

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 REPONSE 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.

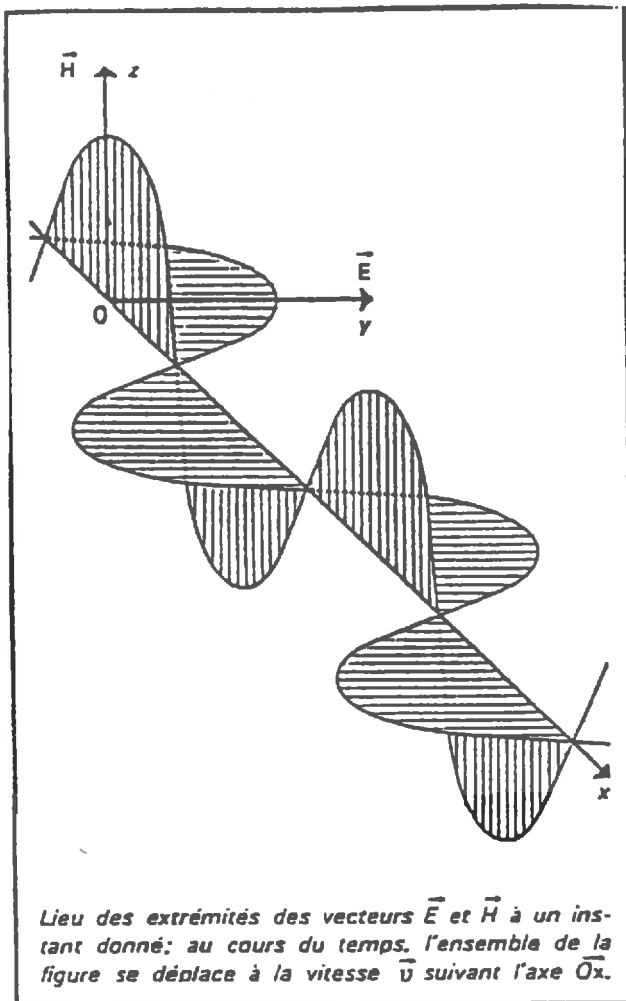


Figure 1.1

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

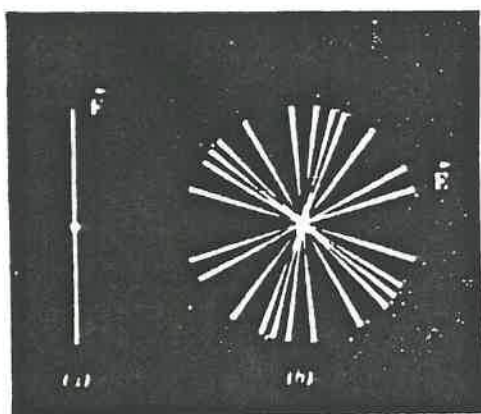
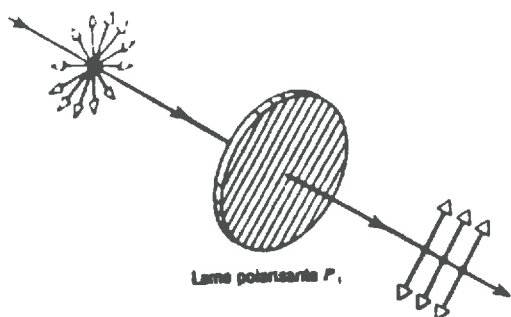


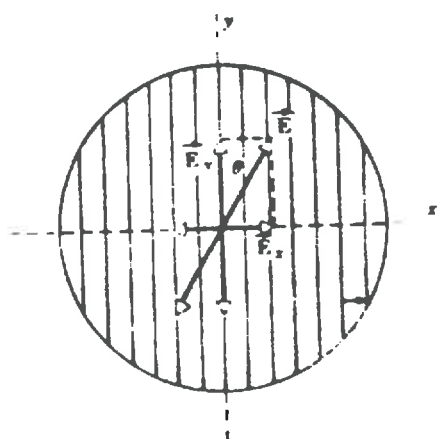
Figure 1.2

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

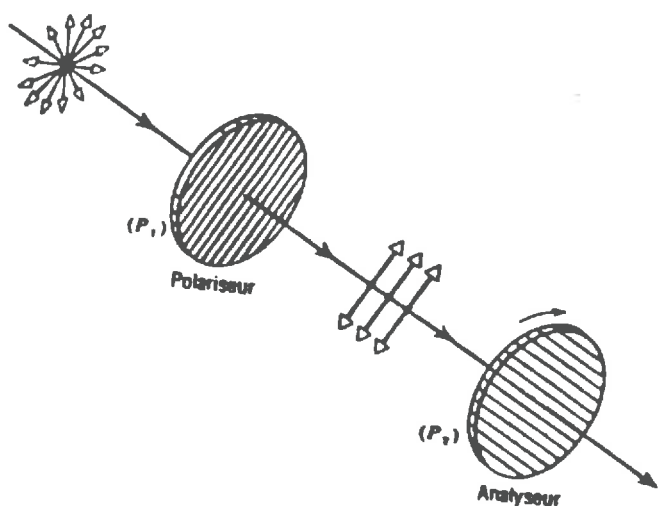
(b) Onde transversale non polarisée, considérée comme une superposition au hasard de plusieurs trains d'ondes polarisés linéairement.



(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.

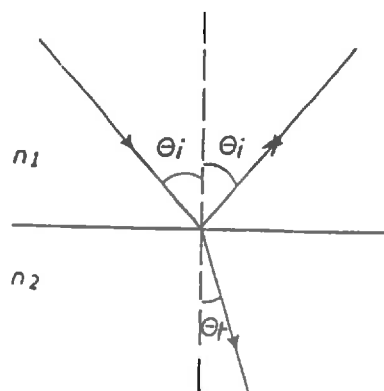


Figure 1.4
Réflexion et réfraction
d'un rayon lumineux.

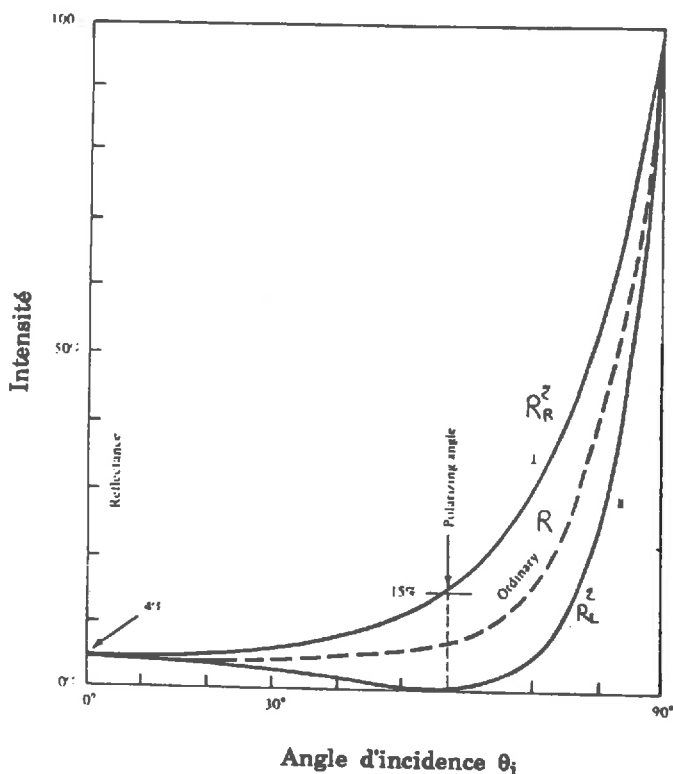


Figure 1.5
Variation des facteurs de
réflexion en fonction de l'angle
d'incidence θ_i :
cas où $n_2/n_1 = 1.5$
(d'après Jenkins and White, 1957
Egan, 1985)

Taux de polarisation

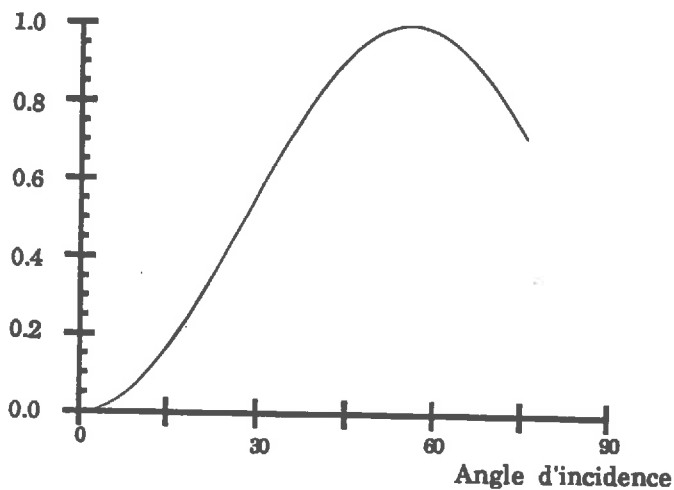


Figure 1.6
Variation du taux de polarisa-
tion du rayonnement réfléchi en
fonction de θ_i .

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 réfléchi. 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 réfléchi 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 représentés 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.

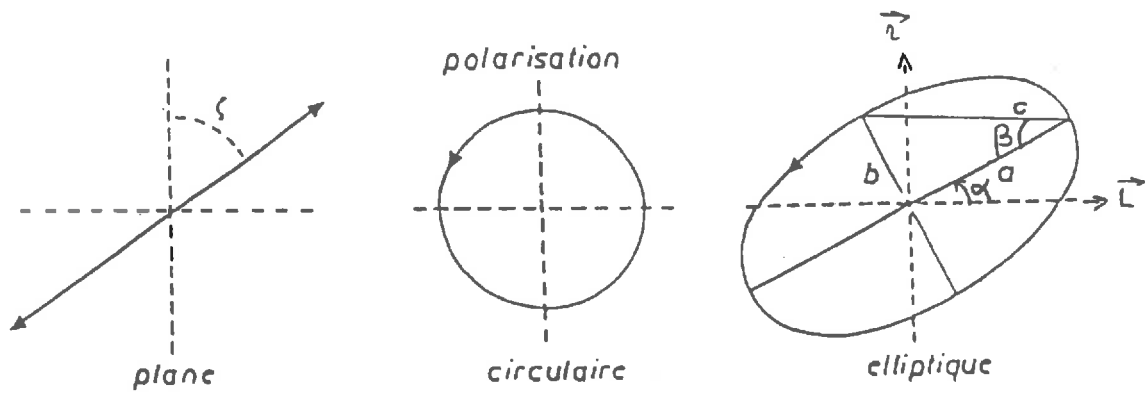


Figure 1.7

Les différents états de polarisation d'une onde électromagnétique.

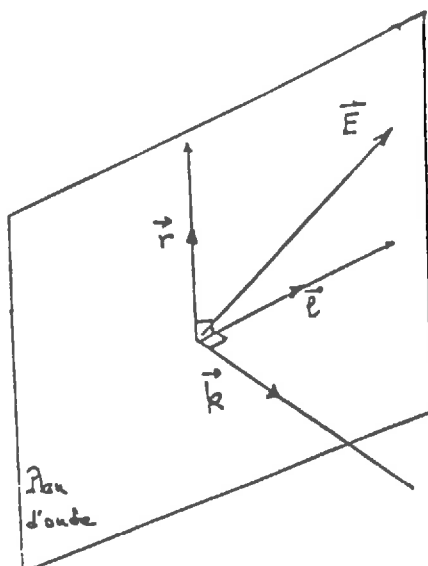


Figure 1.8

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 réfléchi 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.

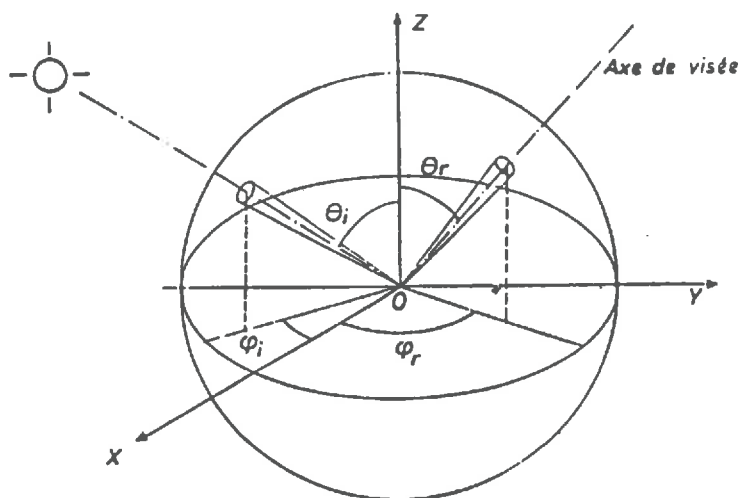


Figure 1.9: Le concept de réflectance bidirectionnelle

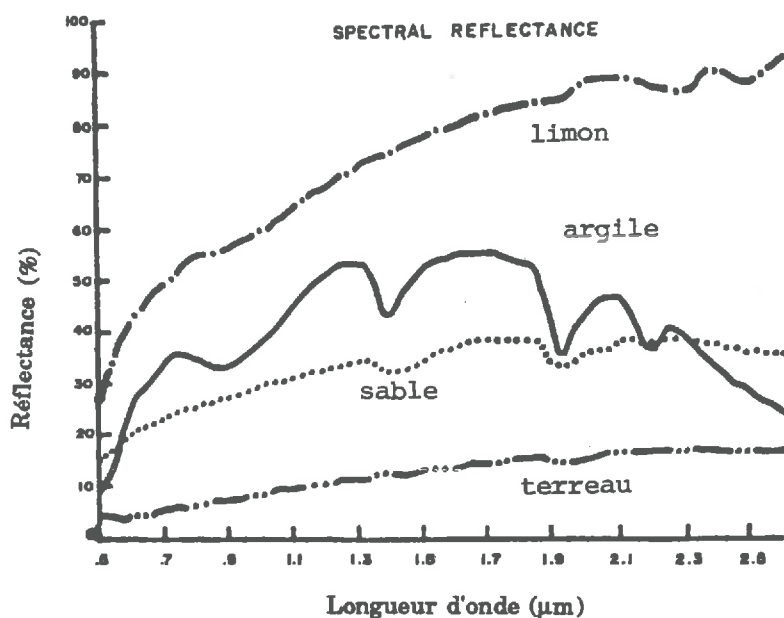


Figure 1.10 : Réflectances de différents types de sol, au même taux d'humidité (d'après JOHANNSON et BAUMGARDNER, 1968).

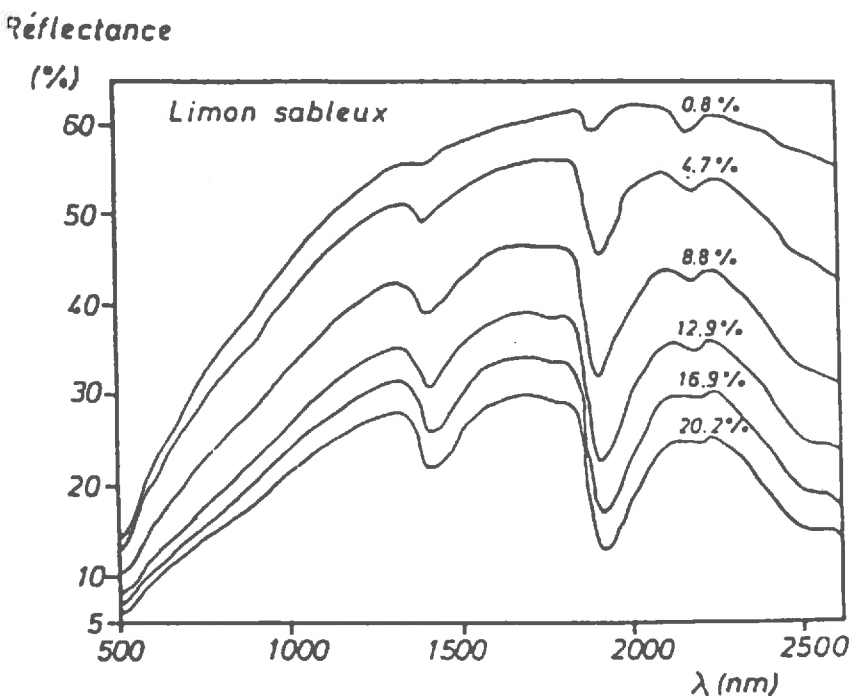


Figure 1.11: Evolution du spectre de réflectance d'un limon sableux en fonction de son humidité (d'après BOWERS et HANKS, 1965).

