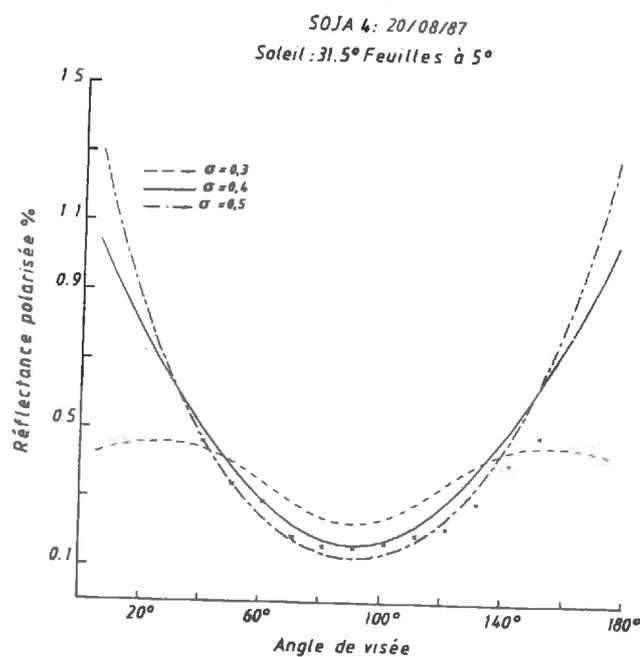
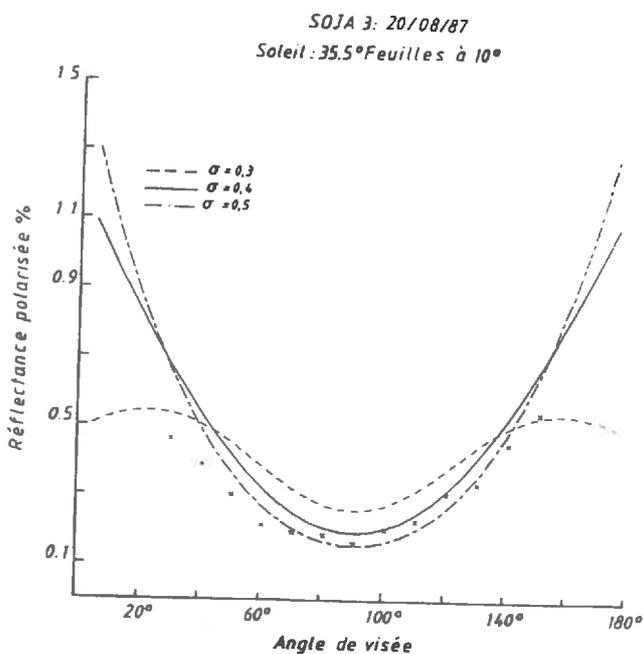
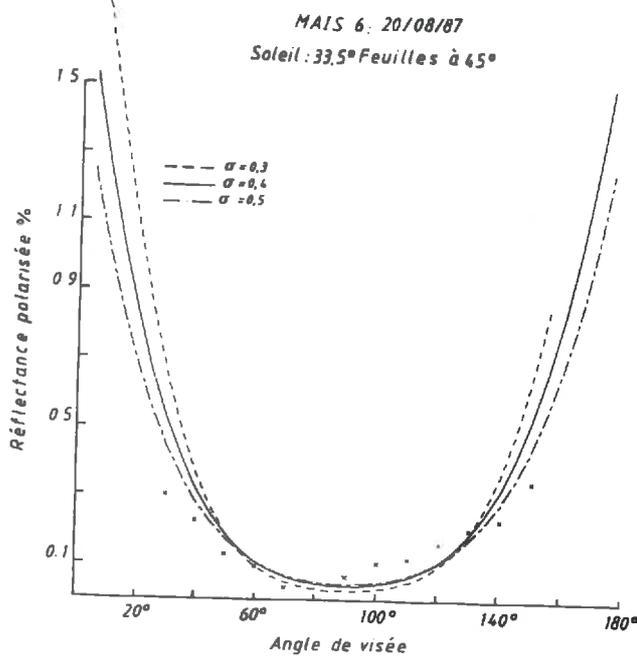
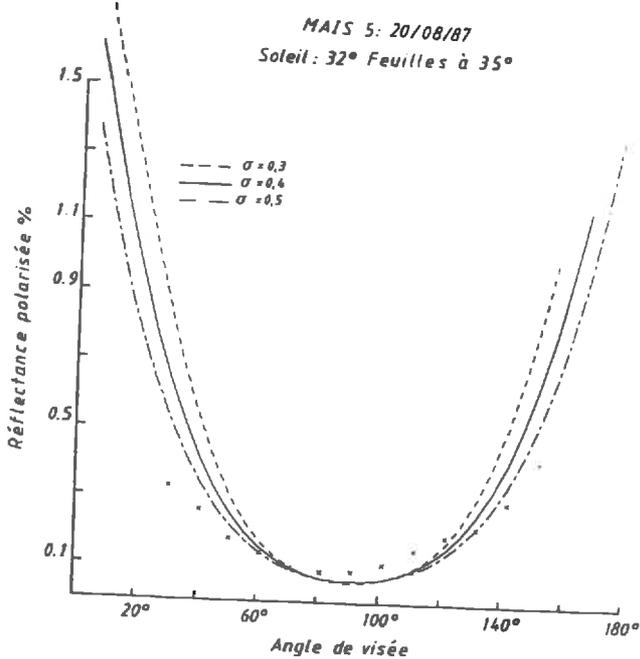
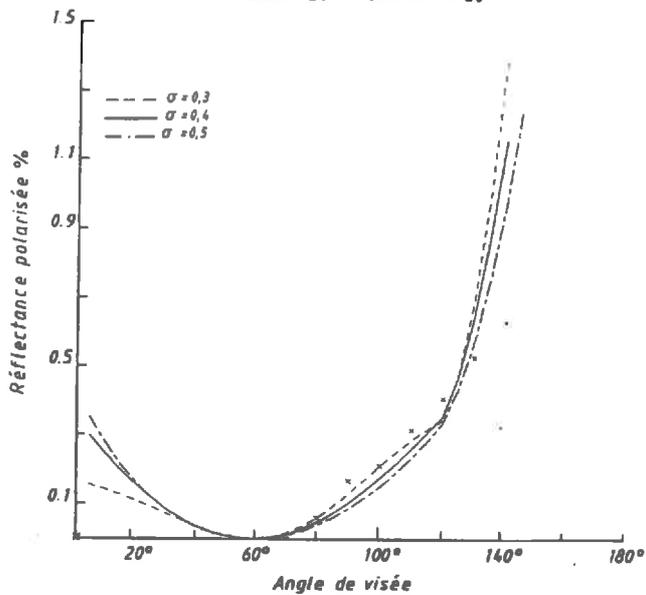


Figure 2.41 :

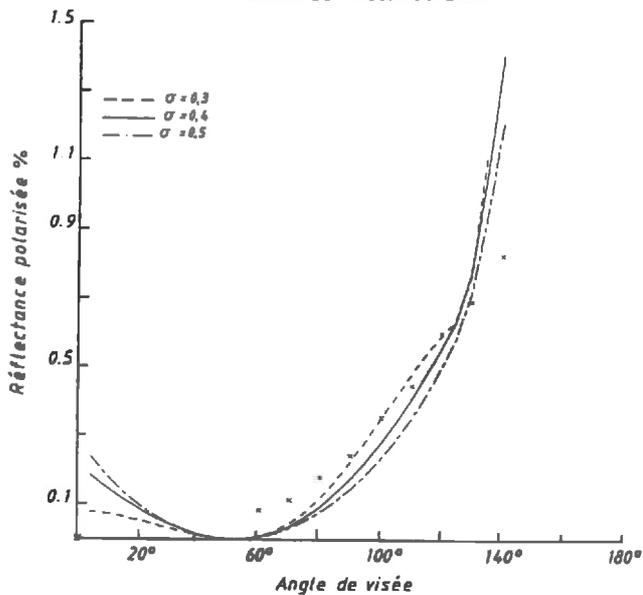
Confrontation des réflectances polarisées expérimentales aux résultats du modèle. Mesures du 20/08/87, dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires incidents.



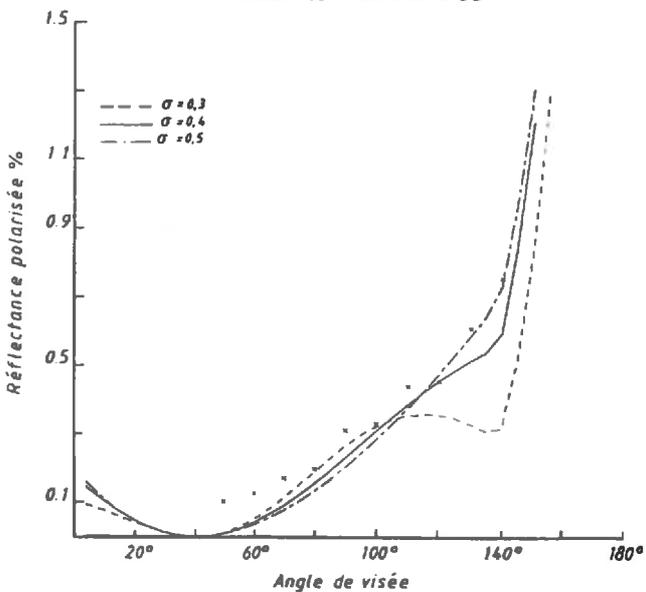
SOJA S: 26/07/88
Soleil: 31° Feuilles à 20°



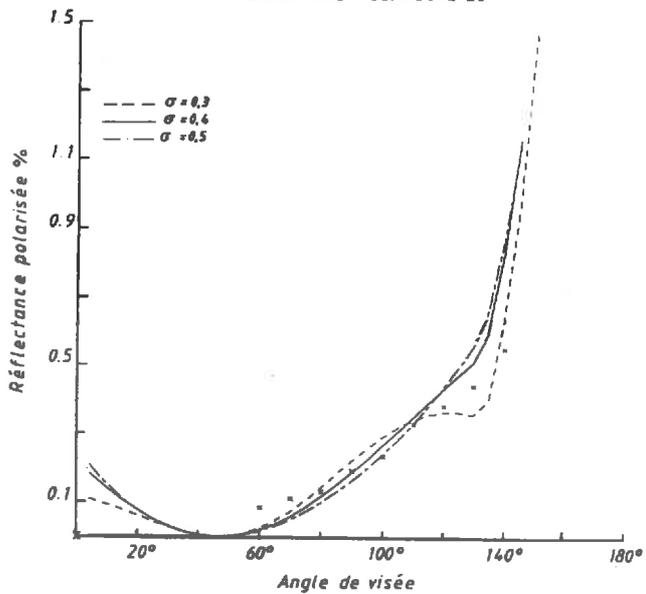
SOJA S: 05/08/88
Soleil: 38° Feuilles à 20°



SOJA S: 10/08/88
Soleil: 49° Feuilles à 35°



SOJA S: 18/08/88
Soleil: 43.5° Feuilles à 30°



SOJA S: 30/08/88
Soleil: 49.5° Feuilles à 25°

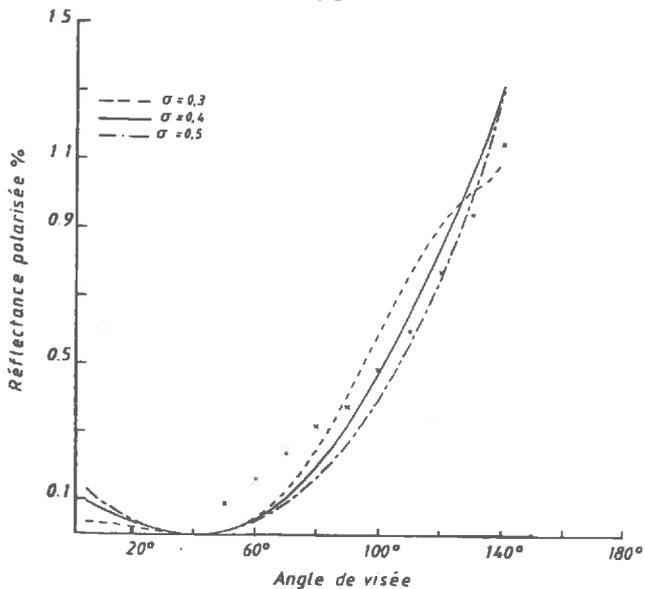


Figure 2.42 :
Parcelle de soja S, mesures 88
dans le plan solaire.

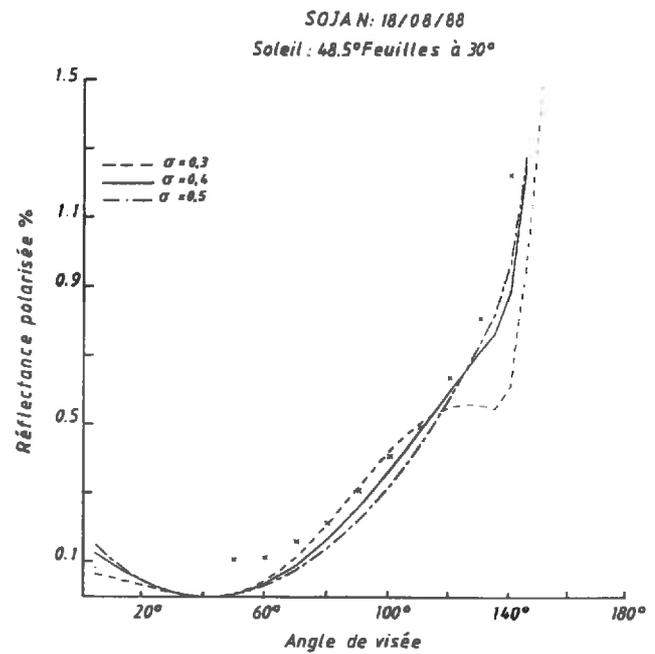
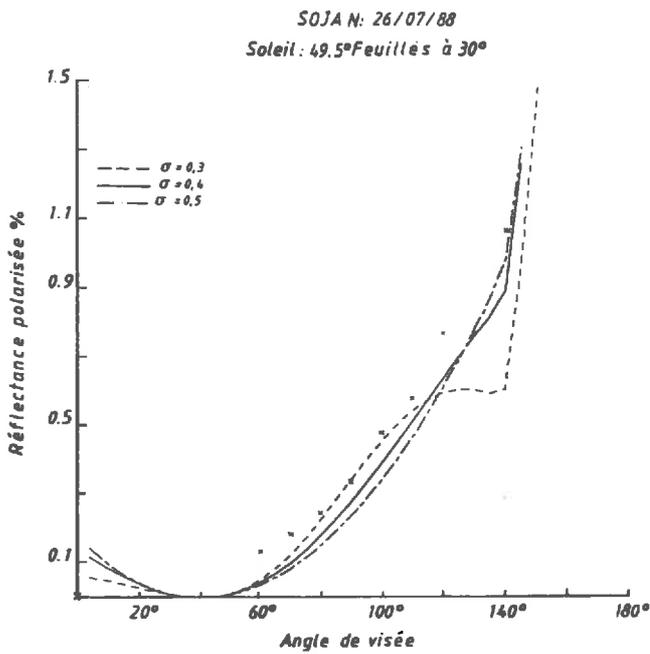


Figure 2.43 :

Parcelle de soja N, mesures 88, dans le plan solaire.

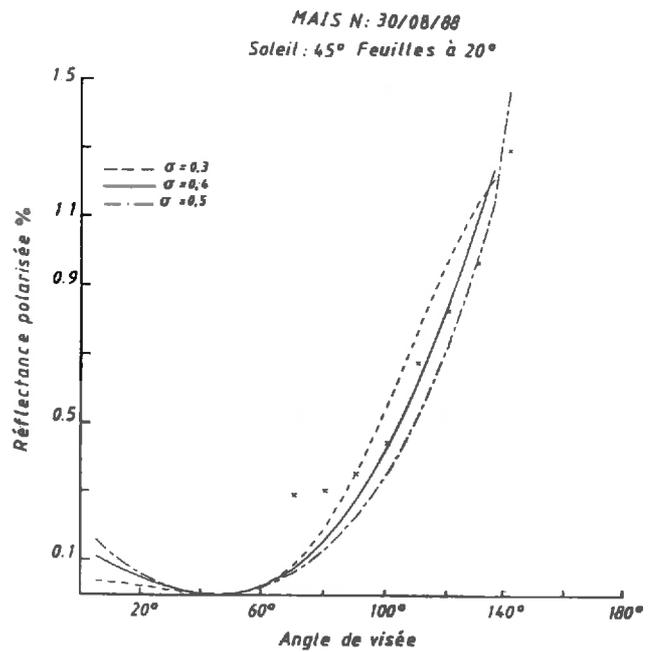
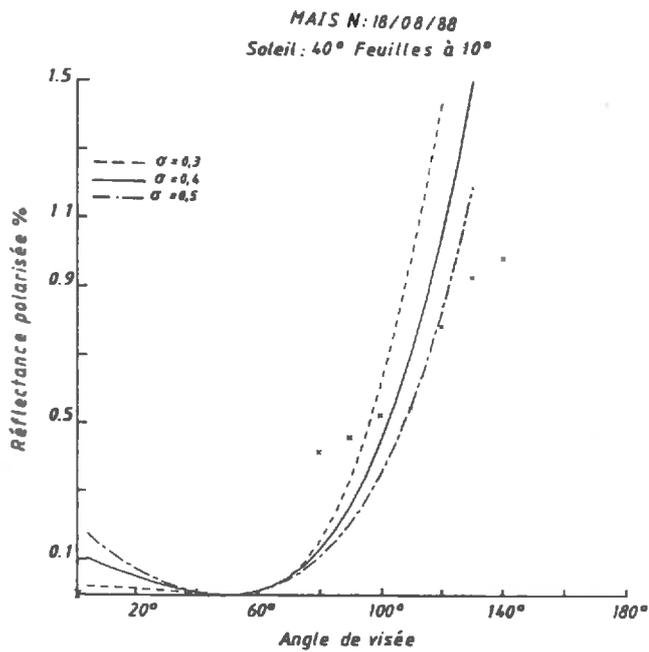


Figure 2.44 :

Parcelle de maïs N.

Dans le plan d'incidence, il apparaît donc difficile de différencier un champ de maïs d'un champ de soja uniquement à partir de leur réponse polarisée. Les différences plus nettes apparues dans les mesures, non pas entre une espèce et l'autre, mais entre deux états d'une même végétation, ne correspondent aussi qu'à de légères modifications des courbes théoriques. Par exemple, entre les mesures du 18/08/88 sur chaque parcelle de soja (S et N) (pour lesquelles la différence de hauteur solaire n'est que de 5° et n'intervient donc que très peu dans les variations observées), les valeurs (maximales) mesurées de réflectance polarisée sont très différentes: elles passent de 1.2% à 0.5% pour la parcelle stressée, alors que θ_F obtenu est le même dans les deux cas (30°), et seul σ traduit une sensible modification de structure en passant de $\sigma=0.5$ sur le soja N non stressé, donc plus uniforme, à $\sigma=0.3$ sur le soja S. Les courbes tracées avec ces deux valeurs de σ (figures 2.42 et 2.43) ont en effet des pentes différentes qui suffisent à rendre compte des changements observés. Un phénomène similaire se remarque aussi entre les parcelles de maïs fleurie et non fleurie (maïs 5 et 6 du 18/08/87), où cette fois-ci seul θ_F varie sensiblement.

Ces résultats sont le reflet de la grande sensibilité du modèle à ces deux paramètres caractéristiques de la fonction d'inclinaison des feuilles du couvert. Des différences qui nous paraissent importantes ne se traduisent que par de relativement faibles variations de ces paramètres. Par exemple, une variation de 10° de l'angle moyen θ_F apporte physiquement une modification sensible des courbes, alors qu'elle n'est pas significative biologiquement (il suffit par exemple d'un léger coup de vent pendant la mesure). La différence obtenue aussi dans le cas du maïs entre le θ_F issu du modèle (dans le plan solaire) et celui calculé directement sur les plants n'est pas non plus déterminante. La méthode des silhouettes utilisée (cf 2.2.1.5.) considère uniquement l'inclinaison des différents segments que présente l'allure générale de chaque feuille, et ne tient pas compte des variations ondulées observées sur le profil d'une feuille de maïs (figure 2.19). Ces ondulations présentent parfois une succession d'éléments de surface foliaire pratiquement horizontaux puis verticaux, qui peuvent donc influencer la réflexion spéculaire de l'ensemble de la feuille. Le problème réside en fait dans la difficulté de caractériser simplement la structure complexe d'un couvert, en restant à

la fois suffisamment précis, tout en tenant compte de sa variabilité naturelle!!

Il semble finalement que le modèle rende bien compte des caractéristiques essentielles de la réflectance polarisée: les ordres de grandeur, l'influence de la hauteur du soleil et la structure bidirectionnelle générale sont respectés. Mais l'interprétation des résultats ne doit pas être poussé trop loin quantitativement, puisque les observations sur une même parcelle se traduisent par des valeurs de θ_F différentes lorsque que la hauteur du soleil et/ou le plan d'observation varient. La distribution gaussienne choisie ne constitue donc qu'une première approche, rendant bien compte des principales tendances, mais ne permettant pas de modéliser l'ensemble des propriétés du couvert,

2.3.3.3. Les taux de polarisation

Le taux de polarisation du modèle n'est pas directement comparable aux mesures expérimentales: il est simplement le rapport des coefficients de FRESNEL (cf 2.3.2.2.). Le taux de polarisation d'un couvert végétal est, par définition, le rapport entre sa réflectance polarisée et sa réflectance totale directionnelle. Or le modèle ne tient compte que de la partie spéculaire de la réflectance, à laquelle il faut donc ajouter sa composante diffuse:

$$\rho_{\text{tot}} = \rho_{\text{sp}} + \rho_{\text{diff}}$$

soit, un taux de polarisation mesuré:

$$P = \frac{\rho_{\text{pol}}}{\rho_{\text{sp}} + \rho_{\text{diff}}}$$

Notre modèle nous donne une bonne évaluation de ρ_{pol} , et donc à posteriori de ρ_{sp} . En essayant d'ajuster les taux de polarisation mesurés, nous allons pouvoir obtenir un ordre de grandeur de ρ_{diff} . En première approximation, nous avons supposé un terme ρ_{diff} lambertien: $\rho_{\text{diff}} = \rho_{\text{diff}}(\lambda)$, a priori de l'ordre de quelques % dans le visible, puisque la réflectance totale d'un végétal reste relativement faible dans ces longueurs d'onde (cf 1.3.2.1.).

Les réflectances ρ_{pol} et ρ_{sp} sont issues du modèle, et calculées dans les conditions de mesure de chaque parcelle avec les paramètres θ_F et σ des ajustements précédents. Les courbes sont tracées dans chaque cas pour trois valeurs de ρ_{diff} : cette valeur est indiquée en % sur chacune d'elles.

Sur les parcelles de soja 3 et 4 (figures 2.45 à 2.47) la composante diffuse ρ_{diff} de la réflectance apparaît être de l'ordre de 2% à 630 nm et 4 ou 5% à 550 nm. Ces valeurs sont légèrement plus faibles pour les parcelles de soja N et S (figures 2.48 et 2.49) avec 1% à 630 nm et 3 ou 4% à 550 nm. Ces ordres de grandeur redonnent relativement bien l'allure des taux de polarisation, sauf aux très grands angles de visée, où le modèle continue d'augmenter alors que le taux de polarisation observé tend à se saturer.

Les différences observées le 18/08/88 entre les mesures sur la parcelle de soja S subissant un stress hydrique et la parcelle de soja N irriguée normalement semblent, comme dans le cas des réflectances polarisées, être bien prises en compte par leur seule différence de structure ($\sigma=0.3$ pour le soja S, $\sigma=0.5$ pour le soja N). Les valeurs de ρ_{diff} permettant l'encadrement des mesures sont en effet dans les deux cas du même ordre de grandeur (figures 2.47 et 2.48): 1% à 630 nm et 3% à 550 nm.

Par contre, les différences observées entre les mesures des parcelles de maïs 5 et 6, non fleurie et déjà fleurie (figures 2.44 et 2.46), supposent aussi une variation importante de ρ_{diff} . Le 18/08/87 (figure 2.44) ρ_{diff} passe de 2% à 4% à 630 nm pour la parcelle 6, et de 4 à 6% à 550 nm, c'est-à-dire que la floraison du maïs entraîne l'augmentation de sa réflectance diffuse, avec une baisse du taux de polarisation.

Ces phénomènes sont effectivement ceux observés sur les mesures du facteur de réflectance d'un couvert. Nous avons vu (figure 2.23) que le stress hydrique n'apparaissait pas sur les données de luminance du soja, alors qu'il a souvent été remarqué que la floraison du maïs, comme l'épiaison du blé (figure 1.19) augmentait sa réflectance dans le visible.

Ces valeurs de ρ_{diff} obtenues ici semblent donc tout à fait cohérentes. Elles ne représentent pourtant qu'un ordre de grandeur de la réflectance diffuse. Nous allons donc essayer d'approfondir son estimation afin d'évaluer les contributions effectives des parties diffuse et spéculaire de la réflectance des parcelles.

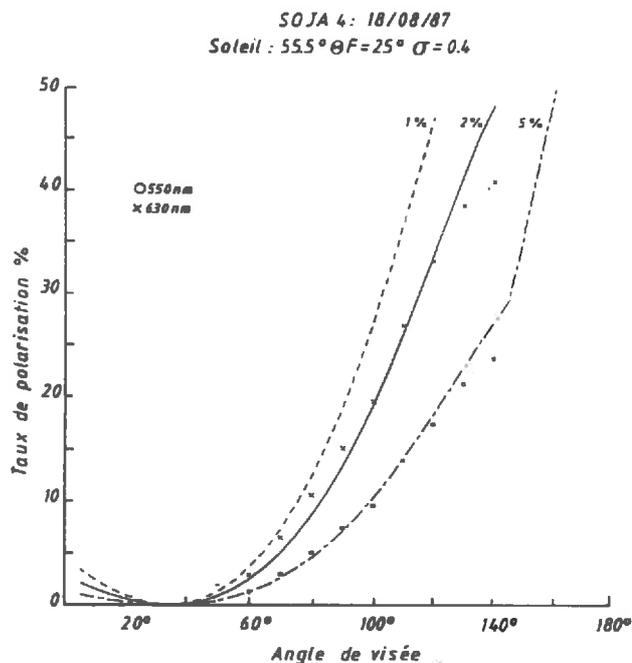
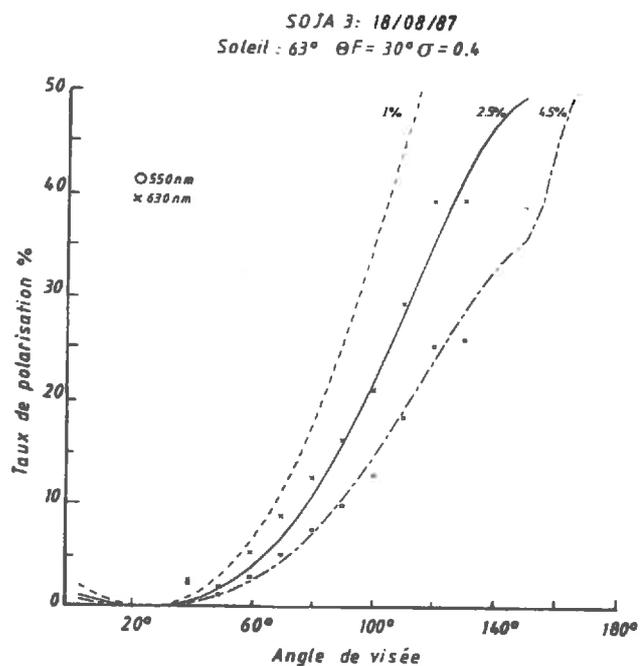
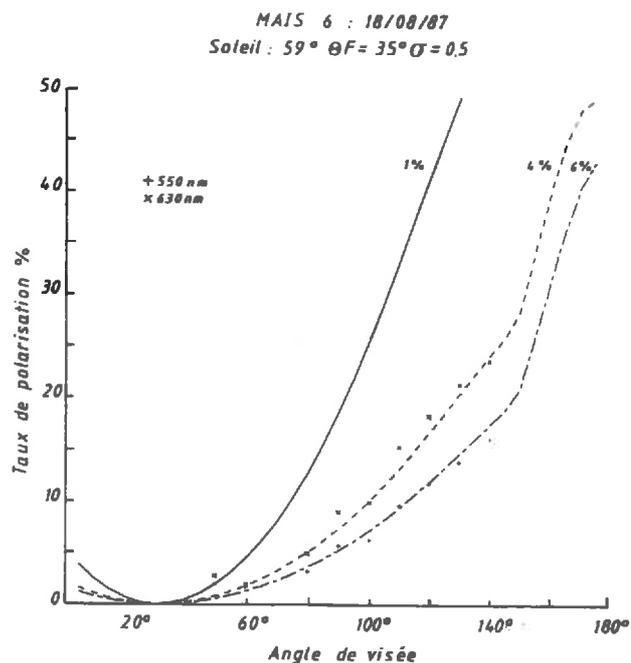
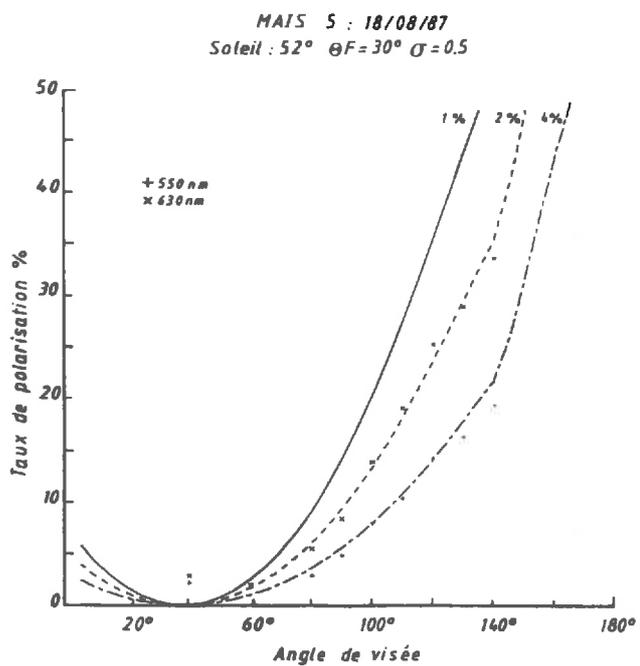


Figure 2.45 :

Essai d'ajustement des taux de polarisation mesurés, donnant un ordre de grandeur de la composante diffuse de la réflectance.

