HAL
open science

Utilisation de la haute resolution spectrale pour l'etude des couverts vegetaux : developpement d'un modele de reflectance spectrale

Stéphane Jacquemoud

To cite this version:

Stéphane Jacquemoud. Utilisation de la haute resolution spectrale pour l'etude des couverts vegetaux : developpement d'un modele de reflectance spectrale. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Paris Diderot - Paris 7, 1992. Français. NNT : . tel-02850924

HAL Id: tel-02850924

https://hal.inrae.fr/tel-02850924v1

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VII

Spécialité:

METHODES PHYSIQUES EN TELEDETECTION

présentée par:

Stéphane JACQUEMOUD

UTLISATION DE LA HAUTE RESOLUTION SPECTRALE POUR L'ETUDE DES COUVERTS VEGETAUX: DEVELOPPEMENT D'UN MODELE DE REFLECTANCE SPECTRALE

Soutenue le 23 septembre 1992 devant le Jury composé de:

M. C. KLAPISZ	Président
M. M. LEROY	Rapporteur
M. G. SAINT	Rapporteur
M. F. BARET	Directeur de Thèse et Examinateur
M. G. GUYOT	Examinateur
M. B. PINTY	Examinateur
M. M. VERSTRAETE	Examinateur

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier ici tout ceux qui, à titres divers, ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse:

Frédéric Baret (INRA Montfavet) qui a, en tant que Directeur de Thèse, suivi ce travail de près, même lorsque 6000 km nous séparaient! J'ai beaucoup appris avec lui.

Messieurs G. Guyot (INRA Montfavet), C. Klapisz (Université Paris VII), M. Leroy (CNES Toulouse), G. Saint (LERTS Toulouse), B. Pinty (LAMP Clermont-Ferrand), M. Verstraete (JRC Ispra) qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de cette thèse.

Catherine Leprieur (LERTS Toulouse), Véronique Carrère (JPL Passadena), Bruno Andrieu (INRA Grignon), Franck Aries et Joël Chadoeuf (INRA Montfavet), Mike Steven (Université de Nottingham), Gregg Vane (JPL Passadena) avec lesquels j'ai pris plaisir à travailler.

J'ai beaucoup apprécié l'accueil et la bonne humeur de la station de Bioclimatologie de l'INRA de Montfavet: merci à tous!

Enfin, je suis reconnaissant à l'Institut National de la Recherche Agronomique et au Centre National d'Etudes Spatiales qui ont cofinancé ce travail et m'on fait confiance durant ces trois années.

Table des matières

Introduction 5

I Analyse bibliographique 8

1 Les propriétés optiques des couverts végétaux 9
1.1 Facteurs de variation de la réflectance d'un couvert végétal 9
1.1.1 Facteurs externes 9
1.1.2 Facteurs liés à la végétation 10
1.1.3 Facteurs liés aux sols 11
1.1.4 Le transfert atmosphérique 12
1.2 Modélisation des propriétés optiques des sols et des couverts 12
1.2.1 Etude des sols 12
1.2.2 Etude des couverts végétaux 13
1.3 Inversion de modèles physiques 13
1.3.1 Méthodologie d'inversion des modèles de réflectance 14
1.3.2 Application 15
1.4 Conclusion partielle 15

2 Les propriétés optiques des feuilles 16
2.1 Interactions rayonnement électromagnétique/feuille 16
2.1.1 Diffusion du rayonnement électromagnétique 17
2.1.2 Absorption du rayonnement électromagnétique 17
2.2 Variabilité des propriétés optiques des feuilles 19
2.2.1 Le domaine proche infrarouge (700 nm - 1300 nm) 19
2.2.2 Le domaine visible (400 nm - 700 nm) 20
2.2.3 Le domaine moyen infrarouge (1300 nm -2500 nm) 22
2.3 Modélisation des propriétés optiques des feuilles 23
2.3.1 Modèles de lancer de rayon 23
2.3.2 Modèles stochastiques 23
2.3.3 Modèles de transfert radiatif 24
2.3.4 Intérêt de ces modèles 25
2.4 Conclusion partielle 25

II Modélisation de la réflectance spectrale du couvert 26

3 PROSPECT: un modèle de propriétés optiques des feuilles 27
3.1 Théorie 27
3.1.1 Transfert radiatif à travers une couche compacte 27
3.1.2 Transfert radiatif à travers N couches compactes 30
3.1.3 Conclusion 31
3.2 Mesure des propriétés biophysiques des feuilles 32

3.2.1 Choix du matériel végétal 32
3.2.2 Mesures physiques 32
3.2.3 Mesures radiométriques 33
3.2.4 Mesures biochimiques 33
3.3 Etalonnage du modèle: détermination des constantes physiques et optiques 34
3.3.1 Calcul de l'indice de réfraction n et de l'angle α 34
3.3.2 Calcul de l'indice de structure N 35
3.3.3 Calcul du spectre d'absorption spécifique des pigments et de l'eau 36
3.4 Validation du modèle PROSPECT 37
3.5 Inversion du modèle PROSPECT 38
3.5.1 Analyse de sensibilité 38
3.5.2 Inversion 38
3.6 Conclusion partielle 39

4 SOILSPECT: un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol 40
4.1 Théorie 40
4.1.1 Présentation du modèle 40
4.1.2 Conséquences 42
4.2 Acquisition des données expérimentales 43
4.2.1 Protocole expérimental 43
4.2.2 Résultats expérimentaux 44
4.3 Ajustement des paramètres du modèle 44
4.3.1 Inversion du modèle SOILSPECT sur les données directionnelles 44
4.3.2 Inversion du modèle sur les données spectrales 46
4.4 Conclusion partielle 46

5 Simulation de la réflectance spectrale des couverts végétaux 48
5.1 Au niveau du sol 48
5.1.1 Le modèle SAIL (Verhoef, 1984, 1985) 48
5.1.2 Couplage de PROSPECT, SOILSPECT et SAIL 49
5.1.3 Validation 51
5.2 Au niveau du satellite 52
5.2.1 Le modèle 5S (Tanré et al., 1985) 52
5.2.2 Couplage de PROSPECT+SOILSPECT+SAIL et 5S 53
5.3 Conclusion partielle 53

III Caractérisation du couvert par radiométrie haute résolution spectrale 54

6 Etude des glissements spectraux 55
6.1 Analyse à l'échelle de la feuille 55
6.1.1 Dérivation analytique du modèle PROSPECT 55
6.1.2 Etude de sensibilité 56
6.1.3 Equivalence entre λ_i et la réflectance en bandes larges 56
6.2 Analyse à l'échelle du couvert 57
6.2.1 Dérivation analytique du modèle PROSPECT+SAIL 57
6.2.2 Etude de sensibilité 58
6.2.3 Proposition d'une paramétrisation simple de λ_i 59
6.3 Analyse à l'échelle spatiale 61
6.3.1 Les effets atmosphériques 61
6.3.2 Caractérisation de λ_i au niveau spatial 62
6.4 Conclusion partielle 62

7 Estimation des paramètres biophysiques du couvert végétal par inversion de modèles 64

7.1 Etude de spectres synthétiques simulant les bandes AVIRIS 64
7.1.1 Inversion du modèle PROSPECT+SAIL 64
7.1.2 Conséquences pour le calcul de la fraction de PAR absorbé: ε_i 67
7.2 Inversion sur spectres réels 67
7.2.1 Inversion du modèle sur des spectres équivalents AVIRIS 67
7.2.2 Inversion du modèle sur les bandes TM 68
7.2.3 Inversion du modèle sur les bandes HRV 68
7.2.4 Conséquences sur l'estimation de ε_i 68
7.3 Conclusion partielle 68