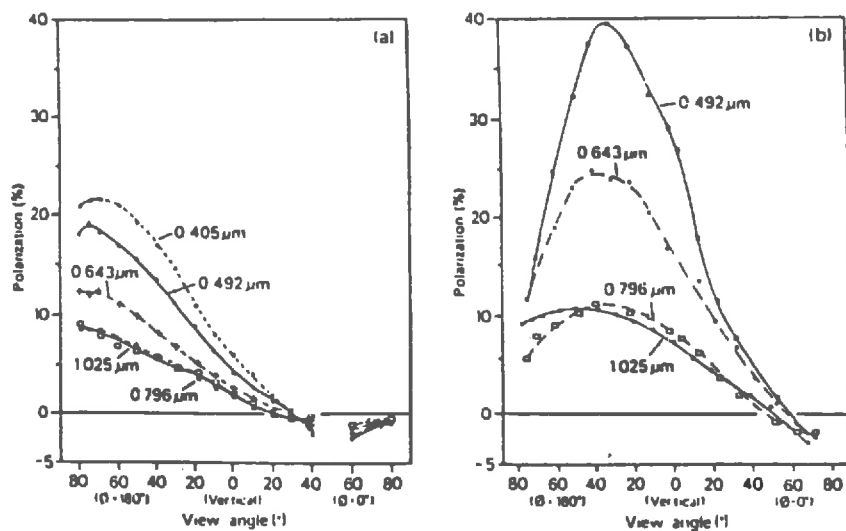


Figure 1.12

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)

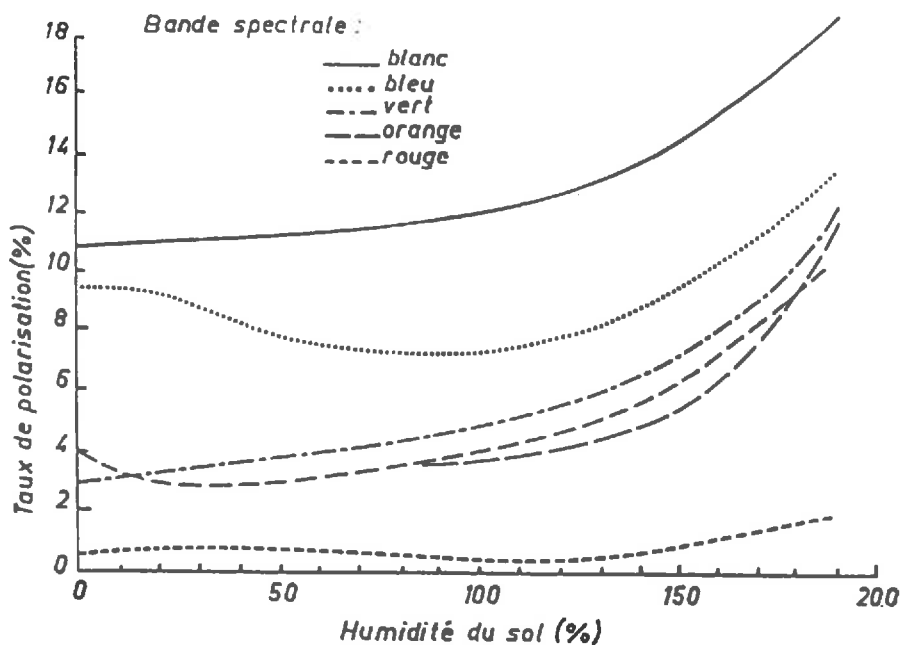


Figure 1.13

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.

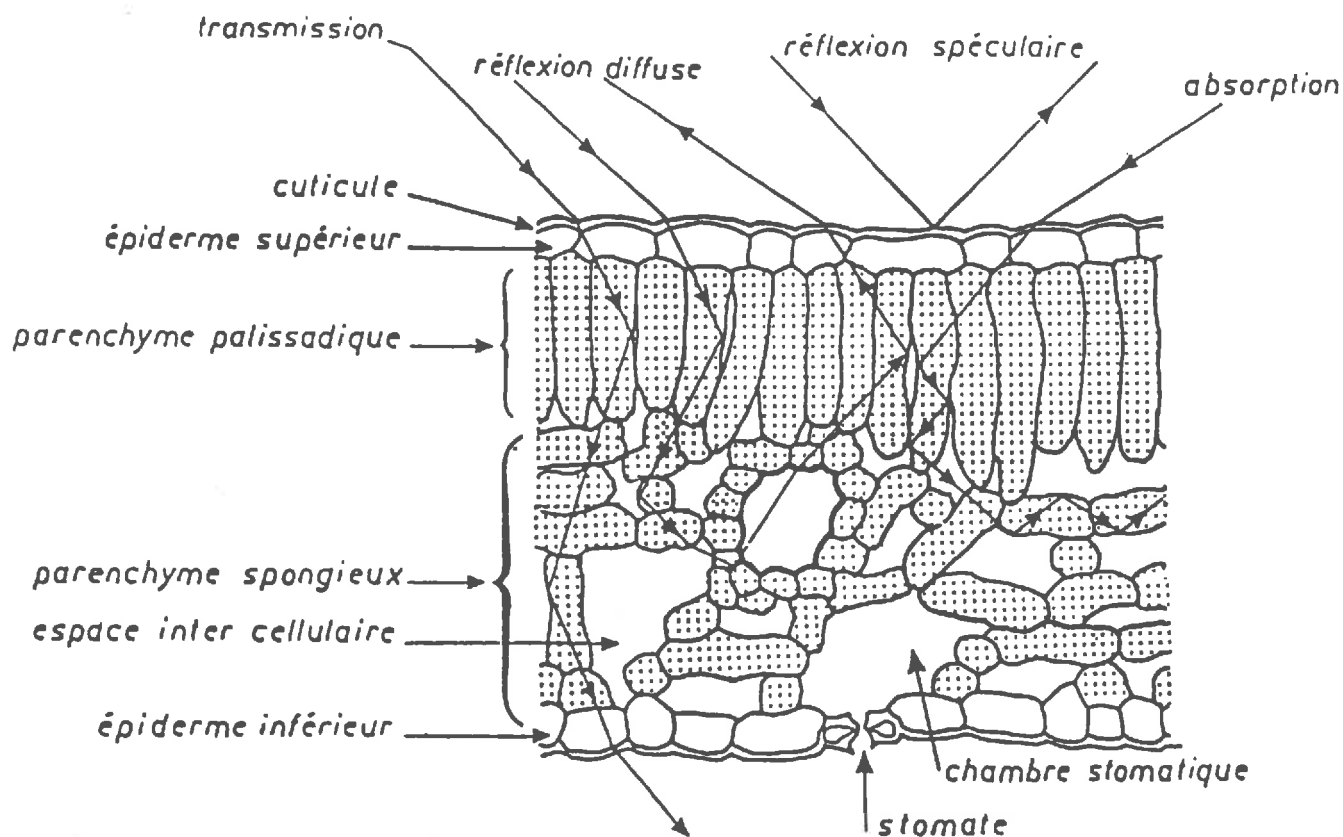


Figure 1.14

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)

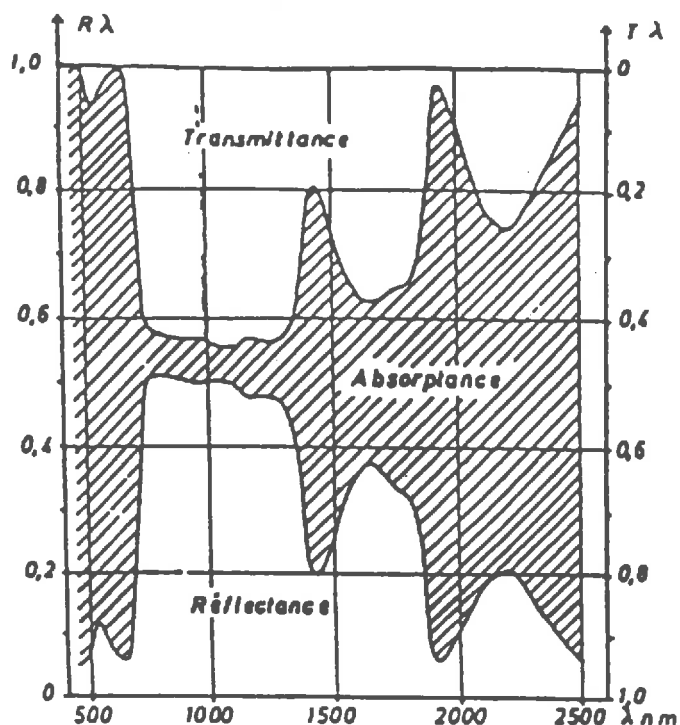


Figure 1.15

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.

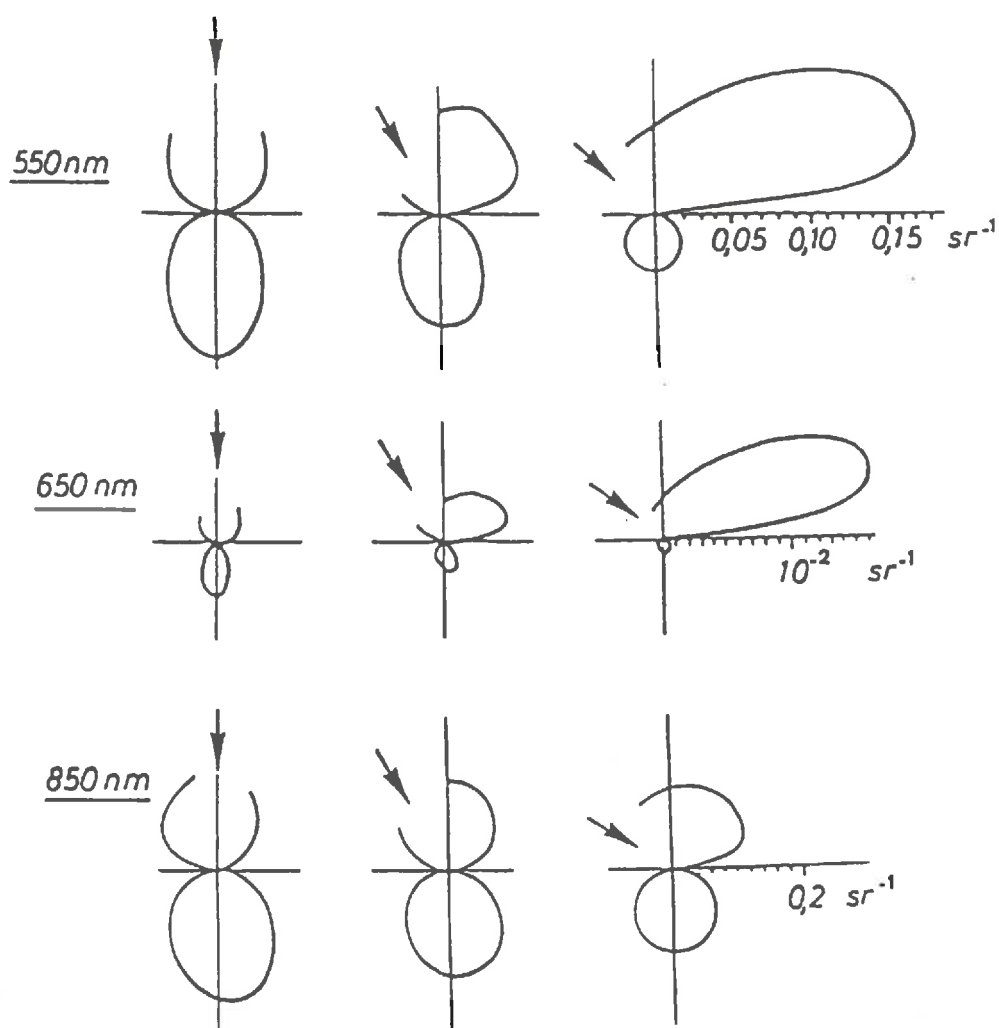


Figure 1.16

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.

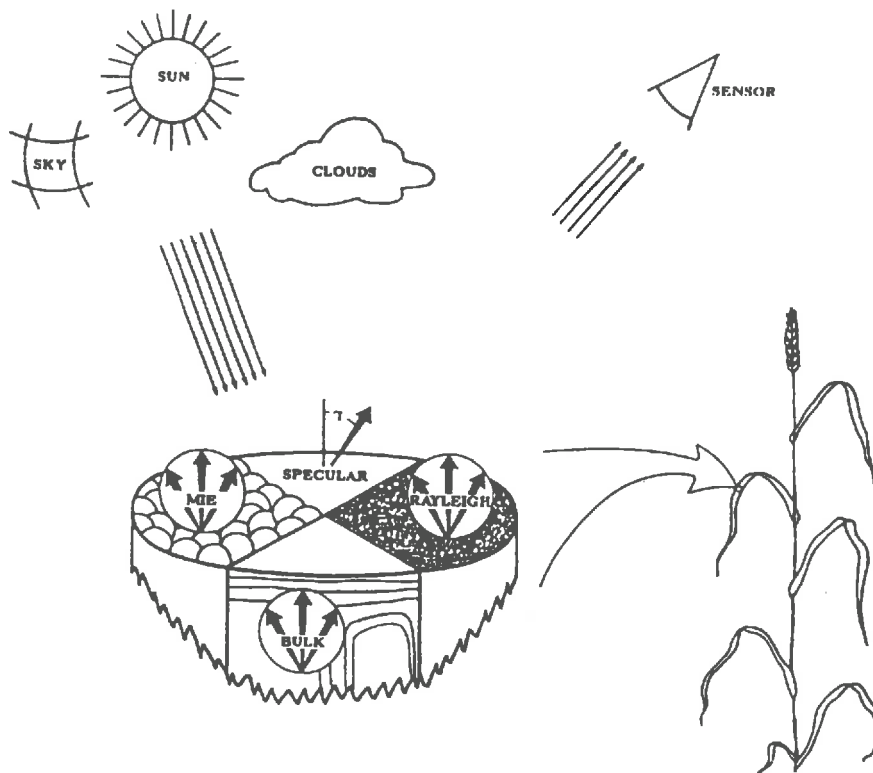


Figure 1.17

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.

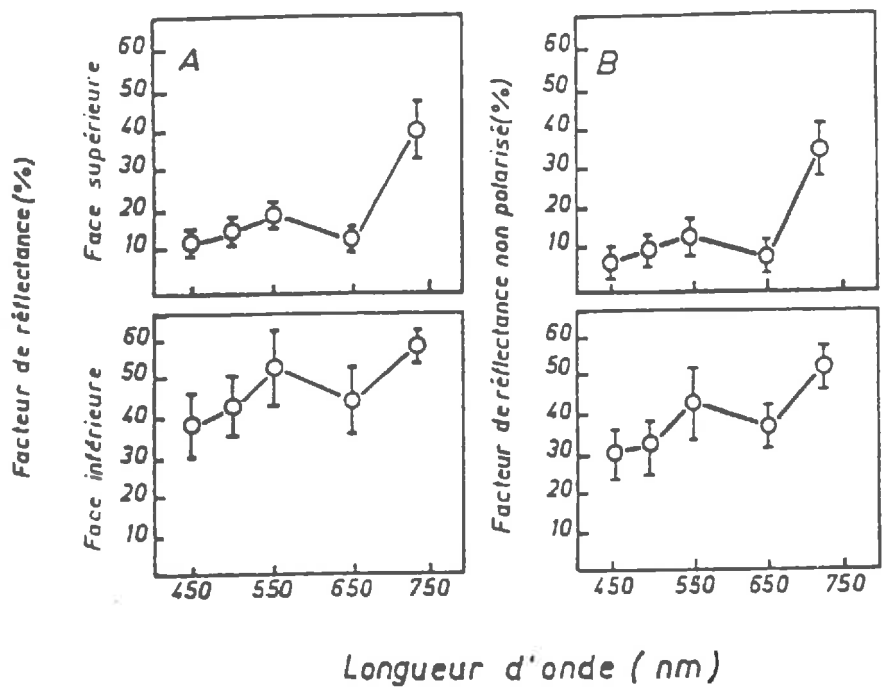


Figure 1.18

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.