Mesures du 18/08/87, dans le plan solaire.



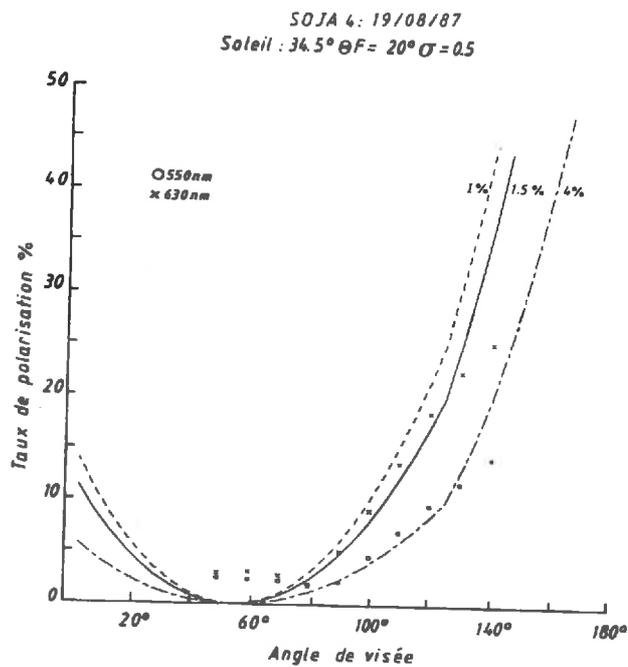
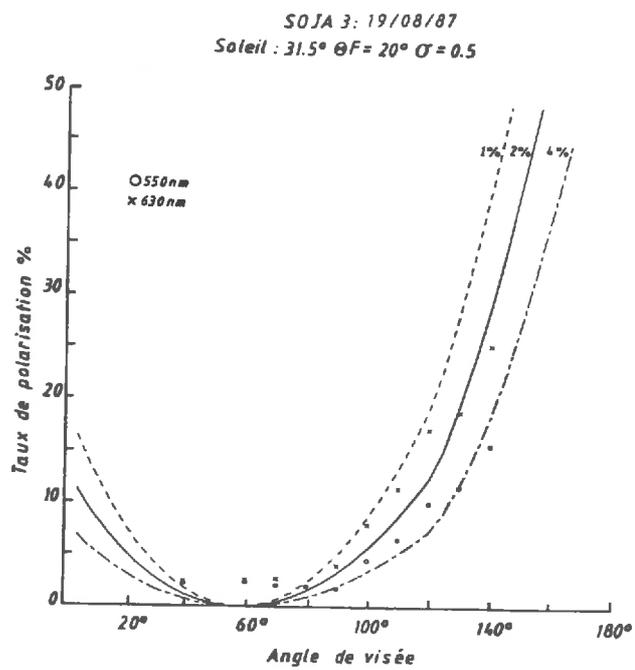
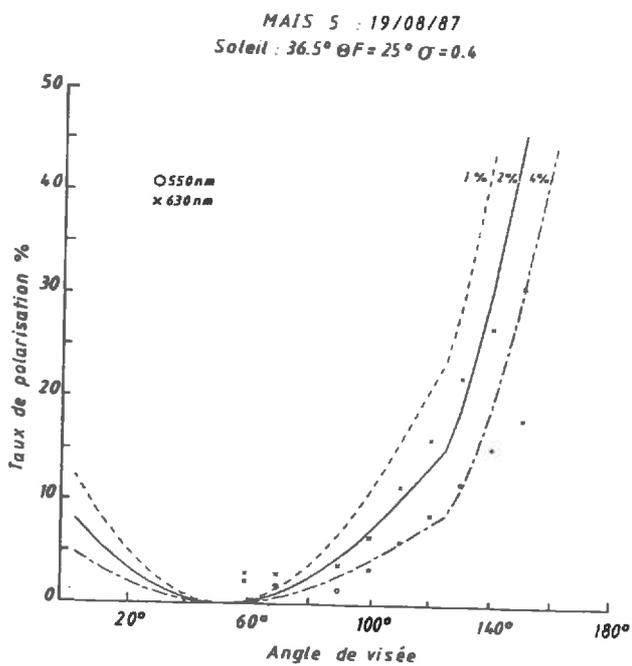


Figure 2.46 :
Mesures du 19/08/87 , dans le plan solaire.



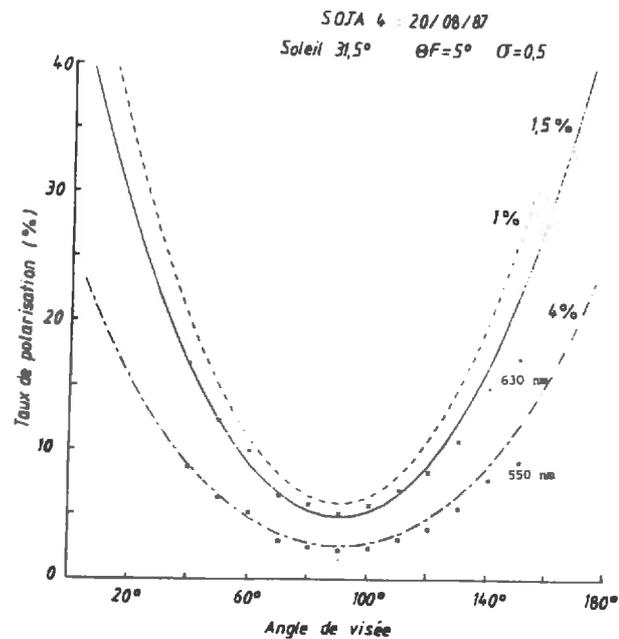
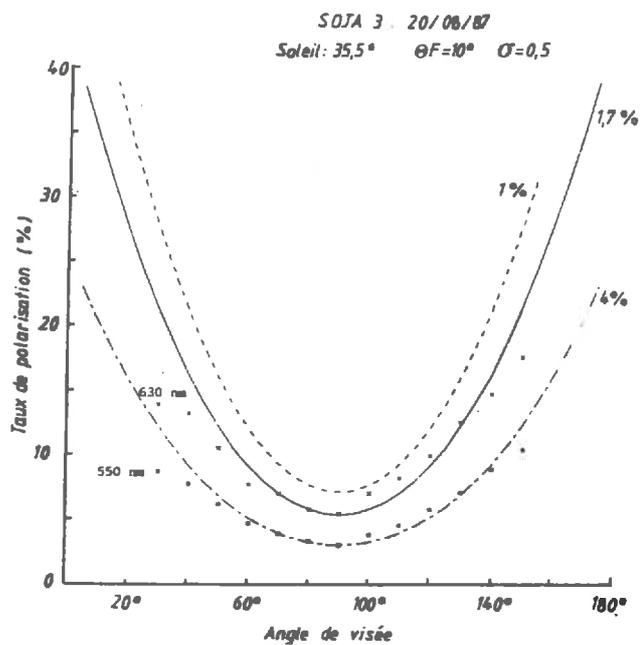
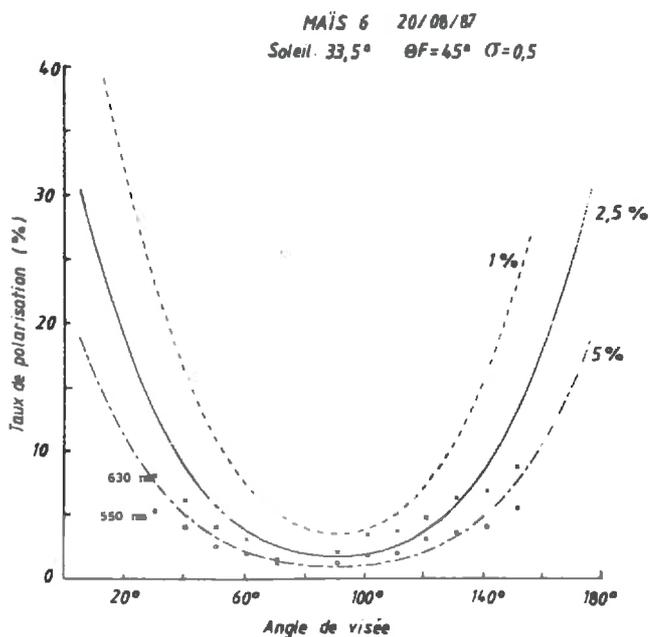
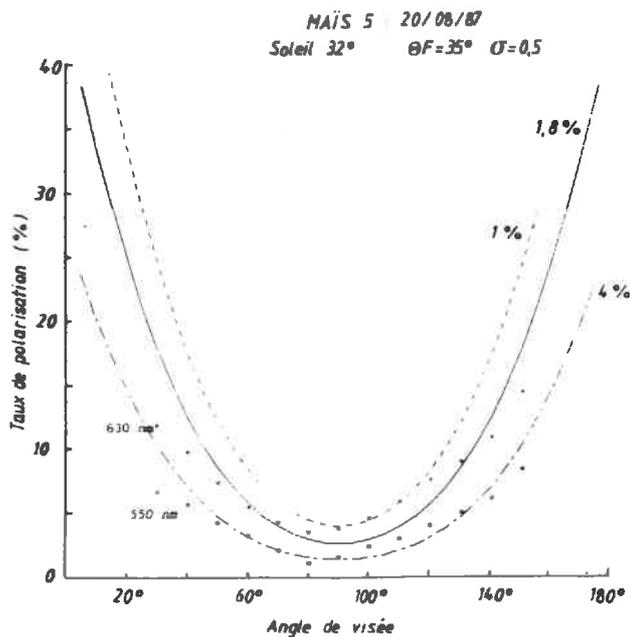
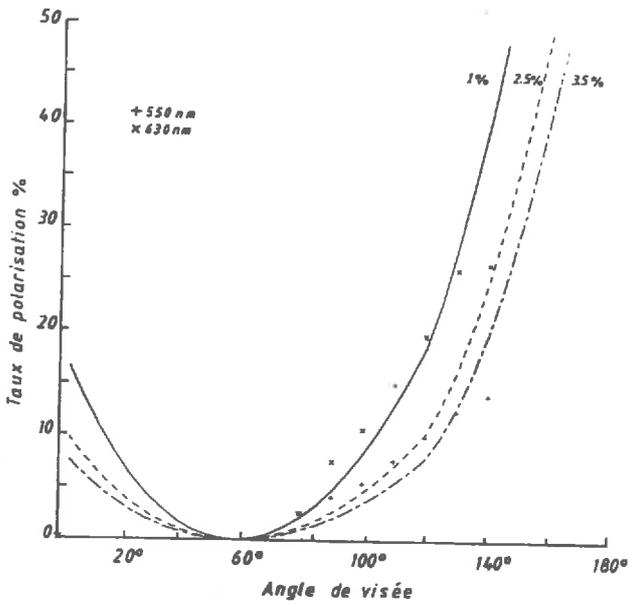


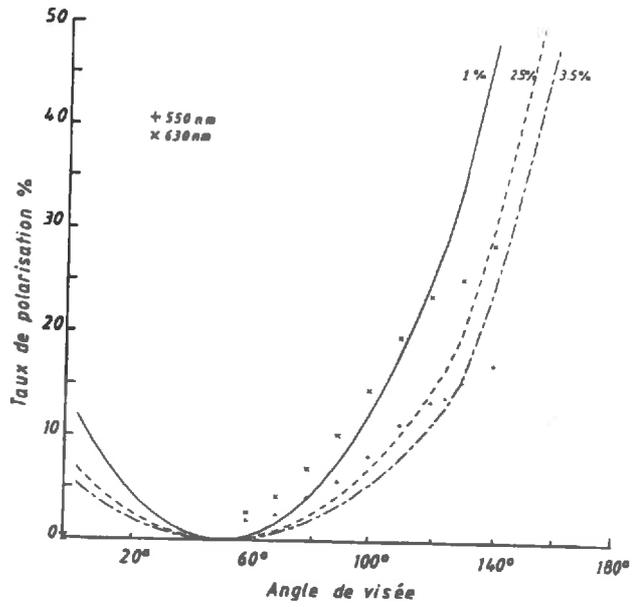
Figure 2.47 :
Mesures du 20/08/87 , dans le plan perpendiculaire.



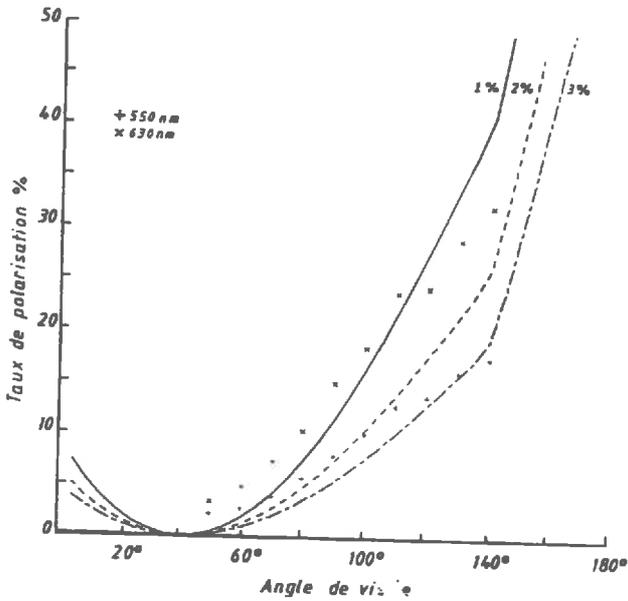
SOJA S: 26/07/88
Soleil : 31° $\theta F = 20^\circ \sigma = 0.5$



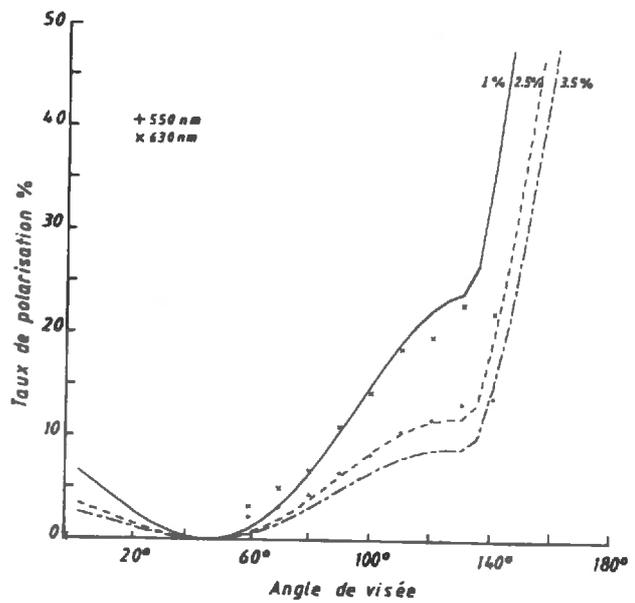
SOJA S: 05/08/88
Soleil : 38° $\theta F = 20^\circ \sigma = 0.5$



SOJA S: 10/08/88
Soleil : 49° $\theta F = 35^\circ \sigma = 0.5$



SOJA S: 18/08/88
Soleil : 43.5° $\theta F = 30^\circ \sigma = 0.3$



SOJA S: 30/08/88
Soleil : 49.5° $\theta F = 25^\circ \sigma = 0.4$

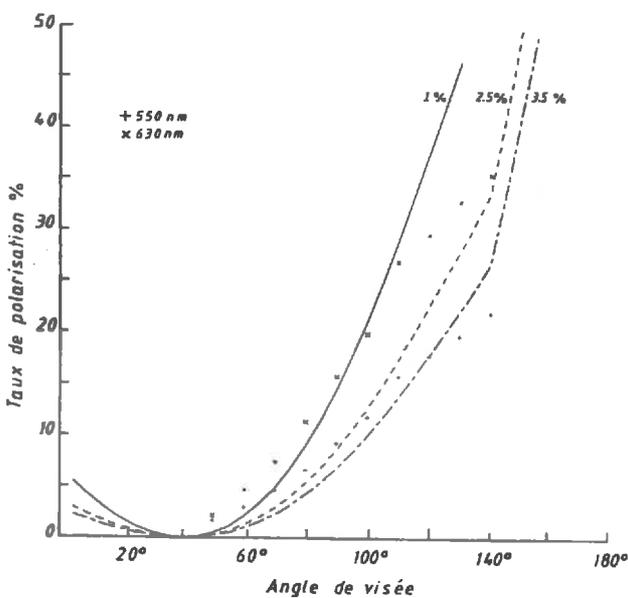


Figure 2.48 :
Mesures sur le soja S,
dans le plan solaire.

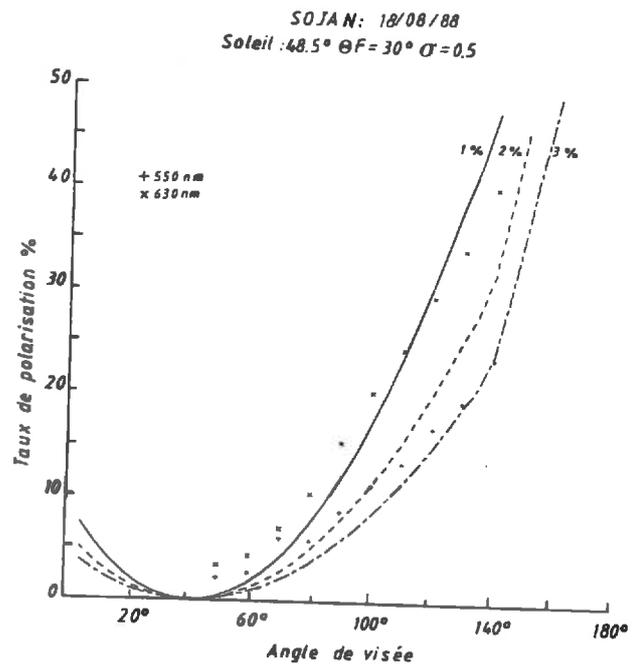
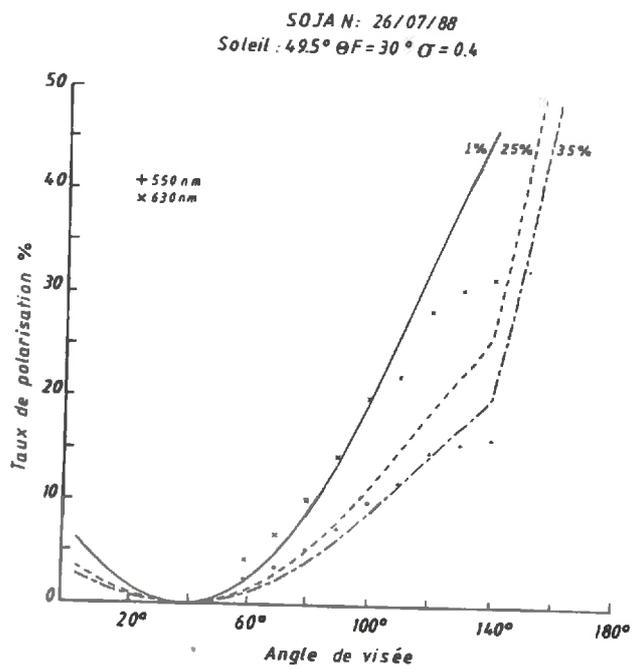


Figure 2.49 :
Mesures sur le soja N, dans le plan solaire.

2.3.3.4. Les luminances

La réflectance d'un couvert, mesurée dans une direction donnée, est la somme de ses deux composantes dans cette direction: spéculaire et diffuse. La réflectance spéculaire, provenant de la réflexion de Fresnel sur les surfaces foliaires du couvert, est calculée à l'aide de notre modèle. Les mesures expérimentales nous donnent la luminance totale directionnelle du couvert. Une façon d'évaluer la composante diffuse est donc de comparer cette luminance totale avec la luminance spéculaire théorique:

$$L_{\text{diff}}(\lambda) = L_{\text{tot}}^{\text{mes}}(\lambda) - L_{\text{sp}}$$

Ces différentes contributions de la luminance sont présentées sur les graphes des figures 2.50 à 2.54 pour différentes parcelles, dans les deux longueurs d'onde du visible (550 et 630 nm).

La partie spéculaire, issue du modèle, ne dépend pas de λ , mais de la géométrie du système (θ_i , θ_F , θ_R). On retrouve, comme sur les courbes de la réflectance polarisée, l'effet important aux grands angles de visée, face au soleil. En rétrodiffusion, aucun effet n'apparaît sur un couvert uniforme ($\sigma=0.5$), alors que sur un couvert dans lequel les feuilles ont une orientation mieux définie ($\sigma=0.3$, figure 2.53) on retrouve le petit maximum qui s'explique par l'uniformité de la répartition azimutale des feuilles.

A 550 nm, cette composante spéculaire reste faible par rapport à la luminance totale, et donc aussi par rapport à la composante diffuse. Par contre, à 630 nm, elle devient importante et parfois du même ordre de grandeur que la partie diffuse. Elle explique alors l'importance des taux de polarisation mesurés dans cette bande spectrale.

La composante diffuse apparaît non lambertienne. Ses variations directionnelles ne sont pas toujours très évidentes à cause de l'imprécision des points de mesure, mais l'allure générale en fait ressortir les principales caractéristiques. Là où la partie spéculaire est faible ou peu variable, cette diffusion est responsable de l'effet directionnel de la luminance totale observée. Dans le demi-plan anti-solaire, on observe systématiquement des valeurs élevées en rétrodiffusion. Cette

luminance diffuse est minimale en visée verticale, puis réaugmente sensiblement avec l'angle d'observation. Dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires (figures 2.52 et 2.53) la courbe est symétrique de part et d'autre de la visée verticale, qui correspond, sur les parcelles de soja, à la valeur maximale.

Pour les parcelles de maïs, les niveaux de luminance totale et diffuse sont visiblement plus élevés sur le maïs 6 (fleuri) que sur le maïs 5 (non encore fleuri), alors qu'au contraire la partie spéculaire est sensiblement plus faible pour la parcelle 6. Ces remarques rejoignent celles faites dans le paragraphe précédent lors de l'évaluation de la réflectance diffuse pour l'ajustement des taux de polarisation: ceux-ci sont plus faibles sur le maïs 6, fleuri.

Entre les parcelles de soja S et N (figure 2.54) les différences, comme attendu, sont moins marquées entre les luminances totales ou diffuses. La luminance totale ne varie pratiquement pas, mais sa partie diffuse apparaît quand-même légèrement inférieure sur la parcelle stressée (S). Cette baisse traduit l'augmentation de la partie spéculaire en rétrodiffusion, qui diminue au contraire aux grands angles de visée par rapport à la parcelle N. Mais seule cette diminution est marquée de façon évidente sur les taux de polarisation, car nous ne possédons pas de mesures significatives en rétrodiffusion (figure 2.48).

Ces variations respectives des composantes spéculaire et diffuse sont ici très importantes à prendre en considération: elles sont les seules à rendre compte des différences d'état phénologique entre les deux parcelles, puisque leurs comportements inverses font que la luminance totale reste inchangée.

Cette évaluation de l'importance et des comportements directionnels respectifs de ces composantes spéculaire et diffuse met en évidence l'intérêt de séparer la réflectance directionnelle d'un couvert végétal en ces deux parties distinctes, provenant de phénomènes physiques différents.

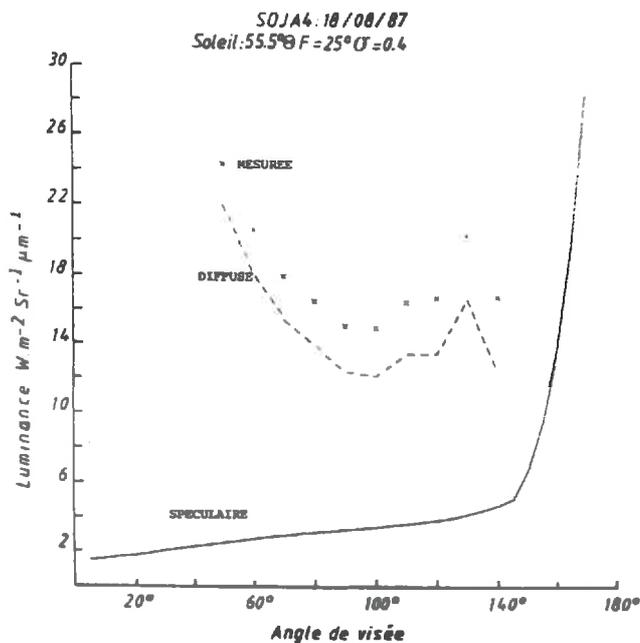
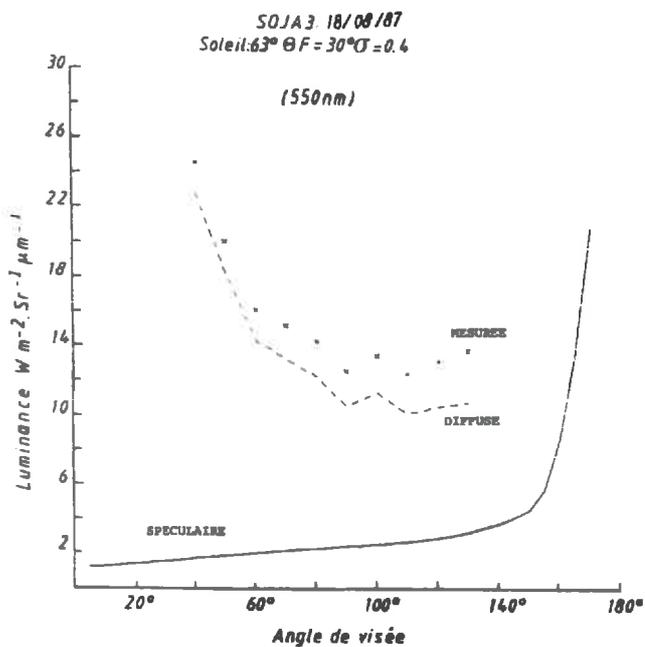
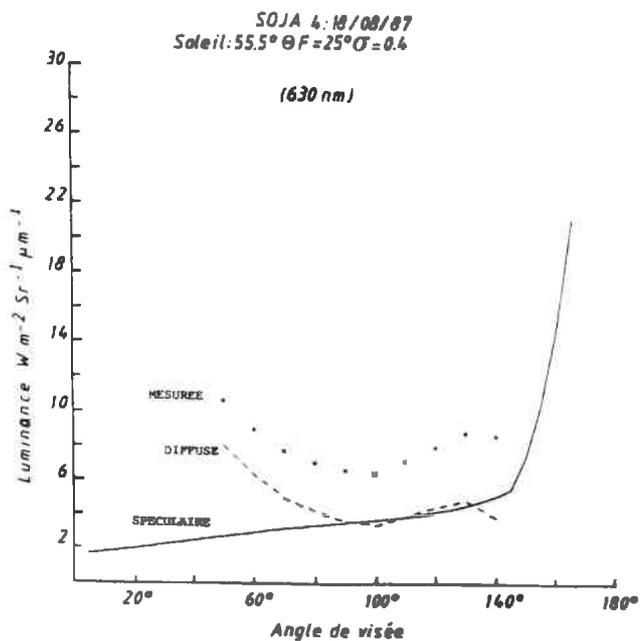
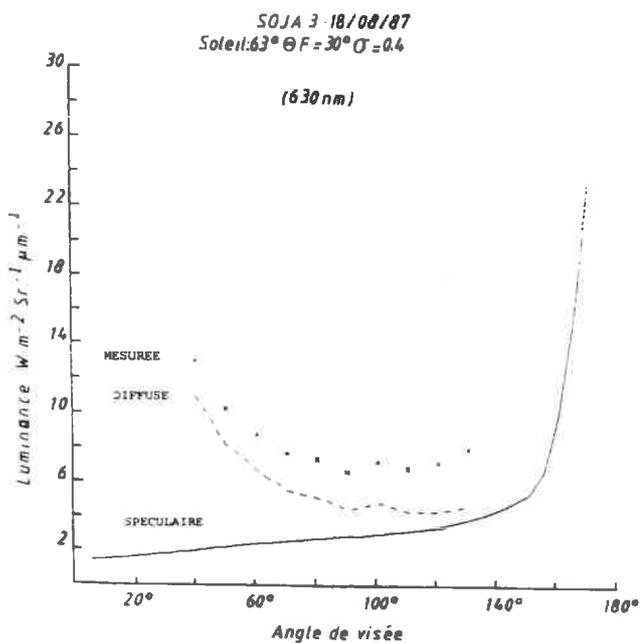


Figure 2.50 :

Evaluation des composantes spéculaire et diffuse de la luminance d'un couvert végétal, à 550 et 630 nm.