Conclusion **70**

Liste des publications **72**

Bibliographie **74**

Liste des figures **86**

Liste des tableaux **91**

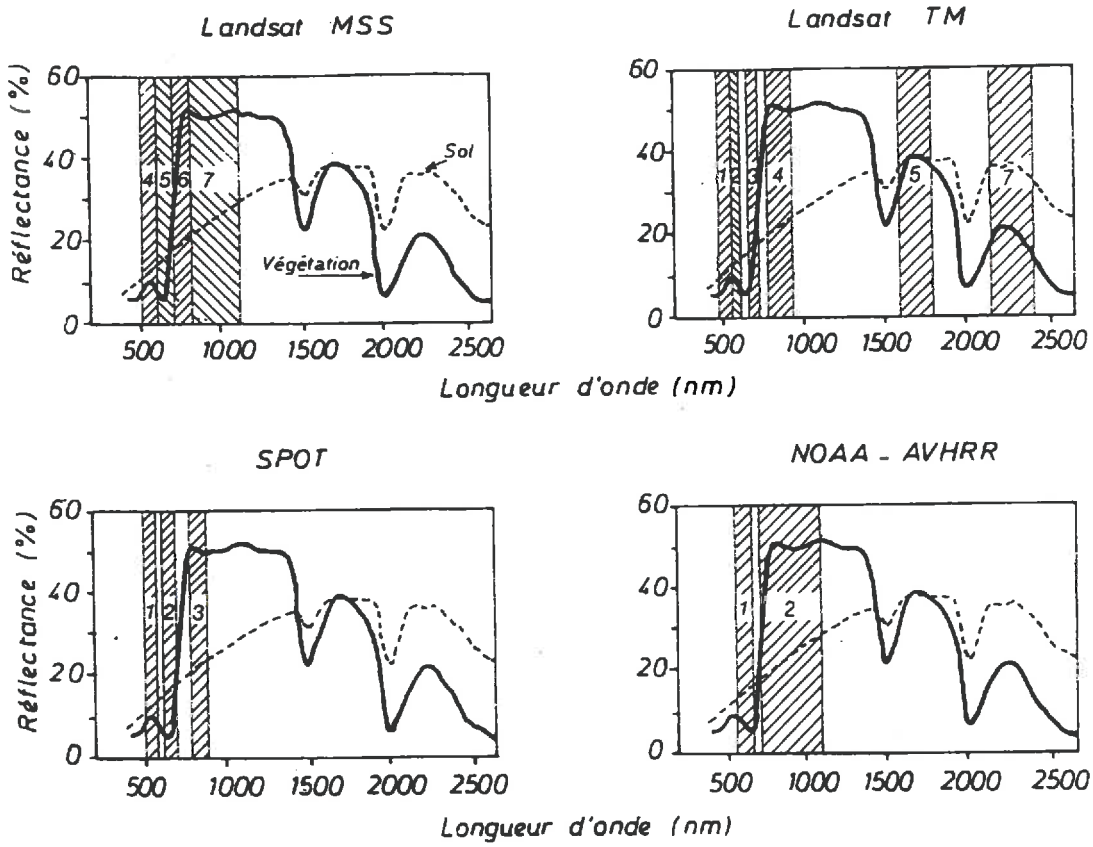


Figure 0.1: Bandes spectrales des capteurs Landsat MSS et TM, Spot HRV, et AVHRR de NOAA superposées à un spectre de sol et un spectre de végétation (d'après Guyot 1989).

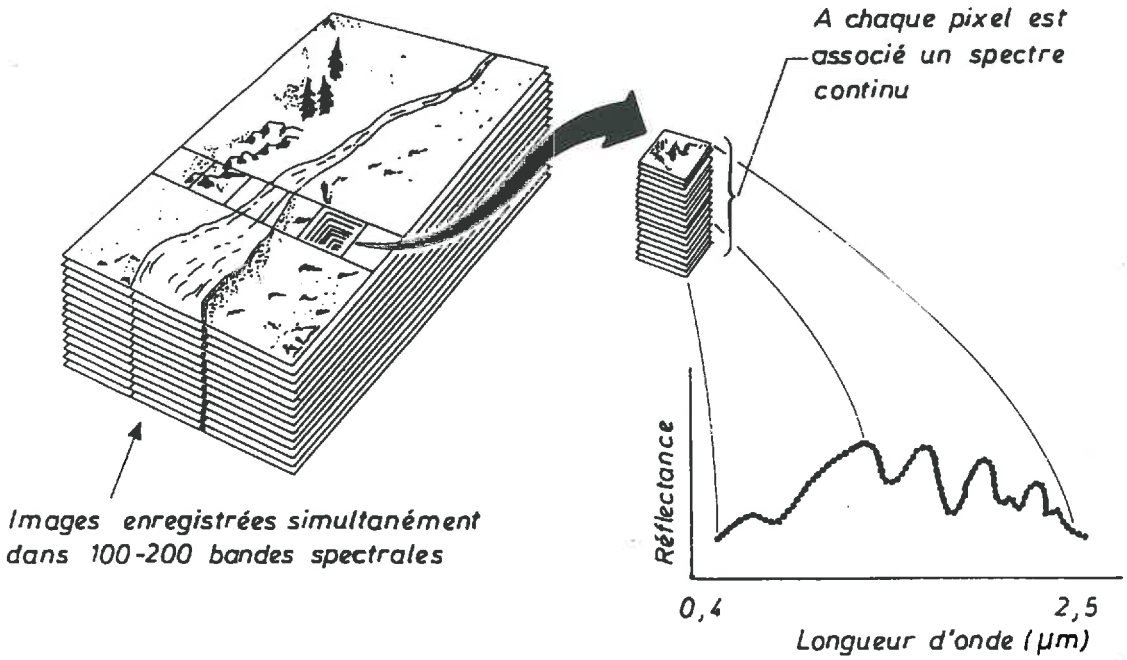


Figure 0.2: Concept d'un système spectro-imageur (d'après Vane et Goetz, 1988).

INTRODUCTION

La télédétection est un outil qui permet d'étudier les objets à distance. Les caractéristiques des surfaces naturelles terrestres (sols, cultures, roches, surfaces immergées, nuages...) sont déterminées à partir du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis dans différents domaines de longueur d'onde. Les propriétés optiques de ces surfaces résultent de propriétés spectrales et directionnelles: la réflectance, rapport entre une quantité de rayonnement réfléchi et une quantité de rayonnement incident, est donc une fonction de la longueur d'onde λ (composante spectrale) et de la géométrie de visée (composante directionnelle).

Sur les terres émergées, la connaissance du rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (300-3000 nm) absorbé par un couvert végétal ou un sol nu peut être d'un grand intérêt pour les climatologues qui utilisent cette donnée dans les modèles de circulation générale de l'atmosphère, pour les agronomes et écologues qui étudient la physiologie et la productivité des espèces végétales cultivées ou naturelles... La quantité de rayonnement absorbé par un milieu étant difficile à estimer par une mesure directe, on la déduit de la quantité de rayonnement diffusé par la surface, qui elle, est mesurable par des instruments au sol, aéroportés ou satellisés (Verstraete et al., 1990). les capteurs actuels embarqués sur satellites (HRV, TM, AVHRR...) disposent de bandes spectrales assez larges (de l'ordre de 50-200 nm), non contigües, et en nombre relativement faible (Figure 0.1); en outre, malgré la possibilité de dépointage de certains d'entre eux, il n'est pas possible, pour l'instant, d'acquérir des données directionnelles (plusieurs angles de visée) sur la même cible au même instant. Ces capteurs fournissent donc une information limitée ne permettant pas l'identification directe des surfaces observées.

La composante directionnelle de la réflectance n'étant pas la préoccupation première de ce travail, nous développerons surtout la composante spectrale. Du visible au moyen infrarouge, les caractéristiques spectrales des sols, roches, couverts végétaux... sont typiquement de l'ordre de 20-40 nm. Les barrières technologiques qui empêchaient la mesure de la luminance d'une surface terrestre dans des bandes spectrales très étroites ont été levées au cours des années 80, amorçant le développement d'un domaine de la télédétection assez nouveau: la haute résolution spectrale (Figure 0.2). Au niveau local, des spectro-radiomètres permettent d'ores et déjà d'acquérir rapidement des spectres entiers dans le domaine optique, avec une résolution spectrale de l'ordre de quelques nanomètres. Les spectro-imageurs aéroportés AVIRIS (Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer), CAESAR (CCD Airborne Experimental Scanner for Application in Remote Sensing), ou encore ASAS (Advanced Solid-State Array Spectroradiometer), préfigurent déjà les systèmes prochainement destinés à être embarqués sur la plate-forme polaire EOS (Earth Observing System): HIRIS (High Resolution Imaging Spectrometer), MISR (Multiangle Imaging Spectroradiometer), ou MODIS-T (Moderate Resolution Imaging Spectrometer Tilt).

En marge des aspects instrumentaux, l'interprétation des données acquises en haute résolution spectrale, et leur traduction en terme de variables thématiques, a nécessité des approches nouvelles d'extraction de l'information (Vane et Goetz, 1988). Ces approches ont été explorées avec plus ou moins de succès selon les domaines d'application (géologie, agronomie, écologie, océanographie...). Par exemple, des progrès considérables ont été accomplis dans la détection des minéraux des roches de surface, et l'application à la prospection minière. En revanche, on sait beaucoup moins extraire une information d'intérêt agronomique (biochimie ou architecture du couvert végétal) à partir de mesures de réflectance spectrale, information qui pourrait être incluse dans des modèles d'estimation des productions agricoles (Delecolle et al., 1991).

Les méthodes d'extraction de l'information radiométrique varient en fonction du nombre de géométries de mesure et de bandes spectrales disponibles. Toutes les relations établies avec des bandes larges sont, bien entendu, valables avec des bandes étroites: c'est le cas des indices de végétation généralement

basés sur des rapports ou autres combinaisons de réflectances mesurées dans le visible et le proche infrarouge. Un "bon" indice doit être sensible aux variables de la végétation et insensible aux variables environnementales telles que le sol, les conditions atmosphériques ou la géométrie de mesure. De nombreux indices de végétation ($NDVI$, PVI, $SAVI$, $TSAVI$, $GEMI$...) ont été proposés dans la littérature afin d'estimer le LAI (surface totale de feuille par unité de surface du sol), ou plus directement la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm) absorbé par la plante, ε_i (Baret et Guyot, 1991; Richardson et Everitt, 1992). ε_i et ε_b, efficience de conversion en matière sèche du rayonnement absorbé, déterminent le potentiel de production primaire nette d'un couvert végétal. De la même façon, des indices fabriqués à partir de bandes proche infrarouge et moyen infrarouge (MSI, $LWCI$...) ont été proposés pour estimer la teneur en eau relative des feuilles et détecter un stress hydrique (Hunt et al., 1987). Enfin, Shibayama et Akiyama (1989, 1991) ont récemment construit toute une panoplie d'indices spectraux à partir de bandes spectrales étroites, choisies sur tout le domaine optique; ils ont établi de bonnes relations entre ces indices et le LAI, la biomasse sèche, ou plus directement le rendement en grains d'une culture de riz.