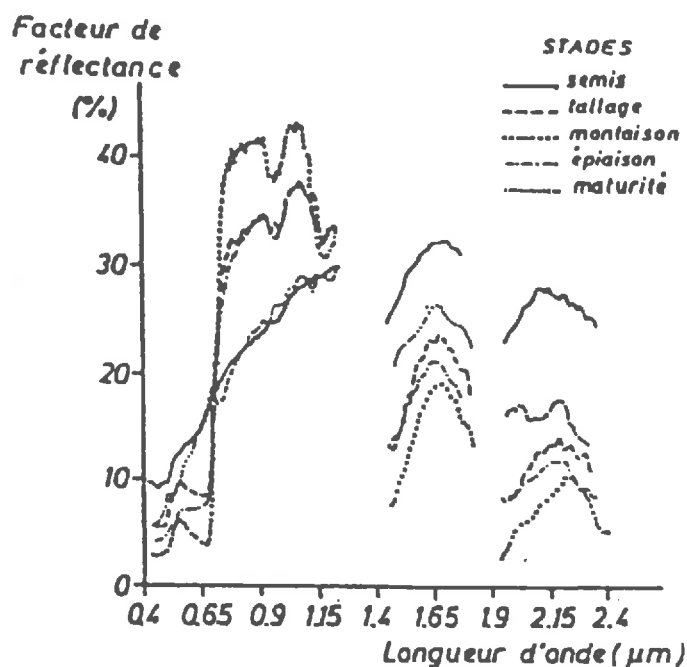


Figure 1.19

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

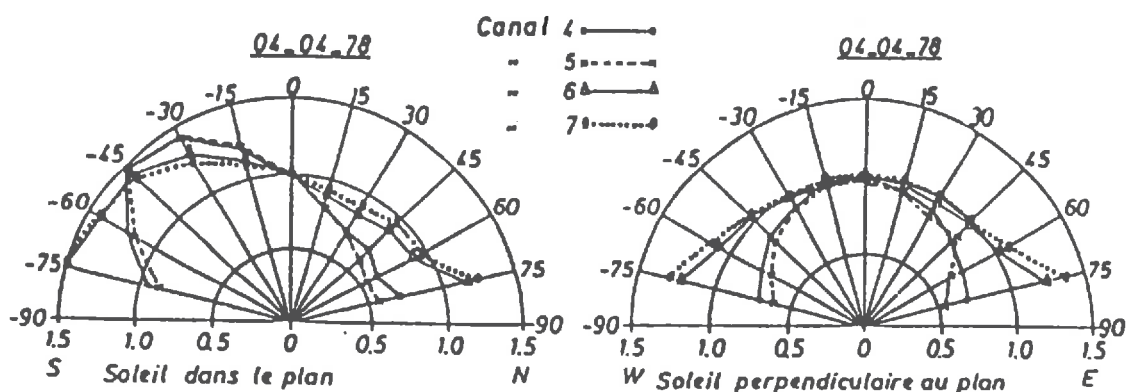


Figure 1.20

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.

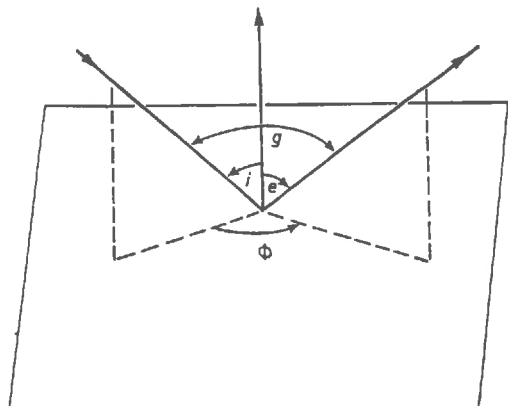


Figure 1.21

Définition de l'angle de phase g :

i = angle d'incidence

e = angle d'observation

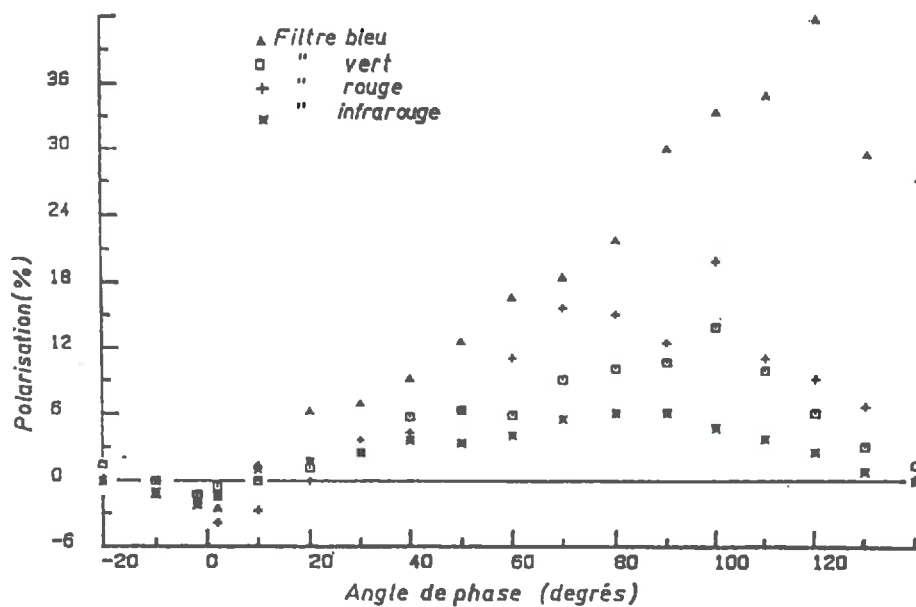


Figure 1.22

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).

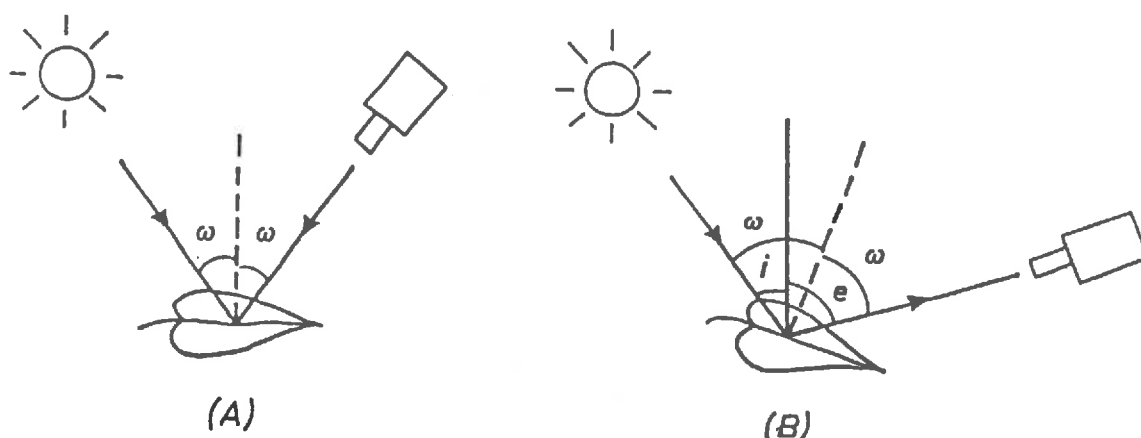


Figure 1.23

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

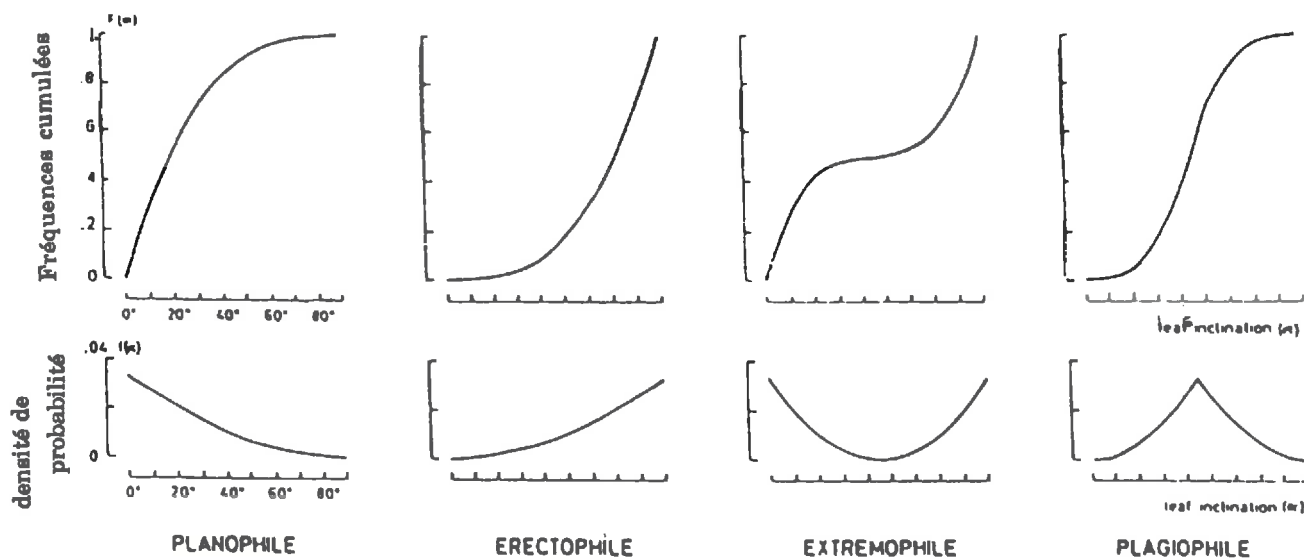


Figure 1.24

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.

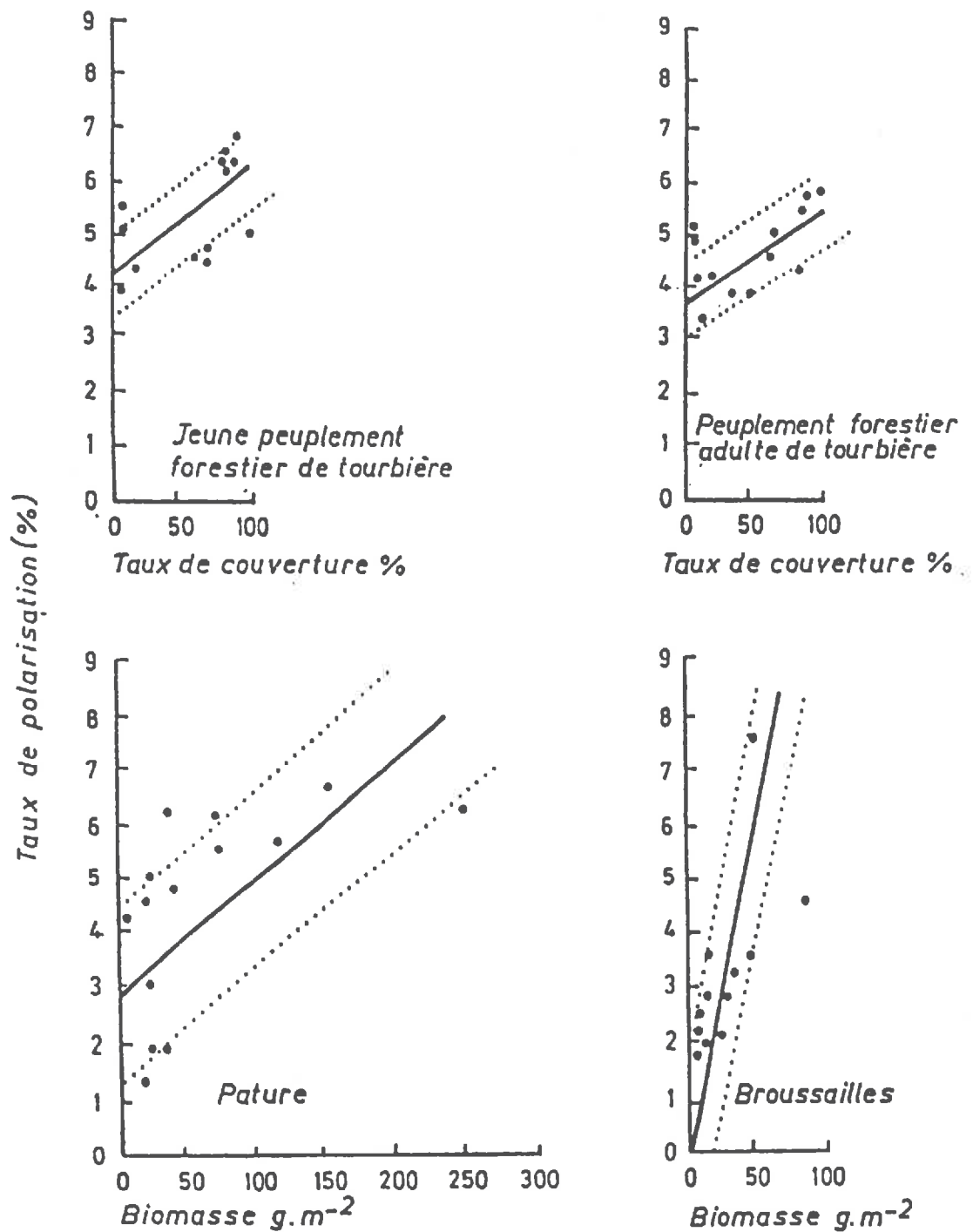


Figure 1.25

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

(d'après CURRAN, 1981)

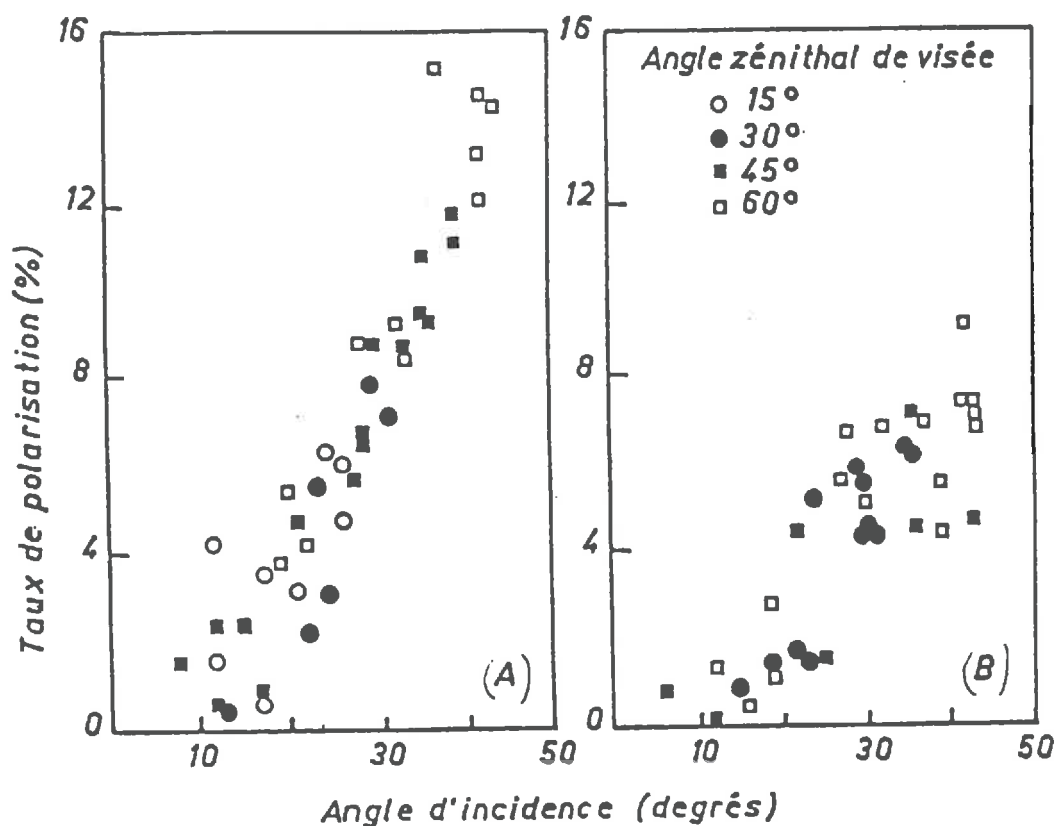


Figure 1.26

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 la 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.