Mesures sur les parcelles de soja, le 18/08/87, dans le plan solaire.



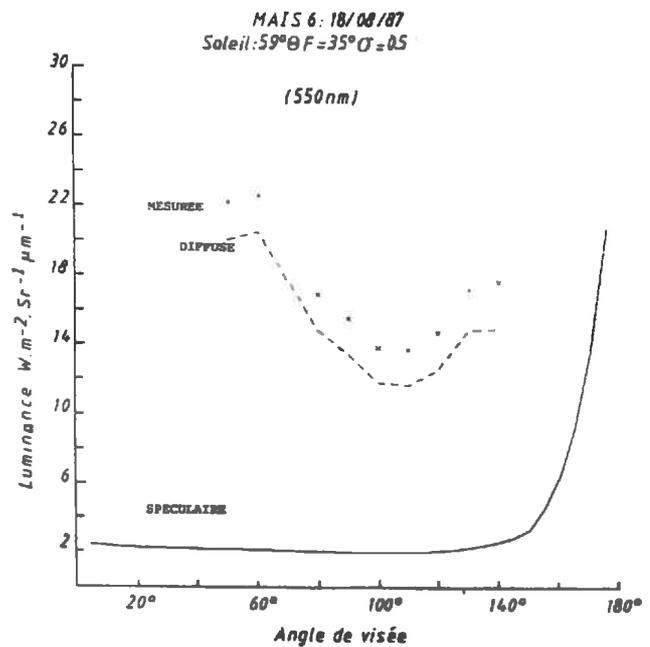
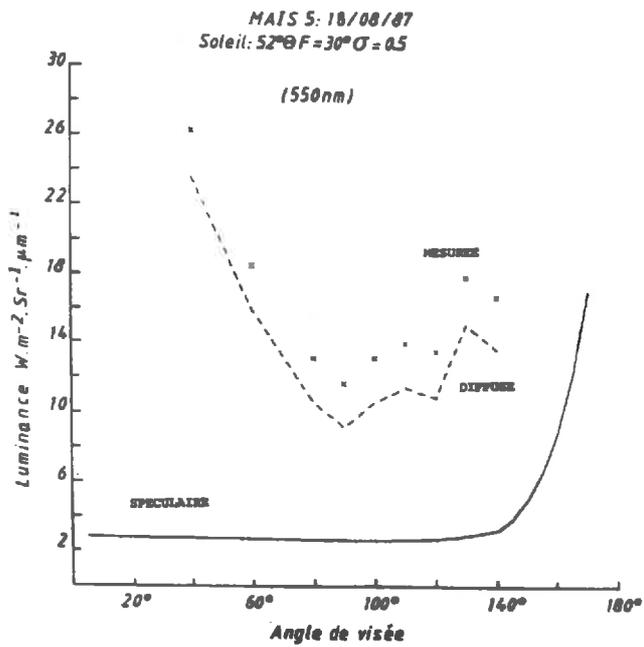
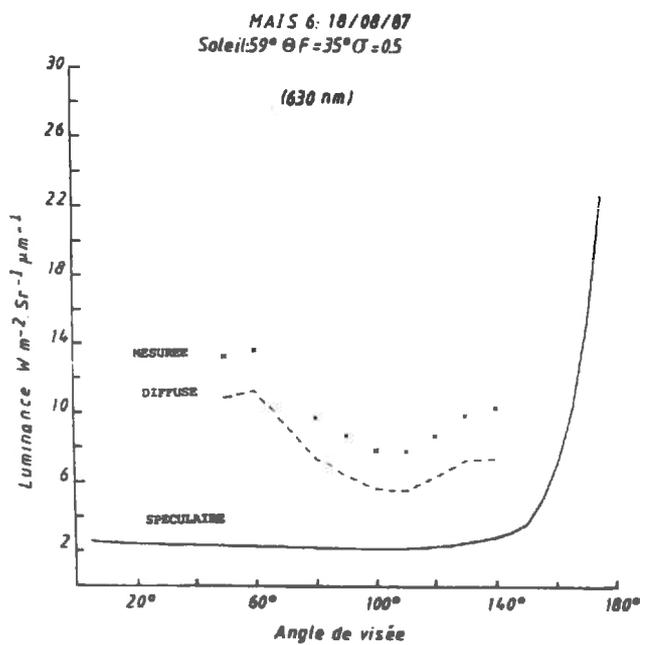
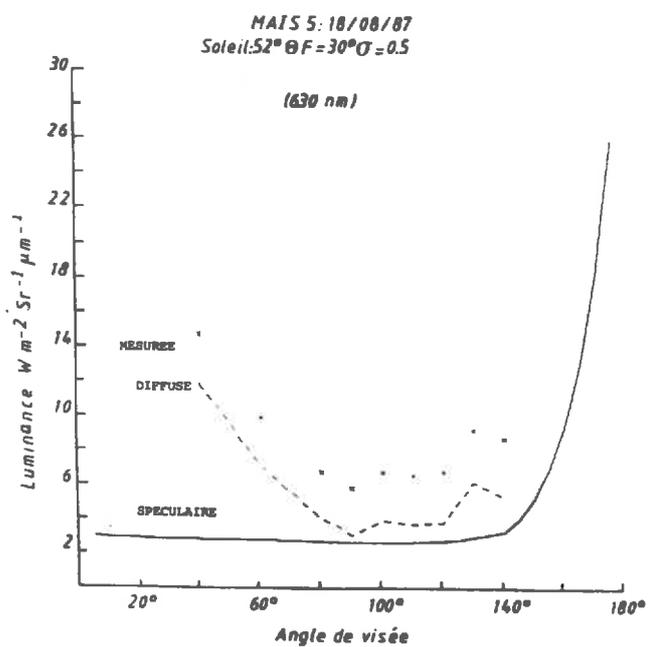


Figure 2.51:

Mesures sur les parcelles de maïs, le 18/08/87, dans le plan solaire.



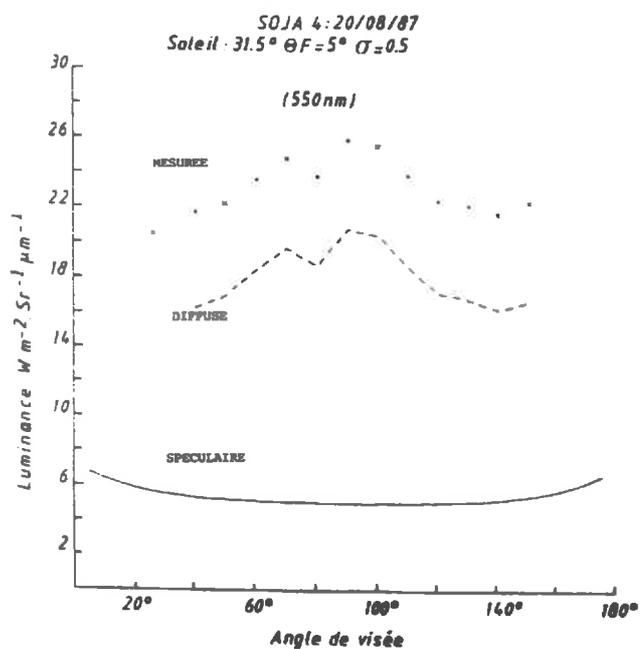
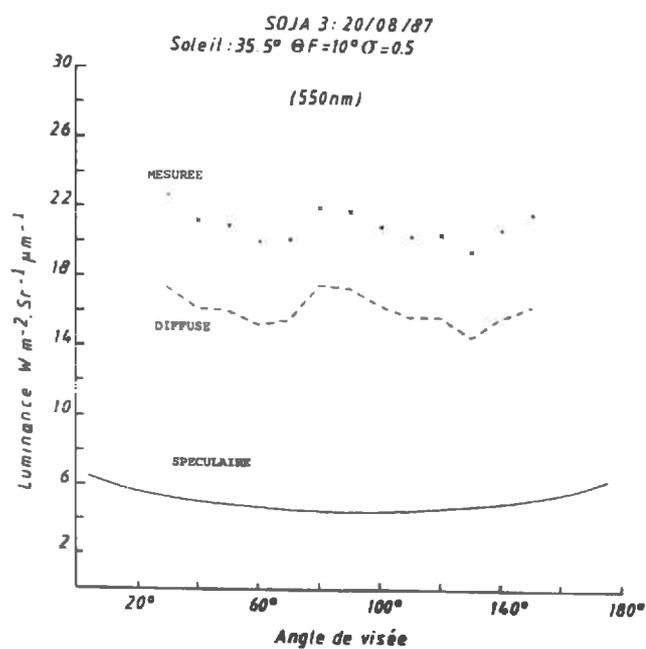
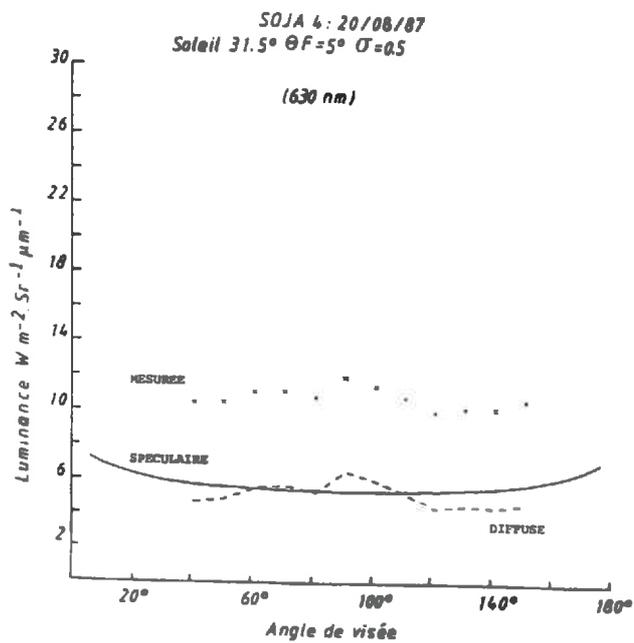
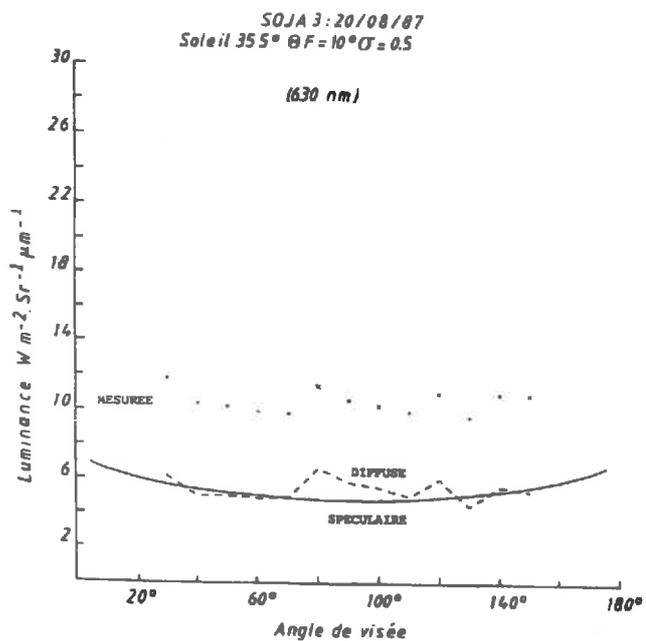


Figure 2.52:

Mesures sur les parcelles de soja, le 20/08/87, dans le plan perpendiculaire.



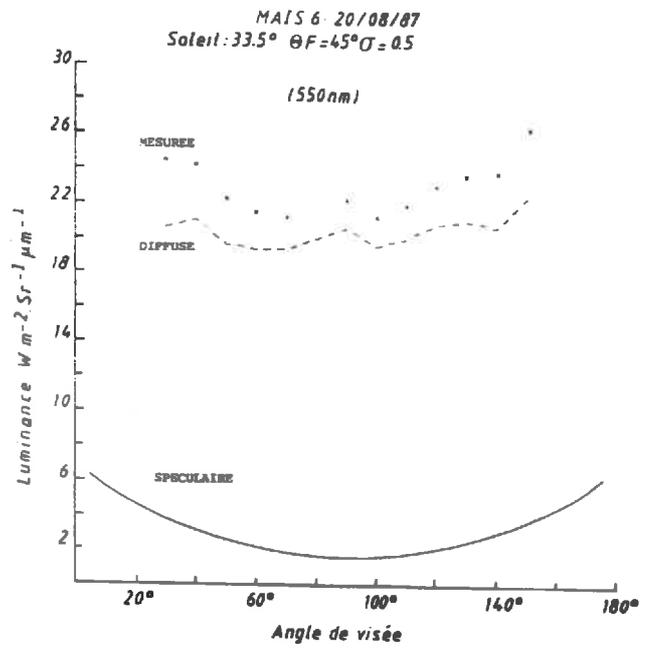
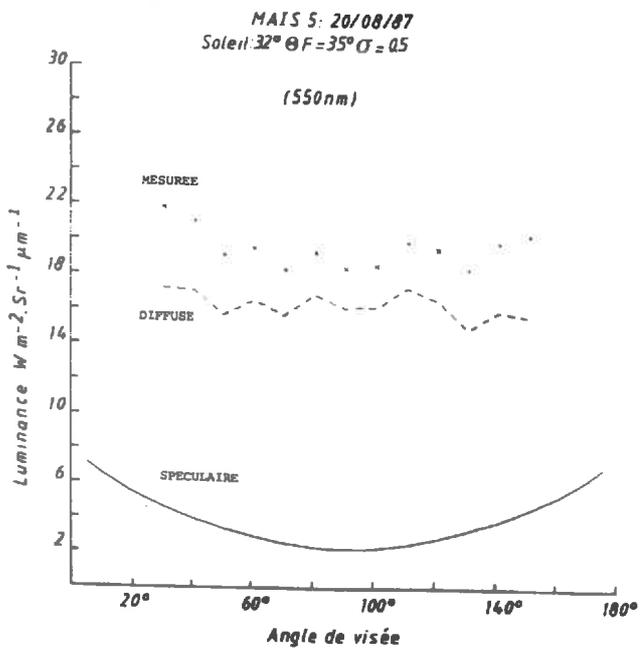
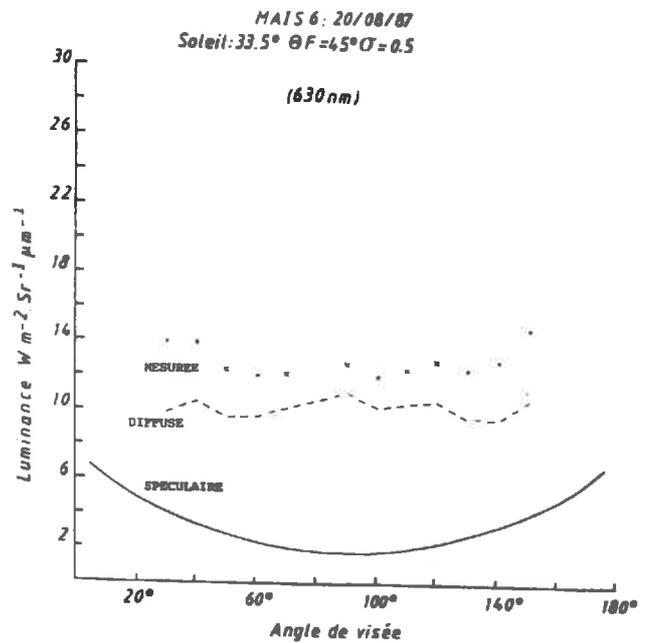
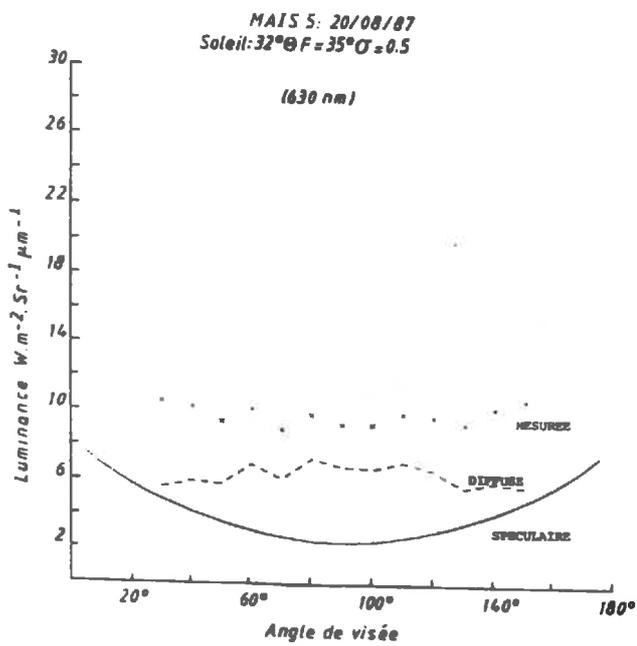


Figure 2.53 :

Mesures sur les parcelles de maïs, le 20/08/87, dans le plan perpendiculaire.



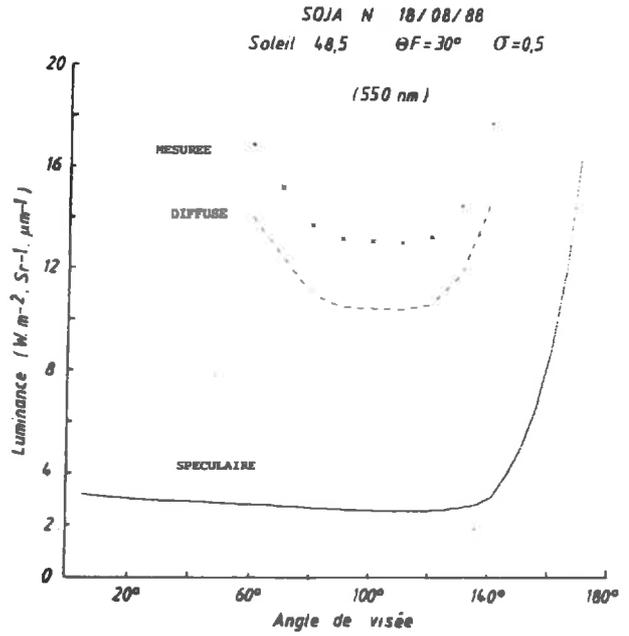
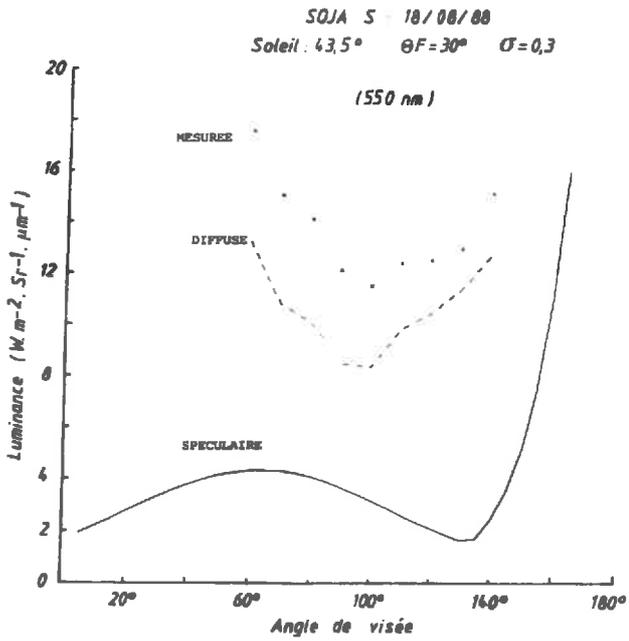
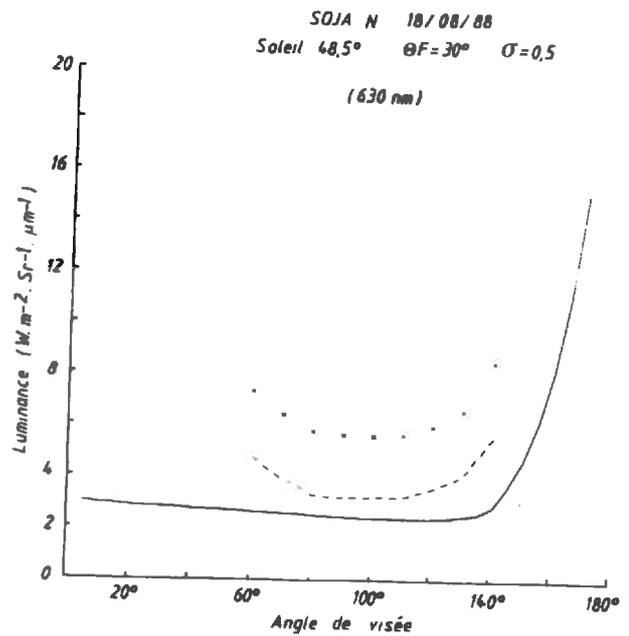
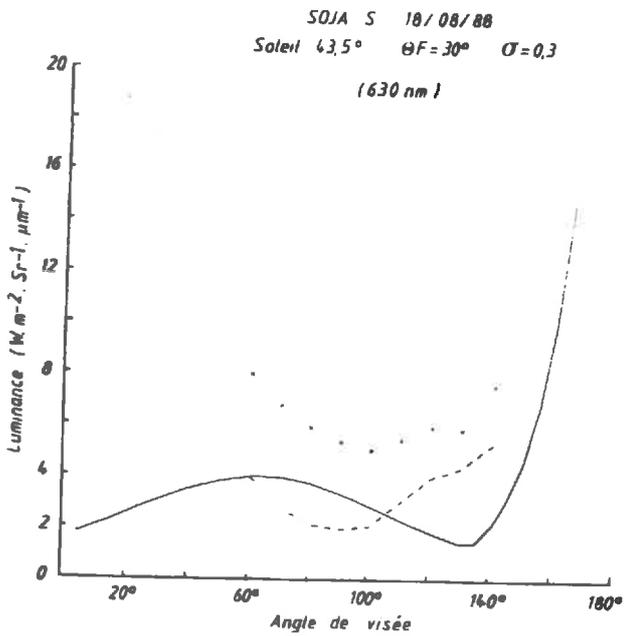


Figure 2.54 :

Mesures sur les parcelles de soja, le 18/08/88, dans le plan solaire.



CONCLUSION PARTIELLE

Après l'analyse bibliographique faisant ressortir l'intérêt de la mesure de polarisation sur un couvert végétal, cette deuxième partie donne un bon aperçu des possibilités effectives d'exploitation de ces mesures.

Nous avons eu la chance de pouvoir disposer d'un site expérimental particulier. Grâce au système ingénieux d'installation des instruments d'acquisition de données sur une platine orientable fixée sous le chariot de flèche d'une grue, nous avons pu réaliser les mesures dans des géométries d'éclairement et d'observation très précises. Le fait que ce site soit situé dans le Sud de la France a aussi assuré un bon ensoleillement. Ces conditions sont importantes dans notre étude, et nous ont donc permis d'obtenir des résultats relativement précis, compte-tenu bien-sûr des étalonnages de l'appareil de mesure utilisé.

Ces mesures ont confirmé l'importance quantitative des taux de polarisation de la lumière par la végétation, puisque ceux-ci peuvent atteindre plus de 40% à certaines longueurs d'onde (630 nm) sur un couvert en pleine croissance, bien homogène et couvrant.

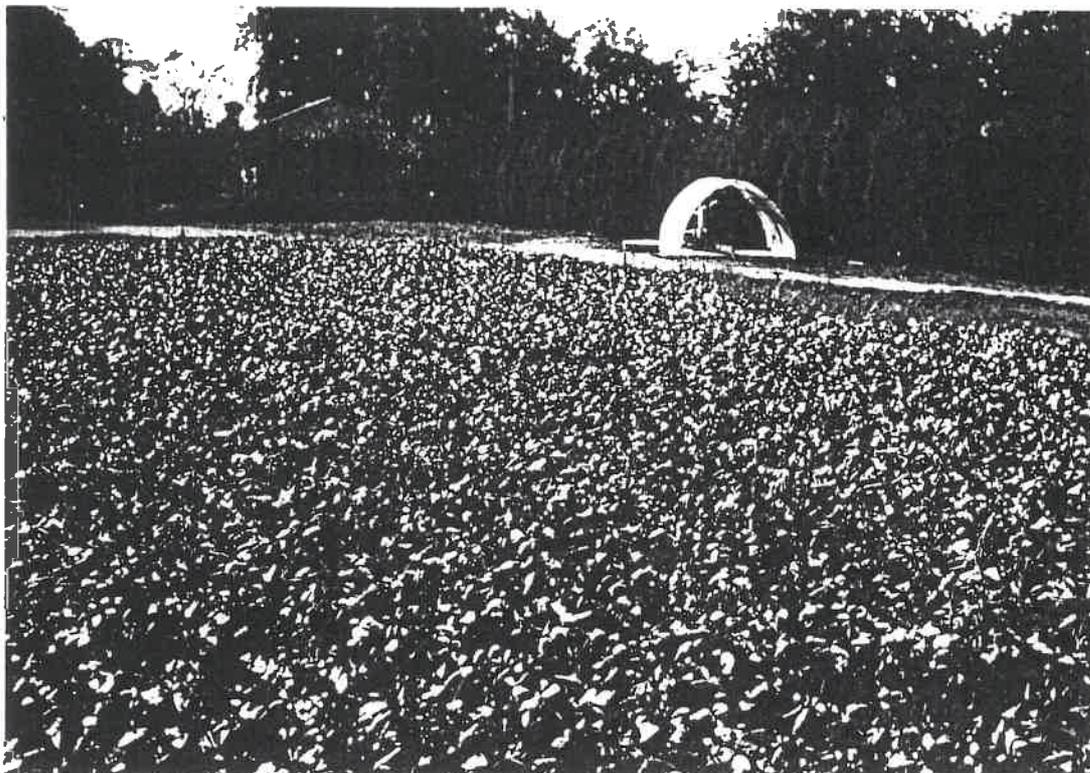
Une modélisation relativement simple de la réflexion spéculaire permet de retrouver assez bien ces observations, et confirme donc notre hypothèse de départ, c'est-à-dire que la polarisation de la lumière réfléchie par la végétation est essentiellement due à la réflexion spéculaire du rayonnement solaire sur les feuilles. Les différences importantes se situent d'une part aux très grands angles de visée, où le modèle prévoit un fort "effet de limbe", et d'autre part en rétrodiffusion, où le modèle s'annule systématiquement et où les valeurs mesurées peuvent provenir d'un autre phénomène, tel la diffusion multiple.

Il est apparu aussi que le fait de disposer sur les mêmes parcelles de mesures réalisées d'une part dans le plan solaire, et d'autre part dans le plan perpendiculaire, pouvait apporter un complément appréciable à l'interprétation des mesures obtenues dans un seul plan. Il semblerait alors qu'à partir des confrontations des résultats dans ces deux plans, la distinction des différentes végétations et de leur état "géométrique" soit possible.