Ces relations entre signatures spectrales de la végétation et propriétés biophysiques des couverts sont presque toujours indirectes et donc souvent limitées. Par exemple, s'il y a de bonnes corrélations entre les indices de végétation et la productivité lorsque la végétation est verte et en bonne santé, ce n'est plus le cas lorsque la végétation est atteinte de chlorose (Steven et al., 1991). Hunt et Rock (1989), Bowman (1989) ont montré que les indices moyen infrarouge ne permettaient pas de détecter des variations naturelles de teneur en eau dans un couvert végétal.

La haute résolution spectrale a permis le développement d'outils spécifiques basés sur une analyse fine de la variation spectrale de la réflectance. Le plus connu est λ_i, longueur d'onde du point d'inflexion caractérisant le "red edge" (remontée brusque de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge). Comme pour les indices de végétation classiques, des relations ont été établies entre les variables du couvert et λ_i. Ce dernier a d'abord été relié à des états de chlorose (Demetriades-Shah et Steven, 1988; Demetriades-Shah et al., 1990; Rock et al., 1988, 1990;...), ou de stress provoqués par des concentrations excessives en certains minéraux (Chang et Collins, 1983; Collins et al., 1983; Miller et al., 1985; Gauthier et Neville, 1985;...), et d'une manière plus générale, à la vigueur de la végétation (Baret et al., 1987; Milton et Mouat, 1989; Clevers et Büker, 1991;...). Mais beaucoup d'autres facteurs, tant propres au couvert (indice foliaire, orientation des feuilles) qu'externes au couvert (géométries de visée et d'éclairement) peuvent rendre l'interprétation des déformations spectrales beaucoup plus complexe (Vanderbilt et al., 1988; Guyot et Baret, 1989). Cependant, l'intérêt des déformations spectrales peut se justifier par une moindre dépendance vis-à-vis de facteurs perturbateurs tels que les propriétés optiques des sols ou les conditions atmosphériques (Guyot et Baret, 1988).

Afin d'utiliser pleinement les données haute résolution spectrale, d'autres méthodes d'extraction de l'information ont été adaptées. C'est le cas des modèles de mélange ("spectral mixture analysis") qui ont été testés avec succès sur des images multispectrales afin de réduire l'information spectrale à quelques spectres de base ("end-members"). Ces derniers peuvent être choisis dans un catalogue de spectres acquis au laboratoire (feuilles, poudres minérales), ou au champ sur des surfaces bien connues (végétaux, roches, sols...) (Adams et al., 1986). On peut aussi les déterminer par des analyses en composantes principales (Huete, 1986), ou les choisir directement dans l'image (Adams et al., 1991; Ustin et al., 1992). L'analyse spectrale revient alors à déterminer la combinaison de ces spectres qui caractérise le mieux la cible. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut apporter qu'une information qualitative sur la végétation. De plus, elle suppose que les phénomènes mis en jeu sont additifs, ce qui n'est pas toujours le cas (Adams et al., 1991; Huete, 1986).

Les nombreuses relations expérimentales établies ces dix dernières années entre des caractéristiques spectrales simples (indices spectraux, dérivées premières et secondes de la réflectance) et des variables biophysiques du couvert, souvent exprimées globalement par des critères d'état, souffrent d'un cer-

tain nombre de limitations, liées évidement à leur caractère empirique. De plus, elles n'ont jamais été utilisées de manière opérationnelle ce qui limite leur portée. Pour toutes ces raisons, l'apport spécifique de la haute résolution spectrale par rapport aux bandes larges classiques n'est toujours pas clairement démontré.

Notre démarche a consisté à établir les bases physiques et physiologiques des processus déterminant le comportement spectral de la végétation. Les modèles résultants devront permettre d'évaluer rationnellement l'intérêt de la haute résolution spectrale, la manière d'utiliser cette information aussi bien au niveau rapproché de la feuille et du sol, qu'au niveau local de la parcelle, et bien entendu à plus large échelle.

La première partie consiste en une synthèse bibliographique des facteurs de variation de la réflectance spectrale des couverts végétaux. Elle est suivie par une présentation des modèles de propriétés optiques des feuilles, des sols, et des couverts, sans oublier le transfert atmosphérique pour des applications satellitaires. Enfin, nous verrons dans une troisième partie comment utiliser ces modèles pour extraire une information d'intérêt agronomique à partir de données haute résolution spectrale: 1) en utilisant les glissements spectraux, 2) par inversion du modèle précédemment construit sur des données spectrale.

Partie I

Analyse bibliographique

Chapitre 1

Les propriétés optiques des couverts végétaux

Le rayonnement solaire réfléchi par un couvert végétal (sol + végétation) véhicule la signature spectrale et directionnelle de ce couvert; les agronomes et les biologistes s'emploient depuis des années à retrouver les caractéristiques du couvert à partir de mesures de réflectance acquises au champ ou au niveau satellitaire. Ce problème est complexe car le signal reçu par le capteur est un mélange de signatures d'éléments propres au couvert et d'éléments extérieurs. Parmi les facteurs externes, on citera la géométrie de mesure et la nature du rayonnement incident. Les facteurs internes sont les propriétés spectrales des éléments de végétation, l'architecture du couvert et la diffusion du sol. Une autre source de complexité est liée au caractère indissociable des composantes spectrales et directionnelles du signal radiométrique. Les travaux antérieurs de modélisation ont surtout concerné la nature bidirectionnelle du rayonnement réfléchi. Nous allons essayer de détailler, dans ce chapitre, la contribution de chacun des éléments du couvert à la composante spectrale ou directionnelle de la réflectance. Nous donnerons ensuite un aperçu des différents modèles de réflectance des sols et des couverts végétaux. Nous verrons quelles sont les stratégies les plus couramment utilisées pour extraire des informations pertinentes sur une surface naturelle à partir de données radiométriques. Enfin, les problèmes liés au transfert atmosphérique seront abordés succinctement.

1.1 Facteurs de variation de la réflectance d'un couvert végétal

Le flux de rayonnement solaire réfléchi par un couvert végétal et capté par un radiomètre est composé de flux élémentaires réfléchis par les feuilles et par le sol. Avant de détailler les facteurs de variation de la réflectance propres à la végétation et aux sols, voyons un peu le rôle des facteurs externes.

1.1.1 Facteurs externes

Nature du rayonnement solaire incident

Le flux solaire incident se scinde généralement en un flux direct et un flux diffus. La fraction de rayonnement diffus, *skyl*, dépend des conditions atmosphériques (nébulosité); elle diminue avec la longueur d'onde et est souvent supposée isotrope. Lorsque qu'il y a des nuages et que le rayonnement diffus est prédominant, les plantes sont éclairées de façon identique dans toutes les directions de l'espace et les ombres s'estompent. De façon générale, la réflectance du couvert est peu sensible à ce facteur (Clevers et Verhoef, 1991).

Géométrie de mesure

La géométrie de mesure est succeptible de perturber la mesure de réflectance du couvert végétal: tout d'abord, la surface échantillonnée doit être représentative du couvert afin de réduire les hétérogénéités

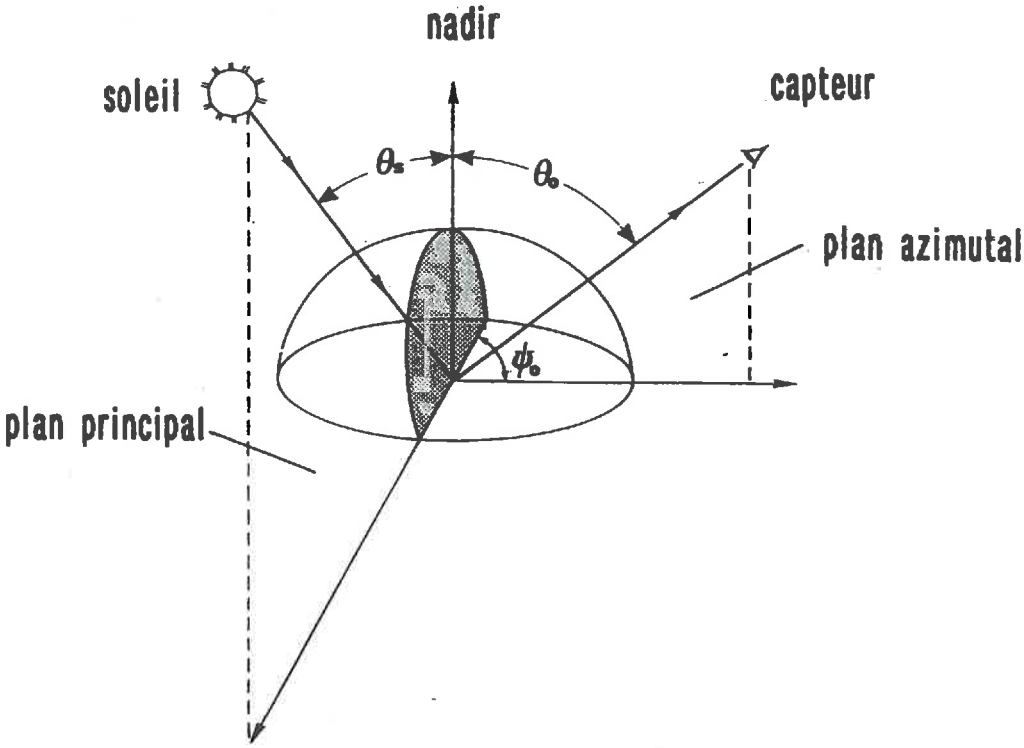


Figure 1.1: Géométrie de mesure de la réflectance bidirectionnelle: θ_s=angle zénithal solaire, θ_o=angle zénithal de visée, ψ_o=angle azimutal de visée (d'après Irons et al., 1988).