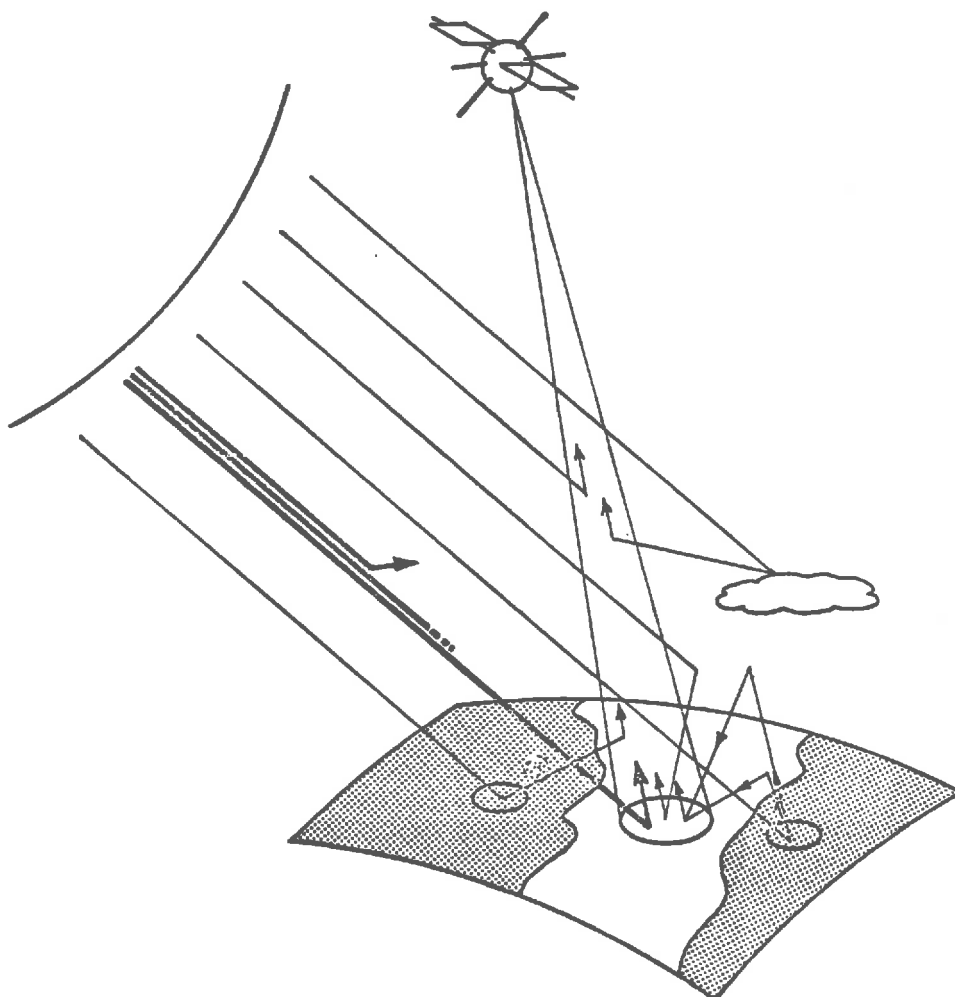


Figure 1.27:

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.

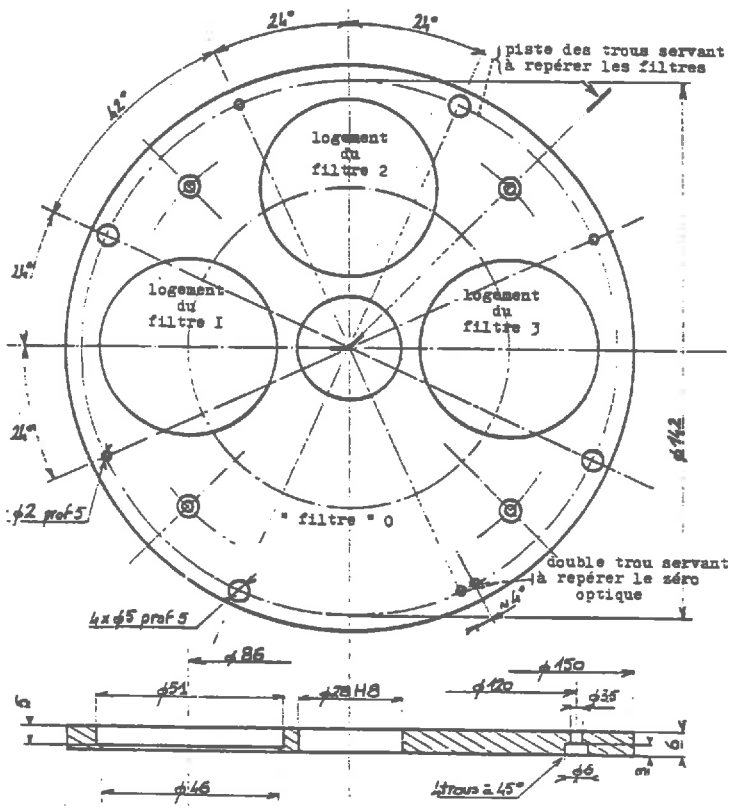


Figure 2.1:
Schéma de la roue porte-filtres.

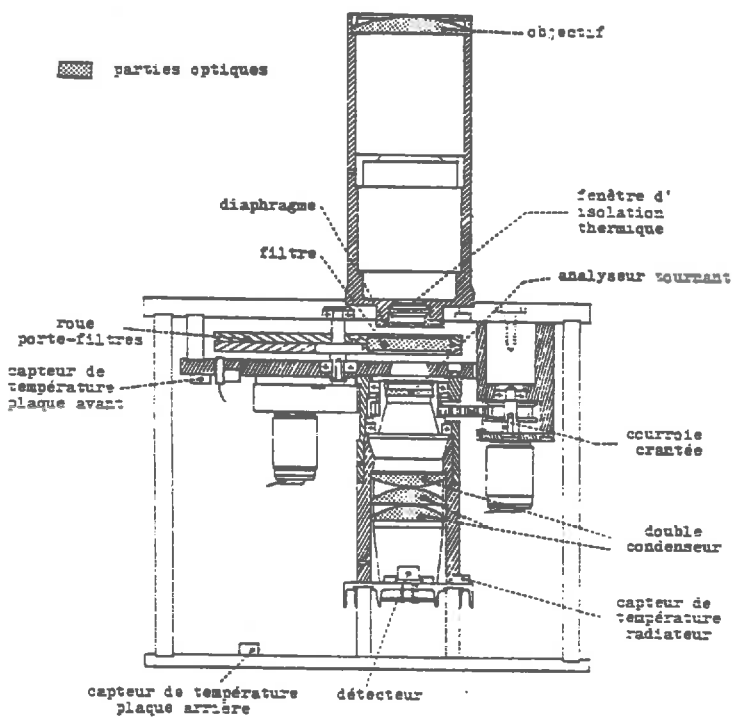


Figure 2.2:
Maquette du système d'acquisition de données "RADIBAL".

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:

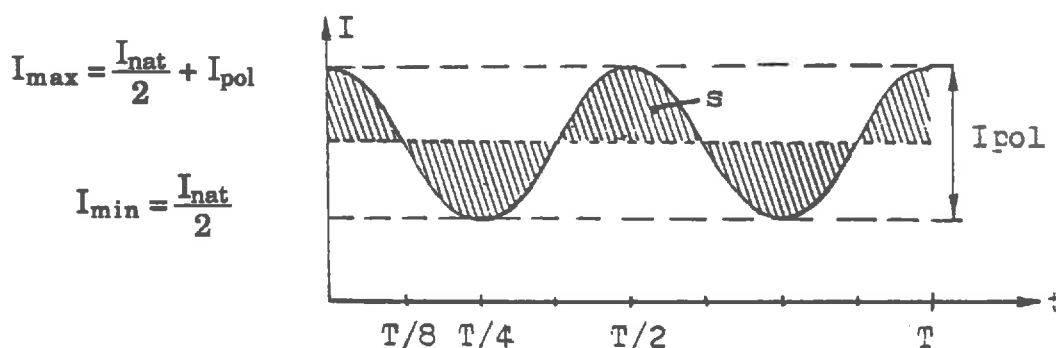
$$I = \frac{I_{nat}}{2} + I_{pol} \cdot \cos^2\beta$$

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).

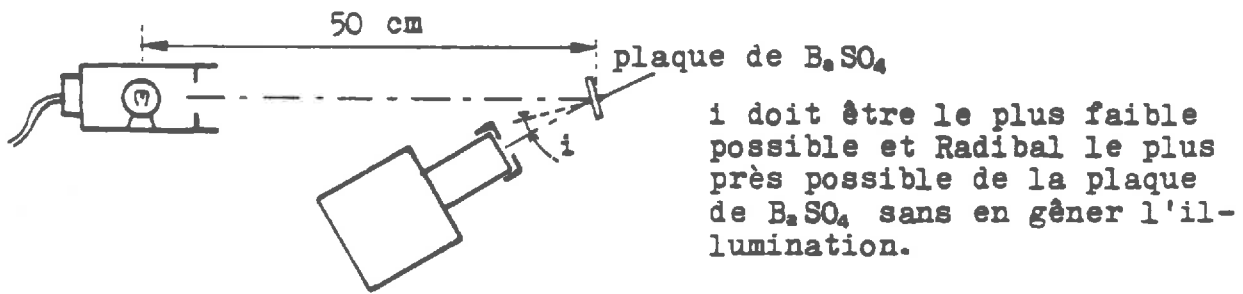
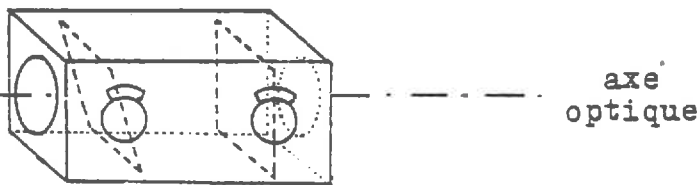
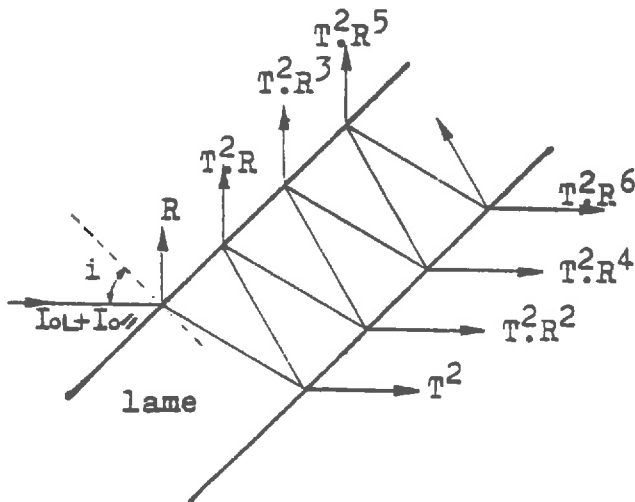


Figure 2.3: Etalonnage énergétique de RADISOL.

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.

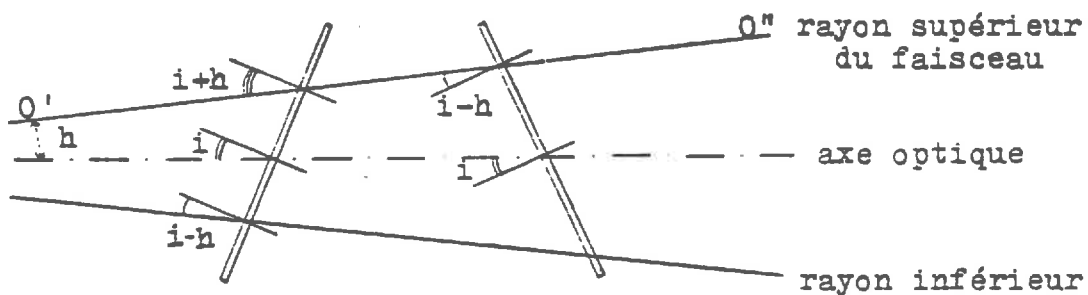


Figure 2.4 : Etalonnage en polarisation.

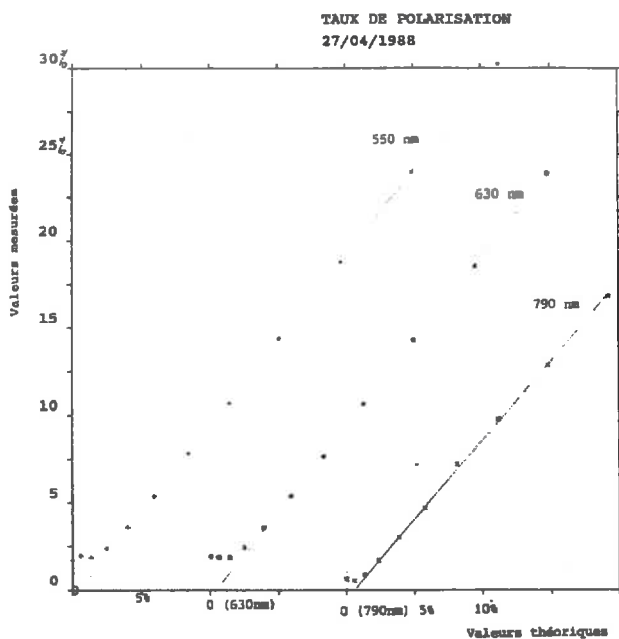


Figure 2.5 :
Résultats de l'étalonnage de RADISOL en polarisation, le 27/04/88

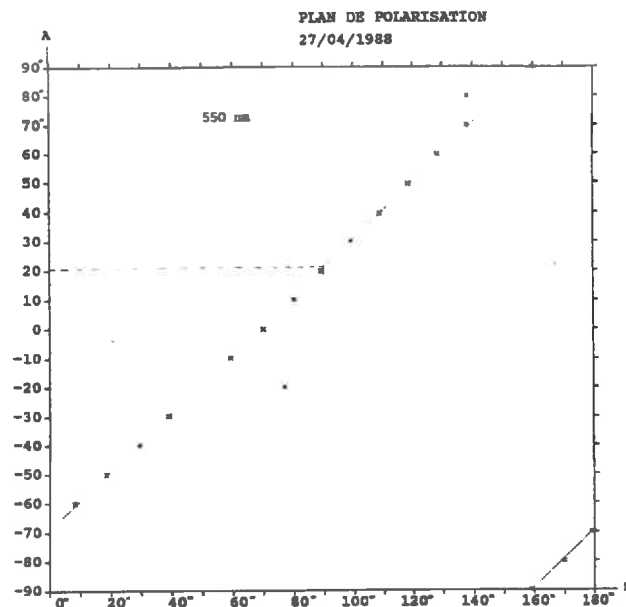
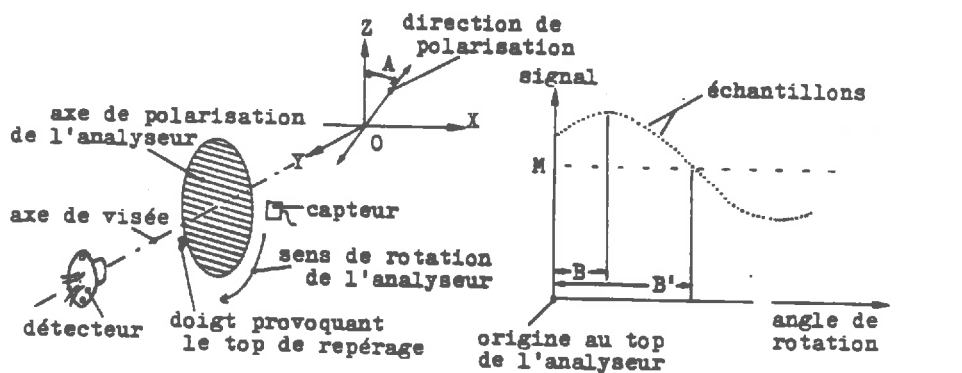


Figure 2.7 :
Repérage du plan de polarisation.