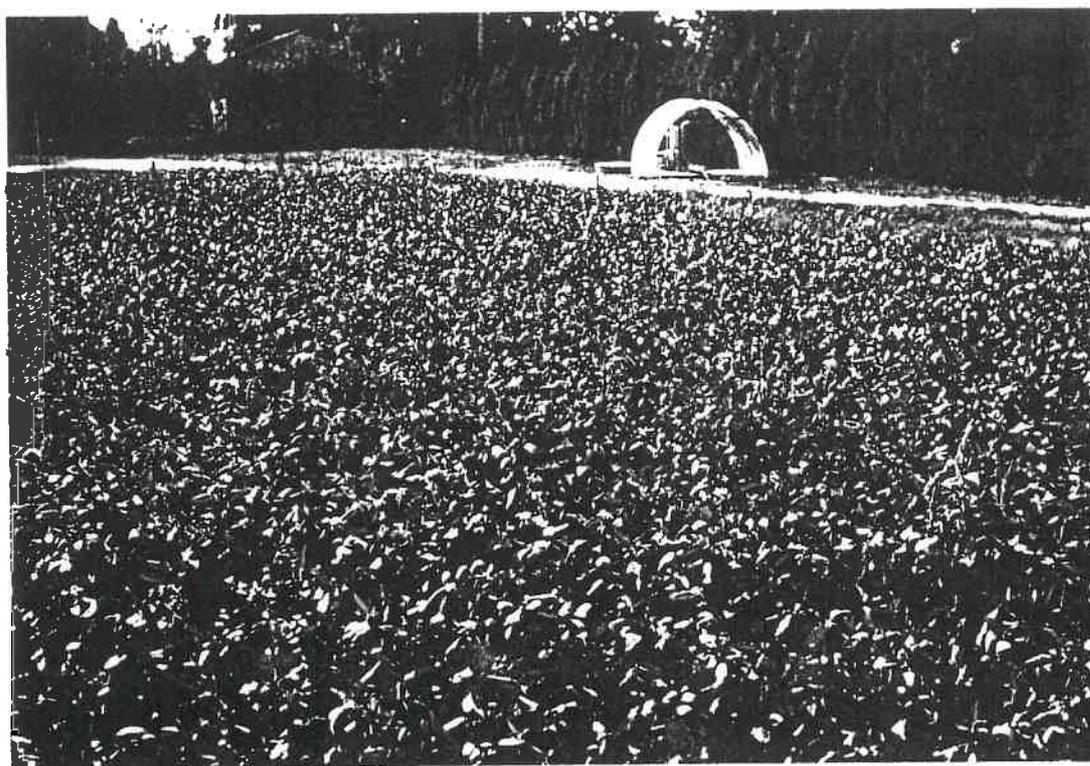
Le problème majeur de cette modélisation réside dans la difficulté de rendre compte de la structure d'un couvert à travers sa fonction d'inclinaison de feuilles. Cette fonction est caractéristique d'un couvert dans son ensemble, pendant tout son cycle végétatif, alors qu'elle nous serait nécessaire ici sur un jour particulier, avec donc toutes les petites variations naturelles qui peuvent intervenir d'un jour à l'autre. Il semble donc qu'un modèle gaussien soit trop simpliste pour maîtriser quantitativement l'ensemble des phénomènes observés.

Cette modélisation nous fournit des ordres de grandeur appréciables. Ceux-ci nous permettent, si l'on accepte cette théorie, d'estimer la composante spéculaire du facteur de réflectance total d'un couvert, et donc de comparer l'importance respective des phénomènes de réflexion spéculaire et de diffusion dans la végétation pour chaque géométrie d'éclairement et d'observation. La partie spéculaire, souvent négligée, est à certaines longueurs d'onde (rouge en particulier) du même ordre de grandeur que sa compagne diffuse. Aux angles d'observation normalement utilisés lors de mesure, et pour des végétations assez uniformes, elle ne présente pas d'effets directionnels importants. C'est alors la composante diffuse qui contrôle ces effets que l'on retrouve sur la réflectance totale.

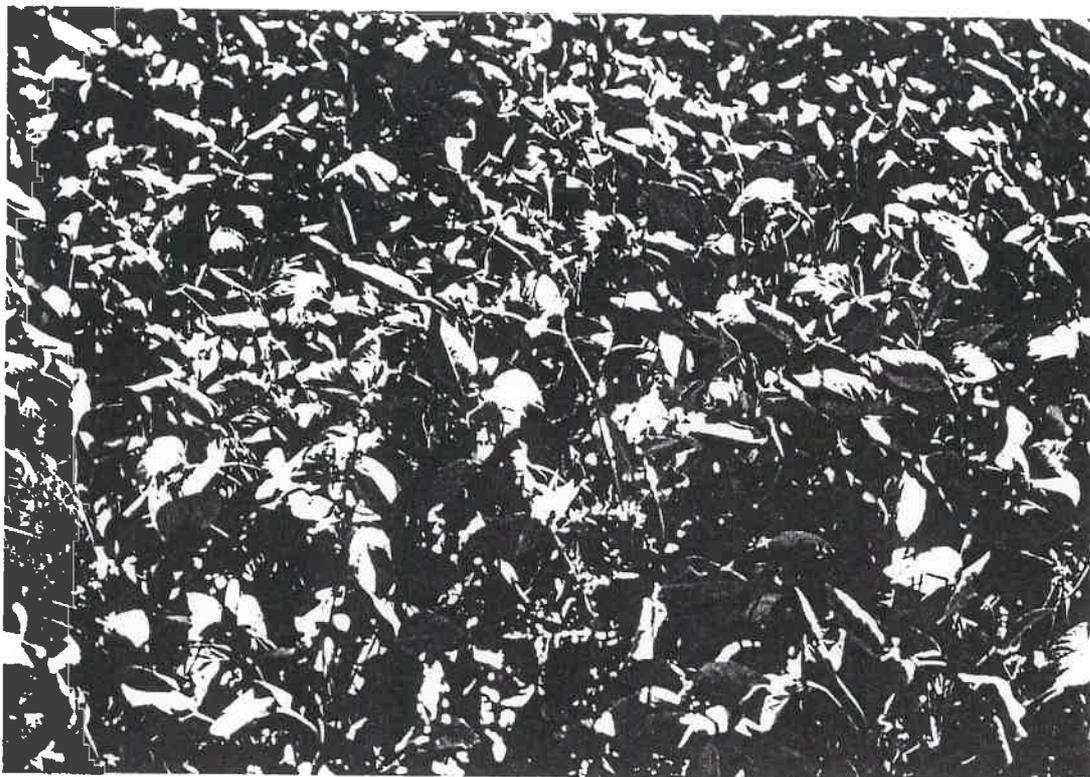
Une modélisation de cette réflectance diffuse s'avère donc nécessaire pour en donner une meilleure estimation. Cette modélisation fait l'objet de notre troisième partie.



Parcelle de soja photographiée avec un filtre polariseur positionné au maximum de luminosité. Les feuilles qui apparaissent blanches, réfléchissent spéculairement vers l'objectif.



Même prise de vue, après rotation du polariseur jusqu'à obtention du minimum de luminosité.



Ces deux photos, prises à des positions différentes du polariseur, mettent en évidence l'importance et la complexité de l'inclinaison des feuilles dans le phénomène de polarisation.

La réflexion spéculaire, apparaissant très brillante sur la photo ci-dessus, est nettement "éteinte" sur certaines feuilles de la photo ci-dessous, mais pas sur d'autres feuilles de positions différentes.



PARTIE 3

MODELISATION DU TRANSFERT RADIATIF AU SEIN D'UN COUVERT VEGETAL

Le rayonnement solaire, direct et diffus, qui pénètre dans la végétation peut être en partie absorbé par les feuilles et le sol, ou rediffusé (ou réfléchi) par ceux-ci. Le rayonnement ainsi rediffusé peut soit ressortir de la végétation, soit être lui-même rediffusé par d'autres éléments du couvert végétal (PREVOT, 1985).

A un niveau donné du couvert, le bilan radiatif est donc constitué par la fraction du rayonnement incident qui a pénétré jusqu'à ce niveau sans être intercepté, ainsi que par le rayonnement plutôt diffus, montant et descendant, issu des multiples rediffusions sur les feuilles et le sol. La réflectance du couvert provient de l'ensemble du rayonnement issu d'au-moins une réflexion ou diffusion sur une feuille ou sur le sol, et qui réémerge du couvert.

Ce bilan est relatif aux courtes longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge. Dans l'infrarouge thermique il faudrait aussi tenir compte de l'émission propre de chaque élément.

Après un très rapide rappel des modèles traditionnels utilisés dans la littérature, nous allons voir comment l'équation générale du transfert radiatif en milieu diffusant peut être adaptée à la végétation, et comment la résoudre de façon suffisamment simple et précise.

3.1 LE TRANSFERT RADIATIF

3.1.1. Introduction

Le développement de l'étude des couverts végétaux par télédétection a conduit à la mise au point de modèles d'échanges radiatifs d'une part au sein de la végétation et d'autre part entre celle-ci et l'atmosphère. Ces modèles ont été développés depuis de nombreuses années, en essayant de relier la réflectance aux paramètres du couvert.

Certains modèles cherchent en particulier à quantifier l'énergie disponible pour la photosynthèse et l'efficacité de celle-ci (BARET, 1986): ils sont basés essentiellement sur une approche déterministe qui tient compte de l'évolution de chacun des paramètres.

Une autre approche, dite "probabiliste" (PREVOT, 1985), consiste à caractériser ces échanges par des "fréquences de trous", définies comme les probabilités de non interception d'un rayon lumineux par la végétation dans une direction donnée; la végétation étant discrétisée en couches horizontales homogènes. Ce formalisme a permis en particulier d'étendre ces études aux grandes longueurs d'onde.

D'autres modèles décrivent la pénétration du rayonnement incident dans un milieu diffusant par un système d'équations différentielles traduisant les différents flux montants ou descendants, reçus et diffusés par chaque élément du couvert (tableau 3.1). SUITS (1972) fut le premier à utiliser ces équations dans un couvert végétal. Il représente les feuilles par leurs projections sur des plans horizontaux et verticaux, et donne une signification physique aux coefficients qui interviennent dans ces équations. Le modèle de SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) (VERHOEF, 1984) est une extension du modèle de SUITS, où la représentation des feuilles par leurs projections est remplacée par une fonction de distribution (discrète) des inclinaisons des feuilles. Ce dernier modèle est plus précis dans sa description de la réflectance des couverts végétaux, et apparaît souvent comme référence de base pour les nouvelles études.

Les lois du transfert en milieu diffusant peuvent être approchées par un système de trois équations différentielles du premier ordre :

$$\frac{dE_s}{dz} = -k E_s$$

$$\frac{dE_-}{dz} = -sE_s + aE_- - \sigma E_+$$

$$\frac{dE_+}{dz} = s'E_s + \sigma E_- - aE_+$$

où: z est la profondeur du couvert végétal ($z=0$ au sommet du couvert)

E_s le flux solaire directionnel incident

E_- le flux diffusé vers le bas

E_+ le flux diffusé vers le haut

k le coefficient d'extinction du flux solaire direct

s le coefficient de diffusion du flux solaire

s' le coefficient de rétrodiffusion du flux solaire

a le coefficient d'atténuation des flux diffus

σ le coefficient de diffusion des flux diffus

Tableau 3.1 :

Equations de base des modèles basés sur les lois de transferts radiatifs en milieu diffusant (d'après VERHOEF, 1984).

Ces dernières années, les modèles ont plutôt tendance à rechercher une approche "généralisée", par la résolution de l'équation générale du Transfert Radiatif en milieu diffusant, appliquée au couvert végétal (CAMILLO, 1987; SHULTIS et MYNENI, 1988). Cette approche apparaît apporter une précision supplémentaire d'une part au niveau du formalisme des phénomènes diffusants, qui est celui utilisé régulièrement dans les problèmes de diffusions atmosphériques, dans un domaine spectral plus large; et d'autre part dans la prise en compte des diffusions multiples, selon la méthode de résolution choisie. Pour bien mettre en évidence ces diffusions et leur importance, nous avons choisi de résoudre l'équation du Transfert Radiatif par la méthode dite "des ordres successifs", qui consiste à calculer la luminance du rayonnement diffusé n fois à partir de celui diffusé $(n-1)$ fois. Avant de détailler cette résolution, nous allons d'abord rappeler le formalisme général du Transfert Radiatif en précisant et développant les grandeurs caractéristiques à la végétation.

3.1.2. Transfert radiatif dans un milieu absorbant et diffusant

L'équation du Transfert Radiatif a été établie dans le but de rendre compte de la propagation du rayonnement dans l'atmosphère. Cette propagation est soumise aux diffusions multiples qui se produisent lorsque le rayonnement rencontre les molécules d'air et les aérosols (cas de l'atmosphère claire) ou les formations nuageuses et les brouillards (atmosphère non claire). Le cas le plus fréquent est celui d'un rayonnement se propageant dans un milieu à la fois absorbant et diffusant. C'est aussi le cas d'un couvert végétal où les feuilles absorbent une partie du rayonnement incident et réfléchissent ou rediffusent l'autre partie.

Le formalisme de ce modèle suppose que les particules ou éléments diffusants soient séparés d'une distance suffisante pour qu'ils diffusent indépendamment les uns des autres.

De façon schématique, on peut décrire la diffusion multiple comme étant la manifestation du phénomène physique suivant: lorsqu'une source rayonne sur un centre diffusant formé de N particules, chacune

des particules est exposée d'une part au rayonnement de la source (atténué par les autres particules) et d'autre part au rayonnement diffusé par d'autres particules. Dans ce cas, le rayonnement diffusé n'est pas égal à N fois le rayonnement diffusé par une particule. Cette égalité n'est satisfaite que dans le cas de diffusion simple ou primaire (rayonnement diffusé une seule fois car il ne rencontre sur le trajet entre source et récepteur qu'une seule particule).

Le milieu dans lequel se propage le rayonnement sera caractérisé en chaque point par un coefficient d'extinction (somme des coefficients d'absorption et de diffusion) et une fonction décrivant le mode de répartition du rayonnement diffus en fonction de l'angle que font entre elles les directions d'incidence et de diffusion: la fonction de phase.

L'équation de base utilisée est celle établie dans l'approximation d'une atmosphère "plan-parallèle". On dit qu'un milieu peut être assimilé à une "couche plan-parallèle" quand les propriétés physiques du milieu varient beaucoup plus rapidement suivant la verticale qu'en fonction des dimensions horizontales. Cette couche représente avec une bonne approximation les atmosphères planétaires. Elle semble aussi relativement bien appropriée dans le cas d'un couvert végétal pour lequel on suppose une distribution de pentes de feuilles uniforme en azimut, et rejoint ainsi les différents formalismes qui décomposent habituellement le couvert en une superposition de couches horizontales.

3.1.3. Equation de Transfert dans une atmosphère "plan-parallèle"

En un point M , repéré par sa coordonnée verticale z (figure 3.1), soient:

$I(z, \theta, \varphi)$: la luminance dans la direction (θ, φ)

$k_\lambda, \sigma_\lambda, \kappa_\lambda$: les coefficients, respectivement, d'absorption, de diffusion et d'extinction

$p(\theta)$: la fonction de phase.

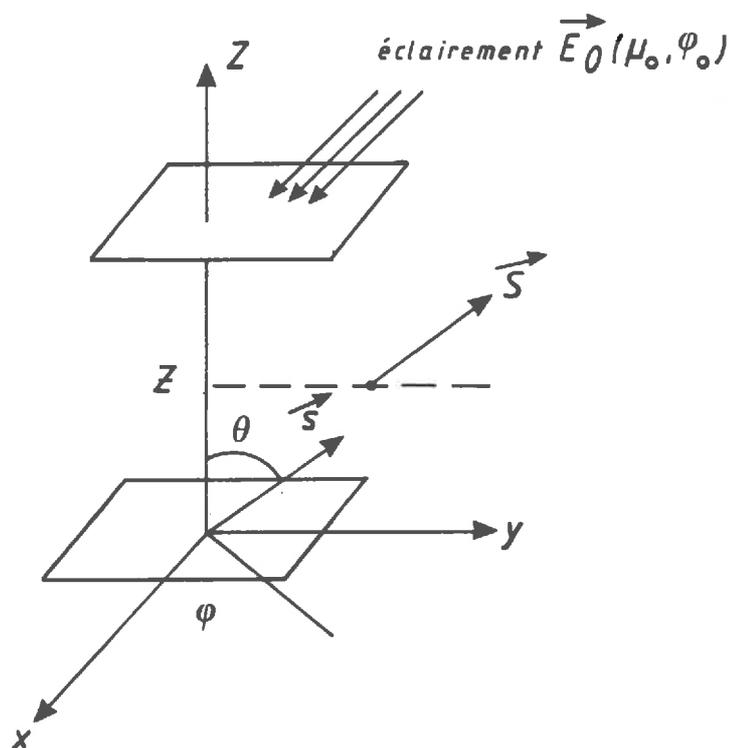


Figure 3.1 : atmosphère "plan-parallèle".

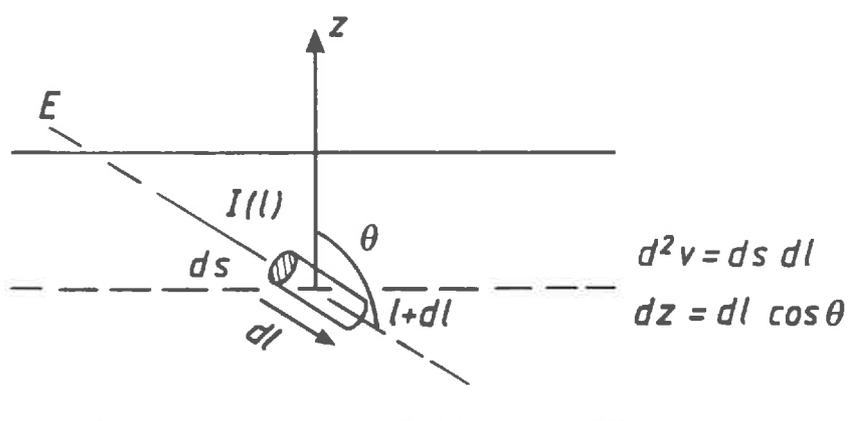


Figure 3.2 :

Atténuation du rayonnement lors de sa traversée d'un élément de volume $dv = ds \cdot dl$ de la couche diffusante.

Lors de la traversée d'un élément de volume $dv = dl \cdot ds$ (figure 3.2), la luminance I , en l , devient $I + dI$ en $l + dl$, où dI est la somme de deux contributions:

- une perte (dI_1) des photons se propageant suivant (θ, φ) en l , et absorbés ou diffusés dans d'autres directions. Par définition du coefficient d'extinction, ce terme s'écrit:

$$\frac{dI_1}{I} = - \kappa_\lambda dl \quad (1)$$

avec $\kappa_\lambda = k_\lambda + \sigma_\lambda$

- un gain (dI_2) de photons provenant d'autres directions (θ', φ') , et diffusés dans la direction (θ, φ) :

Par définition du coefficient de diffusion et de la fonction de phase, le flux diffusé par l'élément de volume dv dans un angle solide $d\omega$ autour de la direction (θ, φ) , provenant du rayonnement dans un angle solide $d\omega'$ autour de (θ', φ') , est:

$$d^2\Phi = d\omega \sigma_\lambda dv \frac{p(\theta)}{4\pi} I d\omega'$$

(où le facteur $1/4\pi$ provient de la normalisation standard de la fonction de phase p)

soit:

$$d^2I_2 = \frac{d^2\Phi}{ds d\omega} = \sigma_\lambda dl \frac{p(\theta)}{4\pi} I d\omega'$$

et au total, en sommant sur toutes les directions (θ', φ') :

$$dI_2 = \frac{\sigma_\lambda dl}{4\pi} \int \int p(\theta) I(\theta', \varphi') d\omega' \quad (2)$$

Le bilan radiatif s'écrit donc:

$$dI = dI_1 + dI_2$$

et avec $dz = dl \cos\theta = \mu dl$ (figure 3.2), et à l'altitude z , l'équation finale se met sous la forme:

$$\mu \frac{\partial I_\lambda}{\partial z}(z, \theta, \varphi) = - \kappa_\lambda(z) [I_\lambda(z, \theta, \varphi) - J_\lambda(z, \theta, \varphi)] \quad (3)$$

où

$$J(z, \theta, \varphi) = \frac{\omega(z)}{4\pi} \int \int p(z, \theta, \varphi, \theta', \varphi') I(z, \theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi' \quad (4)$$

est appelée "fonction source", telle que:

$$\omega = \frac{\sigma_\lambda}{k_\lambda + \sigma_\lambda} = \text{l'albedo}$$

En fonction de l'épaisseur optique τ de la couche atmosphérique, définie dans la couche (z, z_0) par:

$$\tau = \int_z^{z_0} \kappa_\lambda(z') dz'$$

cette équation devient:

$$\mu \frac{\partial I}{\partial \tau}(\tau, \mu, \varphi) = I(\tau, \mu, \varphi) - J(\tau, \mu, \varphi) \quad (5)$$

avec

$$d\tau = -\kappa_\lambda dz$$

$$\mu = \cos \theta$$

et

$$J(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega_0}{4\pi} \int \int p(\tau, \theta, \varphi, \mu', \varphi') I(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi'$$

soit, sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre:

$$\frac{\partial I(\tau, \mu, \varphi)}{\partial \tau} - \frac{1}{\mu} I(\tau, \mu, \varphi) = -\frac{1}{\mu} J(\tau, \mu, \varphi)$$

Pour la résoudre, on pose:

$$K(\tau, \mu, \varphi) = I(\tau, \mu, \varphi) \cdot e^{-\tau/\mu}$$

$$\text{soit} \quad \frac{\partial K}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial I}{\partial \tau} - \frac{1}{\mu} I \right) e^{-\tau/\mu} = -\frac{e^{-\tau/\mu}}{\mu} J(\tau, \mu, \varphi)$$

Cette intégration nécessite de distinguer deux cas: $\mu < 0$ et $\mu > 0$

Si $\mu < 0$, on étudie une direction de propagation vers le bas (figure 3.3a), et l'intégrale s'écrit:

$$\int_0^{\tau} dK = \int_0^{\tau} \frac{e^{-\tau'/\mu}}{\mu} J(\tau', \mu, \varphi) d\tau'$$

soit

$$I(\tau, \mu < 0, \varphi) = I(0, \mu, \varphi) e^{\tau/\mu} - \int_0^{\tau} \frac{e^{-(\tau'-\tau)/\mu}}{\mu} J(\tau', \mu, \varphi) d\tau' \quad (6)$$

où le terme $I(0, \mu, \varphi) e^{\tau/\mu}$ représente le rayonnement descendant (du ciel) atténué par les couches supérieures.

Si $\mu > 0$, la propagation a lieu vers le haut (figure 3.3b):

$$\int_{\tau}^{\tau_1} dK = \int_{\tau}^{\tau_1} \frac{e^{-\tau'/\mu}}{\mu} J(\tau', \mu, \varphi) d\tau'$$

soit

$$I(\tau, \mu > 0, \varphi) = I(\tau_1, \mu, \varphi) e^{-(\tau_1-\tau)/\mu} + \int_{\tau}^{\tau_1} \frac{e^{-(\tau'-\tau)/\mu}}{\mu} J(\tau', \mu, \varphi) d\tau' \quad (7)$$

où $I(\tau_1, \mu, \varphi) e^{-(\tau_1-\tau)/\mu}$ est le rayonnement montant (du sol) atténué par les couches inférieures au point considéré.

Ce formalisme général peut être appliqué dans un couvert végétal, où il suffit alors de préciser la notion d'épaisseur optique et de définir la fonction de phase, nécessaire au calcul de la fonction source.

3.1.4. Transfert Radiatif dans la végétation

3.1.4.1. Transmission d'un rayonnement: l'épaisseur optique

La notion d'épaisseur optique de la végétation a déjà été utilisée dans le modèle de réflectance polarisée (cf 2.3.1.2). Elle est caractérisée par la fonction "G", définie, dans la direction $\mu = \cos\theta$ par:

$$G(\mu) = \int \int |\cos\omega| f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N$$

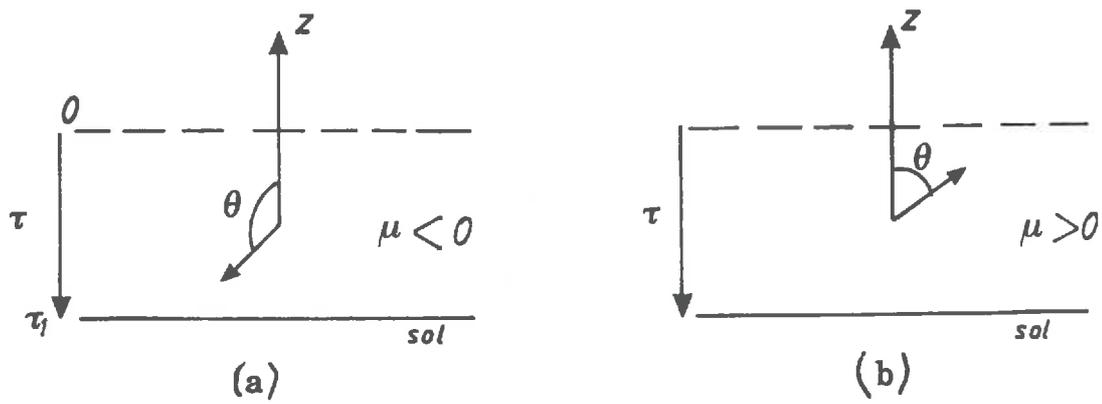


Figure 3.3 :

(a) : propagation vers le sol

(b) : propagation vers le haut

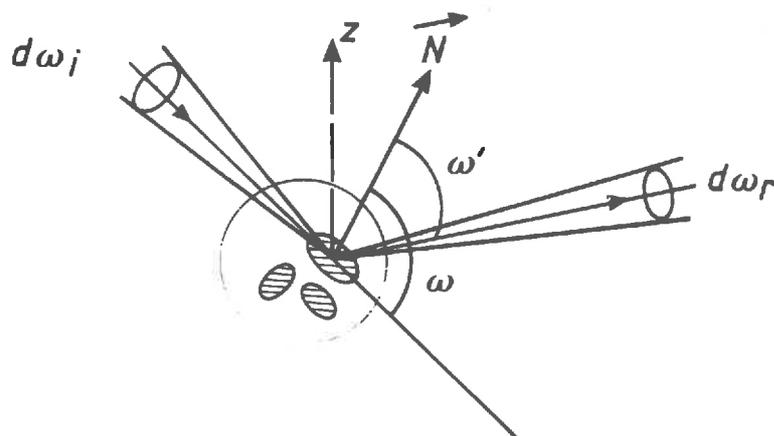


Figure 3.4 :

Définition des angles utilisés.

Soit $S(z)$ la surface totale de feuilles par unité de volume à l'altitude z :

$$L.A.I. = L(z) = \int_z^{\infty} S(z) dz \quad S(z) = -\frac{dL}{dz}$$

La quantité " $G(\mu).S(z)dz$ " représente la surface effective de feuilles interceptant le rayonnement incident dans la direction θ , dans la couche d'épaisseur dz ; " $G(\mu).S(z)$ " est donc l'équivalent de la section efficace d'extinction: elle varie ici avec la direction de propagation, au lieu d'être intrinsèque comme dans le cas de l'atmosphère.

L'extinction d'un rayonnement I de direction (θ, φ) , dans une traversée d'un élément de volume $d^2v (= ds.dl)$ du couvert est donc (figure 3.2) :

$$dI_1 = -G(\mu) S(z) dl I$$

soit :

$$\frac{dI_1}{I} = -\frac{G(\mu)}{\mu} S(z) dz = \frac{G(\mu)}{\mu} dL \quad (8)$$

où " $G(\mu).L(z)$ " joue le rôle d'une épaisseur optique

3.1.4.2. Diffusion d'un rayonnement: la fonction de phase

Le rayonnement intercepté par une surface foliaire est en partie absorbé ou rediffusé par celle-ci suivant ses propriétés optiques (cf 1.3.2.1). (Nous rappelons que nous ne tenons pas compte ici de la composante spéculaire de la réflectance d'une feuille, et étudions sa composante diffuse, supposée lambertienne). Le couvert est ainsi caractérisé par un coefficient de réflexion (r) et un coefficient de transmission (t) de ses feuilles, supposés connus. Mais suivant l'orientation de ces feuilles et la direction du rayonnement incident, l'importance et la répartition dans l'espace du rayonnement diffusé seront différentes. C'est ce que nous allons essayer de préciser à travers la fonction de phase du couvert.

Une feuille étant supposée lambertienne, sa luminance réémise L est isotrope. Si l'on observe la face éclairée de la feuille, on mesure un

phénomène de réflexion; sur la face opposée, c'est un phénomène de transmission:

$$L^+ = \frac{r}{\pi} |\cos\omega| E$$

$$L^- = \frac{t}{\pi} |\cos\omega| E$$

où ω est l'angle entre la direction du rayonnement incident E et la normale de la surface foliaire considérée (figure 3.4).