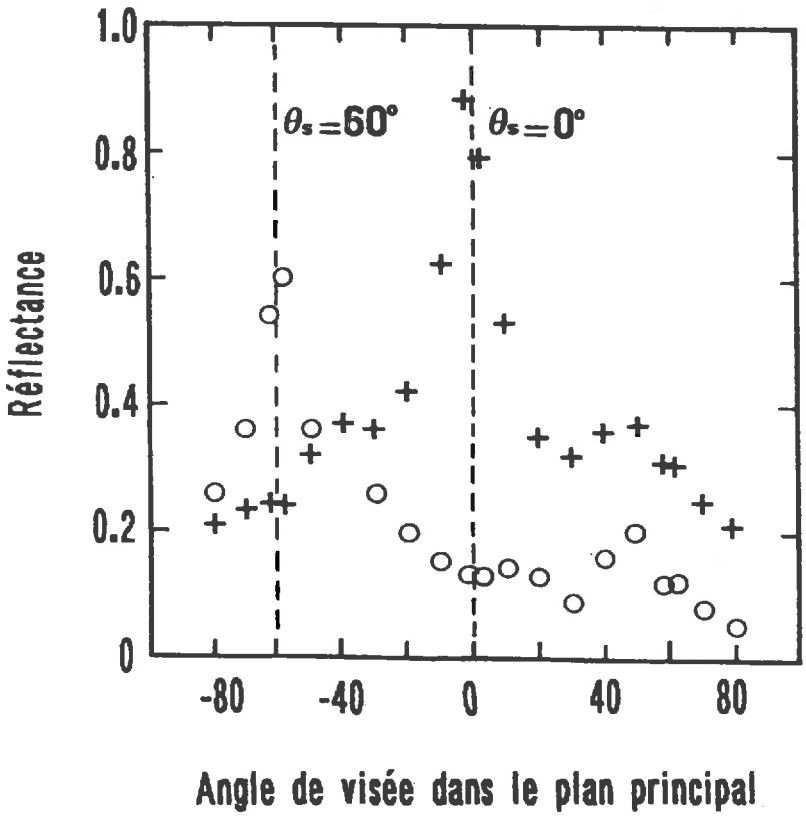


Figure 1.2: Variation angulaire de la réflectance d'une parcelle de trèfle (*Trifolium repens*): (+) illumination à 0°, (o) illumination à 60° (d'après Woessner et Hapke, 1987).

locales (Ø≈ 0.5 m pour du blé, 1.0 m pour du maïs et plusieurs dizaines de mètres pour une forêt). De plus, les couverts végétaux et les sols nus n'étant pas des diffuseurs lambertiens, la hauteur du soleil et les angles de visée influencent aussi les niveaux de réflectance: la proportion de zones éclairées et de zones d'ombre observées par le capteur varie en fonction de ces angles (Figure 1.1). Par exemple, si on se place dans le plan du soleil (plan principal), la réflectance présente une forte dissymétrie appelée effet de "hot spot" (Figure 1.2): lorsque la direction d'observation est la même que la direction d'illumination ($\theta_s = \theta_o$ et $\psi_o \approx 0^o$), la probabilité de fuite de la lumière qui pénètre dans le couvert ou le sol est égale à 1, et la réflectance est alors maximum (Pinty et al., 1990; Verstraete et al., 1990). Dans le plan perpendiculaire, les variations de la réflectance sont faibles et symétriques (Guyot, 1991).

1.1.2 Facteurs liés à la végétation

Propriétés spectrales de la végétation

En ignorant provisoirement le sol, les feuilles représentent les surfaces principales d'un couvert végétal. Les autres organes tels que les pétioles, les tiges, les fleurs, les fruits ...sont rarement pris en compte même si, durant une période donnée, ils peuvent affecter la réflectance du couvert. Les mécanismes spectraux mis en jeu au niveau de la feuille seront développés dans le chapitre suivant. Au niveau du couvert, quelques études utilisant la haute résolution spectrale ont permis d'estimer des concentrations en lignine et en cellulose de couverts forestiers (Wessman et al., 1988, 1989). L'estimation et le suivi de la biochimie d'un couvert végétal par télédétection est l'une des priorités des années à venir: ils devraient fournir des indications précieuses sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Les constituants chimiques les plus intéressants sont la lignine, les protéines (azote), l'amidon, la cellulose, les chlorophylles et autres pigments accessoires (Peterson, 1992). Par exemple, il existe une forte corrélation entre la concentration en lignine ou en azote des feuilles et la vitesse de décomposition des litières: celle-ci est plus grande pour les matériaux riches en azote (Melillo et al., 1982). La concentration en chlorophylle ou en azote est un élément limitant de l'activité photosynthétique et donc de la productivité primaire. Enfin la cellulose et la lignine qui caractérisent les bois et litières reflètent la biomasse non photosynthétique (Ustin et al., 1992). L'utilisation de la télédétection pour l'estimation de la biochimie du couvert a pour principal avantage de permettre l'extension des modèles de cycles nutritifs, d'échanges gazeux...à différentes échelles afin de prédire les réponses écologiques à une modification de l'environnement.

Architecture du couvert

La réflectance d'un couvert végétal ne dépend pas seulement des propriétés de diffusion et d'absorption des éléments de végétation mais aussi de l'architecture du couvert: **on ne peut pas assimiler un couvert à une feuille de taille infinie.** L'architecture - agencement des feuilles sur la plante et des plantes dans le couvert - est décrite par la distribution spatiale des surfaces végétales ou minérales, l'indice foliaire (LAI= "Leaf Area Index") et la distribution des angles foliaires (LAD):

- **La distribution spatiale de la végétation sur le sol** dépend du type de culture, de la disposition des plantes (écartement et orientation des rangs), et de leur stade de développement. Au fur et à mesure que la végétation s'étend, les effets du sol s'estompent; ceci est d'autant plus sensible que le contraste avec la réflectance de la végétation est faible.

- **Le LAI (surface des feuilles par unité de surface de sol)** est une variable importante qui entre dans les modèles de croissance et d'évapotranspiration des couverts. Il varie de 0 pour un sol nu à une valeur maximale de 8-10 pour une culture annuelle, et peut dépasser 15 dans le cas d'une forêt. Pour une situation de mesure donnée, la réflectance du couvert végétal est celle du sol lorsque LAI=0, et tend vers une limite appelée réflectance infinie lorsque le LAI dépasse un certain seuil. Ce seuil dépend du domaine spectral dans lequel on se place: ainsi dans le rouge, la réflectance sature pour un LAI de l'ordre de 2-3 alors qu'il faut atteindre des LAI de l'ordre de 6-8 dans le proche infrarouge (Figure 1.3).

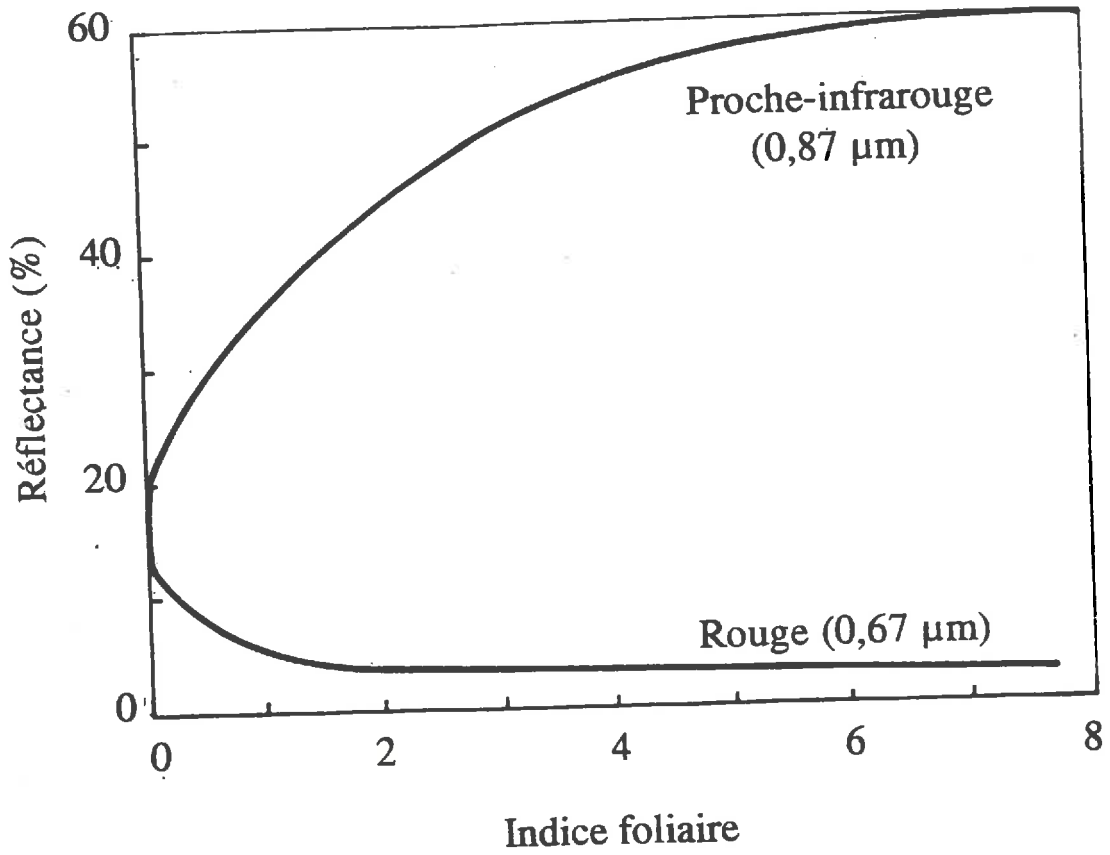


Figure 1.3: Variation de la réflectance d'un couvert végétal en fonction du *LAI* (d'apr Guyot, 1991).