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

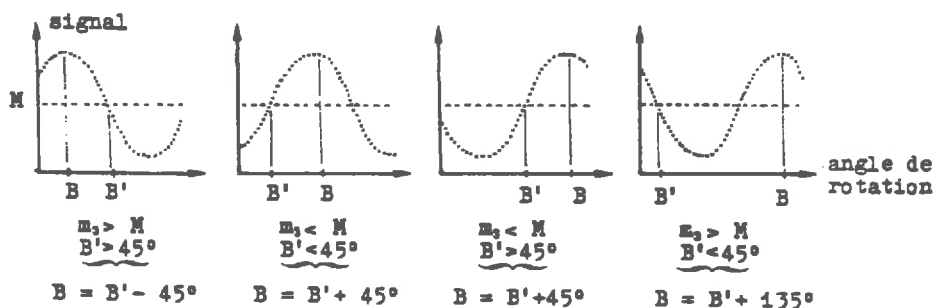


Figure 2.6 :
Repérage de la direction de polarisation du rayonnement reçu.

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° 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 $B=90°$, 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.

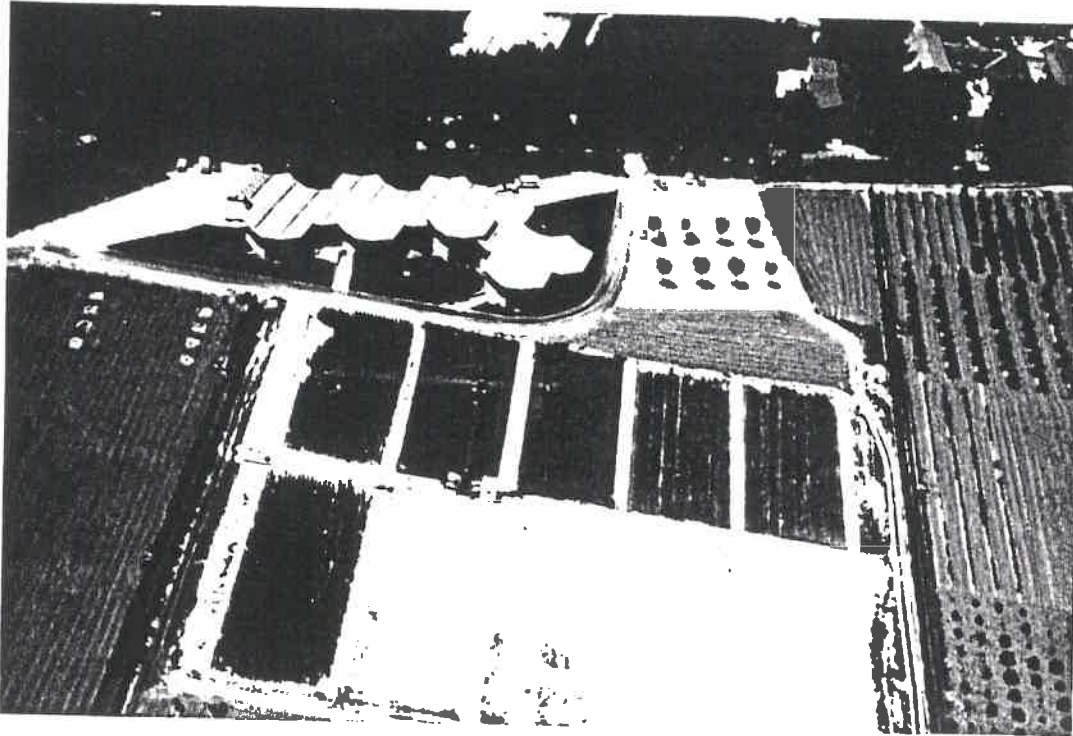


Photo 2.1 :
Parcelles expérimentales.
(I.N.R.A., Avignon, centre de Montfavet).

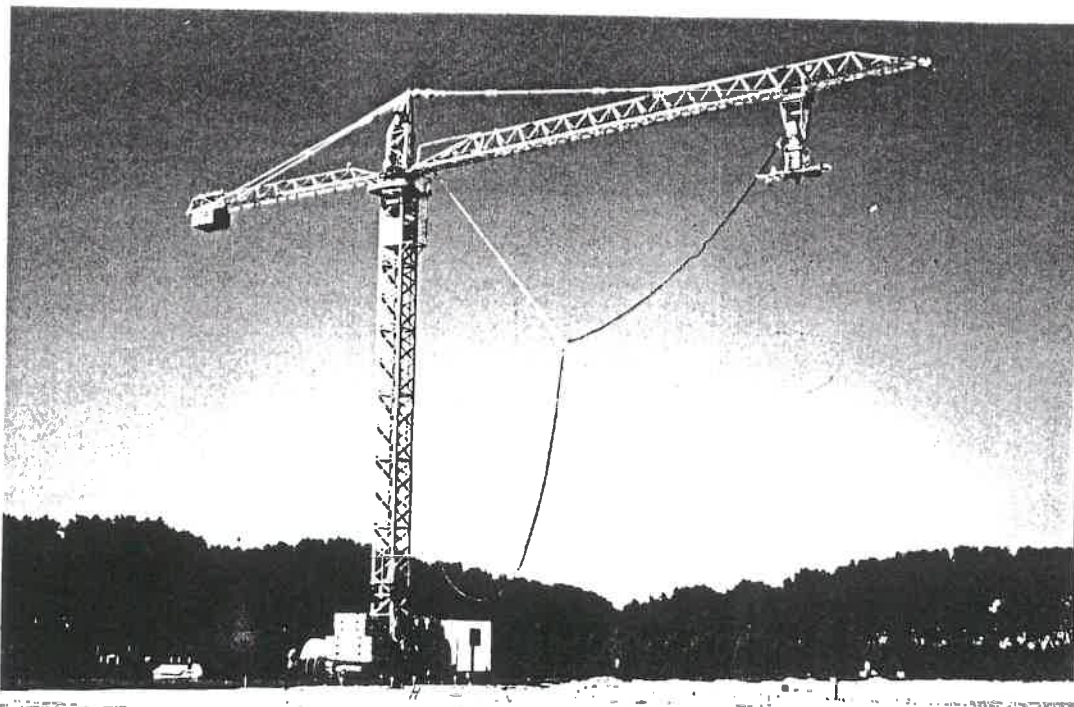


Photo 2.2 :
Les instruments de mesures physiques sont placés sous le chariot
de flèche d'une grue de chantier.

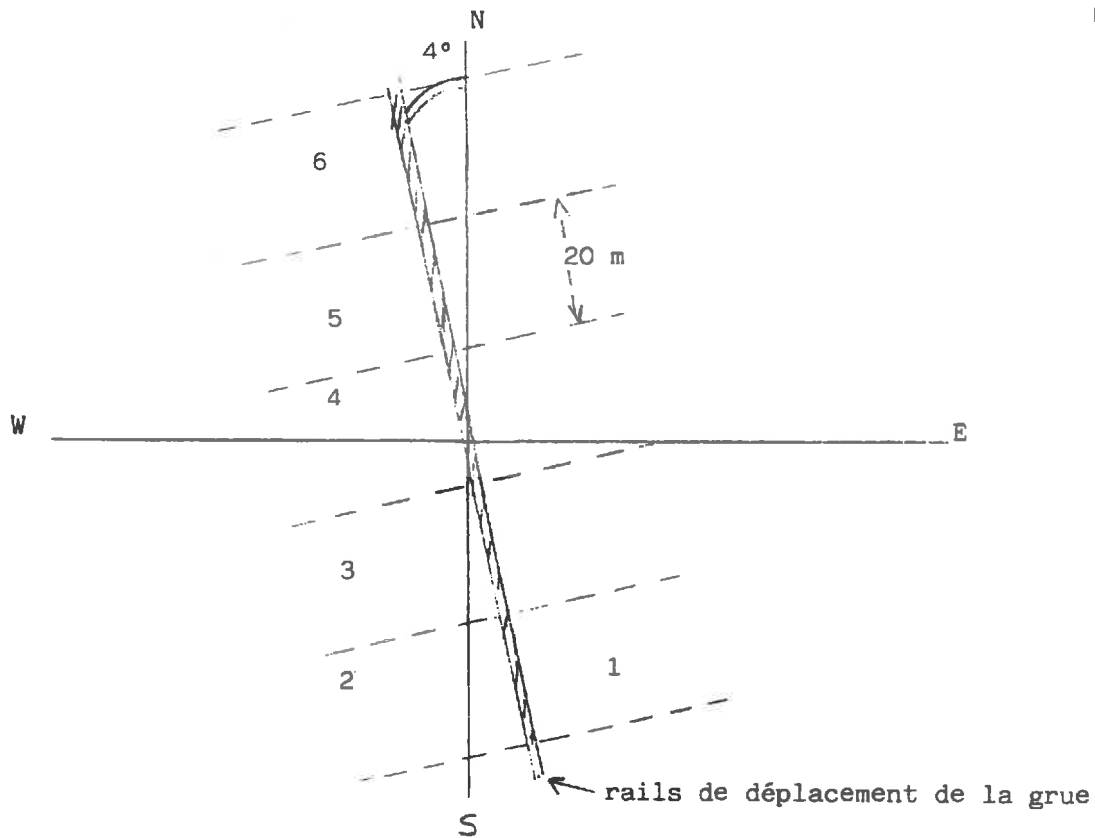


Figure 2.8 :
Disposition des parcelles expérimentales.

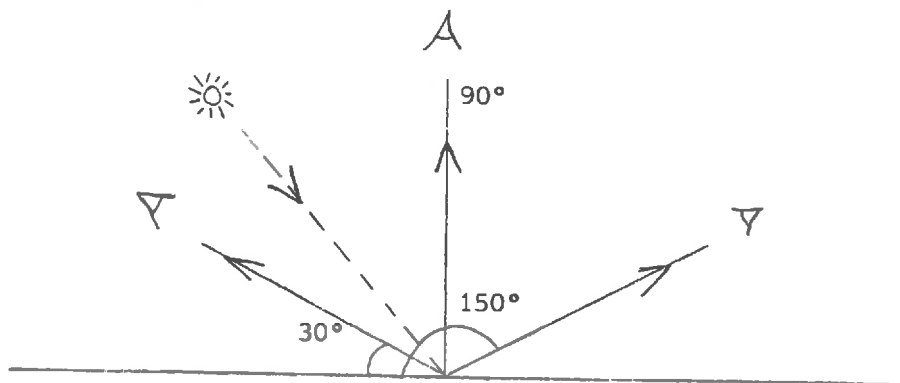


Figure 2.9 :
Repérage de l'angle de visée dans le plan d'incidence du rayonnement solaire: 90° correspond à une visée verticale.

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

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).

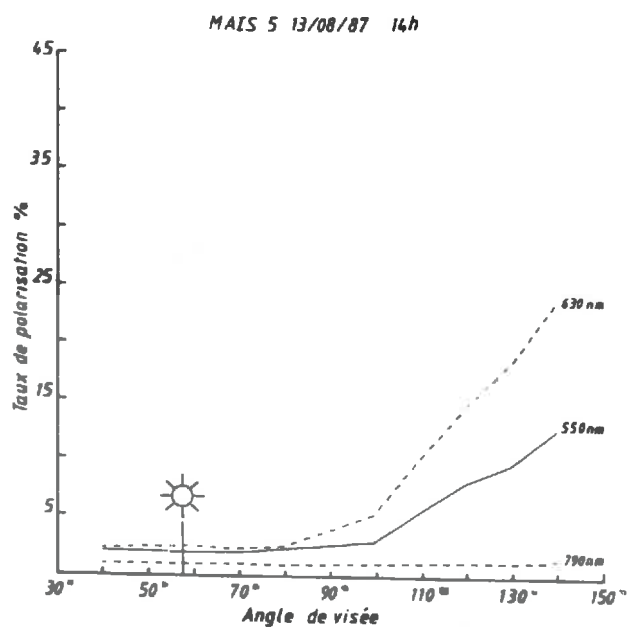
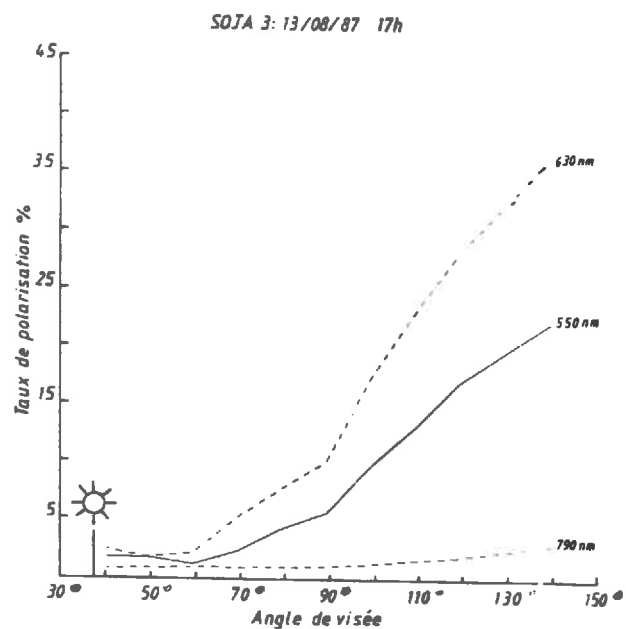
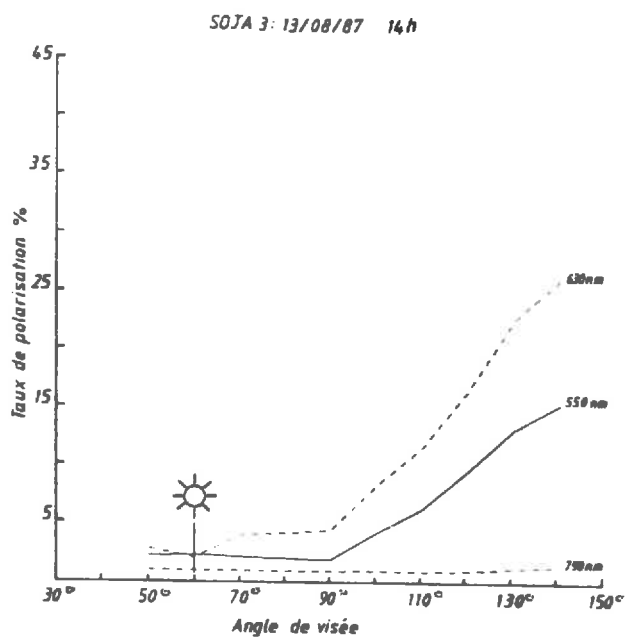