Mais quelle que soit l'orientation des feuilles (θ_N, φ_N) , chaque élément de surface foliaire diffuse au total une partie $(r+t)$ du flux qu'il intercepte.

Le flux équivalent à cette luminance L , sortant dans l'angle solide $d\omega_R$ autour de la direction d'observation (θ_R, φ_R) , est, par définition:

$$\frac{d^2\Phi_R^{\pm}}{d\omega_R} = L^{\pm} ds |\cos\omega| = \frac{1}{\pi} E ds |\cos\omega| |\cos\omega'| (r \text{ ou } t)$$

où ds est la surface foliaire émettant ce flux, et ω' l'angle entre la normale à cette surface et la direction d'observation.

Si l'on considère maintenant un élément de volume unité dv du couvert, la surface foliaire totale dans ce volume, orientée dans un angle solide $d\omega_N$ autour de la direction (θ_N, φ_N) est:

$$ds = dv \cdot S(z) \cdot f(\theta_N, \varphi_N) \cdot d\omega_N$$

Le flux diffusé dans la direction (θ_R, φ_R) , par toutes les surfaces foliaires contenues dans dv , et provenant d'un rayonnement incident dans l'angle solide $d\omega_i$ autour de la direction (θ_i, φ_i) est alors:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_R}{d\omega_R} &= I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i \int \int dv S(z) |\cos\omega| |\cos\omega'| \frac{(r \text{ ou } t)}{\pi} f(\theta_N, \varphi_N) d\omega_N \\ &= I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i dv S(z) \int \int f(\theta_N, \varphi_N) \frac{(r \text{ ou } t)}{\pi} |\cos\omega| |\cos\omega'| d\omega_N \quad (9) \end{aligned}$$

où

$$\cos\omega = \cos\theta_i \cos\theta_N + \sin\theta_i \sin\theta_N \cos(\varphi_i - \varphi_N)$$

$$\cos\omega' = \cos\theta_R \cos\theta_N + \sin\theta_R \sin\theta_N \cos(\varphi_R - \varphi_N)$$

si $\cos \omega \cdot \cos \omega' < 0$ (figure 3.4) nous sommes dans le cas d'un
 phénomène de réflexion (r)
 si $\cos \omega \cdot \cos \omega' > 0$ c'est un phénomène de transmission (t).

Pour obtenir le flux total diffusé par cet élément de volume, il suffit de sommer sur toutes les directions de luminance incidente (θ_i, φ_i) :

$$\frac{\Delta \Phi_R}{d\omega_R} = dv S(z) \int_{\theta_i} \int_{\varphi_i} I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i \int_{\theta_N} \int_{\varphi_N} f(\theta_N, \varphi_N) \frac{(r \text{ ou } t)}{\pi} |\cos \omega| |\cos \omega'| d\omega_N$$

soit un gain par diffusion dI_2 , dans la direction (θ_R, φ_R) :

$$dI_2 = \frac{\Delta \Phi_R}{d\omega_R ds} = dl S(z) \int_{\theta_i} \int_{\varphi_i} I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i \int_{\theta_N} \int_{\varphi_N} f(\theta_N, \varphi_N) \frac{(r \text{ ou } t)}{\pi} |\cos \omega| |\cos \omega'| d\omega_N \quad (10)$$

Et par comparaison avec le cas atmosphérique (équation (2)), on pose:

$$dI_2 = \frac{dl S(z)}{4\pi} \int_{\theta_i} \int_{\varphi_i} I(\theta_i, \varphi_i) p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R) d\omega_i$$

soit

$$\boxed{\frac{p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R)}{4\pi} = \int \int f(\theta_N, \varphi_N) \frac{(r \text{ ou } t)}{\pi} |\cos \omega| |\cos \omega'| d\omega_N} \quad (11)$$

appelée: *fonction de phase du couvert*

Mais contrairement au cas atmosphérique, il est intéressant de noter que cette fonction n'est pas normalisée:

L'équation (9) s'écrit maintenant:

$$\frac{d\Phi_R}{d\omega_R} = I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i dv S(z) \frac{p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R)}{4\pi}$$

Le flux total, diffusé dans tout l'espace (toutes les directions (θ_R, φ_R)), provenant du rayonnement incident dans $d\omega_i$ est alors:

$$\Delta\Phi = I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i \frac{dv S(z)}{4\pi} \int \int p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R) d\omega_R \quad (12)$$

Le flux total incident dans la direction $d\omega_i$, capté par toutes les surfaces foliaires contenues dans l'élément de volume $dv=ds.dl$, est:

$$\Delta\Phi_i = I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i ds G(\theta_i) S(z) dl$$

et on a vu que chaque élément de surface foliaire diffuse en tout une fraction $(r+t)$ du flux qu'il intercepte, d'où un flux total diffusé par dv :

$$\Delta\Phi = I(\theta_i, \varphi_i) d\omega_i dv G(\theta_i) S(z) (r+t)$$

En comparant avec l'équation (12), on obtient alors l'expression suivante:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\theta_R} \int_{\varphi_R} p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R) d\omega_R = G(\theta_i) (r+t) \quad (13)$$

et donc une fonction de phase un peu particulière par rapport aux fonctions de ce type généralement utilisées.

3.1.4.3. Equation de Transfert dans un couvert végétal

A partir de ces grandeurs caractéristiques d'un couvert végétal que sont son épaisseur optique et sa fonction de phase, nous pouvons maintenant réécrire l'équation du Transfert Radiatif dans ce cas particulier et aborder sa méthode de résolution.

En un point du couvert, l'intensité du rayonnement provient d'une part de la diffusion en ce point, et d'autre part du rayonnement incident non encore diffusé qui a pénétré jusqu'à ce point:

$$dI = dI_1 + dI_2 \quad (\text{équations 8 et 10})$$

soit

$$dI(z, \theta_R, \varphi_R) = \frac{G(\mu_R)}{\mu_R} dL I + \frac{dv}{ds} S(z) \frac{1}{4\pi} \int_{\theta_i} \int_{\varphi_i} I(z, \theta_i, \varphi_i) p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R) d\omega_i$$

et avec

$$S(Z) dz = - dl$$

$$dz = \mu dl \quad ; \quad dv = ds dl$$

$\mu_R \frac{dI(L, \mu_R, \varphi_R)}{dL} = G(\mu_R) I(L, \mu_R, \varphi_R) - \frac{1}{4\pi} \int_{\mu_i} \int_{\varphi_i} I(L, \mu_i, \varphi_i) p(\mu_i, \varphi_i, \mu_R, \varphi_R) d\mu_i d\varphi_i$
--

(14)

Equation du Transfert Radiatif dans un couvert végétal

telle que:

$$J(L, \mu_R, \varphi_R) = \frac{1}{4\pi} \int_{\mu_i} \int_{\varphi_i} I(L, \mu_i, \varphi_i) p(\mu_i, \varphi_i, \mu_R, \varphi_R) d\mu_i d\varphi_i$$

soit la fonction source associée.

Cette équation, similaire à celle de l'atmosphère plan-parallèle (cf 3.2.2) se résoud de la même façon selon le signe de $\mu = \cos\theta$ de la direction d'observation (équations 6 et 7):

Si $\mu < 0$

$$I(L, \mu < 0, \varphi) = I(0, \mu, \varphi) e^{(G(\mu)/\mu)L} - \frac{1}{\mu} \int_0^L e^{(G(\mu)/\mu)(L-L')} J(L', \mu, \varphi) dL'$$

et si le rayonnement du ciel est négligé:

$$I(L, \mu < 0, \varphi) = - \frac{1}{\mu} \int_0^L e^{(G(\mu)/\mu)(L-L')} J(L', \mu, \varphi) dL'$$

Si $\mu > 0$

$$I(L, \mu > 0, \varphi) = I(L_1, \mu, \varphi) e^{(G(\mu)/\mu)(L-L_1)} + \frac{1}{\mu} \int_L^{L_1} e^{-(G(\mu)/\mu)(L-L')} J(L', \mu, \varphi) dL'$$

et si le sol est noir:

$$I(L, \mu > 0, \varphi) = \frac{1}{\mu} \int_L^{L_1} e^{-G(\mu)\mu(L-L')} J(L', \mu, \varphi) dL'$$

Ces équations nous donnent l'intensité du rayonnement diffusé en chaque direction de l'espace, à chaque couche du couvert végétal. Cette intensité dépend de la fonction source, c'est-à-dire de l'intensité du rayonnement provenant de tout l'espace, et qui va être diffusé au point considéré. Chaque rayonnement diffusé par une surface foliaire, dans une direction quelconque, peut à nouveau être intercepté par une autre surface foliaire située dans une couche supérieure ou inférieure du couvert, et contribuer à l'intensité diffusée par cette autre feuille. Pour chaque point du couvert, ces diffusions successives doivent donc intervenir dans sa fonction source, dont le calcul apparaît alors être très complexe. C'est pour cette raison que nous avons choisi la méthode de résolution dite "des ordres successifs" qui, en calculant successivement les différentes diffusions, permet d'une part de simplifier le problème par sa démarche "pas à pas", et d'autre part d'évaluer ainsi l'importance de chaque ordre de diffusion dans la réflectance globale du couvert.

3.1.4.4 Résolution par la méthode des ordres successifs

La luminance I est calculée à des profondeurs et dans des directions discrétisées: $I(L_i, \theta_j, \varphi_k)$ (figure 3.5). Elle est considérée comme la superposition des luminances du rayonnement ayant subi 1, 2, ...n diffusions avant d'atteindre ce point:

$$I(L_i, \theta_j, \varphi_k) = \sum_{n=1}^{\infty} I^{(n)}(L_i, \theta_j, \varphi_k)$$

où $I^{(n)}$ est la composante ayant subi n diffusions.

$I^{(n)}$ se déduit du rayonnement $I^{(n-1)}$, ayant subi $(n-1)$ diffusions

$I^{(1)}$ correspond à la diffusion primaire du rayonnement solaire incident sur les feuilles ou sur le sol (figure 3.6).

$I^{(2)}$ est la rediffusion de $I^{(1)}$ lorsqu'il rencontre de nouvelles surfaces diffusantes, et ainsi de suite.

La luminance du couvert est finalement la résultante des luminances qui réémergent du couvert.

Soit θ_s la direction du faisceau solaire incident, tel que $\mu_s < 0$. Ce rayonnement direct est transmis jusqu'à la couche L du couvert avec la luminance:

$$I^{(0)}(L, \mu) = E_s e^{L G(\mu_s)/\mu_s} \delta(\mu - \mu_s)$$

et va être diffusé selon la fonction de phase $p(\mu_s, \varphi_s \rightarrow \mu, \varphi)$, donnant pour $I^{(1)}$ l'expression totale:

$$\begin{aligned} I^{(1)}(L, \mu < 0, \varphi) &= -\frac{1}{\mu} \int_0^L e^{-(G(\mu)/\mu)(L-L')} J^{(0)}(L', \mu, \varphi) dL' \\ &= \frac{E_s p(\mu_s, \varphi_s \rightarrow \mu, \varphi)}{4\pi \mu} \frac{e^{L G(\mu_s)/\mu_s} - e^{L G(\mu)/\mu}}{\frac{G(\mu_s)}{\mu_s} - \frac{G(\mu)}{\mu}} \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} I^{(1)}(L, \mu > 0, \varphi) &= \frac{1}{\mu} \int_L^{L_1} e^{-(G(\mu)/\mu)(L-L')} J^{(0)}(L', \mu, \varphi) dL' \\ &= \frac{E_s p(\mu_s, \varphi_s \rightarrow \mu, \varphi)}{4\pi \mu} e^{L G(\mu_s)/\mu_s} \frac{e^{(L_1-L)(G(\mu_s)/\mu_s - G(\mu)/\mu)} - 1}{\frac{G(\mu_s)}{\mu_s} - \frac{G(\mu)}{\mu}} \end{aligned}$$

à laquelle s'ajoute éventuellement dans ce cas la diffusion primaire du rayonnement solaire transmis jusqu'au sol:

$$I_{sol}^{(1)}(L, \mu, \varphi) = \frac{\rho_{sol}}{\pi} |\mu_s| E_s e^{L_1(G(\mu_s)/\mu_s)} e^{(L-L)(G(\mu)/\mu)}$$

Cette luminance d'ordre 1 peut être à son tour rediffusée:

$$J^{(1)}(L, \mu', \varphi') = \frac{1}{4\pi} \int \int p(\mu, \varphi \rightarrow \mu', \varphi') I^{(1)}(L, \mu, \varphi) d\mu d\varphi$$

et donne lieu à une luminance d'ordre 2, où $I^{(2)}(L, \mu, \varphi)$ est calculée à partir de cette fonction source $J^{(1)}$ par les équations:

$$I^{(2)}(L, \mu < 0, \varphi) = -\frac{1}{\mu} \int_0^L e^{-(G(\mu)/\mu)(L-L')} J^{(1)}(L', \mu, \varphi) dL'$$

$$I^{(2)}(L, \mu > 0, \varphi) = \frac{1}{\mu} \int_L^{L_1} e^{-(G(\mu)/\mu)(L-L')} J^{(1)}(L', \mu, \varphi) dL'$$

Ces intégrales sont calculées en chaque point $(L_i, \theta_j, \varphi_k)$ et sont donc ramenées à leur expression en une somme discrétisée.

Les ordres successifs de diffusion sont calculés jusqu'à obtention d'une certaine convergence de la suite $I^{(n)}$, c'est-à-dire jusqu'à ce que $I^{(n)}$ ne soit plus significatif par rapport à la luminance totale I , dans la bande spectrale considérée.

Il est clair que dans le cas d'un couvert végétal cette convergence doit être obtenue plus rapidement dans le visible, où les réflectances sont faibles, que dans le proche infrarouge.

Cette luminance finale représente la partie diffuse de la luminance d'un couvert végétal.

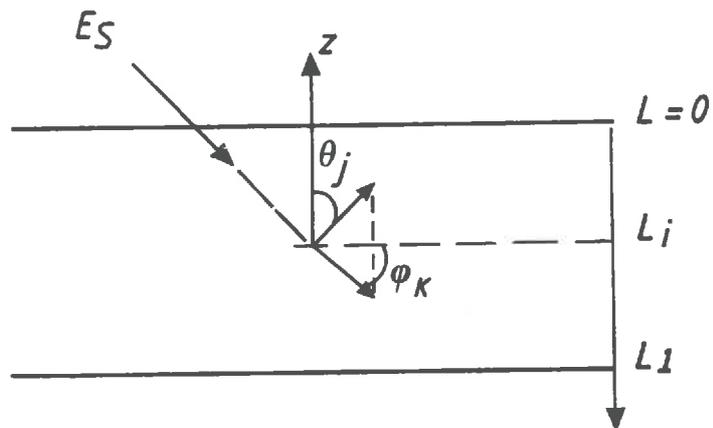


Figure 3.5:

La luminance I est calculée à des profondeurs et dans des directions discrétisées: $I(L_i, \theta_j, \varphi_k)$.

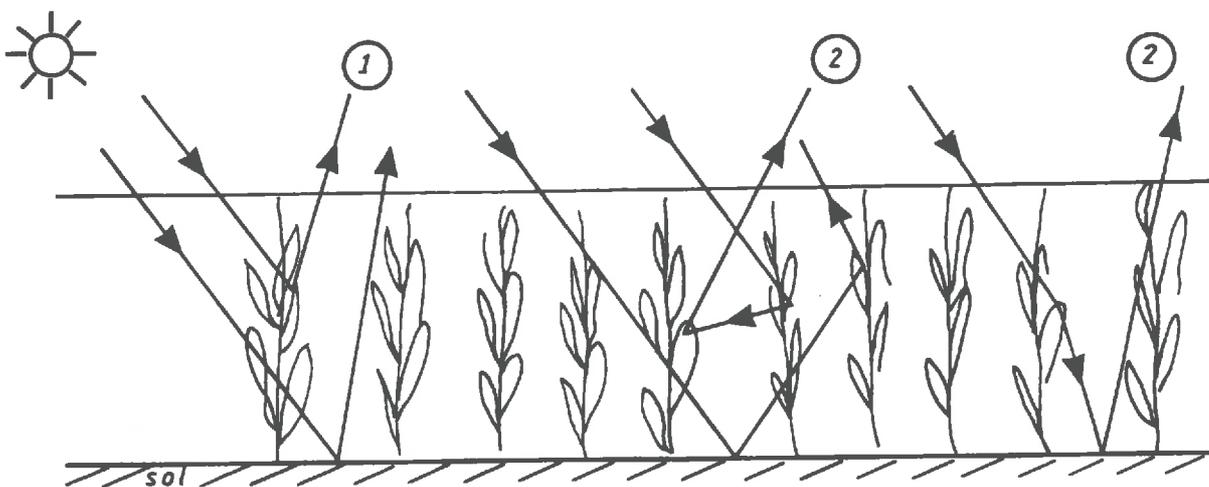


Figure 3.6: Les ordres successifs

(1) : diffusion d'ordre 1

(2) : diffusion d'ordre 2

3.2. DIFFUSION DE LA LUMIERE PAR UN COUVERT VEGETAL

3.2.1. Le modèle

La résolution de l'équation de transfert radiatif par la méthode des ordres successifs est effectuée par le programme fortran "*succ.f*" présenté en annexe 2. Pour un type de couvert particulier (dont les paramètres θ_F , σ , LAI, r et t sont fixés), et pour un rayonnement incident (θ_i), ce programme nous donne la luminance du couvert dans la direction (θ_R, φ_R).

La fonction $G(\theta)$ du couvert, ainsi que sa fonction de phase sont calculées initialement dans le programme "*muphase.f*" (annexe 2) pour chaque géométrie de mesure ($\theta_i, \theta_R, \varphi_R$) sur le couvert considéré.

Les résultats de ce modèle vont pouvoir être comparés aux luminances diffuses "semi-expérimentales" des figures 2.50 à 2.54. Mais avant cette comparaison, la longueur de ces programmes nécessite leur validation sur des cas simples ou bien connus. Le cas de la diffusion atmosphérique, qui a servi de base à l'élaboration du modèle, puis celui d'une végétation de référence (modèle de SAIL), semblent être appropriés.

3.2.2. Validation du modèle

3.2.2.1. Comparaison à la diffusion moléculaire

Lorsque le couvert n'est caractérisé par aucune direction foliaire privilégiée ($f(\theta_N) = 1$) et que les éléments diffusants sont supposés non absorbants ($r+t = 1$), la fonction de phase ne dépend alors que de l'angle de diffusion (angle formé par les directions d'incidence θ_i et de diffusion θ_R). Si $r=t=50\%$ cette fonction (figure 3.7a) ressemble fortement à la fonction de phase caractéristique d'une diffusion moléculaire (figure 3.7b).

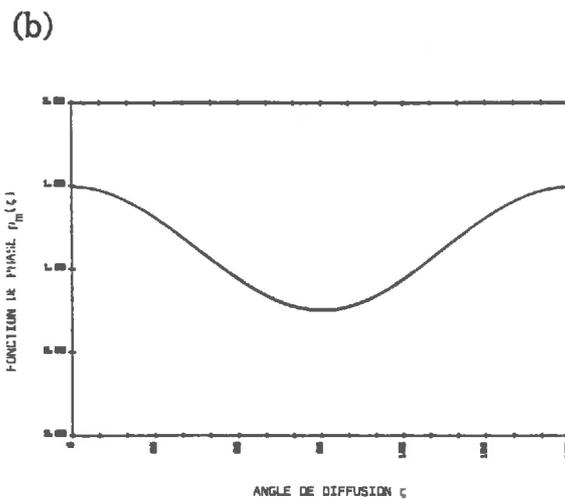
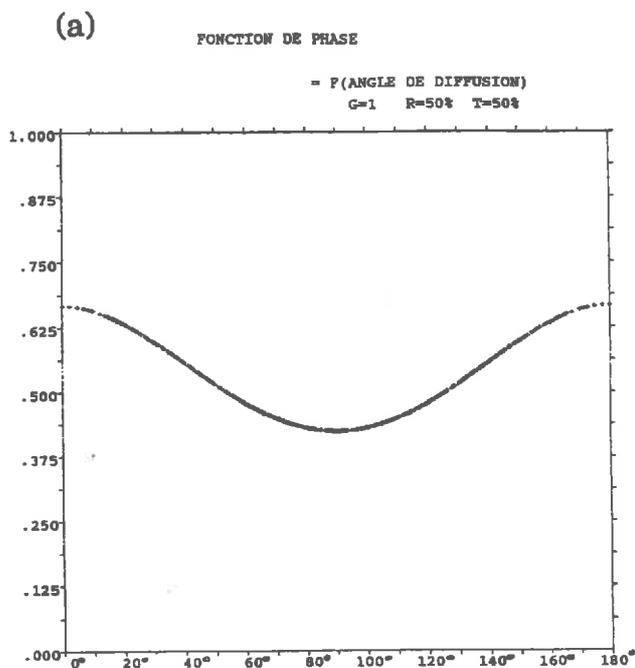
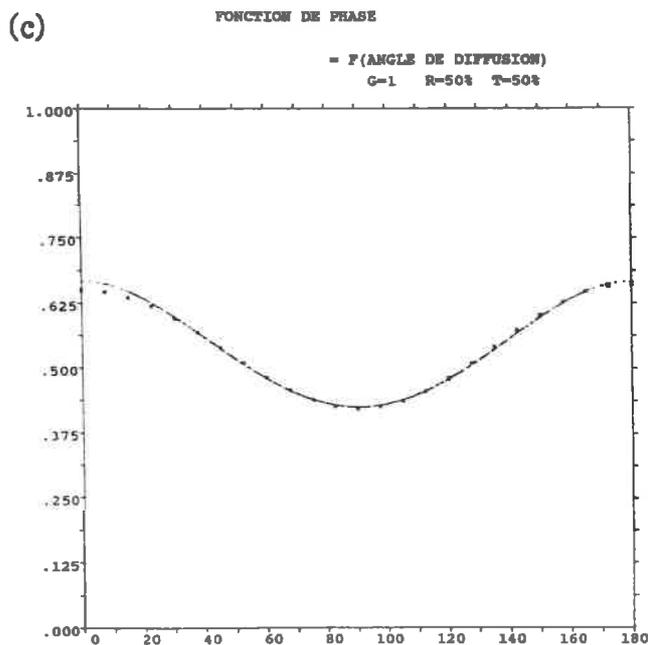


Figure 3.7 :

- (a) Fonction de phase pour $r=t=50\%$ et $G=1$ (couvert uniforme).
 (b) Fonction de phase d'une diffusion moléculaire.
 (c) Expression analytique de la fonction de phase (a) en une somme de polynômes de Legendre.



$$p(\theta) = \beta_0 + \beta_2 \frac{3\cos^2\theta - 1}{2} + \beta_3 \frac{5\cos^3\theta - 3\cos\theta}{2}$$

$$\beta_0 = 0.4999$$

$$\beta_1 = -1.864 \cdot 10^{-3}$$

$$\beta_2 = 0.1562$$

$$\beta_3 = -4.413 \cdot 10^{-3}$$

Si $f(\theta_N) = 1/4\pi$ (pour être normalisée), la fonction G s'écrit:

$$G(\mu) = \frac{1}{4\pi} \int \int |\cos\omega| d\omega_N = \frac{2\pi}{4\pi} = \frac{1}{2}$$

valeur vers laquelle tendent effectivement les courbes de la figure 2.33 ($p^\circ 115$) pour un couvert uniforme.

Et la loi d'extinction devient:

$$E(L) = E_0 e^{-(L/2)/\mu}$$

avec donc une épaisseur optique efficace $L^*=L/2$ qui joue le rôle de l'épaisseur optique τ d'une couche atmosphérique.

La fonction de phase est alors normalisée à $1/2$ (équation (13)):

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\theta_R} \int_{\varphi_R} p(\theta_i, \varphi_i, \theta_R, \varphi_R) d\omega_R = G(\theta_i) (r+t) = \frac{1}{2}$$

et l'équation du transfert radiatif (14) réécrite en fonction de L^* est équivalente à l'équation (5) du cas atmosphérique:

$$\mu \frac{dI(L^*, \mu, \varphi)}{dL^*} = I(L^*, \mu, \varphi) - \frac{(r+t)}{4\pi} \int_{\mu_i} \int_{\varphi_i} I(L^*, \mu_i, \varphi_i) p(\mu_i, \varphi_i, \mu, \varphi) d\mu_i d\varphi_i$$

Nous avons ainsi pu comparer les résultats de notre modèle d'ordres successifs (O.S.) à ceux d'un modèle fiable de diffusion atmosphérique basé sur des harmoniques sphériques (H.S.) (DEVAUX et al., 1973; BENASSI et al., 1984).

La fonction de phase de la figure 3.7a se retrouve assez bien par une somme de polynômes de Legendre (figure 3.7c) et peut être ainsi utilisée dans le programme des H.S.. Un couvert d'indice foliaire $L=4$ est équivalent à une épaisseur optique $\tau=2$.

Cette comparaison est présentée sur les courbes de la figure 3.8 pour $L=2$ et $L=4$, un zénith solaire incident de 60° , un couvert discrétisé en 20 couches, avec une réflectance de sol de 28%.

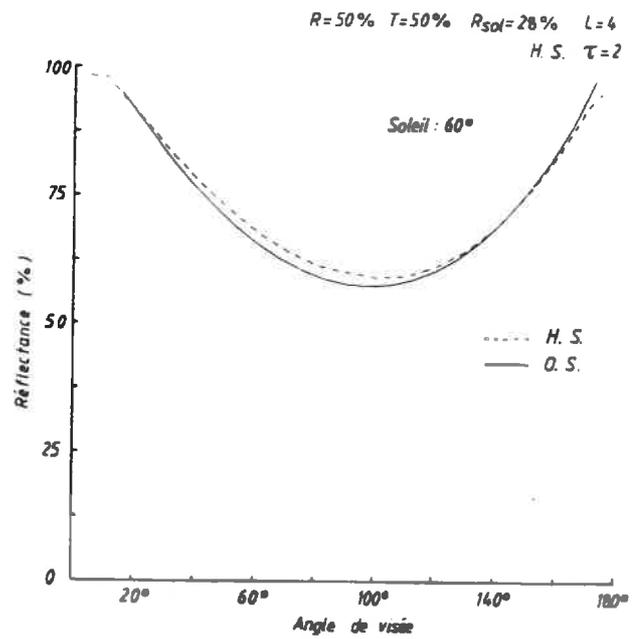
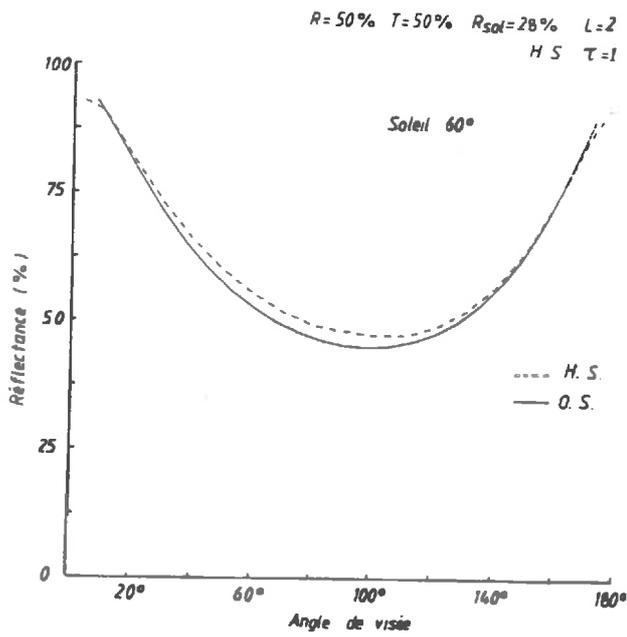


Figure 3.8 :

Comparaison du modèle des ordres successifs (O.S.) à un modèle de diffusion moléculaire standard (H.S.).

Les résultats donnent dans les deux cas une bonne validation du modèle des ordres successifs.

3.2.2.2. Comparaison au modèle SAIL

Le modèle SAIL (VERHOEF, 1984) est aujourd'hui le modèle "classique de référence" de la réflectance d'un couvert végétal. Nous ne le détaillerons donc pas, et renvoyons pour cela aux articles bibliographiques.