- **L'inclinaison des feuilles** n'est pas uniforme dans un couvert végétal: on définit généralement un angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l), et une fonction de distribution (LAD). θ_l influence surtout la réflectance directionnelle du couvert. Un couvert planophile ($\theta_l = 0^o$) dont tous les éléments sont lambertiens est lui-même un corps lambertien et la réflectance directionnelle est égale à la réflectance hémisphérique; l'anisotropie de la réflectance augmente lorsque le couvert devient érectophile (θ_l tend vers 90°) et atteint son maximum lorsque les directions d'illumination et de visée se confondent ("hot spot") ou sont opposées (effet spéculaire).

Sur des surfaces dépourvues de végétation ou recouvertes par un couvert épars, il est nécessaire de bien caractériser les propriétés optiques des sols.

1.1.3 Facteurs liés aux sols

Les propriétés optiques des sols dépendent des propriétés spectrales intrinsèques des matériaux pédologiques (minéraux, matière organique, eau), de la taille des agrégats et de la géométrie de mesure. Les études portant à la fois sur les propriétés spectrales et directionnelles des sols sont assez rares, et les deux aspects sont le plus souvent dissociés.

Propriétés spectrales

Elles ont été beaucoup étudiées en laboratoire sur des poudres minérales et en milieu naturel sur des roches ou des sols de nature variable. Baumgardner et al. (1985), Irons et al. (1989) ont recensé les principaux constituants du sol affectant la réflectance: les minéraux (argiles, oxydes et hydroxydes de fer, carbonates, sulfates...), la matière organique (humus et substances non humiques), l'eau et l'air forment des milieux complexes dont les propriétés optiques sont, elles aussi, complexes (Figure 1.4). Au niveau microscopique, les phénomènes d'absorption sont liès à des transitions électroniques dans le visible, à des vibrations et rotations de molécules dans le proche et moyen infrarouge. Au niveau macroscopique, les sols ont été étudiés de façon assez empirique: par exemple, Idso et al. (1975) ont établi des relations entre la teneur en eau volumique et la réflectance. Un sol mouillé apparait sombre et sa réflectance est plus faible qu'un sol sec. De même la réflectance spectrale d'un sol décroît sur tout le spectre visible lorsque la teneur en matière organique augmente.

Dans un sol, les combinaisons possibles de minéraux, matière organique, air et eau sont presque infinies. Stoner and Baumgardner (1981) ont néanmoins défini 5 classes de spectres caractéristiques de la plupart des sols des Etats Unis. Mais ces travaux se contentent de cataloguer des spectres acquis selon une seule géométrie d'éclairement et de visée. De telles études sont, bien entendu, utiles dans une optique de cartographie ou de classification, mais elles contribuent assez peu à la compréhension des autres facteurs gouvernant les interactions entre le rayonnement solaire et les sols, tels que la dimension des particules ou les conditions de mesure. Il est nécessaire de considérer les propriétés directionnelles.

Propriétés directionnelles

Le rayonnement solaire qui arrive sur un sol ne rencontre généralement pas une surface plate et lisse mais une surface rugueuse et irrégulière. La rugosité est le facteur le plus important influençant la réflectance bidirectionnelle d'un sol nu. Comme pour les couverts végétaux, les sols rugueux peuvent présenter un phénomène de rétrodiffusion ("hot spot") important (Figure 1.5). Au contraire, certaines surfaces désertiques planes sont caractérisées par un effet speculaire très marqué (Deering et al., 1990). Plusieurs indices (variations de surface, distribution et taille des particules ...) ont été définis pour décrire la surface d'un sol, mais leur mesure directe présente encore des difficultés. De plus, selon que les particules du sol sont transparentes ou opaques, la réflectance bidirectionelle s'accroît ou décroît lorsque leur taille diminue (Irons et al., 1989). La compréhension et la description de la diffusion de la lumière entre les particules devraient nous donner des informations intéressantes sur la rugosité de surface.

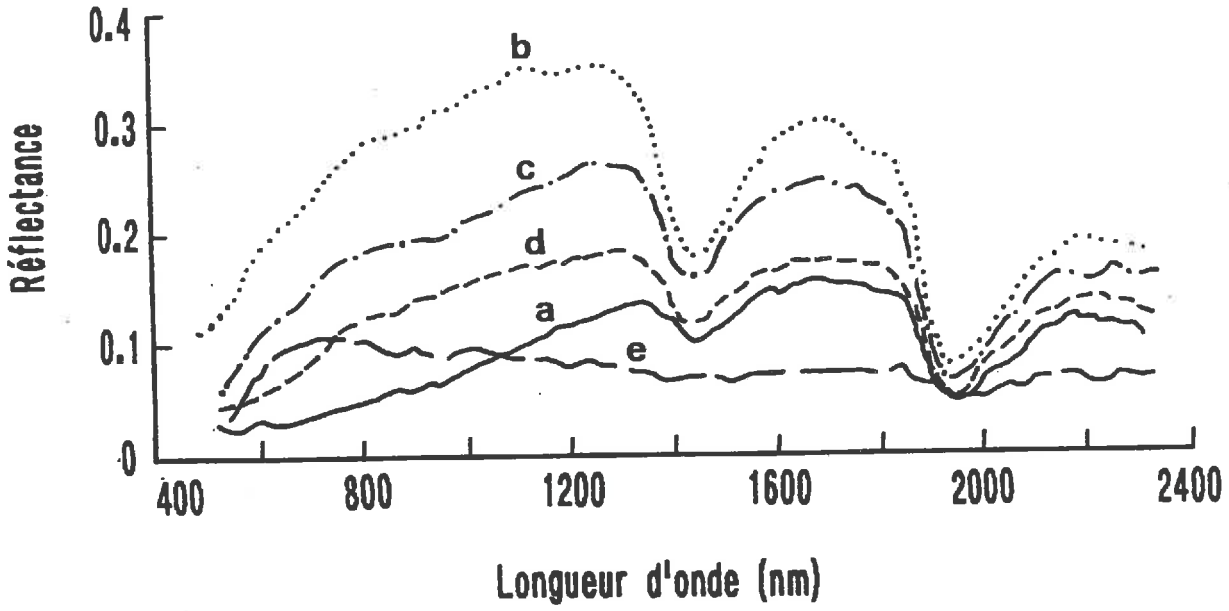


Figure 1.4: Spectres de réflectance de cinq sols différents: (a) sol à forte teneur en matière organique, (b) sol peu altéré, (c) sol à faible teneur en fer, (d) sol à faible teneur en matière organique, (e) sol à forte teneur en fer (d'après Baumgardner et al., 1985).

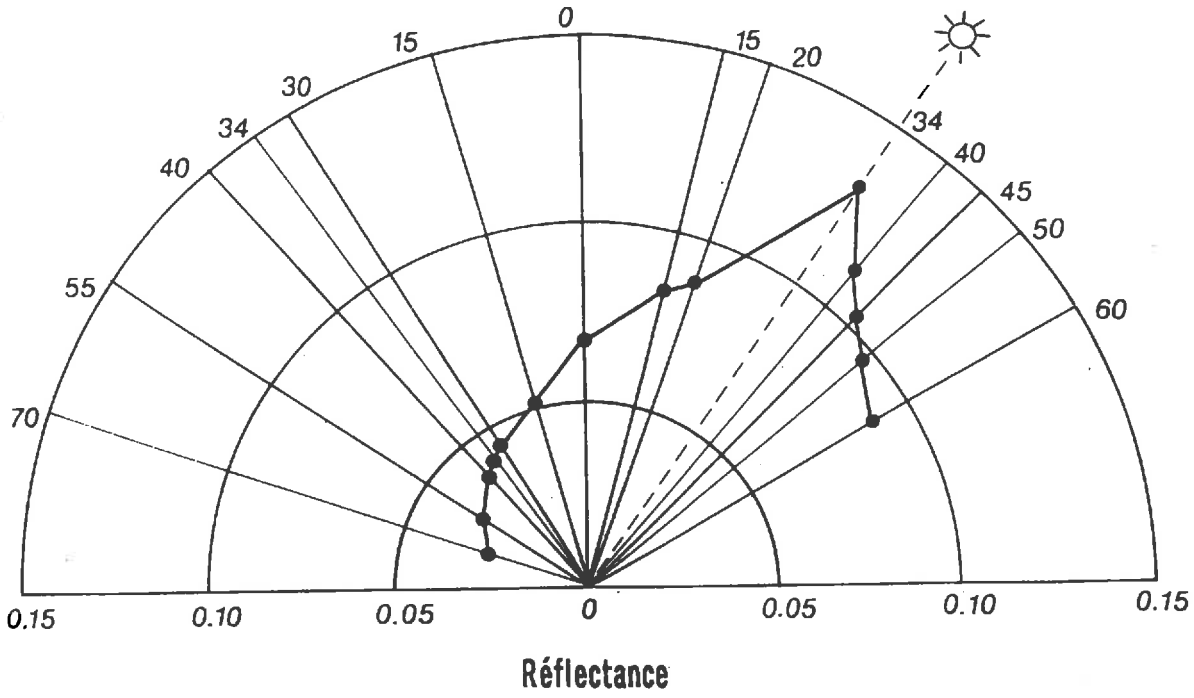


Figure 1.5: Variation directionnelle d'un sol argileux rugueux dans le plan principa de visée.