Figure 2.10 :

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

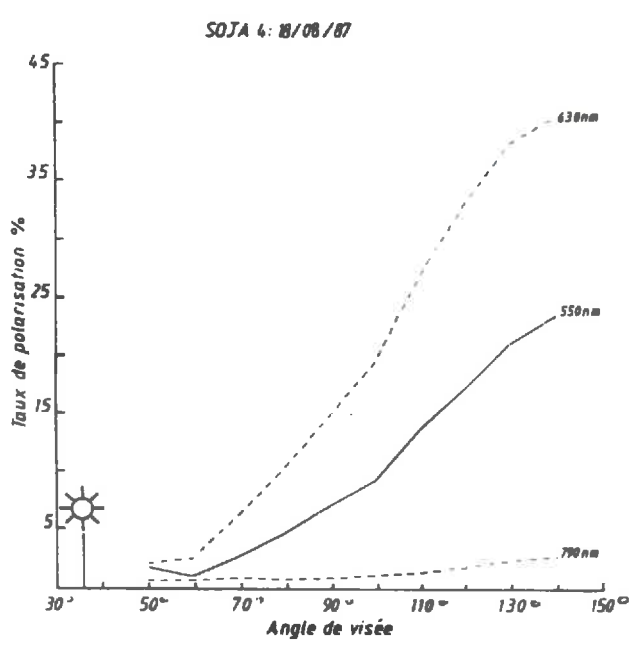
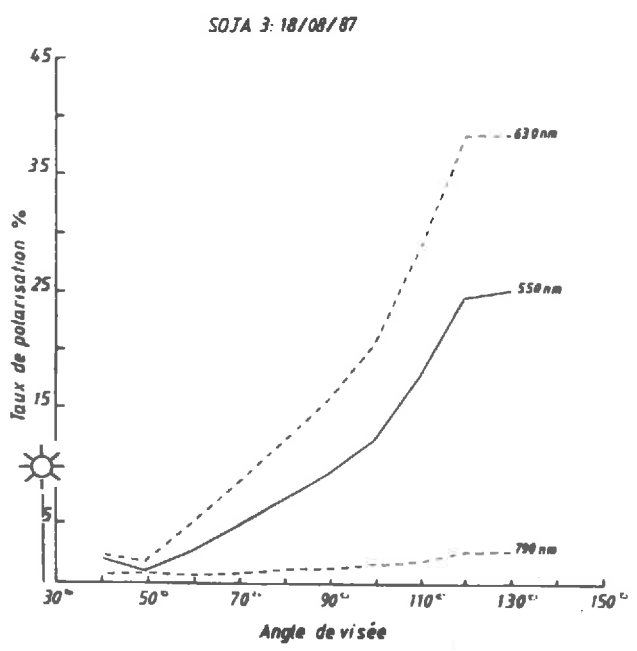
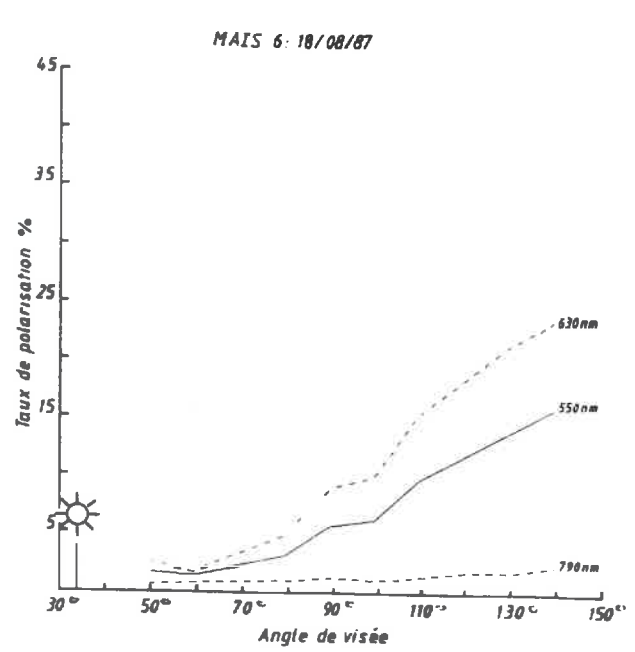
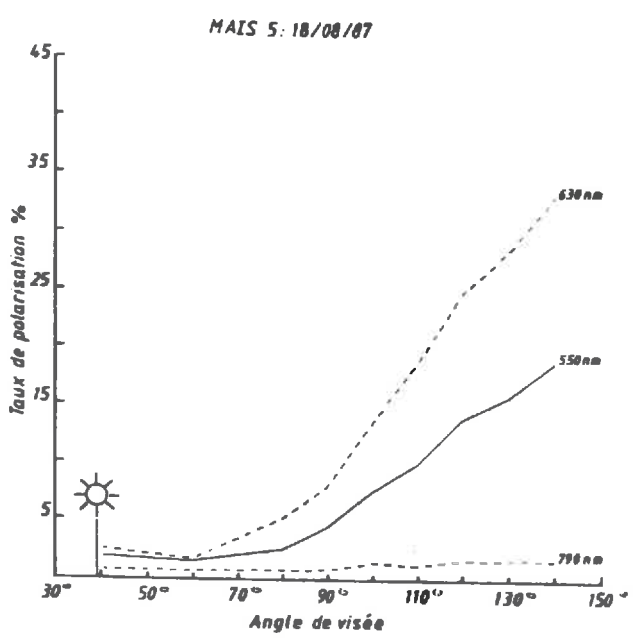


Figure 2.11 : Taux de polarisation mesurés dans le plan solaire, le 18/08/87.



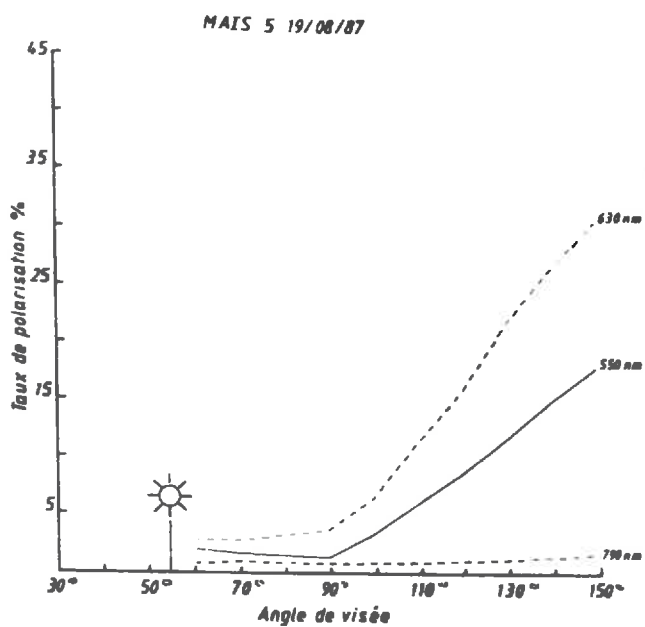
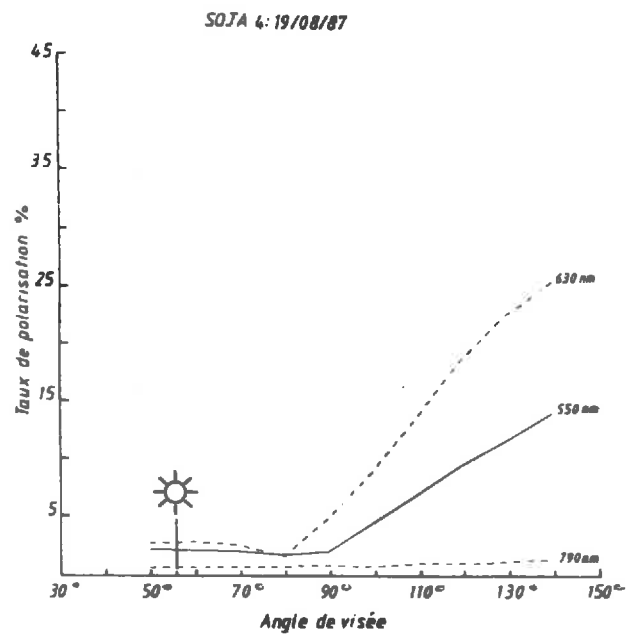
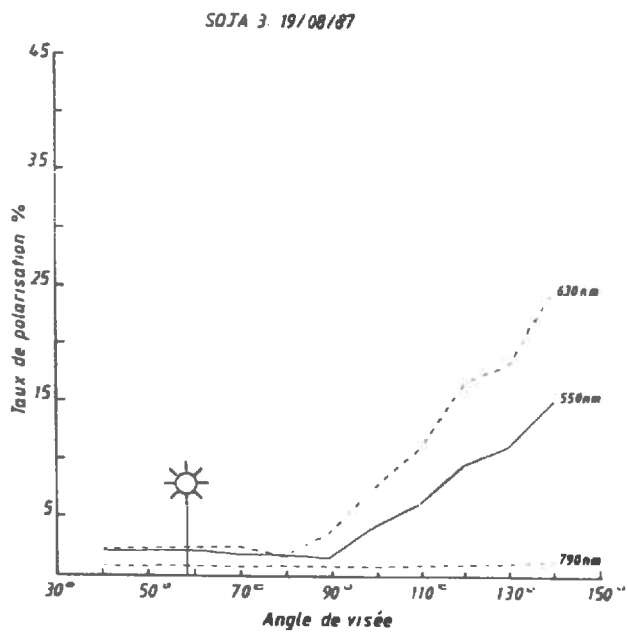


Figure 2.12:
Taux de polarisation mesurés
dans le plan solaire, le 19/08/87.

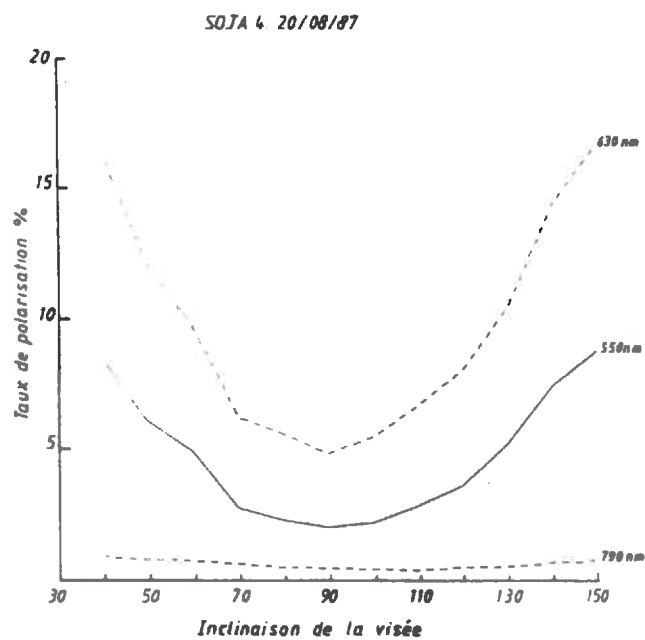
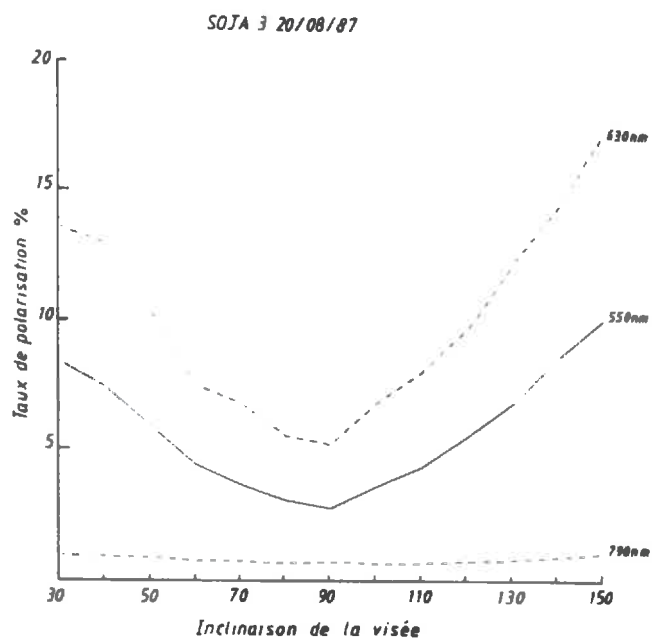
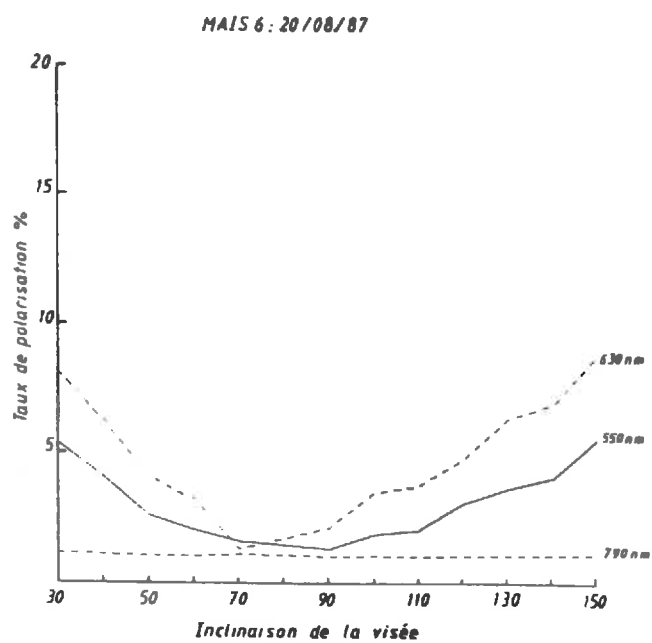
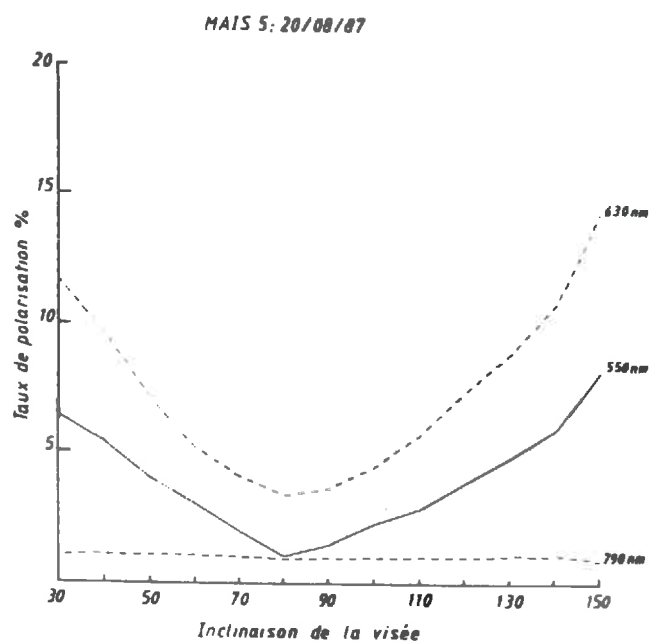


Figure 2.13 : Taux de polarisation mesurés dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires, le 20/08/87.