Ce modèle est basé sur les équations du tableau 3.1. Les feuilles sont supposées être des diffuseurs lambertiens parfaits, de réflectance hémisphérique r et de transmittance hémisphérique t , pour les deux faces des feuilles. La fonction d'inclinaison des feuilles est discrétisée en 13 classes d'angles, qui sont respectivement: 0° - 10° , 10° - 20° , ... 70° - 80° et 80° - 82° , 82° - 84° , ... 88° - 90° . (Le découpage de l'intervalle 80° - 90° est nécessité par la sensibilité des coefficients du tableau 3.1 dans cet intervalle lorsqu'on observe autour de la visée verticale). La fonction utilisée ici est une distribution ellipsoïdale d'inclinaison des feuilles (CAMPBELL, 1986), dont l'auteur nous précise en particulier les paramètres caractéristiques à un couvert de soja.

La comparaison à notre modèle des ordres successifs est présentée sur la figure 3.9. Elle est réalisée dans deux bandes spectrales (visible et proche infrarouge) où les valeurs de r , t , et de la réflectance du sol sont celles données en exemple par l'auteur du modèle SAIL (VERHOEF, 1984): dans le visible, $r=13.5\%$, $t=5.5\%$ et $r_{\text{sol}}=12.6\%$; dans le proche infrarouge, $r=52\%$, $t=44\%$ et $r_{\text{sol}}=28.6\%$.

Nous avons choisi deux directions solaires incidentes (30° et 60°) et, dans les ordres successifs, deux types de couvert:

- un couvert uniforme ($G=1$)
- un couvert caractérisé par deux paramètres obtenus dans la partie 2 sur une parcelle de soja: $\theta_F=30^\circ$ et $\sigma=0.4$.

Les réflectances bidirectionnelles sont tracées en fonction de l'angle d'observation, soit un balayage dans le plan principal autour de la visée verticale (0° ici).

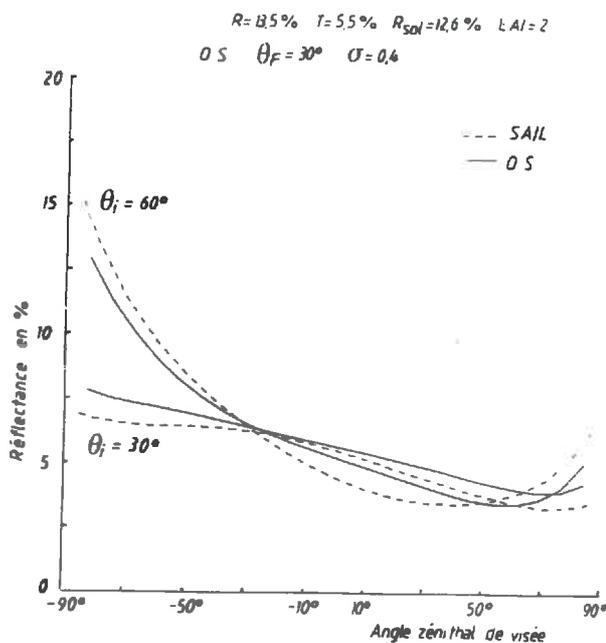
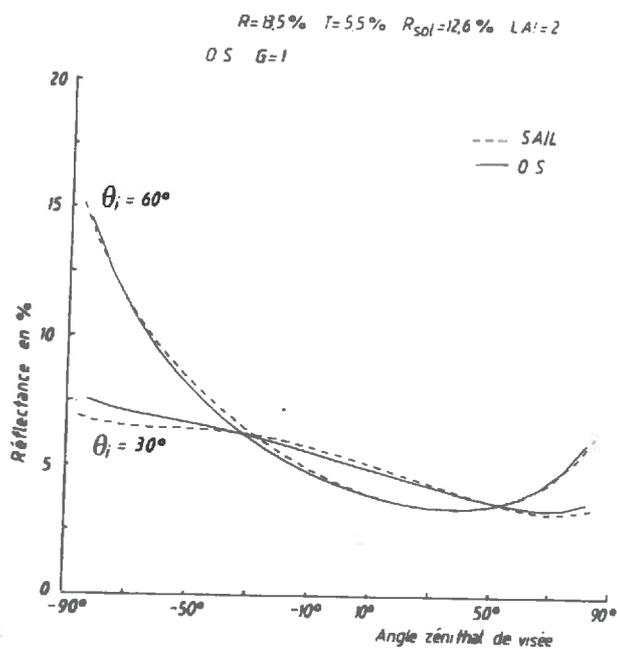
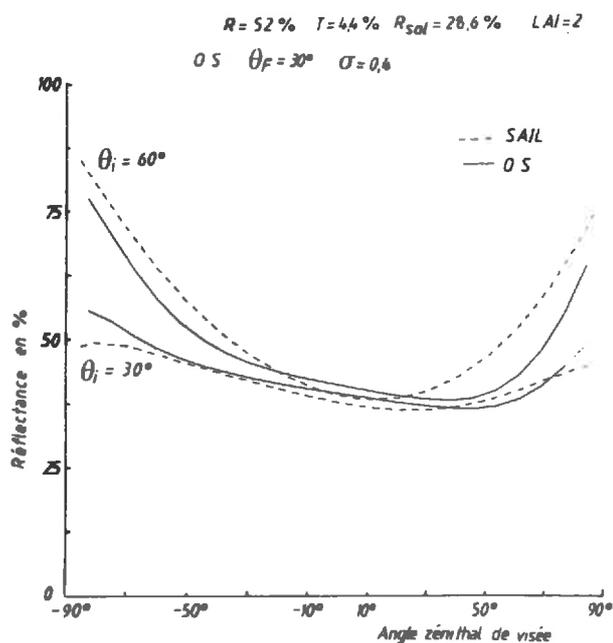
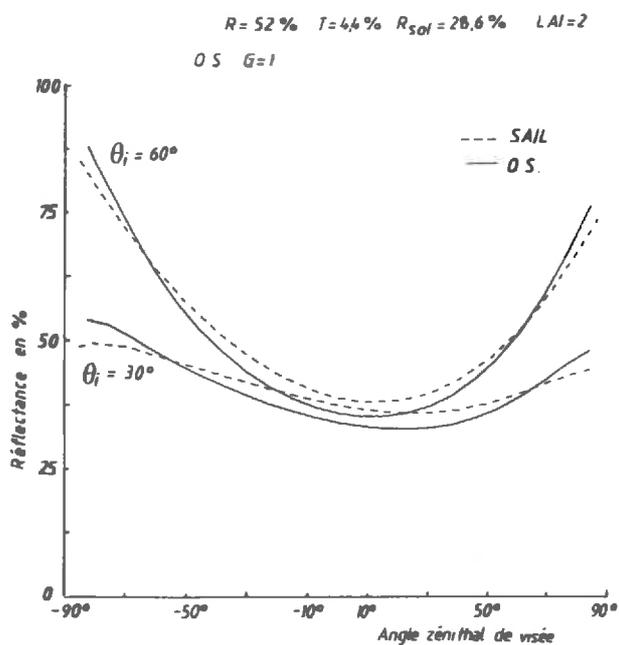


Figure 3.9 :
 Comparaison du modèle des ordres successifs avec le modèle SAIL.



Les effets directionnels prévus par le modèle SAIL se retrouvent bien dans tous les cas avec le modèle des ordres successifs. On remarque en particulier l'importance relative du phénomène de rétrodiffusion dans chaque bande spectrale.

Les résultats varient bien-sûr avec la structure du couvert utilisée dans les modèles. Mais quelle que soit la fonction d'inclinaison de feuilles considérée, à priori caractéristique d'un couvert de soja (ellipsoïdale dans SAIL, uniforme ($G=1$) ou planophile ($\theta_F=30^\circ$) dans les ordres successifs), les courbes gardent assez bien la même allure et les mêmes ordres de grandeur des réflectances.

Ces comparaisons montrent finalement que sur un couvert bien homogène comme le soja, ces modèles de réflectance diffuse sont peu sensibles à la formulation de la fonction de distribution d'inclinaison des feuilles.

3.2.3. Diffusion primaire et ordres successifs

Un résultat intéressant à noter est l'évaluation des différents ordres de diffusion qui donnent lieu à la réflectance d'un couvert. Ces premiers ordres sont présentés sur la figure 3.10.

Dans le visible où le rayonnement est en grande partie absorbé par les feuilles ($r=13.5\%$, $t=5.5\%$), la convergence des diffusions multiples est obtenue très rapidement. La diffusion primaire est alors le phénomène principal qui régit la réflectance d'un couvert. Par contre, dans le proche infrarouge ($r=52\%$, $t=44\%$), la diffusion primaire ne représente que environ un tiers de la réflectance totale. Celle-ci est le résultat d'au-moins une dizaine de diffusions successives. Le rayonnement, peu absorbé, est rediffusé de nombreuses fois. Les diffusions d'ordre 2 et 3 sont encore importantes (respectivement de l'ordre de 10 et 5%). Dans le visible, la diffusion d'ordre 2 est relativement beaucoup moins importante par rapport à la diffusion primaire.

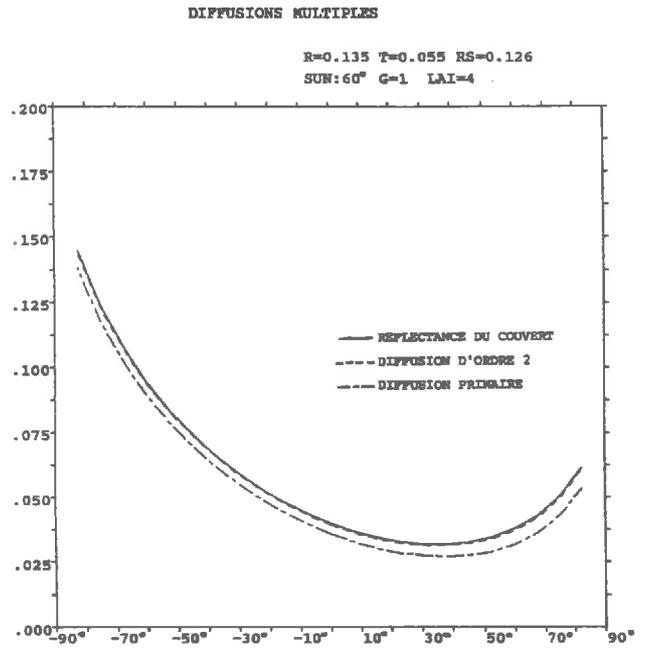
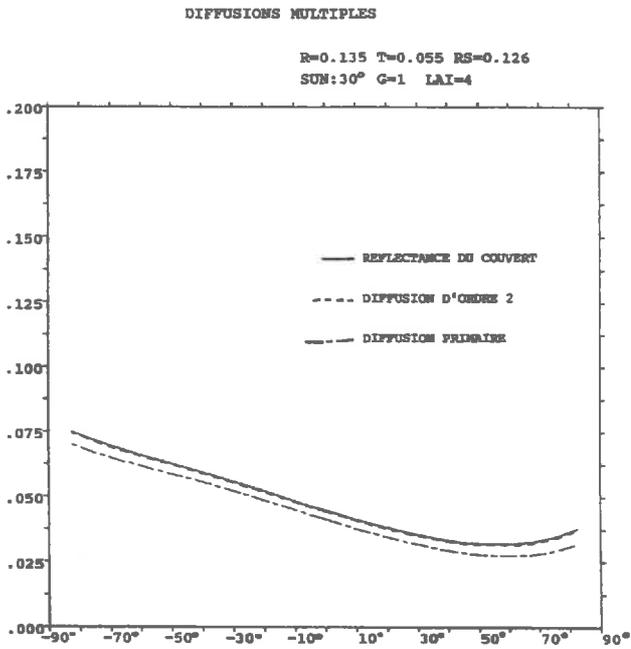
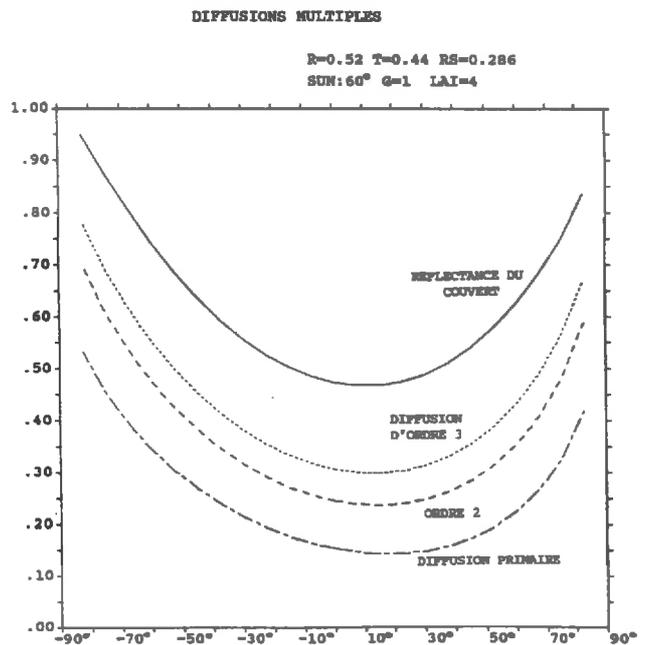
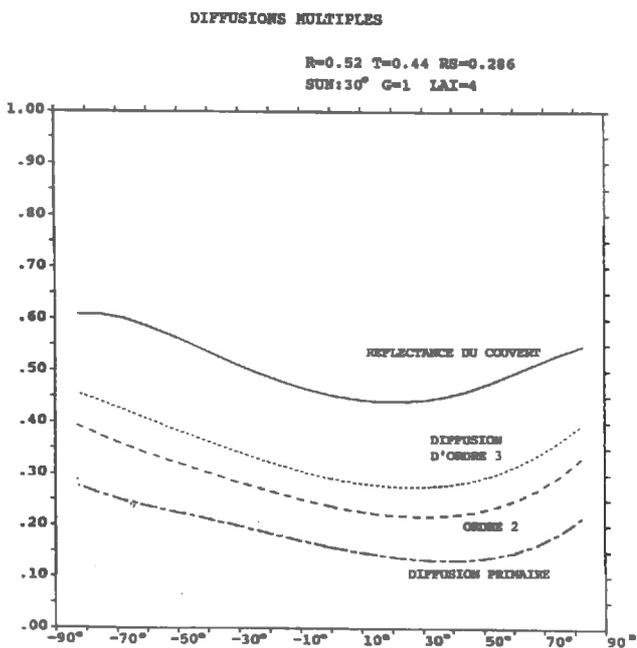


Figure 3.10 :

Les ordres successifs de diffusion pour 2 longueurs d'onde (visible et proche infrarouge) et 2 inclinaisons (30 et 60°) du rayonnement incident.



Cette remarque justifie le fait que dans les longueurs d'onde du visible, la réflectance mesurée sur un couvert peut être considérée comme la somme directe d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire due à la réflexion du rayonnement direct sur les feuilles. La contribution spéculaire du rayonnement diffusé 2 fois ou plus est en effet négligeable.

Dans le proche infrarouge, ces diffusions multiples internes au couvert végétal sont des contributions importantes au rayonnement photosynthétiquement actif.

3.2.4. Comparaison aux valeurs expérimentales

Sur les figures 2.50 à 2.54 de la partie 2, est évaluée la composante diffuse de la luminance par différence entre la luminance totale mesurée et sa composante spéculaire calculée théoriquement. Nous avons remarqué alors que cette composante diffuse présentait des effets directionnels importants. Nous allons voir maintenant que ces effets se retrouvent relativement bien à partir de l'équation du transfert radiatif.

Le modèle des ordres successifs nous fournit la réflectance diffuse d'un couvert.

La réflectance directionnelle s'écrit:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{\cos \theta_s E_{\lambda}}$$

où θ_s est l'angle zénithal du soleil

E_{λ} l'éclairement reçu par la cible.

Dans l'étude de la réflexion spéculaire, nous n'avons considéré que le rayonnement direct: $E_{\lambda} = E_{0\lambda} e^{-\tau_{\lambda}}$ (cf 2.3.3.1.)

Ici, il est plus juste de considérer le rayonnement incident global: direct et diffus.

Nous rappelons que $e^{-\tau/\mu_0}$ est l'atténuation du flux solaire direct par l'atmosphère. Soit $t_d(\theta_s)$ le facteur de transmission diffuse du rayonnement:

$$E_\lambda = E_0 \lambda (e^{-\tau/\mu_0} + t_d(\theta_s))$$

soit:

$$L^{\text{diff}} = \frac{1}{\pi} \rho_{\text{diff}} \cos\theta_s E_0 (e^{-\tau/\mu_0} + t_d(\theta_s))$$

en considérant qu'il est ici peu différent de pondérer $t_d(\theta_s)$ par ρ_{diff} que par sa valeur moyenne.

Le facteur $t_d(\theta_s)$ est calculé, pour chaque longueur d'onde, par le programme "5S" de transmission atmosphérique (TANRE et al., 1986). Nous avons supposé une atmosphère standard: des aérosols continentaux et une visibilité de 23 km.

Les figures 3.11 à 3.13 sont la reprise des figures 2.50, 2.51 et 2.53, sur lesquelles nous avons rajouté la luminance diffuse théorique calculée par le programme des ordres successifs (O.S.). Dans tous les cas, cette courbe redonne bien l'allure attendue de la composante diffuse. Dans le plan principal (figures 3.11 et 3.12), l'effet de rétrodiffusion est bien net, surtout à 550 nm. Dans le plan perpendiculaire (figure 3.13) la luminance diffuse ne présente pas d'effet directionnel particulier.

Les courbes sont tracées pour des propriétés optiques arbitraires des feuilles et du sol, mais qui sont des valeurs auxquelles on pourrait s'attendre à ces longueurs d'ondes.

Pour les deux parcelles de soja (figure 3.11) des valeurs équivalentes dans les deux cas donnent des résultats plausibles. Par contre, un ajustement correct de la luminance diffuse des parcelles de maïs (figures 3.12 et 3.13) nécessite de prendre une réflectance initiale plus élevée pour la parcelle 6 ($r=13.5\%$ à 550 nm et 7.5% à 630 nm) que pour la parcelle 5 ($r=10\%$ à 550 nm et 5% à 630 nm). Nous avons vu en effet que la parcelle 6 était déjà fleurie (présence des panicules), alors que la parcelle 5 ne l'est pas encore à la date de mesure. Cette différence de développement explique la valeur différente des propriétés des éléments du couvert.

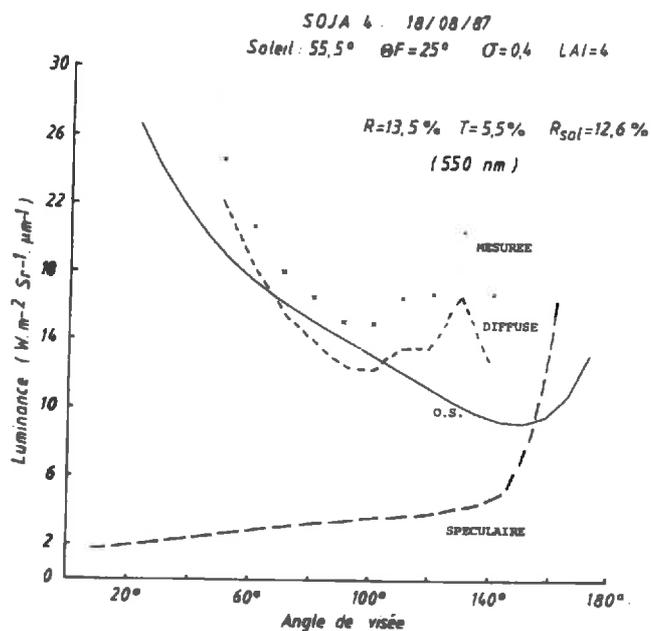
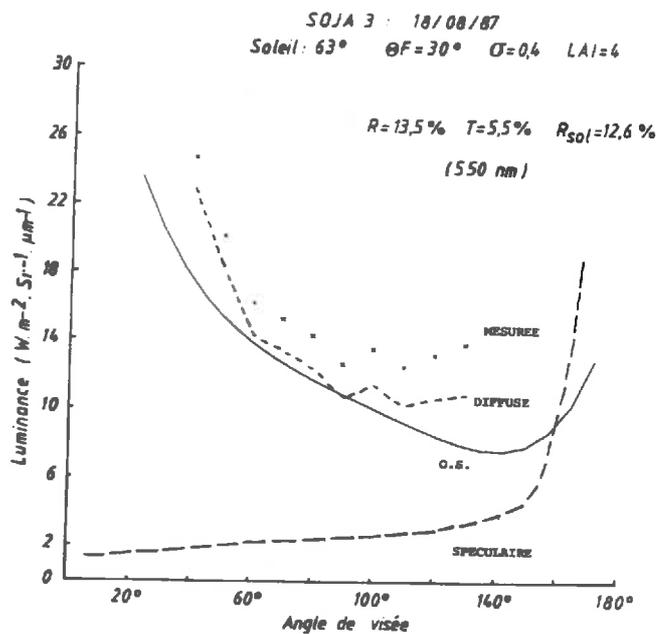
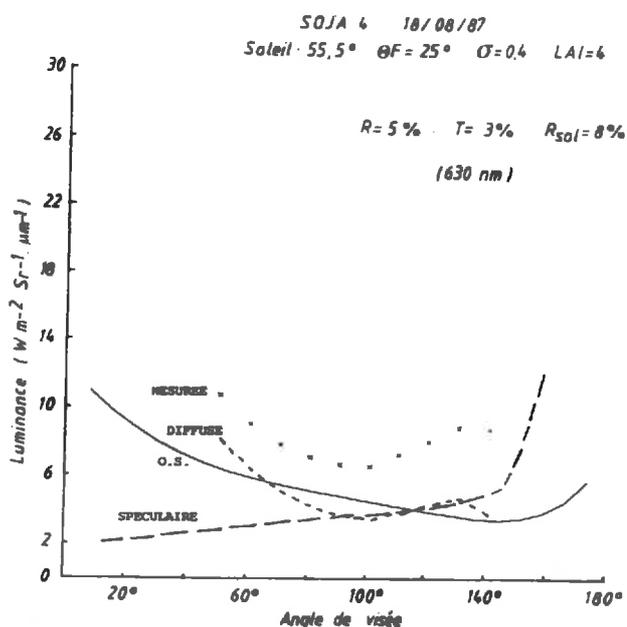
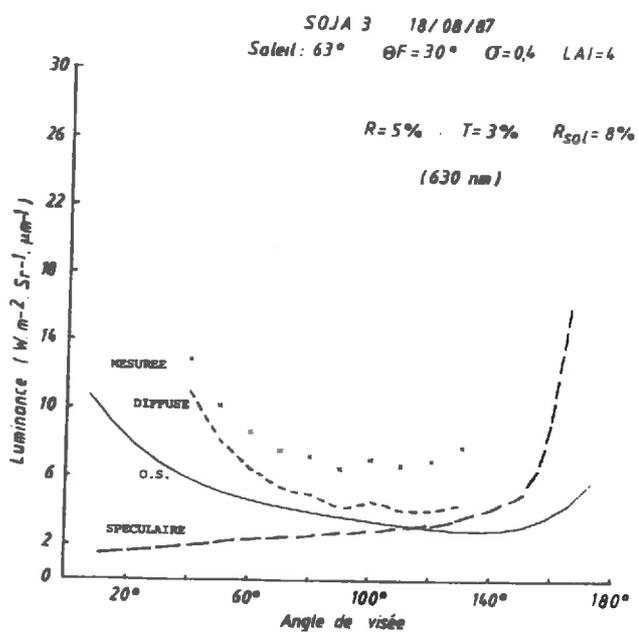


Figure 3.11 :

Comparaison de la luminance diffuse d'un couvert végétal issue du modèle des O.S., à son évaluation "semi-expérimentale" à partir des points de mesure et de la composante spéculaire.

Mesures sur les parcelles de soja, le 18/08/87, dans le plan solaire.



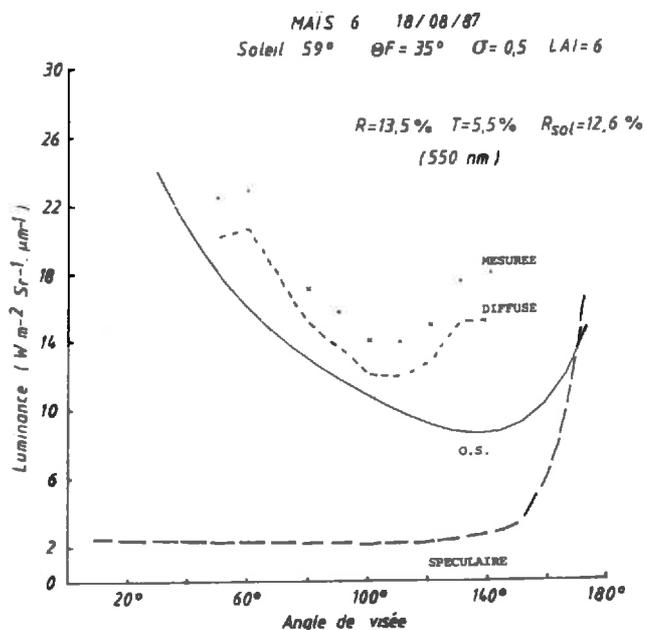
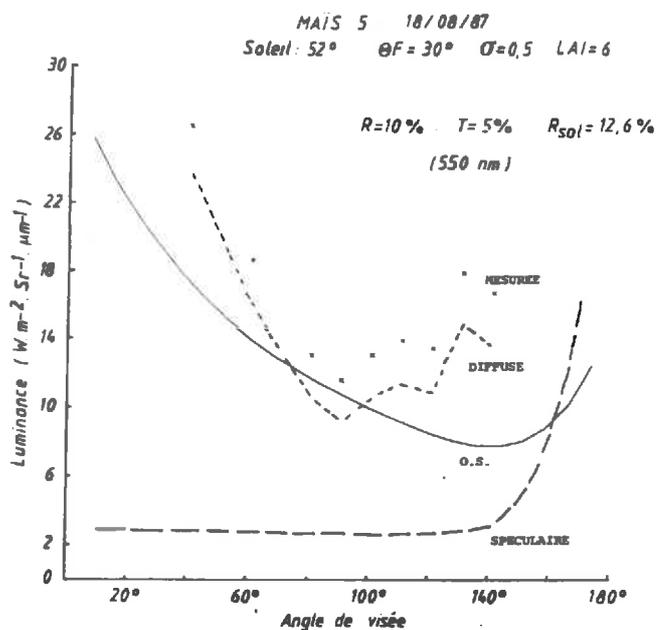
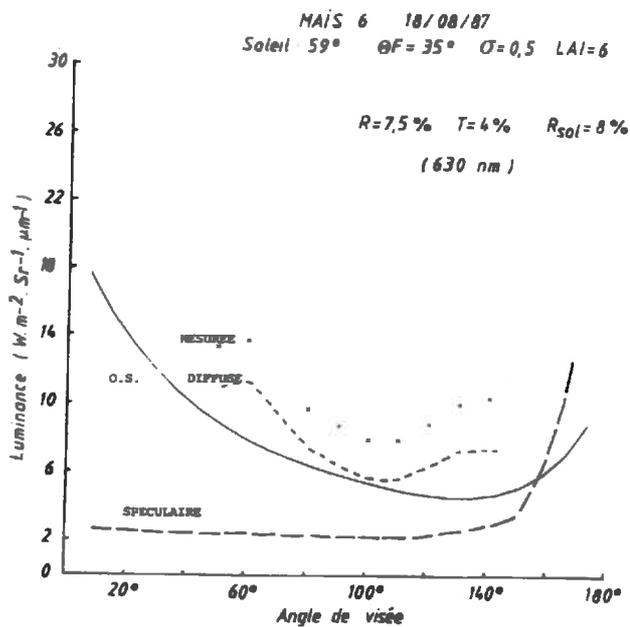
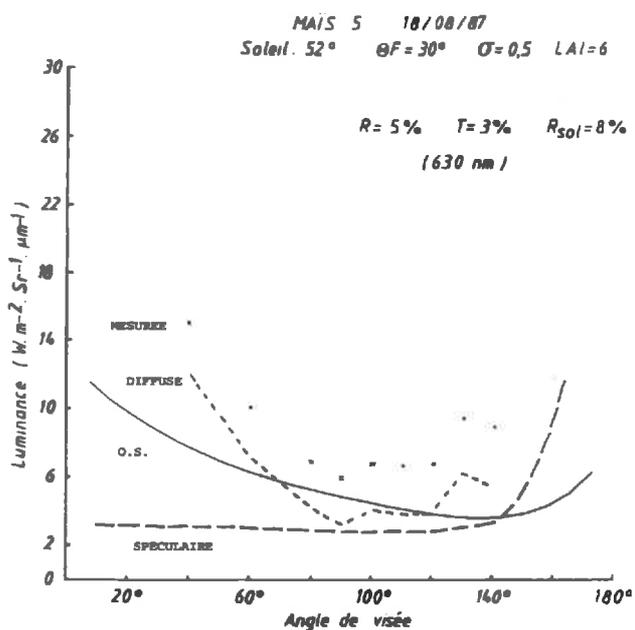


Figure 3.12:

Mesures sur les parcelles de maïs, le 18/08/87, dans le plan solaire.