1.1.4 Le transfert atmosphérique

Si la Terre n'avait pas d'atmosphère, tout le rayonnement solaire éclairerait sa surface et seuls les photons réfléchis par la cible parviendraient au capteur. Ce signal directement relié aux propriétés de la cible est le signal utile (Tanré et al., 1985). La Terre étant entourée d'une atmosphère, le signal utile est perturbé par deux mécanismes dont les effets sont différents: l'absorption gazeuse et la diffusion.

- **Les processus d'absorption:** un certain nombre de photons disparaissent et on observe une atténuation du signal dans la direction de propagation. L'absorption est due principalement à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, à l'ozone et à l'oxygène. Elle est variable avec la longueur d'onde et dépend des quantités d'absorbants contenues dans l'atmosphère.

- **Les processus de diffusion:** La diffusion atmosphérique est due à l'interaction des photons avec les molécules (diffusion Rayleigh) et les aérosols (diffusion de Mie). Contrairement aux processus d'absorption où un certain nombre de photons disparaissent, ceux-ci sont redistribués dans toutes les directions avec une probabilité définie par la fonction de phase de diffusion; on observe une atténuation du signal dans la direction d'éclairement et une augmentation dans les autres directions.

1.2 Modélisation des propriétés optiques des sols et des couverts

Les couverts végétaux sont des milieux complexes. L'expérimentation ne permet d'analyser que très partiellement le rôle des différents facteurs influençant la réponse radiométrique (Baret, 1988). En outre, l'étude de la dynamique d'une culture ou d'un écosystème par comparaison de données satellitaires acquises au même moment par des capteurs différents (bandes spectrales et résolution spatiale), ou par un même capteur à des instants différents, requiert l'utilisation de modèles de réflectance des sols et des couverts végétaux. Il en existe de nombreux dans la littérature: discrets ou continus, déterministes ou empiriques, inversibles ou non inversibles (Strahler et al., 1986). Le modèle parfait et universel n'existe pas, et le choix de l'un ou de l'autre dépendra surtout de l'objectif, de la situation rencontrée, de l'échelle d'acquisition des données... Nous commencerons cette section par les modèles de propriétés optiques des sols, qui peuvent être couplés aux modèles de propriétés optiques des couverts.

1.2.1 Etude des sols

Les travaux de modélisation de la réflectance spectrale et directionnelle des sols sont rares. Les propriétés spectrales sont le plus souvent décrites au niveau macroscopique: Ishida et al. (1991) ont proposé un modèle théorique permettant de simuler l'effet de l'humidité du sol sur la réflectance; ils introduisent un indice de réfraction complexe du milieu, $n+ik$, dont la partie imaginaire k, assimilable à un coefficient d'extinction, est fortement corrélée aux propriétés chimiques du sol (oxydes de fer en particulier). Bedidi et al. (1992) ont fait de même sur des sols latéritiques. La rareté des modèles peut s'expliquer par la complexité et la variété des phénomènes mis en jeu.

Les propriétés directionnelles ont fait l'objet de travaux plus fournis. Le modèle géométrique de Deering et al. (1990) dans lequel les effets spéculaires et de rétrodiffusion sont formulés séparément, a permis de simuler avec succès la réflectance directionnelle de sols désertiques. Cierniewski (1987, 1989) qui assimile la surface d'un sol à des sphères équidistantes de même rayon, disposées sur un plan de pente variable, suppose que la réflectance est fortement liée aux ombres créées par les agrégats, et dépend donc de la rugosité et de la géométrie de mesure. Cette hypothèse est correcte mais, comme le montre Escadafal (1989), la réflectance ne diminue pas aussi vite que le modèle le prévoit en supposant les ombres totalement sombres. Cette dérive est d'autant plus importante que l'albédo du sol est élevé. Il apparaît donc nécessaire de prendre en compte les réflexions d'ordre supérieur qui interviennent quand les particules sont proches les unes des autres. Des modèles dérivés de la

théorie du transfert radiatif ont été développés pour décrire quantitativement cette diffusion multiple (Chandrasekhar, 1960; Irons et al., 1989). On peut les inverser afin d'estimer des caractéristiques du milieu à partir d'observations de télédétection. Hapke (1963, 1981, 1984), Hapke et Wells (1981) ont proposé une solution approchée de l'équation de transfert radiatif intégrant l'effet de "hot spot". Ce modèle à 5 paramètres permet de simuler aussi bien des mesures de réflectance au laboratoire que des observations de surfaces de planètes. Pinty et al. (1989, 1990) ont validé ce modèle sur des sols nus.

1.2.2 Etude des couverts végétaux

Les modèles de propriétés optiques des couverts végétaux sont généralement adaptés à un type de couvert donné (couvert homogène, culture en rangs, forêt...). On peut les classer de différentes façons: nous reprendrons ici la classification de Goel (1987).

Modèles de transfert radiatif en milieu diffusant

Les éléments de végétation sont traités comme des petites particules absorbantes et diffusantes, de propriétés optiques connues, positionnées dans des couches horizontales parallèles selon des lois de distribution connues. On distinguera d'abord les modèles basés sur la théorie de Kubelka-Munk, qui décrivent la pénétration du rayonnement solaire direct et diffus dans un milieu diffusant par un système d'équations différentielles du premier ordre (Allen et al., 1970; Chance et LeMaster, 1978; Park et Deering, 1982; Verhoef, 1984, 1985;...). On distinguera ensuite les modèles directement basés sur l'équation de transfert radiatif (Gerstl et Zardecki, 1985; Myneni et al., 1987; Woessner et Hapke, 1987; Verstraete, 1988; Verstraete et al., 1990;...). L'architecture du couvert est généralement décrite par l'orientation des feuilles, leur arrangement dans le couvert ou un indice foliaire. Ces modèles s'appliquent à des couverts homogènes denses pour lesquels les éléments de végétation ont une taille plus petite que la hauteur du couvert.

Modèles nécessitant une description géométrique du couvert

Les éléments de base sont désormais des plantes entières ou des ensembles de plantes représentés par des formes géométriques simples (sphères, cônes, cylindres, ellipsoïdes...) disposées sur le sol de manière bien définie et dont les propriétés optiques sont connues. Ces modèles qui représentent correctement les parties éclairées et ombrées d'une scène sont bien adaptés aux couverts épars (buissons, vergers...) dont la diffusion multiple peut être négligée (Otterman, 1981, 1984; Otterman et Weiss, 1984...). Il existe aussi des modèles hybrides qui combinent, comme leur nom l'indique, les approches géométriques et radiatives; ils sont adaptés à des couverts hétérogènes donc complexes (Kimes et Kirchner, 1982; Bégué, 1991; Roujean et al., 1992).

Les modèles les plus récents sont basés sur une description encore plus détaillée des plantes: la forme exacte et l'organisation géométrique des organes végétaux dans l'espace est désormais requise (Aries et al., 1992). Les éléments de végétation sont divisés en un nombre fini de surfaces qui interceptent la lumière selon des lois de probabilité données (Smith et Oliver, 1974; Borel et al., 1991; Dauzat et Hautecoeur, 1991; Goel et al., 1991). Ces modèles simulent donc de façon très précise le transfert des photons dans le couvert en utilisant les dernières techniques de calcul numérique et de visualisation. Le principal avantage de ces simulations est la représentation réaliste des couverts et du régime lumineux à l'intérieur de la végétation; le principal inconvénient est le temps de calcul souvent très long et l'impossibilité d'inverser ces modèles.

1.3 Inversion de modèles physiques

Modéliser un phénomène physique consiste à déterminer une certaine application $\mathcal{M}$, d'un ensemble $\mathcal{S}$ de valeurs initiales, vers un ensemble $\mathcal{B}$ de résultats. Résoudre le problème direct, c'est se donner un élément de $\mathcal{S}$ et déterminer l'élément de $\mathcal{B}$ correspondant. Résoudre le problème inverse,

c'est identifier le phénomène physique à partir d'un nombre fini de mesures: il s'agit donc de trouver l'image réciproque d'un élément de $\mathcal{B}$ dans $\mathcal{S}$. Pour reprendre la phrase de R. Thom (1983), "il est clair qu'étant donné n'importe quelle phénoménologie, on peut toujours construire un modèle qui la décrit. En d'autres termes, si l'on utilise des paramètres en nombre suffisant, des fonctions d'un degré assez élevé, on peut toujours construire un modèle mathématique de n'importe quoi! Mais le vrai problème n'est évidement pas là: il consiste, en revanche, dans la construction d'un modèle qui ne recoure pas à trop d'être mathématiques. Il y a donc un conflit entre l'adhérence rigoureuse à la donnée empirique, ce que les Anglo-Saxons appellent le fit, et la quantité de paramètres qui apparaissent dans le modèle: si on met beaucoup de paramètres, on a un bon fit, mais un modèle compliqué. Seront excellents les modèles qui concilient, moyennant quelques compromis, peu de paramètres et un bon fit". Cette condition n'est cependant pas suffisante: la description d'un phénomène par un modèle mathématique dont la construction fait abstraction des principes physiques qui régissent ce phénomène, conduit fréquemment à des impasses. Les paramètres du modèle doivent correspondre à des grandeurs mesurables sur le terrain et interprétables par les thématiciens.