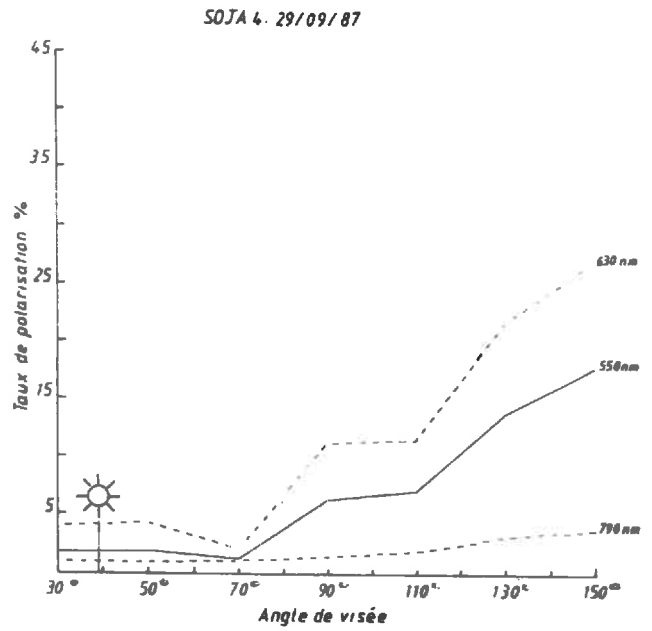
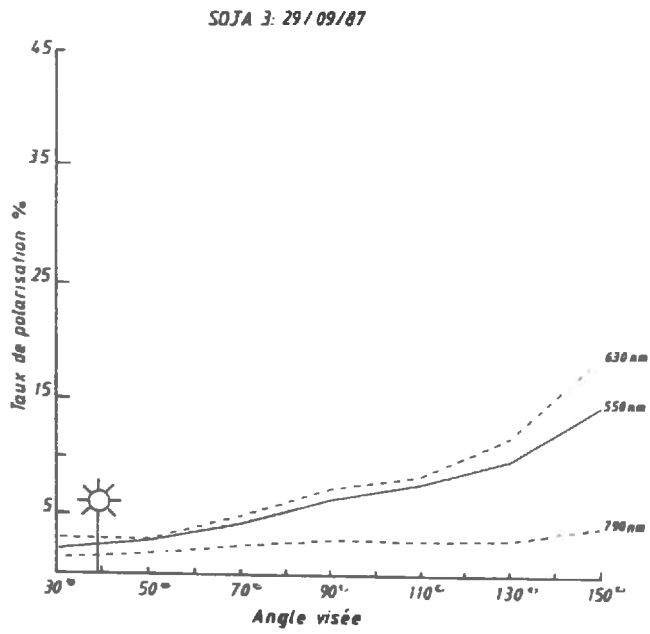
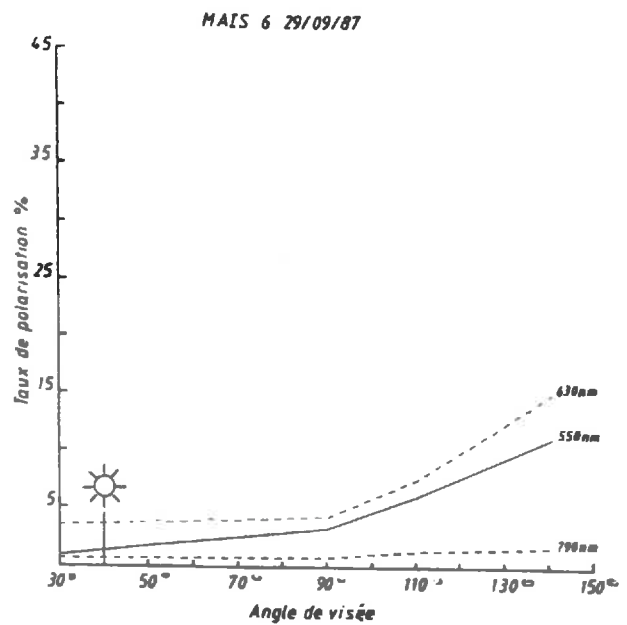
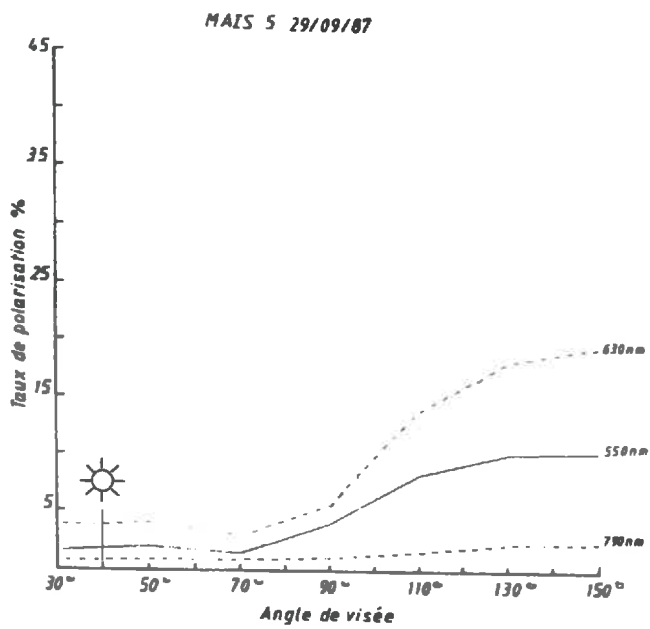


Figure 2.14 : Taux de polarisation mesurés dans le plan solaire, le 29/09/87.



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.

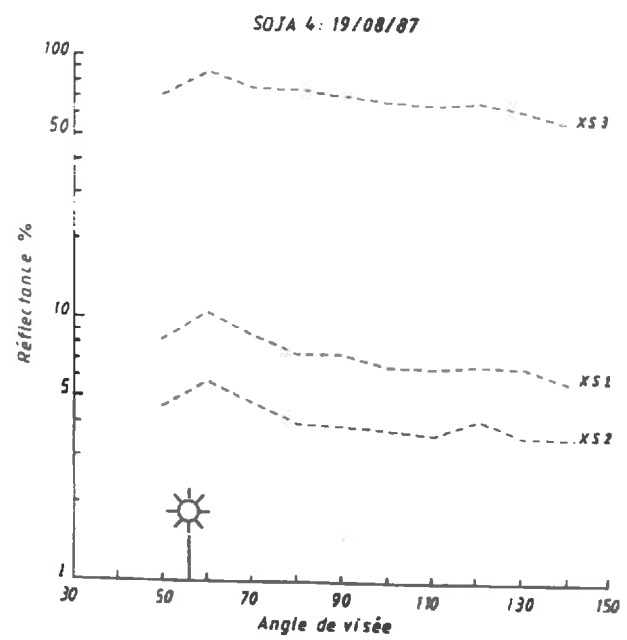
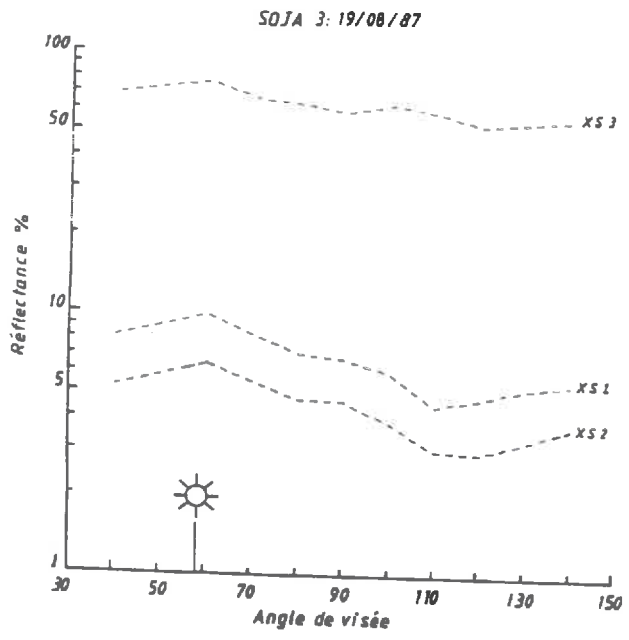
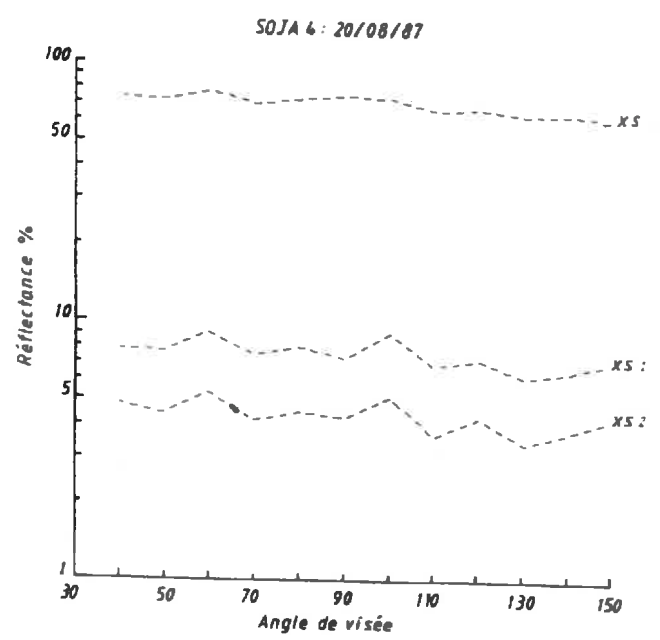
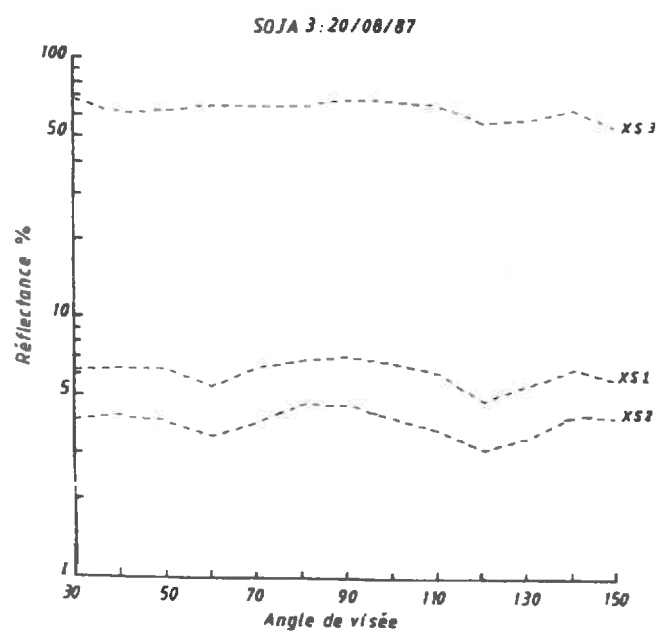


Figure 2.15 : Facteurs de réflectance mesurés sur les couverts de soja avec le radiomètre CIMEL:
 le 19/08/87 : visées dans le plan solaire
 le 20/08/87 : visées dans le plan perpendiculaire.



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.

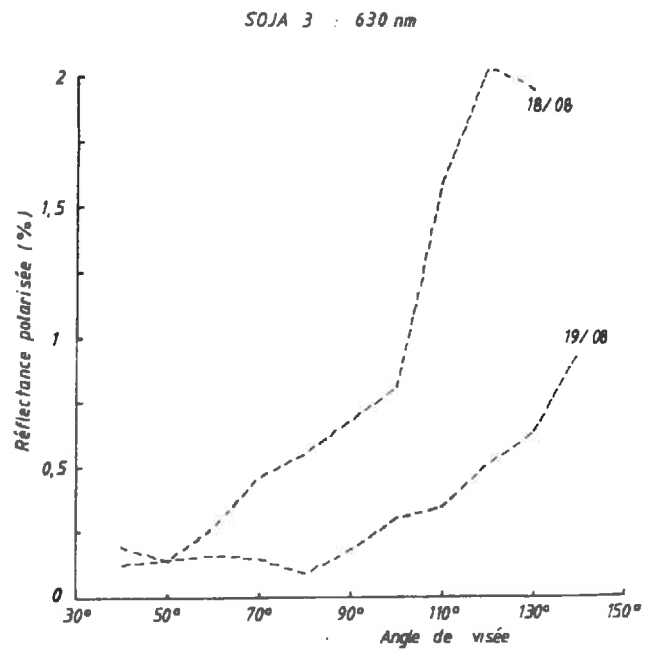
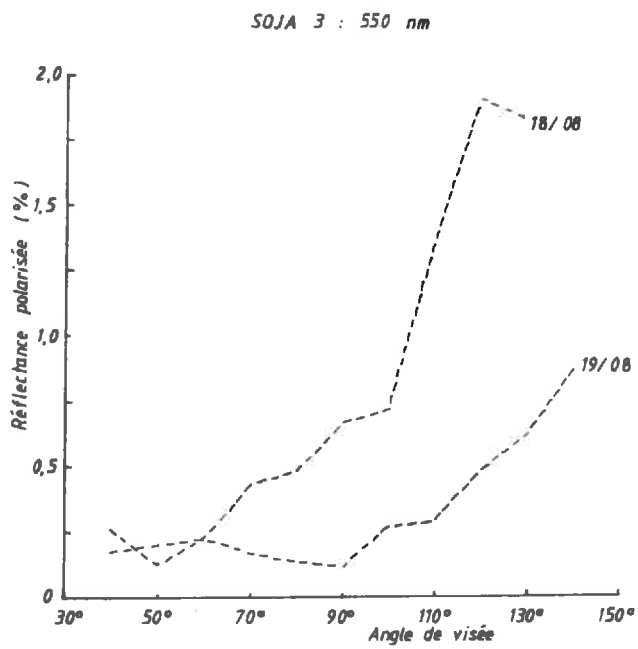
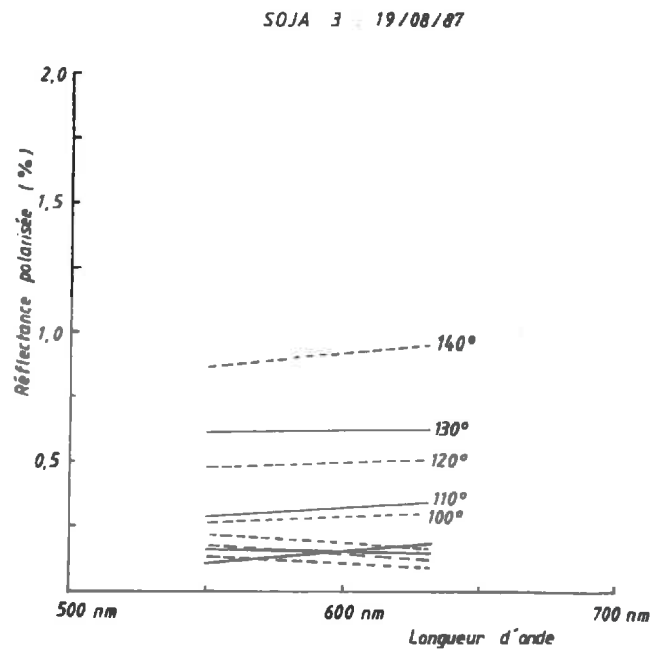
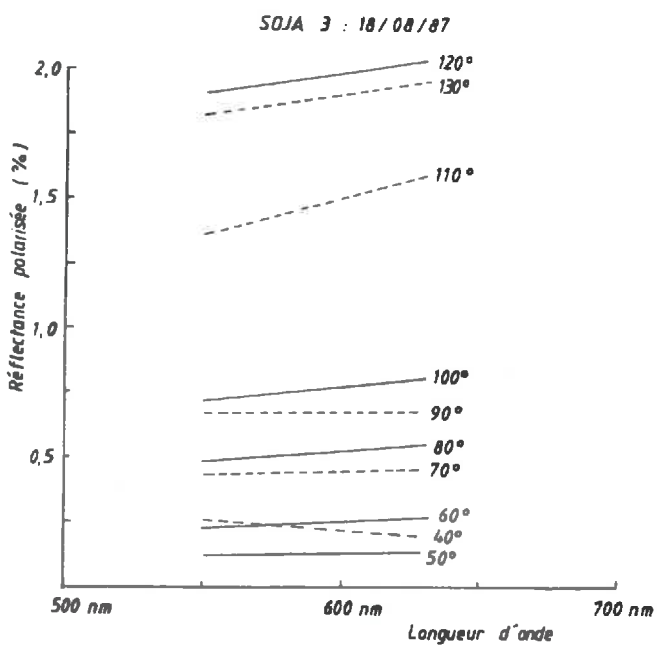


Figure 2.16 (a): Composante polarisée de la réflectance sur la parcelle de soja 3, dans le plan solaire.