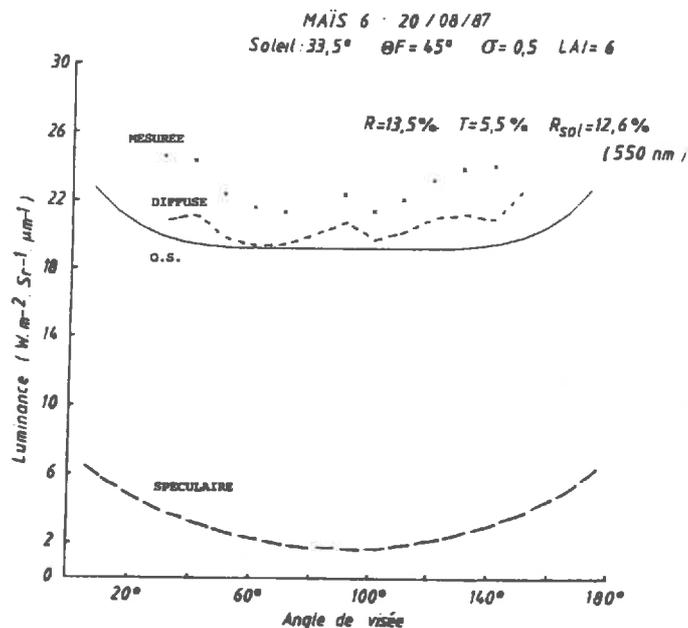
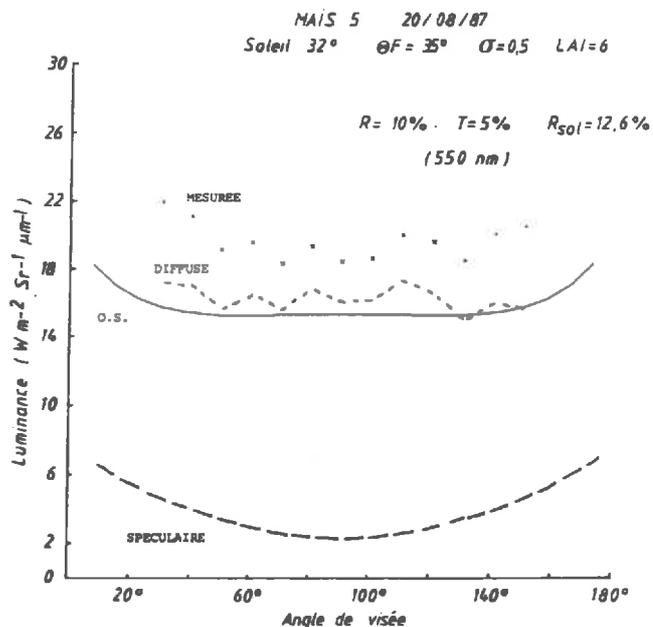
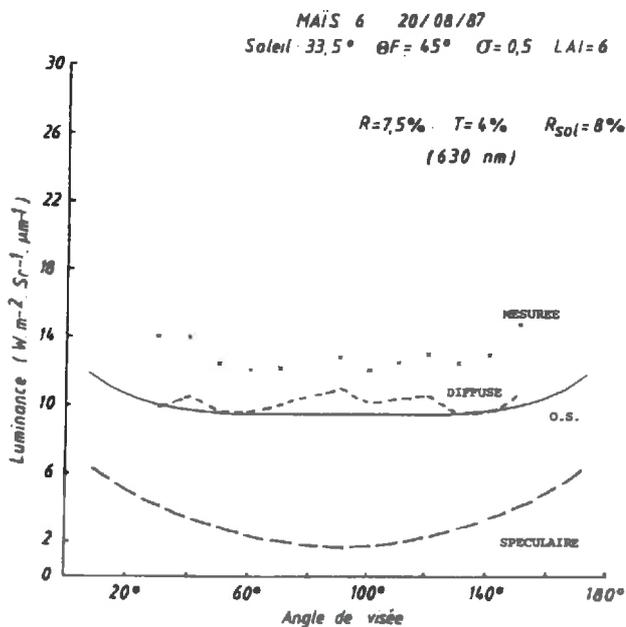
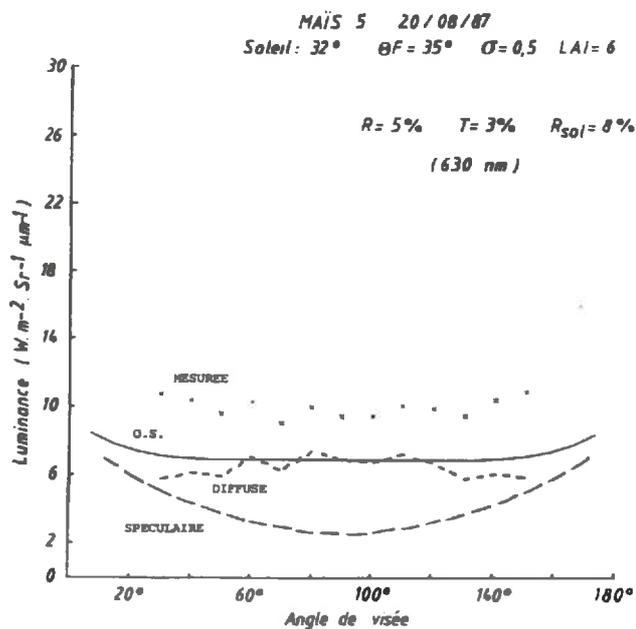


Figure 3.13 :
Mesures sur les parcelles de maïs, le 20/08/87, dans le plan perpendiculaire.



Pour un meilleur fitage des courbes, il faudrait connaître précisément les propriétés optiques pour chaque couvert. Et lorsque celui-ci présente des éléments verticaux (tels que les panicules du maïs ou les épis de blé), une méthode consiste alors à séparer la végétation en deux couches superposées, de propriétés optiques différentes.

Mais les valeurs obtenues ici nous donnent un ordre de grandeur suffisant pour notre évaluation.

Sur l'ensemble des figures, un écart entre la courbe théorique et l'allure attendue apparaît aux grands angles de visée: les valeurs semi-expérimentales de la luminance diffuse "remontent" pour des angles inférieurs à ceux prévus par le programme des O.S.. Cette différence peut aussi provenir du calcul de la composante spéculaire qui reste longtemps pratiquement constante avant de remonter rapidement aux très grands angles d'observation.

CONCLUSION PARTIELLE

Après l'étude détaillée de la composante spéculaire de la réflectance d'un couvert végétal, cette troisième partie nous a permis d'obtenir une bonne évaluation de la composante diffuse.

La modélisation présentée est l'adaptation de l'équation du transfert radiatif en milieu diffusant dans une couche de végétation, et sa résolution par la méthode des ordres successifs. Cette démarche présente l'avantage d'aboutir à un modèle mathématiquement précis, qui calcule la réflectance à différentes profondeurs du couvert et dans toutes les directions. Ce modèle est donc intéressant à la fois pour les agronomes qui recherchent l'énergie photosynthétiquement utilisée par les éléments internes du couvert, et pour les télédétectionnistes qui regardent plutôt les effets directionnels au-dessus du couvert.

Ce modèle, de par sa structure, fait ressortir la comparaison des paramètres caractéristiques de la diffusion (épaisseur optique et fonction de phase) entre une couche atmosphérique et un couvert végétal. La caractérisation de ce dernier passe toujours par le problème de l'évaluation de la fonction de distribution d'inclinaison des feuilles, auquel s'ajoute ici la connaissance indispensable des propriétés optiques des éléments diffusants du couvert et du sol sous-jacent.

Les évaluations de la réflectance diffuse des couverts de maïs et soja étudiés dans la partie 2, ont été obtenues à partir d'une distribution gaussienne de pentes de feuilles (cf 2.3.1.4.). Les propriétés spectrales de ces feuilles sont des valeurs prises dans la littérature, considérées comme caractéristiques d'une feuille verte en pleine santé. Il est alors remarquable que ces paramètres simples permettent de retrouver une bonne approximation de la réflectance diffuse d'un couvert, que ce soit dans le plan solaire ou dans le plan perpendiculaire.

La résultante de cette composante diffuse et de la réflectance spéculaire modélisée dans la partie précédente redonne donc finalement une bonne évaluation de la réflectance totale d'un couvert, à la fois en allure bidirectionnelle et en ordres de grandeur.

CONCLUSION GENERALE

La mesure de la polarisation de la lumière réfléchiée par un couvert végétal agricole en pleine croissance, est un moyen simple et efficace de séparer la réflectance du couvert, dans les longueurs d'onde du visible, en deux composantes bien distinctes: le rayonnement solaire directement réfléchi sur la surface des feuilles, et le rayonnement diffus ayant interagi avec les tissus foliaires internes.

La séparation nette entre ces deux composantes est possible dans ce domaine spectral ($\lambda < 700$ nm), où elles sont du même ordre de grandeur du fait de la forte absorption du rayonnement par les tissus foliaires qui ne rediffusent donc qu'une faible partie du rayonnement incident. La connaissance de la réflectance spéculaire permettra alors de mieux estimer le rayonnement effectivement utilisé pour la photosynthèse (P.A.R.).

Un intérêt particulier de notre étude est d'avoir essayé un suivi de la réponse polarisée d'un couvert donné pendant son développement. Cette signature semble suivre un comportement bidirectionnel reproductible, sauf si un phénomène particulier, tel le stress hydrique du soja ou la floraison mâle du maïs, apparaît et perturbe nettement la polarisation. Ces observations laissent donc penser qu'elles peuvent être maîtrisées par un modèle.

Nous avons montré qu'une modélisation simple de la réflexion spéculaire selon les équations de FRESNEL, permettait en effet de rendre compte de la plupart des mesures réalisées sur des couverts de maïs et de soja. La polarisation du rayonnement sortant dans une direction donnée est supposée provenir de la réflexion sur les surfaces foliaires du couvert, correctement orientées de façon à réfléchir la lumière solaire spéculairement dans la direction d'observation. Les ordres de grandeur et le comportement bidirectionnel de la lumière polarisée se retrouvent bien avec une fonction gaussienne simple de distribution d'inclinaison des feuilles.

Mais si cette fonction gaussienne est assez flexible pour restituer l'ensemble des observations, on constate qu'à différentes dates de mesure, les paramètres (θ_F , σ) d'un même couvert doivent varier pour une meilleure précision des ajustements. Il est possible qu'une fonction gaussienne soit trop simpliste pour caractériser la structure du couvert, et qu'une fonction plus élaborée soit mieux adaptée. Mais ces variations peuvent aussi traduire la sensibilité de la réflectance polarisée à des facteurs non pris en compte ici, en particulier le vent.

Il semble finalement, en admettant un pourcentage d'erreur raisonnable, que la polarisation bidirectionnelle d'un couvert végétal donné, puisse être comprise dans le cadre d'un tel modèle. Celui-ci permettrait de maîtriser le suivi de cette information, c'est-à-dire de comparer dans une même référence des données acquises à différentes dates sur un couvert donné, et donc de repérer les variations nettes dues à un phénomène tel le stress hydrique, la floraison ou l'épiaison.

Par contre, il ne semble pas que la polarisation permette de distinguer un couvert de soja d'un couvert de maïs, dont les réponses polarisées sont très voisines. L'information sur la structure des couverts, qu'on peut espérer attendre de la polarisation, n'est certainement pas évidente, et ce problème serait encore à étudier en étendant ce type d'observations à un échantillon beaucoup plus large de types de végétations.

La composante diffuse de la réflectance provient, par définition, de la diffusion du rayonnement par les feuilles. Nous avons mis au point une méthode de résolution de l'équation du transfert radiatif dans la végétation qui, compte-tenu des propriétés spectrales des feuilles, permet un calcul exact de la diffusion. Le modèle a été développé en supposant la réflexion diffuse des feuilles lambertienne, mais il serait facilement généralisable à une loi de réflexion plus précise. Les résultats de ce modèle (comme ceux déjà obtenus par le modèle SAIL) confirment que cette réflectance diffuse est beaucoup moins sensible aux variations de la fonction d'inclinaison des feuilles que la polarisation. Compte-tenu de la direction d'observation, l'estimation du P.A.R. est donc de la même façon relativement peu sensible à cette fonction. Cette remarque laisse alors espérer qu'une détermination même assez grossière des paramètres (θ_F , σ) à partir de la réflectance polarisée devrait suffire pour tenir compte de l'influence résiduelle de la structure du couvert dans l'estimation du P.A.R..

Notre programme des ordres successifs présente l'avantage (par rapport au modèle SAIL) de pouvoir être également généralisé (à l'aide des paramètres de STOKES) à une estimation plus rigoureuse de la polarisation, par la prise en compte des différents ordres de diffusion. Cette correction est sûrement négligeable dans la direction de réflexion spéculaire, mais pourrait expliquer les faibles polarisations observées en rétrodiffusion, et aider ainsi à un meilleur ajustement du modèle de réflectance polarisée.

Il est évident que les résultats présentés ici ne donnent qu'une bonne approche des phénomènes et nécessitent un approfondissement. Mais ils fournissent déjà une base solide permettant d'aborder deux applications intéressantes que sont, d'une part, la connaissance et l'interprétation des signaux satellitaires, et d'autre part, l'étude du rayonnement photosynthétiquement actif (P.A.R.) nécessaire à l'estimation de la production primaire de l'écosystème terrestre.

Du point de vue satellitaire, il serait maintenant simple d'évaluer le signal polarisé hors atmosphère à partir d'une modélisation standard de transmission atmosphérique couplée au modèle développé ici. Cette évaluation sera directement nécessaire au futur programme POLDER. Les valeurs de réflectances polarisées obtenues dans notre étude, de l'ordre de 1 à 2% dans la direction de réflexion spéculaire, seront accessibles si la sensibilité nominale de l'instrument POLDER est respectée, soit un NEDp de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$. Les premiers vols avion de POLDER, prévus au printemps 1990, apporteront un complément de données permettant de clarifier ces problèmes de la polarisation par les surfaces terrestres.

Par ailleurs, la capacité photosynthétique des plantes est actuellement estimée à l'aide d'indices de végétation tels que le rapport simple des réflectances obtenues dans le visible et l'infrarouge, ou leur différence normalisée. La réflectance spéculaire polarisée, qui n'a pas interagi avec les pigments foliaires, n'intervient pas dans la photosynthèse. Un objectif est donc de redéfinir des indices généralisés faisant intervenir les contributions polarisées et non polarisées de la réflectance, et de réinterpréter ces indices selon les caractéristiques de la plante, puis du couvert, pour une meilleure corrélation avec le P.A.R.. Cette étude sera l'objet d'un travail post-doctoral.

ANNEXE 1

CALCUL DE LA FONCTION "G" D'UN COUVERT

$$G(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta_N) |\cos\omega| \sin\theta_N \, d\theta_N \, d\varphi_N$$

tel que: $\cos\omega = \cos\theta_N \cos\theta + \sin\theta \sin\theta_N \cos(\varphi - \varphi_N)$

où θ est le zénith de la direction considérée:

$\theta = \theta_i$ pour l'éclairement solaire incident

$\theta = \theta_R$ dans la direction d'observation.

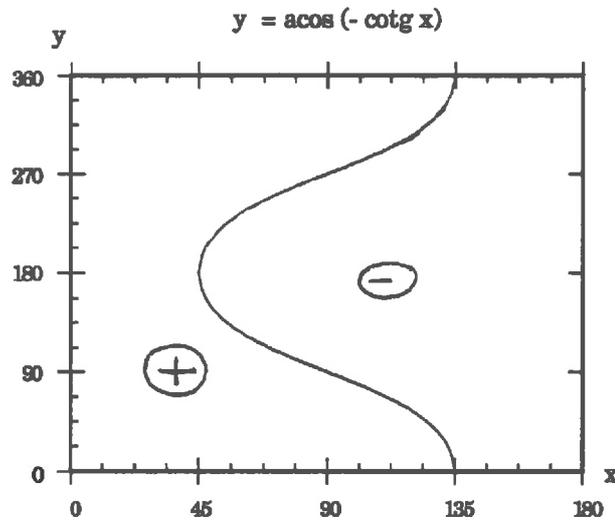
1. Calcul de "G(θ_i)"

avec:
$$\begin{aligned} \cos\omega &= \cos\theta_N \cos\theta_i + \sin\theta_i \sin\theta_N \cos(\varphi_N) \\ &= g(\theta_N, \varphi_N) \end{aligned}$$

Le problème est de déterminer le signe de cette fonction.

$$g(\theta_N, \varphi_N) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_N = \arccos(-\cotg\theta_N \cotg\theta_i)$$

La fonction $y = \arccos(-\cotgx)$ est représentée sur la figure suivante:
(x et y en degrés)



Cette courbe délimite la zone de changement de signe de la fonction $g(x,y) = \cos x + \sin x \cos y$:

$$\text{si } \left\{ \begin{array}{l} x \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right] \quad g(x,y) \geq 0 \\ x \in \left[\frac{3\pi}{4}, \pi\right] \quad g(x,y) \leq 0 \\ x \in \left[\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}\right] \left\{ \begin{array}{l} y_1 < y < y_2 \quad g(x,y) < 0 \\ y > y_1 \text{ ou } y > y_2 \quad g(x,y) > 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = \text{acos}(-\text{cotg}x) \\ y_2 = 2\pi - y_1 \end{array} \right.$$

Il en est de même pour la fonction $g(\theta_N, \varphi_N) = \cos \omega$:

$$\text{si } \left\{ \begin{array}{l} \theta_N \in [0, \theta_1] \quad \cos \omega \geq 0 \quad \forall \varphi_N \\ \theta_N \in [\theta_2, \pi] \quad \cos \omega \leq 0 \\ \theta_N \in [\theta_1, \theta_2] \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \quad \cos \omega < 0 \\ \varphi_N < \varphi_1 \text{ ou } \varphi_N < \varphi_2 \quad \cos \omega > 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \text{acos}(-\text{cotg}\theta_N \text{ cotg}\theta_i) \\ \varphi_2 = 2\pi - \varphi_1 \end{array} \right.$$

et θ_1, θ_2 tels que

$$-\text{cotg}\theta_N \text{ cotg}\theta_i \in [-1, 1] \quad \text{soit } \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \pi/2 - \theta_i \\ \theta_2 = \pi/2 + \theta_i \end{array} \right.$$

D'où la décomposition de l'intégrale $G(\theta_i)$ selon le signe de cette fonction, dont voici l'expression finale:

$$G(\theta_i) = 2\Pi \cos\theta_i \left[\int_0^{\theta_1} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N - \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N - \int_{\theta_1}^{\Pi} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N \right]$$

$$+ 4 \cos\theta_i \int_{\theta_1}^{\theta_2} \varphi f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N$$

$$+ 4 \sin\theta_i \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\varphi f(\theta_N) \sin\theta_N^2 d\theta_N$$

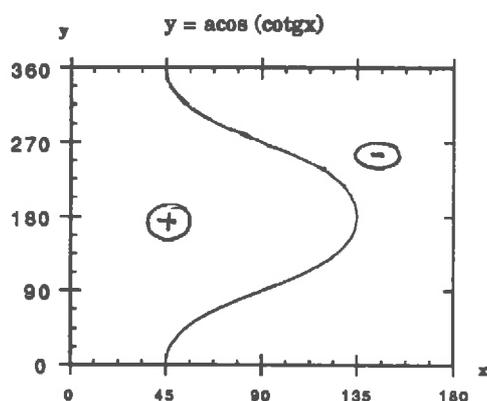
$$\text{avec : } \varphi = \arccos(-\cot\theta_N \cot\theta_i)$$

2. Calcul de "G(θ_R)"

Si l'observation se fait dans le plan principal (ou plan d'incidence des rayons solaires), deux cas se présentent:

- $\varphi_R = 0$, et le calcul est alors identique au précédent
- $\varphi_R = \pi$, soit $\cos\omega = \cos\theta_N \cos\theta_R - \sin\theta_R \sin\theta_N \cos(\varphi_N)$

Dans ce dernier cas, le signe de la fonction $g(x,y) = \cos x - \sin x \cos y$ est représenté sur la figure suivante:



D'où le signe de $\cos\omega$:

$$\text{si } \begin{cases} \theta_N \in [0, \theta_1] & \cos\omega \geq 0 \\ \theta_N \in [\theta_2, \Pi] & \cos\omega \leq 0 \end{cases} \quad \forall \varphi_N$$

$$\left| \theta_N \in [\theta_1, \theta_2] \right| \begin{array}{ll} \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 & \cos\omega > 0 \\ \varphi_N < \varphi_1 \text{ ou } \varphi_N < \varphi_2 & \cos\omega < 0 \end{array}$$

avec:

$$\left| \begin{array}{l} \varphi_1 = \arccos(\cotg\theta_N \cotg\theta_R) \\ \varphi_2 = 2\pi - \varphi_1 \end{array} \right.$$

et θ_1, θ_2 tels que

$$\cotg\theta_N \cotg\theta_R \in [-1, 1] \quad \text{soit} \quad \left| \begin{array}{l} \theta_1 = \pi/2 + \theta_R \\ \theta_2 = \pi/2 - \theta_R \end{array} \right.$$

et

$$\begin{aligned} G(\theta_R) = & 2\pi \cos\theta_R \left[\int_0^{\theta_1} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N + \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N - \int_{\theta_1}^{\pi} f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N \right] \\ & - 4 \cos\theta_R \int_{\theta_1}^{\theta_2} \varphi f(\theta_N) \cos\theta_N \sin\theta_N d\theta_N \\ & + 4 \sin\theta_R \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\varphi f(\theta_N) \sin^2\theta_N d\theta_N \end{aligned}$$

$$\text{avec : } \varphi = \arccos(\cotg\theta_N \cotg\theta_R)$$

Cette fonction est calculée par la sous-routine "fctg", présentée à la suite du programme principal "mode.f". Les intégrales sont calculées par la méthode simple des trapèzes dans la sous-routine "integ".

```

      program mode
c
c *****
c * POLARISATION de la Lumiere reflechie speculairement par la *
c *   vegetation , tq L.I.D.F. = fct gaussienne *
c * ----- *
c *           Calcul de la REFLECTANCE POLARISEE *
c *****
c
      implicit double precision (a-h,o-z)
      real lai
      external f1,f2,fd1,fdil
      character*20 nf,nff
      dimension sg(3),refpol(180,3)
      common/chif/cota
      common/s/sig,pi,yn
      common/feu/zf
c
      write(6,'(A)')'fichier resultats ?'
      read(5,'(a20)')nff
      open(9,file=nff)
      pi=3.14159265358
      pi2=pi/2
      c=pi/180.d+00
      fin=(1.5)**2
      er=1.d-04
      lai=4
c
      write(6,*)'inclinaison soleil ?'
      read(5,*)zsun
      write(6,*)'inclinaison moyenne des feuilles ?'
      read(5,*)zf
      write(6,*)'sigma ? (3 valeurs)'
      read(5,*)sg(1),sg(2),sg(3)
c
      do 800 k=1,3
      sig=sg(k)
c
c normalisation de la fonction  $\int_0^{\pi} f d\theta$ 
c -----
      c1=0
      i1=1
      call integ(fd1,c1,pi,er,i1,yn)
      write(6,*)yn
c
      b=1.d+00
      call fctg(zsun,b,gi)
c
c reflexion et polarisation
c -----
      do 100 i=5,175,5
c
      ic=1
c reflexion dans le plan solaire
      plin=float(i)
      zrad=plin-90
      if(zrad.gt.0) then
         arad=180.d+00
         b0=-1.d+00
         call fctg(zrad,b0,gr)
      endif
      if(zrad.lt.0) then
         arad=0.d+00
         zrad=abs(zrad)
         b0=1.d+00
         call fctg(zrad,b0,gr)
      endif
      if(zrad.eq.0) then
         call integ(f1,c1,pi2,er,i1,y1)
         call integ(f1,pi2,pi,er,i1,y2)
         gr=2*pi*(y1-y2)
      endif
      zrad=dabs(zrad)
c angle d'incidence sur les feuilles
      a1=dcos(arad*c)*dsin(zrad*c)*dsin(zsun*c)
      a2=dcos(zrad*c)*dcos(zsun*c)
      omega=0.5*dacos(a1+a2)

```

Jan 06 14:07 1990 mode.f Page 2

```

      om=omega/c
c   coefficients de FRESNEL
      co=dcos(omega)
      si=dsin(omega)**2
20  rr=(co-dsqrt(fin-si))/(co+dsqrt(fin-si))
      rl=(dsqrt(fin-si)-fin*co)/(dsqrt(fin-si)+fin*co)
      r1=0.5*(rr**2+rl**2)
      r2=0.5*(rr**2-rl**2)
      ra=r2/r1
c   ras=ra
      if(ic.eq.2) goto 25
      rav=ra
      r1v=r1
      r2v=r2
      if((plin-90).eq.zsun) then
        co=dcos(zsun*c)
        si=dsin(zsun*c)**2
        lc=ic+1
        goto 20
      else
        ras=0.
      endif
c   orientation des feuilles pour reflexion speculaire
25  b1=((dcos(zsun*c)+dcos(zrad*c))**2)/(2*(1+a1+a2))
      zfeu=dacos(dsqrt(b1))
c
c   reflectance polarisee
      cst=(gi/dcos(zsun*c))+(gr/dcos(zrad*c))
      ex1=dexp(-cst*lai)
      ex2=dexp(cst*lai)
      ek=(fdil(zfeu)/4)*ex1*(1/cst)*(ex2-1)
      refpol(i,k)=(pi*ek*r2v)/(dcos(zsun*c)*dcos(zrad*c))
c   reflectance
      ref=(pi*ek*r1v)/(dcos(zsun*c)*dcos(zrad*c))
c
c   100 continue
c
c   800 continue
      do 850 i=5,175,5
        write(9,30) i,(refpol(i,k),k=1,3)
30   format(2x,i3,3(3x,f12.5))
850  continue
      close(9)
      stop
      end
c
c
c   CALCUL DE LA FONCTION "G" DU COUVERT
c   *****
c
c   subroutine fctg(za,b,gc)
c   -----
      implicit double precision (a-h,o-z)
      external f1,f2,fd1,fdil
      common/chif/cota
      common/s/sig,pi,yn
      c=pi/180.d+00
      er=1.d-04
      tet1=(pi/2)-(za*c)
      tet2=(pi/2)+(za*c)
      cota=-b*dcos(za*c)/dsin(za*c)
      c1=0
      i1=1
      i2=2
      i3=3
      call integ(f1,c1,tet1,er,i1,y1)
      call integ(f1,tet2,pi,er,i1,y2)
      call integ(f1,tet1,tet2,er,i1,y3)
      call integ(f1,tet1,tet2,er,i2,y4)
      call integ(f2,tet1,tet2,er,i3,y5)
c
      gc1=2*pi*dcos(za*c)*(y1-y2-b*y3)
      gc2=4*b*dcos(za*c)*y4
      gc3=4*dsin(za*c)*y5
      gc=gc1+gc2+gc3
c   write(6,*)gc
      return

```

```

      end
c
c CALCUL D'INTEGRALES
c *****
c
      subroutine integ(fct,a,b,er,i,w)
c -----
      implicit double precision (a-h,o-z)
      external fct
      common/chif/cota
      dimension x(600),y(600),ph(600)
      w=0.d+00
      w1=0.d+00
      n=100
      c=1
      x(1)=a
      if(i.eq.1) then
         y(1)=fct(a)
      else
         ph(1)=dacos(cota*(dcos(a)/dsin(a)))
         if(i.eq.2) y(1)=ph(1)*fct(a)
         if(i.eq.3) y(1)=dsin(ph(1))*fct(a)
      endif
5     x(n+1)=b
      if(i.eq.1) then
         y(n+1)=fct(b)
      else
         cotb=cota*(dcos(b)/dsin(b))
         if(cotb.gt.1) cotb=1.d+00
         if(cotb.lt.-1) cotb=-1.d+00
         ph(n+1)=dacos(cotb)
         if(i.eq.2) y(n+1)=ph(n+1)*fct(b)
         if(i.eq.3) y(n+1)=dsin(ph(n+1))*fct(b)
      endif
      h=(b-a)/float(n)
      s=0.d+00
      do 10 j=2,n
         x(j)=x(j-1)+h
         if(i.eq.1) then
            y(j)=fct(x(j))
         else
            cotb=cota*(dcos(x(j))/dsin(x(j)))
            ph(j)=dacos(cotb)
            if(i.eq.2) y(j)=ph(j)*fct(x(j))
            if(i.eq.3) y(j)=dsin(ph(j))*fct(x(j))
         endif
         s=s+y(j)
10     continue
         w=(0.5*(y(1)+y(n+1))+s)*h
         if(c.eq.1) w1=w
         n=n+5
         c=c+1
         if(c.eq.2) goto 5
         d=w1-w
         if(dabs(d).gt.er) then
            w1=w
            c=c-1
            goto 5
         endif
         return
      end
c
c
      function f1(x)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      external fdil
      b1=fdil(x)*dcos(x)*dsin(x)
      f1=b1
      return
      end
c
      function f2(x)
      implicit double precision (a-h,o-z)
      external fdil
      f2=fdil(x)*dsin(x)*dsin(x)
      return
      end

```

C
C DISTRIBUTION D'INCLINAISON DES FEUILLES : L.I.D.F.