Parmi toutes les méthodes d'extraction des variables du couvert, celle qui consiste à inverser un modèle physique de réflectance est peut-être la plus élégante et la plus performante car elle permet de découpler, dans le signal radiométrique, l'effet de chacune des variables. Elle consiste, dans un premier temps, à décrire les interactions entre le rayonnement solaire et la végétation (feuille+sol) sous la forme d'un modèle physique de réflectance de couvert (Goel, 1989). Une fois ce modèle validé sur un jeu de données expérimentales, on peut envisager son inversion, c'est-à-dire l'estimation des variables biophysiques et biochimiques du couvert à partir de mesures de réflectance.

1.3.1 Méthodologie d'inversion des modèles de réflectance

Dans la quasi totalité des cas, la complexité des modèles de réflectance ne permet pas une inversion analytique si bien qu'on doit utiliser des méthodes numériques d'optimisation. Considérons le modèle $\mathcal{M}$ à p paramètres, le vecteur X de variables explicatives, et le vecteur Y de variables observées; la relation entre X et Y peut s'exprimer de la façon suivante:

$$Y = \mathcal{M}(\Theta, X) + \epsilon \tag{1.1}$$

où Θ est le vecteur des p paramètres inconnus. Si n est le nombre d'observations, la procédure d'inversion consiste à estimer Θ en rendant minimum la fonction $S(\Theta)$ définie par:

$$S(\Theta) = \sum_{i=1}^{i=n} [Y_i - \mathcal{M}(\Theta, X_i)]^2 \tag{1.2}$$

On procède pour cela par itérations. Ce problème peut être délicat: la connaissance du jeu de paramètres initial Θ^o a souvent une importance capitale, tant du point de vue de la rapidité de convergence de la solution, que de la validité de la convergence elle-même; des phénomènes d'instabilité numérique conduisent parfois à des minima locaux, ce qui revient à dire que l'unicité de la solution n'est jamais garantie (Roux et Tomassone, 1973; Huet, 1990; Pinty et Verstraete, 1991). Les techniques d'optimisation les plus courantes sont les algorithmes de Gauss-Newton, Gauss-Marquardt (Marquardt, 1963), ou encore la méthode du Simplex (Nelder et Mead, 1965). Il est difficile d'affirmer que telle méthode est meilleure qu'une autre: le choix de l'algorithme dépend surtout du modèle et de sa non-linéarité (Huet, 1990). On se dirige actuellement vers de nouvelles méthodes basées sur des algorithmes génétiques: ces méthodes, combinées avec les méthodes classiques, semblent très prometteuses pour l'inversion de données de télédétection (Renders et Flasse, 1992).

Ces différentes méthodes d'inversion sont généralement disponibles dans des librairies mathémathiques (HAUS59, IMSL, MATLAB, NAG,...). Deux routines ont été testées durant cette thèse selon les problèmes rencontrés: la routine HAUS59 qui minimise la fonction $S(\Theta)$ en utilisant l'algorithme de Gauss-Marquardt, et la routine *fmins* de MATLAB qui minimise $S(\Theta)$ par la méthode du Simplex.

Ces routines sont robustes, *i.e.* le processus de minimisation ne conduit généralement pas à des minima locaux (Goel, 1989). La valeur caractéristique d'une bonne inversion est l'écart quadratique moyen (rms="root mean square"), défini par la relation: $rms = \sqrt{\frac{S(\Theta)}{n_f}}$, où n_f est le nombre de degrés de liberté ($n_f = n - p$). L'inversion est d'autant meilleure que le rms est faible (Maggion, 1991).

1.3.2 Application

A partir de données de télédétection, il est possible de distinguer deux catégories d'inversion:

- **l'inversion sur des données directionnelles** permet d'estimer les variables physiques décrivant l'architecture du couvert. Goel et Thompson (1984a, 1984b) ont montré que le LAI et, avec une moindre précision, l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l, pouvaient être estimés par inversion du modèle SAIL (Verhoef, 1984; 1985). Pinty et al. (1990), Kuusk (1991) ont aussi estimé les propriétés optiques des feuilles ainsi que leur orientation spatiale en inversant des modèles analytiques de réflectance directionnelle. La précision sur les variables estimées dépend de deux facteurs: le choix de la ou des longueurs d'onde à laquelle l'inversion s'opère, et le nombre de données directionnelles disponibles. Le premier facteur est imposé à l'expérimentateur par le radiomètre employé; le second représente peut-être la limitation la plus importante car, si on peut mesurer à l'échelle locale du couvert jusqu'à 50 réflectances bidirectionnelles, on doit se contenter, avec les données satellitaires actuelles, de quelques mesures acquises à des dates proches.

- **l'inversion sur des données spectrales** acquises dans une configuration de mesure donnée, permettrait d'extraire l'information spectrale du couvert mais aussi, sous certaines conditions, des variables décrivant sa structure. Jusqu'à présent, les satellites d'observation de la Terre avaient un nombre limité de bandes spectrales (3 à 7), souvent inférieur au nombre de variables décrivant la réflectance du couvert. Comme le faisait justement remarquer Goel (1989), cela rendait inopérante cette méthode d'inversion. Le développement de la spectro-imagerie a ouvert de nouvelles perspectives d'étude de la végétation: ainsi, Gao et Goetz (1990) ont estimé la teneur en eau d'un couvert végétal à partir d'une image AVIRIS.

1.4 Conclusion partielle

Nous nous sommes attachés dans ce chapitre à décrire les interactions entre le rayonnement électromagnétique et un couvert végétal. Nous avons montré la complexité des phénomènes mis en jeu et l'aspect indissociable, par des méthodes semi-empiriques ou statistiques, des composantes directionnelle et spectrale du signal réfléchi. Alors que des progrès ont été accomplis, ces dix dernières années, dans la modélisation de la réflectance des couverts, aucun de ces modèles n'inclut explicitement la biochimie de la feuille. Cette limitation est essentiellement liée à l'absence d'un modèle de propriétés optiques des feuilles simple, réaliste et opérationnel (Peterson, 1992). Les relations statistiques établies entre une teneur en chlorophylle, eau, lignine ou cellulose et la réflectance des couverts sont insuffisantes pour interpréter les données haute résolution spectrale. Il faut donc avant tout établir les bases physiques et physiologiques du comportement spectral de la végétation et donc revenir au niveau de la feuille: c'est le point qui sera développé dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Les propriétés optiques des feuilles

La lumière est un facteur très important de régulation de la croissance et du développement des plantes. L'étude des propriétés optiques des feuilles fournit une information essentielle pour la compréhension des interactions physiologiques et physiques entre une radiation et un tissus végétal. Un flux incident sur une feuille est soit absorbé, soit diffusé. Le devenir de ce flux dépend des caractéristiques du flux (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation) et de la feuille (propriétés de surface, structure interne, composition biochimique...). Avant de détailler les mécanismes d'absorption et de diffusion du rayonnement électromagnétique à l'intérieur de la feuille, quelques rappels sur son organisation anatomique sont nécessaires car celle-ci influence fortement la propagation de la lumière. Nous évaluerons ensuite les effets de ces mécanismes en terme de propriétés optiques globales (réflectance et transmittance).

2.1 Interactions rayonnement électromagnétique/feuille

Parmi les végétaux les mieux adaptés à la vie en milieu aérien, on peut distinguer les Gymnospermes, groupe très ancien constitué uniquement de plantes vivaces arborescentes ou arbustives, et les Angiospermes, groupe largement dominant de la flore terrestre qui rassemble des espèces herbacées et ligneuses (Camefort et Boué, 1969). L'organisation anatomique des feuilles des plantes de ces deux groupes est assez différente.

Les Gymnospermes sont surtout caractérisées par des feuilles en forme d'aiguilles: Pin, Epicéa, Mélèze, Cèdre ...Si on fait une coupe transversale dans une aiguille de pin, on observe (Camefort, 1972):

- **un épiderme** formé de cellules à membranes très épaisses, doublé intérieurement par une couche de cellules aux parois épaisses et lignifiées.
- **un mésophylle,** parenchyme chlorophyllien homogène.
- **des faisceaux cribro-vasculaires** assurant la circulation des sèves brutes (xylème) et élaborées (phloème) dans la feuille.

Les Angiospermes sont des végétaux plus évolués: on distinguera les Monocotylédones (Graminées) et les Dicotylédones (Légumineuses) dont les feuilles présentent les tissus fondamentaux suivants (Camefort, 1972):

- **un épiderme** recouvrant toute la surface du limbe. Il est constitué d'une assise de cellules épidermiques dépouvues de chloroplastes, couverte d'une cuticule plus ou moins épaisse suivant les espèces, parfois doublée d'un revêtement cireux. Les Monocotylédones présentent des stomates sur les deux faces, les Dicotylédones uniquement sur la face dorsale.