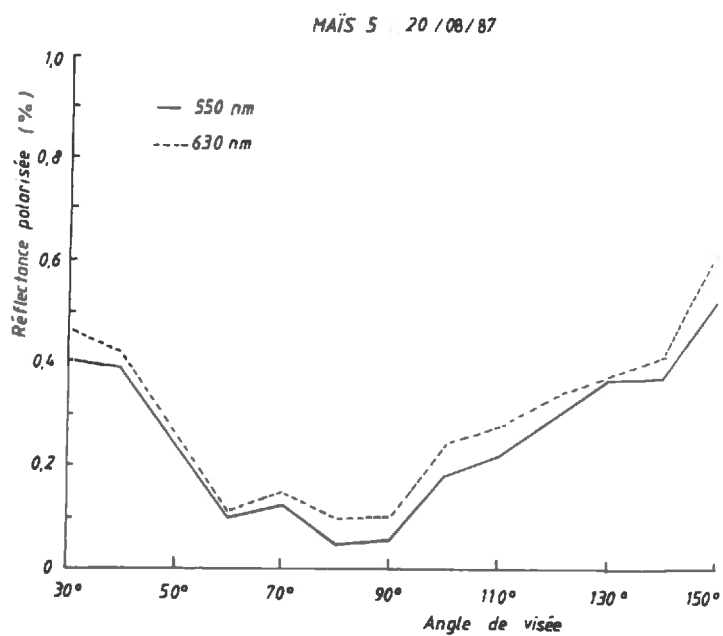
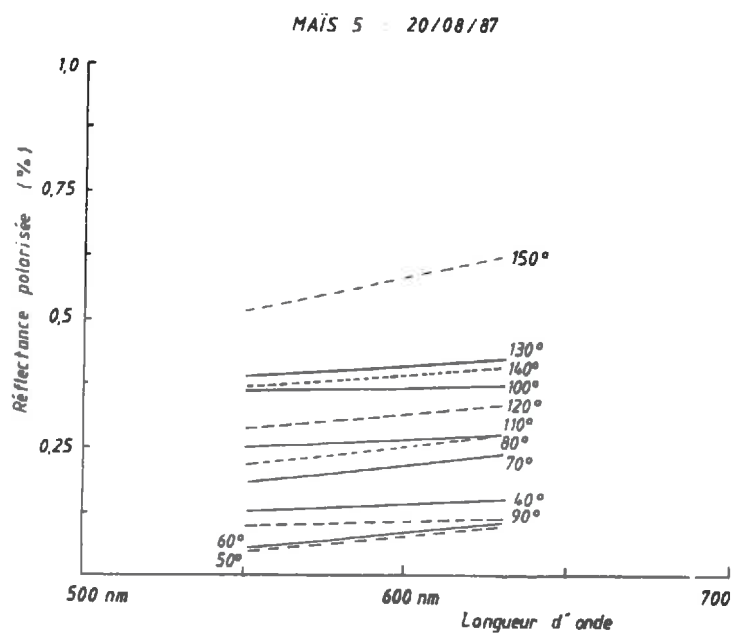


Figure 2.16 (b) : Réflectance polarisée de la parcelle de maïs 5, dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires.



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.

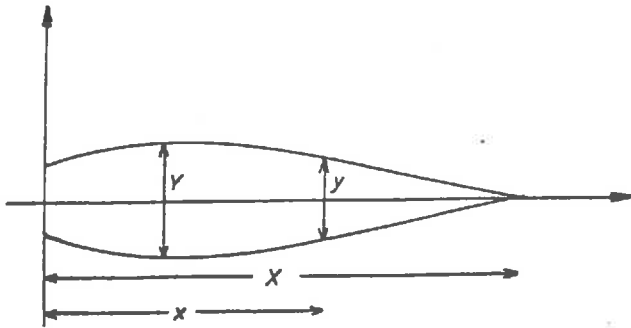
Pour chaque parcelle de maïs, sont mesurés, comme précédemment, le poids frais de l'ensemble des 10 plantes, puis les poids frais et poids secs des feuilles, tiges, fleurs (panicules) et épis lorsqu'ils sont sortis. Mais les

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

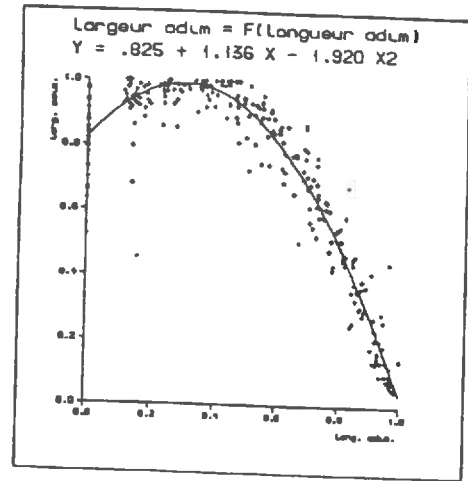


Figure 2.17:

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)

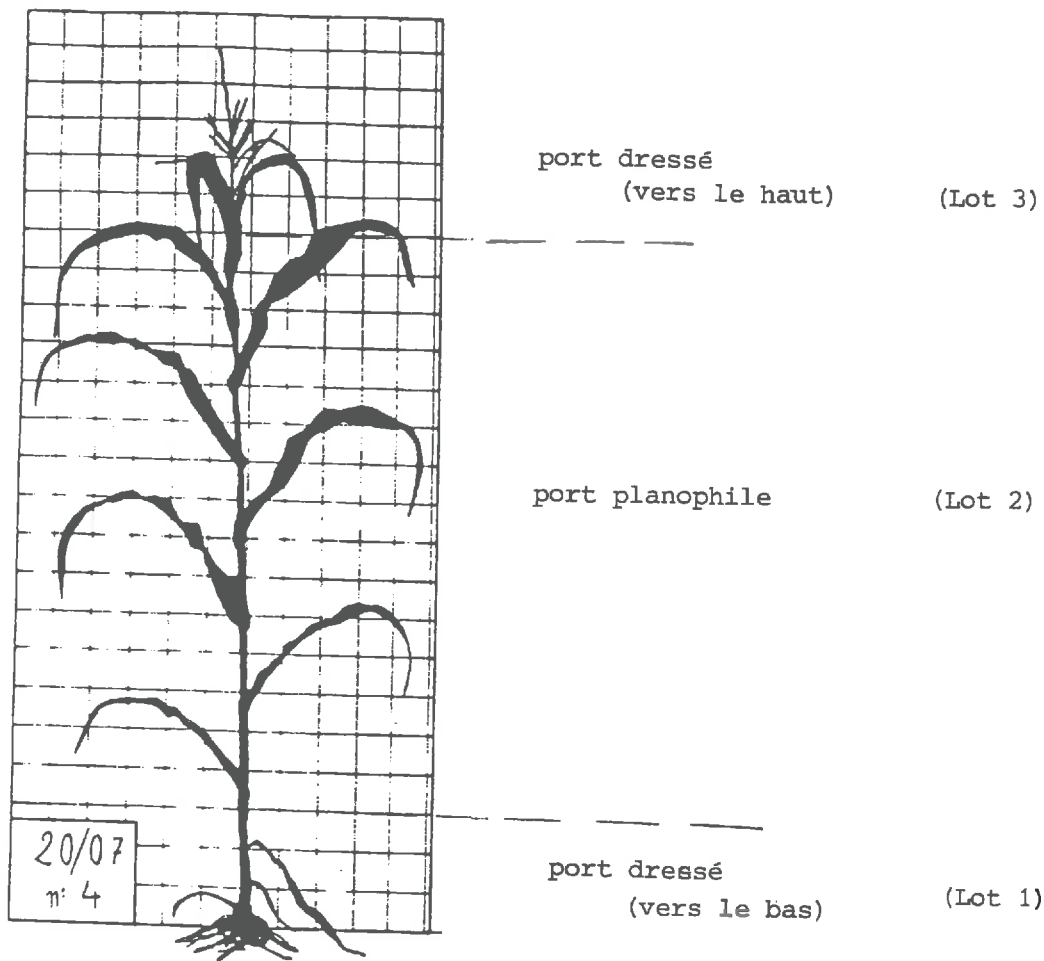


Figure 2.19 (a) :

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

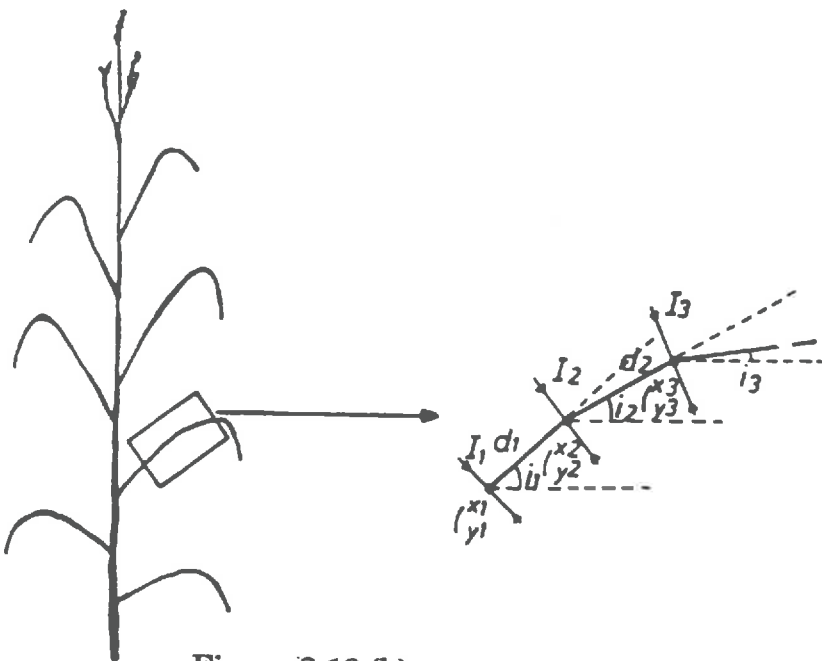


Figure 2.19 (b) :

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.

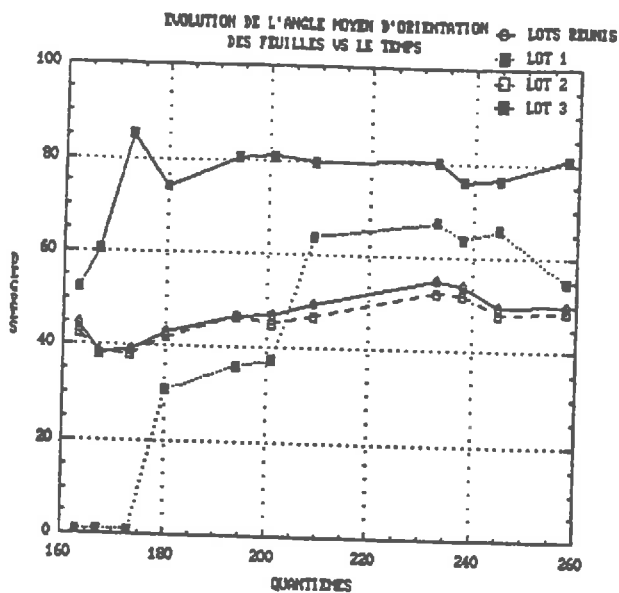


Figure 2.20 :
Evolution de l'angle moyen d'orientation des feuilles de la parcelle de maïs 6 au cours du temps.

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

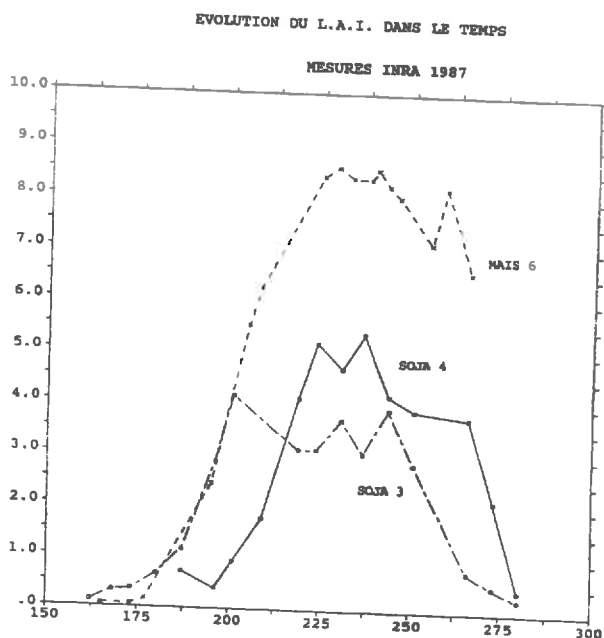
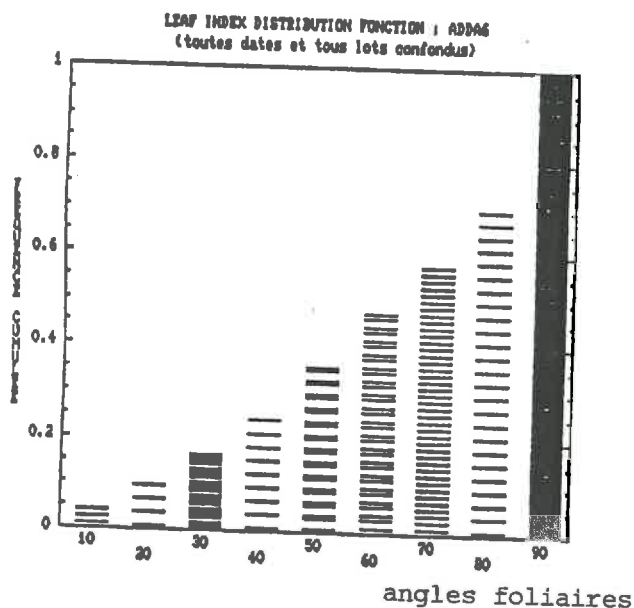


Figure 2.22 :
Evolution de l'indice foliaire de différentes parcelles au cours du temps (dates en quantièmes).

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.

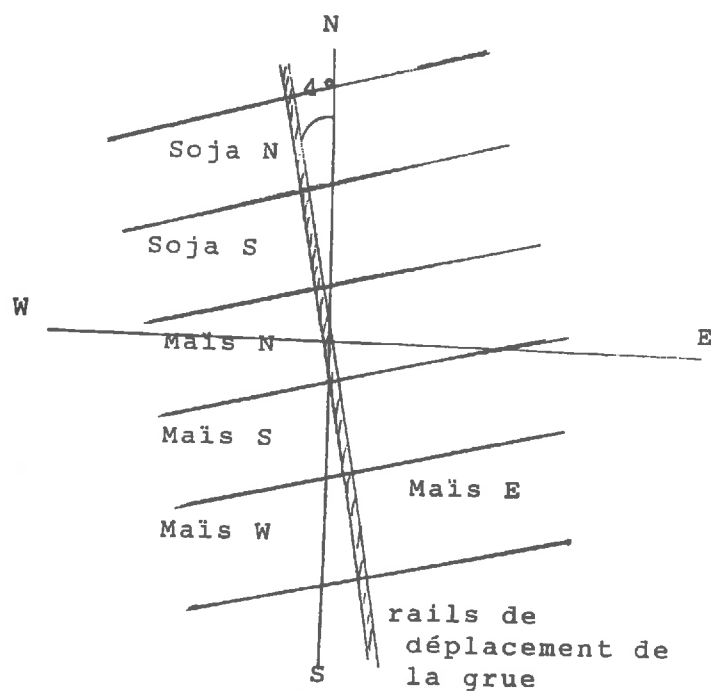


Figure 2.23 :

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.