C -----
function fd1(z)
implicit double precision (a-h,o-z)
common/s/sig,pi
common/feu/zf
zo=zf*pi/180
fd1=dsin(z)*dexp(-((z-zo)**2)/(2*(sig**2)))
return
end

C
function fdil(z)
implicit double precision (a-h,o-z)
common/s/sig,pi,yn
common/feu/zf
zo=zf*pi/180
a1=dexp(-((z-zo)**2)/(2*(sig**2)))
fdil=a1/(yn*2*pi)
return
end

ANNEXE 2

Le programme "*succ.f*" présenté ci-après est la résolution de l'équation du transfert radiatif dans un couvert végétal, par la méthode des ordres successifs.

Les fonctions $G(\mu)$ et les fonctions de phase $p(\theta_i, \theta_R, \varphi_R)$ sont calculées dans le programme "*muphase.f*".

```

program succ
c *****
c *   DIFFUSIONS MULTIPLES DANS UN COUVERT VEGETAL   *
c *   par la methode                                 *
c *   des ORDRES SUCCESSIFS                          *
c *****
c
c   implicit double precision (a-h,o-z)
c   character*20 nf,nf1,nf2
c   dimension tetr(25),zmu(25),azr(36),hh(21),GMU(25),PH(25,25,36)
c   dimension TI(21,25,36), TSI(21,25,36),TJ(21,25,36),T11(21,25,36)
c   dimension texps(21),texp(21)
c
c GMU= tableau fct G(mu)
c PH= fonction de phase
c   GMU et PH sont calcules dans le programme "muphase"
c TI= tableau I(L,teta,phi)
c TSI= tableau somme des I(L,teta,phi)
c TJ= tableau fonction source J(L,teta,phi)
c n= 24 points de GAUSS
c L= 20 couches du couvert
c 36 valeurs de phi (par pas de 10 degres)
c
c   common/rad/pi
c   pi=dacos(-1.d+00)
c   c=pi/180.d+00
c   c10=c*10.d+00
c   pi4=pi*4.d+00
c   delta=180.d+00/24.d+00
c   deltac=pi/24.d+00
c   er=1.d-04
c   nb=1
c
c   write(6,*)'fichier resultats?'
c   read(5,'(A)')nf
c   write(6,*)'zenith incident (en degres)?'
c   read(5,*)zsun
c   asun=0.d+00
c   h1=4
c   write(6,*)'coeff de reflexion?'
c   read(5,*)r
c   write(6,*)'coeff de transmission?'
c   read(5,*)t
c   write(6,*)'reflectance du sol?'
c   read(5,*)rs
c
c   write(6,*)'fichier fctgmu?'
c   read(5,'(A)')nf1
c   write(6,*)'fichier fctphase?'
c   read(5,'(A)')nf2
c   open(1,file=nf1)
c   read(1,*)(GMU(i),i=1,25)
c   close(1)
c   open(2,file=nf2)
c   do 1 i=1,25
c   do 1 j=1,25
c   read(2,*)(PH(i,j,k),k=1,19)
c     do 2 k=20,36
c     PH(i,j,k)=PH(i,j,38-k)
c   continue
c 2 continue
c 1 close(2)
c   do 3 i=1,25
c   do 3 j=1,25
c   p0=PH(i,j,1)
c   do 4 k=1,35
c   PH(i,j,k)=PH(i,j,k+1)
c 4 continue
c   PH(i,j,36)=p0
c 3 continue
c
c   open(3,file=nf)
c   write(3,9)h1,r,t,zsun
c 9 format(2x,'H=',f4.2,2x,'R=',f5.3,2x,'T=',f5.3,2x,'teta=',f4.0)
c   write(3,*)'
c
c   ii=int(zsun*24.d+00/180.d+00)

```

Jan 16 17:12 1990 succ.f Page 2

```

      zsun=zsun*c
      zmus=dcos(zsun)
      gs=GMU(ii)
      gms=gs/zmus
c
c reflectance du sol
      sol=.rs*zmus/pi
c atténuation par le couvert
      sol=sol*dexp(gms*h1)
c
c valeurs des "teta" et "phi" en rad
      do 5 i=1,25
        tetr(i)=float(i-1)*deltac
        zmu(i)=dcos(tetr(i))
      5 continue
      do 6 j=1,36
        azr(j)=float(j)*c10
      6 continue
c couches du couvert
      delth=h1/20.d+00
      do 7 i=1,21
        hh(i)=float(i-1)*delth
      7 continue
c
c remplissage des tableaux TI et TSI par I(1)
c -----
      do 10 i=1,21
        h=hh(i)
        texps(i)=dexp(gms*h)
      10 continue
c
      do 50 j=1,25
        zmu(j)=zmu(j)
        if(j.eq.13) zmu(j)=0.d+00
        gr=GMU(j)
        if(zmu(j).ne.0.d+00) then
          gm=gr/zmu(j)
          do 26 i=1,21
            h=hh(i)
            texp(i)=dexp(gm*h)
          26 continue
        endif
        do 50 k=1,36
          TI(21,j,k)=sol
          p=PH(i,j,k)
          if(zmu(j).eq.0.d+00) then
            do 30 i=1,21
              TI(i,j,k)=p*texps(i)/(pi4*gr)
              TSI(i,j,k)=TI(i,j,k)
            30 continue
            goto 50
          endif
          if(zmu(j).eq.zmus) goto 100
          if(zmu(j).lt.0.d+00) then
            do 40 i=1,21
              a1=texps(i)-texp(i)
              TI(i,j,k)=-p*a1/(pi4*zmu(j)*(gms-gm))
              TSI(i,j,k)=TI(i,j,k)
            40 continue
          endif
          if(zmu(j).gt.0.d+00) then
            do 45 i=1,21
              h=hh(i)
              as=sol*dexp(gm*(h-h1))
              a1=dexp((h1-h)*(gms-gm))-1.d+00
              b1=pi4*zmu(j)*(gms-gm)
              TI(i,j,k)=(p*texps(i)*a1/b1)+as
              TSI(i,j,k)=TI(i,j,k)
            45 continue
          endif
        endif
      goto 50
c si zmu(j)=zmus<0
      100 do 47 i=1,21
          h=hh(i)
          TI(i,j,k)=-p*texps(i)*h/(pi4*zmu(j))
          TSI(i,j,k)=TI(i,j,k)
        47 continue

```

Jan 16 17:12 1990 succ.f Page 3

```

50 continue
c
c Fonction source J
c -----
      deltpi=pi/24.d+00
      delph=2*pi/36.d+00
      pdt=deltpi*delph
200 do 300 i=1,21
      h=hh(i)
      do 290 j=1,25
        zmu(j)=zmu(j)
        if(zmu(j).eq.0.d+00) goto 290
      do 280 k=1,36
        s=0.d+00
          do 250 j1=1,25
            zen=tetr(j1)
            sz=dsin(zen)
            do 250 k1=1,36
              if(k1.gt.k) k2=k1-k
              if(k1.lt.k) k2=k-k1
              if(k1.eq.k) k2=36
              p=PH(j1,j,k2)
              y=p*TI(i,j1,k1)*sz
              s=s+y*pdt
            continue
          TJ(i,j,k)=-s/(pi*4*zmu(j))
        280 continue
      290 continue
      do 295 k=1,36
        TJ(i,13,k)=0.5*(TJ(i,12,k)+TJ(i,14,k))
      295 continue
    300 continue
c
c Calcul de I(2) a partir de la fonction source
c -----
c reflexion secondaire sur le sol
      s=0.d+00
      do 310 j=14,25
        zmu(j)=zmu(j)
        gj=GMU(j)
        gmj=gj/zmu(j)
        si=dsin(tetr(j))*pdt
      do 310 k=1,36
        s=s+dabs(zmu(j))*TI(21,j,k)*si
    310 continue
      do 315 j=1,13
        do 315 k=1,36
          TI1(31,j,k)=rs*s/pi
    315 continue
c
c diffusion secondaire par le couvert
      s=0.d+00
      do 402 j=1,25
        zmu(j)=zmu(j)
        if(zmu(j).eq.0.d+00) goto 402
        gj=GMU(j)
        if(zmu(j).ne.0.d+00) then
          gmj=gj/zmu(j)
          if(zmu(j).gt.0.d+00) exj=dexp(-gmj*delth)
          if(zmu(j).lt.0.d+00) exj=dexp(gmj*delth)
        endif
      do 400 k=1,36
        if(zmu(j).lt.0.d+00) then
          TI1(1,j,k)=0.d+00
          do 340 i=2,21
            ex=0.5*(TJ(i-1,j,k)*exj+TJ(i,j,k))
            TI1(i,j,k)=TI1(i-1,j,k)*exj+ex*delth
          continue
        340 endif
        if(zmu(j).gt.0.d+00) then
          as=dexp(gmj*(hh(20)-h1))*TI1(21,j,k)
          TI1(20,j,k)=-TJ(20,j,k)*delth+as
          do 350 i=1,19
            i1=20-i
            ex=0.5*(TJ(i1+1,j,k)*exj+TJ(i1,j,k))
            TI1(i1,j,k)=TI1(i1+1,j,k)*exj-ex*delth
          350 continue

```

```

        endif
400 continue
402 continue
c si zmu=0 (teta=90)
    do 405 i=1,21
    do 405 k=1,36
        T11(i,13,k)=0.5*(T11(i,12,k)+T11(i,14,k))
405     continue
c
c test de convergence
c -----
    write(6,*)nb
    do 500 i=1,21
    do 500 j=1,25
    do 500 k=1,36
        if(T11(i,j,k).gt.0.0001) goto 501
500     continue
        goto 503
501 do 502 i=1,21
    do 502 j=1,25
    do 502 k=1,36
        TSI(i,j,k)=TSI(i,j,k)+T11(i,j,k)
        TI(i,j,k)=T11(i,j,k)
502     continue
        nb=nb+1
        goto 200
c
c sauvegarde des resultats
c -----
503 write(3,504)nb
504 format(x,'nbre de diffusions =',i2)
    write(3,*)' '
    do 550 i=1,2
    write(3,505)i
505 format(2x,'i=',i2,' couches')
    do 555 j=1,25
        tet=float(j-1)*delta
    write(3,506)tet
506 format(4x,'teta=',f6.2)
    write(3,510)(TSI(i,j,k),k=1,36)
510 format(x,36(e12.5,x))
555 continue
    write(3,*)' '
550 continue
c
    close(3)
    stop
    end

```

```

program muphase
c *****
c * Calcul des fonctions G(mu) et des fonctions de PHASES *
c * utilisees dans le programme "succ", estimant les *
c * DIFFUSIONS MULTIPLES DANS UN COUVERT VEGETAL *
c * par la methode des ORDRES SUCCESSIFS *
c * ----- *
c * L.I.D.F. = fonction gaussienne *
c *****
c
c implicit double precision (a-h,o-z)
c external g
c dimension tetr(25),zmu(25),azr(19),GMU(25),PH(25,25,19)
c common/rad/pi,cn2
c common/feu/zo,sig
c
c GMU= tableau fct G(mu)
c PH= fonction de phase
c r= coefficient de reflexion des feuilles
c t= coefficient de transmission
c zo= inclinaison moyenne des feuilles
c sig= sigma de la fct gaussienne
c
c pi=dacos(-1.d+00)
c c=pi/180.d+00
c c10=c*10.d+00
c deltac=pi/24.d+00
c
c r=0.135
c t=0.055
c zo=30.d+00*c
c sig=4.d-01
c
c fichiers resultats
c open(1,file='fctgmu')
c open(2,file='fctphase')
c
c valeurs des "teta" et "phi" en rad
c do 4 i=1,25
c tetr(i)=float(i-1)*deltac
c zmu(i)=dcos(tetr(i))
4 continue
c do 5 j=1,19
c azr(j)=float(j-1)*c10
5 continue
c
c normalisation de la L.I.D.F.
c cn=0.d+00
c do 6 i=1,25
c tet=tetr(i)
c cn=cn+g(tet)*dsin(tet)*deltac
6 continue
c cn2=cn/2
c
c call cste
c
c fonction G(mu)
c -----
c do 10 i=1,25
c tet=tetr(i)
c call fctg(tet,gr)
c GMU(i)=gr
10 continue
c
c fonction de phase
c -----
c do 20 i=1,25
c tet1=tetr(i)
c do 20 j=1,25
c tet2=tetr(j)
c do 20 k=1,19
c azim=azr(k)
c call phase(tet1,tet2,azim,r,t,p)
c PH(i,j,k)=p
20 continue
c
c
c

```

Jan 16 17:15 1990 muphase.f Page 2

```

c sauvegarde des resultats
c -----
c
  write(1,*)(GMU(i),i=1,25)
  close(1)
  do 50 i=1,25
  do 50 j=1,25
  write(2,*)(PH(i,j,k),k=1,19)
50 continue
  close(2)
  stop
  end

c
c Remplissage des tableaux constants dans les sousroutines
  subroutine cste
  -----
  implicit double precision (a-h,o-z)
  external g
  common/cst1/gg(200),phi(300),cophi(300)
  common/cst2/teta(200),coteta(200),siteta(200)
  common/dt/delt,delph
  common/rad/pi,cn2

c
  n=199
  m=299
  delt=pi/float(n)
  delph=2*pi/float(m)
  teta(1)=0.d+00
  phi(1)=0.d+00
  teta(200)=pi
  phi(300)=2*pi
  do 10 i=2,n
  teta(i)=teta(i-1)+delt
10 continue
  do 15 j=2,m
  phi(j)=phi(j-1)+delph
15 continue
  do 20 j=1,300
  cophi(j)=dcos(phi(j))
20 continue
  do 25 i=1,200
  coteta(i)=dcos(teta(i))
  siteta(i)=dsin(teta(i))
  gg(i)=g(teta(i))/cn2
25 continue
  return
  end

c
c FONCTION DE PHASE DU COUVERT
c *****
c
  subroutine phase(zsun,zvis,avis,r,t,w)
  -----
  implicit double precision (a-h,o-z)
  dimension acophi(300)
  common/cst1/gg(200),phi(300),cophi(300)
  common/cst2/teta(200),coteta(200),siteta(200)
  common/dt/delt,delph
  common/rad/pi

c
  cs=dcos(zsun)
  ss=dsin(zsun)
  cv=dcos(zvis)
  sv=dsin(zvis)
  cav=dcos(avis)
  w=0.d+00
  n=199
  m=299
  do 7 j=1,300
  acophi(j)=dcos(avis-phi(j))
7 continue
  sf=0.d+00
  do 20 i=2,n
  s=0.d+00
  s1=0.d+00
  st=siteta(i)
  ct=coteta(i)

```

Jan 16 17:15 1990 muphase.f Page 3

```

        x=gg(i)
        a1=cs*ct
        a2=ss*st
        a=a1+a2
        b1=cv*ct
        b2=sv*st
        b=b1+b2*cav
c      a*b = produit des cos(omega)
        if(a*b.lt.0.d+00) coef=r
        if(a*b.gt.0.d+00) coef=t
        y=x*dabs(a)*dabs(b)*coef*st
        s1=y*delph
        do 10 j=2,m
            a=a1+a2*cophi(j)
            b=b1+b2*acophi(j)
            if(a*b.lt.0.d+00) coef=r
            if(a*b.gt.0.d+00) coef=t
            y=x*dabs(a)*dabs(b)*coef*st
            s=s+y*delph
10     continue
        sf=sf+(s+s1)*delt
20     continue
        w=sf
        w=w/pi
        return
        end
c
c
c FONCTION "G(cos(teta))"
c *****
c
c      subroutine fctg(zsun,z)
c      -----
c      implicit double precision (a-h,o-z)
c      common/cst1/gg(200),phi(300),cophi(300)
c      common/cst2/teta(200),coteta(200),siteta(200)
c      common/dt/delt,delph
c      common/rad/pi
c
c      cs=dcos(zsun)
c      ss=dsin(zsun)
c      z=0.d+00
c      z1=0.d+00
c      co=1
c      n=199
c      m=299
c      sf=0.d+00
c      do 30 i=2,n
c      s=0.d+00
c      s1=0.d+00
c          ct=coteta(i)
c          st=siteta(i)
c          x=gg(i)
c          a1=cs*ct
c          a=a1+ss*st
c          y=x*dabs(a)*st
c          s1=y*delph
c          do 25 j=2,m
c              a=a1+ss*st*cophi(j)
c              y=x*dabs(a)*st
c              s=s+y*delph
25     continue
c          sf=sf+(s+s1)*delt
30     continue
c          z=sf/(4*pi)
24     return
c         end
c
c DISTRIBUTION D'INCLINAISON DES FEUILLES
c *****
c
c      function g(z)
c      implicit double precision (a-h,o-z)
c      common/feu/zo,sig
c      g=dexp(-((z-zo)**2)/(2*(sig**2)))
c      return
c      end

```

BIBLIOGRAPHIE

- ASRAR G. (1989) : "Theory and Applications of Optical Remote Sensing". Wiley - Interscience, 734p.

- BALOIS J.Y. (1985) : "Mise au point, essais, étalonnage et intégration d'un radiomètre-polarimètre infrarouge embarquable à bord d'une plateforme stratosphérique". Mémoire de diplôme d'ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers. LILLE.

- BARET F. (1986) : "Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales". Thèse. Université de Paris-Sud, centre d'Orsay.

- BENASSI M., GARCIA D.M., KARP A.H., SIEWERT C.E. (1984) : "A high-order spherical harmonics solution to the standard problem in radiative transfer". *Astrophysical Journal*, 280, 853- 864.

- BONHOMME R., VARLET GRANCHER C., (1978) : "Estimation of gramineous crop geometry by plant profiles including leaf with variations". *Photosynthetica*, 12 (2), 193-196.

- BOWERS S.A., HANKS R.J. (1965) : "Reflection of radiant energy from soils". *Soil Sci.* 100, 130-138.

- BREECE H.T., HOLMES R.H. (1971) : "Bidirectionnal characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo". *Appl. Optics*, 10, 119-127.

- BRUHAT G., KASTLER A. (1959) : "Cours de physique générale: Optique". Cinquième ed. Masson et Cie, 908p.

- CAMILLO P. (1987) : "A canopy reflectance model based on an analytical solution to the multiple scattering equation". *Remote Sens. Environ.* 23: 453- 477.

- 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.

- CHANDRASEKHAR S. (1950) : "Radiative Transfer". Oxford

- CIHLAR J., DOBSON M.C., SCHMUGGE T., HOOGEBOOM P., JANSE A.R.P., BARET F., GUYOT G., LE TOAN T., PAMPALONI P. (1987) : "Procedures for the description of agricultural crops and soils in optical and microwave remote sensing studies". *Int. J. Remote Sensing*, vol 8, n°3: 427- 439.

- COX C., MUNK W. (1954) : "Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter". *Journal of the Optical Society of America*, vol.44, n°11, pp 838-850.

- CURRAN P.J. (1978) : "A photographic method for the recording of polarized visible light for soil surface moisture indication". *Remote Sens. Environ.* 7: 305-322.

- CURRAN P. (1981) : "The Relationship between Polarized Visible Light and Vegetation Amount". *Remote Sens. Environ.* 11: 87-92

- CURRAN P.J. (1982) : "Polarized visible light as an aid to vegetation classification" . *Remote Sens. Environ.* 12: 491-499.

- DEERING D.W., ECK T.F. (1987) : "Atmospheric optical depth effects on angular anisotropy of plant canopy reflectance". *Int. J. Remote Sensing*, vol 8 n°6 893-916.

- DESCHAMPS P.Y., HERMAN M., TANRE D. (1983) : "Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la terre entre 0.35 et 4 μm ". *Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Techniques de Lille. Contrat ESA 4393/80/F/DD (sc)*, 188p.

- DEUZE J.L., HERMAN M., ROGER J.C., SANTER R. (1988) : "Modélisation de l'état de polarisation du rayonnement atmosphérique ascendant. Partie 1: Atmosphère limitée par un sol lambertien". Rapport interne. Laboratoire d'Optique Atmosphérique; Université des Sciences et Techniques de Lille.

- DEUZE J.L., HERMAN M., SANTER R. (1988) : "Modélisation de l'état de polarisation du rayonnement atmosphérique ascendant. Partie 2: Atmosphère limitée par un océan agité". Rapport interne. Laboratoire d'Optique Atmosphérique. Lille.

- DEUZE J.L., HERMAN M., SANTER R. (1989) : "Modélisation de l'état de polarisation du rayonnement atmosphérique ascendant. Partie 3: Atmosphère limitée par un sol polarisant". Rapport interne. Laboratoire d'Optique Atmosphérique. Lille.

- DEVAUX C., FOUQUART Y., HERMAN M., LENOBLE J. (1973) : "Comparaison de diverses méthodes de résolution de l'équation de transfert radiatif dans un milieu diffusant". *J. Quant. Spectros. Rad. Transfer*, 13, 1421- 1431.

- DE WIT C.T. (1959) : "Potential photosynthesis of crop surfaces". *Neth. J. Agric. Sci.* 7: 141-149.

- EGAN W.G. (1985) : "Photometry and Polarisation in Remote Sensing". Elsevier, Science Publishing Co.

- FLEURY P., MATHIEU J.P. (1959) : "Lumière". Ed Eyrolles.

- FUNG A.K. (1984) : "Surface scattering effects at different spectral regions". II^e colloque international de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection. Bordeaux, sept 83. Les colloques de l'INRA n°23: 693-707.

- GOEL N.S., STREBEL D.E. (1984) : "Simple Beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies". *Agronomy Journal*, vol.76, pp 800-802.

- GRANT L. (1985) : "Polarized and non-polarized components of Leaf Reflectance". Thesis. Purdue University.
- GRANT L. (1987) : "Diffuse and Specular Characteristics of Leaf Reflectance". *Remote Sens. Environ.* 22: 309-322.
- GRANT L., DAUGHTRY C.S.T., VANDERBILT V.C. (1987) : "Polarized and non-polarized leaf reflectances of *Coleus Blumei*". *Environmental and Experimental Botany*, Vol.27 n°2, pp 139-145.
- GRANT L., DAUGHTRY C.S.T., VANDERBILT V.C. (1987): "Variations in the Polarized Leaf Reflectance of *Sorghum bicolor*". *Remote Sens. Environ.* 21: 333-339.
- GUYOT G. (1984) : "Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge. Application à la Télédétection". *Bul S.F.P.T.* n°95.
- GUYOT G. (1984) : "Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge". II^e Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux, sept 1983, Les Colloques de L'INRA n°23.
- GUYOT G. (1989) : "Les signatures spectrales des surfaces naturelles". *Télédétection Satellitaire* n°5, Paradigme, Caen, 178p.
- GUYOT G., SEGUIN B. (1988) : "Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie". *Agronomie* 8(1),1-13.
- JACQUEMOUD S., BARET F., GUYOT G. (1989) : "modelization of leaf optical properties for interpreting high spectral resolution reflectance measurements". Communication présentée au congrès de l'EARSSEL, Espoo, Finlande, juin 1989, 12p.
- JOHANNSEN C.J., BAUMGARDNER M.F. (1968) : "Remote sensing for planning resource conservation". *Proc. of 1968 Ann. Meet. Soil Cons. Soc. of Am.*, 149- 155.

- LICHTENTHALER H.K., PFISTER K. (1978) : "Praktikum der Photosynthese". Quelle & Meyer Verlag, Heidelberg.
- NILSON T., KUUSK A. (1989) : "A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion". *Remote Sens. Environ.* 27: 157-167
- PREVOT L. (1985) : "Modelisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application à la télédétection. Validation sur un couvert de maïs". Thèse de Doctorat, Université Paris 6.
- RANSON K.J. et al (1981) : "Soybean canopy reflectance as a function of view and illumination geometry". *Proc. 15th Int. Symp. of Remote Sensing Environ.. Univ. of Michigan, Ann Arbor*, pp 853-865.
- REYNA E., BADHWAR G.D. (1985) : "Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol GE-23 n°5, 731-736.
- ROSS J. (1981) : "The radiation regime and architecture of plant stands". Dr W. Junk Publishers. The Hague-Boston-London 1981.
- ROSS J.K., MARSHAK A.L. (1988) : "Calculation of canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method". *Remote Sens. Environ.* 24: 213-225.
- SHULTIS J.K., MYNENI R.B. (1988) : "Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering". *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* Vol 39 n°2 pp 115-129.
- SINCLAIR T.R., HOFFER R.M., SCHREIBER M.M. (1971) : "Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season". *Agronomy Journal*, Vol.63, pp.864-868.
- SINCLAIR T.R., SCHREIBER M.M., HOFFER R.M. (1973) : "A diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves". *Agronomy Journal*, Vol.65, pp.276-283.

- SUITS G.H. (1972) : "The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy". *Remote Sens. Environ.* 2: 117-125.

- TALMAGE D.A., CURRAN P.J. (1986) : "Remote sensing using partially polarized light". *Review Article. Int. J. Remote Sensing*, vol.7, n°1, pp 47-64.

- TANRE D., DEROO C., DUHAUT P., HERMAN M., MORCRETTE J.J., PERBOS J., DESCHAMPS P.Y. (1986) : "Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)". *User's guide*, available from L.O.A., Université des Sciences de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France. 350p.

- VANDERBILT V.C. et al. (1981) : "Linear polarization of light by two wheat canopies mesured at many view angles". *Colloque international de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*. Avignon, sept 81. *Les colloques de l'INRA n°5*: 217-224.

- VANDERBILT V.C., GRANT L. (1984) : "Light polarization measurements: A method to determine the specular and diffuse light-scattering properties of both leaves and plant canopies". *II^e colloque international de Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*. Bordeaux, sept 83. *Les colloques de l'INRA n°23*: 55-66

- VANDERBILT V.C., GRANT L. (1985) : "Plant Canopy Specular Reflectance Model". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol GE-23, n°5, sept 1985.

- VANDERBILT V.C., GRANT L., BIEHL L., ROBINSON B.F. (1985) : "Specular, diffuse and polarized light scattered by two wheat canopies". *Appl. Optics* 24: 2408-2418.

- VANDERBILT V.C., DE VENEZIA K.J. (1988) : "Specular, diffuse and polarized imagery of an oat canopy". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 26, n°4, pp 451- 462.

- VANE G., GOETZ A.F.H. (1988) : "Terrestrial imaging spectroscopy". *Remote Sens. Environ.* 24: 1-29.

- VERHOEF W. (1984) : "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model". *Remote Sens. Environ.* 16: 125-141.

- WOESSNER P., HAPKE B. (1987) : "Polarization of light scattered by clover". *Remote Sens. Environ.* 22: 243-261.

Thèse de Doctorat de l' Université PARIS VII

spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection

par : Geneviève Rondeaux

Titre : Polarisation de la lumière réfléchi par un couvert végétal

Résumé :

La polarisation permet de séparer la réflectance d'un couvert végétal, dans les longueurs d'onde du visible, en deux composantes distinctes: le rayonnement solaire directement réfléchi sur la surface des feuilles, et le rayonnement diffus qui a interagi avec les tissus foliaires internes.

La réflectance spéculaire est modélisée à partir des équations de FRESNEL. La structure du couvert est caractérisée par sa fonction de distribution d'inclinaison des feuilles, qui détermine la valeur directionnelle de la polarisation. Ce modèle est étudié avec une fonction gaussienne. Il est confronté à un ensemble de mesures expérimentales réalisées sur des couverts de soja et maïs à différentes dates.

La modélisation de la réflectance diffuse est l'adaptation de l'équation du transfert radiatif en milieu diffusant à un couvert végétal, et sa résolution par la méthode des ordres successifs. Ce modèle permet un calcul exact des différents ordres de diffusion.

Ces modèles mettent en évidence l'importance de la réflectance spéculaire par rapport à la réflectance diffuse. Ils pourront permettre d'une part, d'évaluer le signal polarisé hors atmosphère, et d'autre part, de corriger les calculs d'estimation de l'énergie photosynthétiquement utilisée par le couvert.

Bibliothèque
I.N.R.A. - C.S.E.
Unité Climat Sol et Environnement
Bâtiment Climat
Site Agroparc
F. 84914 AVIGNON Cedex 9
FRANCE

AHTH13