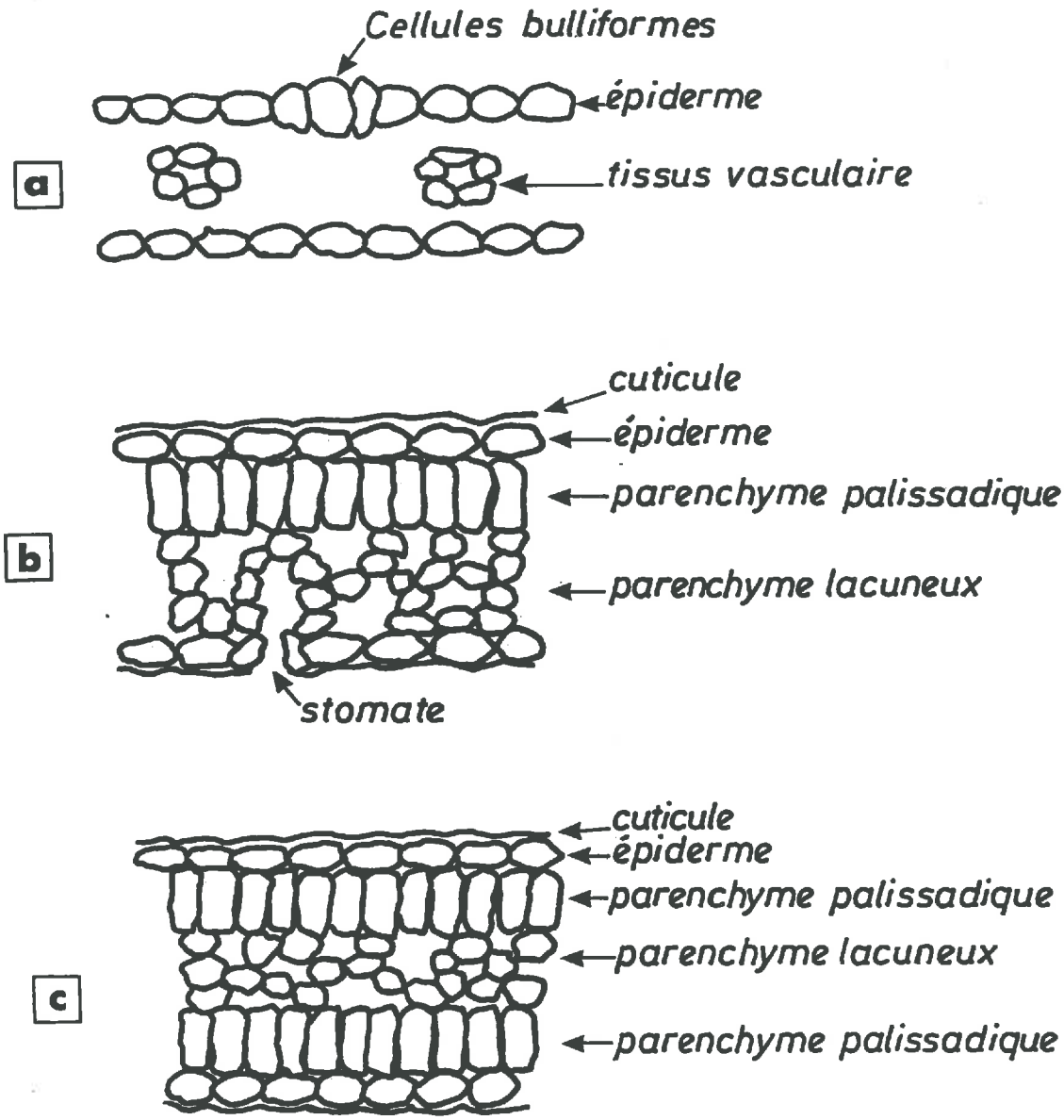


Figure 2.1: Structure anatomique de quelques feuilles: (a) une Monocotylédone, (b) une Dicotylédone, (c) une feuille isolatérale.

auteur	*feuille*	*λ (nm)*	*indice de réfraction*
Allen et al. (1969)	maïs (*Zea mays*)	500-2500	1.46-1.2
Gausmań et al. (1974)	concombre (*Cucumis sativus*)	800	1.415
	pois (*Pisum sativum*)		1.414
	tomate (*Lycopersicon esculentum*)		1.333
	haricot (*Phaseolus vulgaris*)		1.436
Woolley (1975)	soja (*Glycine max*)	800	1.415

Tableau 2.1: Quelques valeurs d'indice de réfraction de matériaux foliaires.

- **un mésophylle:** Les feuilles des Monocotylédones présentent un parenchyme chlorophyllien homogène, avec des lacunes peu importantes (Figure 2.1a). Le mésophylle des Dicotylédones n'est pas homogène (Figure 2.1b); il est formé de deux sortes de parenchymes chlorophylliens superposés. Sous l'épiderme supérieur, on observe le parenchyme palissadique constitué d'une ou plusieurs assises de cellules hautes et serrées, contenant de nombreux chloroplastes. Entre le parenchyme palissadique et l'épiderme inférieur, on observe le mésophylle spongieux formé de cellules irrégulières séparées par de nombreuses lacunes et moins riches en chloroplastes. Enfin chez certains végétaux, le parenchyme palissadique s'observe sur les deux faces du limbe foliaire.

- **un système vasculaire** correspondant aux nervures principales et secondaires du limbe.

2.1.1 Diffusion du rayonnement électromagnétique

Les cellules des tissus principaux de la feuille (tissus protecteurs, parenchymes et tissus conducteurs) sont constituées d'une paroi cellulaire, d'un cytoplasme contenant de nombreux organites (noyau, mitochondries, chloroplastes, amyloplastes) et de vacuoles de grandes tailles. Ces cellules sont séparées par des lacunes plus ou moins importantes assurant la circulation des gaz au sein des tissus. Le terme général de diffusion regroupe des phénomènes complexes de réflexion, réfraction et diffraction (Vogelmann et Björn, 1986) engendrés à l'intérieur de la feuille.

- **A l'échelle macroscopique** (les surfaces rencontrées ont une dimension supérieure à la longueur d'onde), des changements brusques d'indice de réfraction entre deux milieux différents créent des limites optiques; à chaque fois qu'elle passe d'un milieu à l'autre, la lumière est en partie réfléchie de façon spéculaire, et en partie réfractée: c'est la loi de Snell-Descartes ($n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$). Les interfaces air/parois cellulaires sont les principales limites optiques rencontrées par la lumière. On supposera le plus souvent que les phénomènes d'absorption aux interfaces sont négligeables et donc que l'indice de réfraction des constituants foliaires est un nombre réel (Kumar et Silva, 1973); La mesure de cet indice a fait l'objet de quelques études résumées dans le Tableau 1.1. L'indice de réfraction de l'air contenu dans les espaces intercellulaires est généralement supposé égal à 1, celui de l'eau pure étant de 1.328 à 1000 nm (Palmer et Williams, 1974).

- **A l'échelle microscopique** (la taille des particules rencontrées d est inférieure ou égale à la longueur d'onde λ), on observe des phénomènes de diffusion de Rayleigh ($d \ll \lambda$) et de Mie ($d \approx \lambda$). Si la taille moyenne des cellules ($15\mu m \times 15\mu m \times 60\mu m$ pour le parenchyme palissadique, $18\mu m \times 15\mu m \times 20\mu m$ pour l'épiderme et le mésophylle spongieux) est trop grande devant la longueur d'onde pour induire ces phénomènes (Gates et al., 1965; Sinclair et al., 1973), les organites présents dans le cytoplasme (chloroplastes et grana) peuvent en être à l'origine. La taille de ces organites étant comparable à la longueur d'onde, il semble que la diffusion de Mie est prépondérante. Ces phénomènes sont complexes et encore très mal connus.

2.1.2 Absorption du rayonnement électromagnétique

Les phénomènes d'absorption moléculaire font appel à des notions de mécanique quantique. On distingue deux mécanismes dépendant de l'énergie de l'onde électromagnétique incidente:

Transitions électroniques

L'absorption est liée à des changements d'états d'énergie d'électrons dans les atomes ou les molécules. Ces transitions très consommatrices en énergie concernent les courtes longueur d'onde (400 nm - 1000 nm). Les molécules qui absorbent la lumière dans ce domaine spectral sont principalement les pigments foliaires (chlorophylles a et b, caroténoïdes, xanthophylles, pigments bruns ...).

λ (nm)	*mécanismes d'absorption*	*constituants biochimiques*
430	transition électronique	chlorophylle a
460	transition électronique	chlorophylle b
640	transition électronique	chlorophylle b
660	transition électronique	chlorophylle a
961	étirement C-H, 3^{ieme} harmonique	protéines
930	étirement C-H, 3^{ieme} harmonique	huile
970	rotation O-H, 1^{iere} harmonique	eau, amidon
990	étirement O-H, 2^{ieme} harmonique	amidon
1020	étirement N-H	protéines
1040	étirement C-H	huile
1120	étirement C-H, 2^{ieme} harmonique	lignine
1200	rotation O-H, 1^{iere} harmonique	eau, cellulose, amidon, lignine
1400	rotation O-H, 1^{iere} harmonique	eau
1420	étirement C-H	lignine
1450	étirement O-H, 1^{iere} harmonique étirement C-H	amidon, sucre, lignine, eau
1490	étirement O-H, 1^{iere} harmonique	cellulose, sucre
1510	étirement N-H, 1^{iere} harmonique	protéines, azote
1530	étirement O-H, 1^{iere} harmonique	amidon
1540	étirement O-H, 1^{iere} harmonique	amidon, cellulose
1580	étirement O-H, 1^{iere} harmonique	amidon, sucre
1690	étirement C-H, 1^{iere} harmonique	lignine, amidon, protéines, azote
1780	étirement C-H, 1^{iere} harmonique/ étirement O-H/déformation H-O-H	cellulose, sucres, amidon
1820	étirement O-H / étirement C-O, 2^{ieme} harmonique	cellulose
1900	étirement O-H / étirement C-O	amidon
1940	étirement O-H / déformation O-H	eau, lignine, protéines, azote, amidon, cellulose
1960	étirement O-H / liaison O-H	sucre, amidon
1980	asymétrie N-H	protéines
2000	déformation O-H / déformation C-O	amidon
2060	rotation N=H, 2^{ieme} harmonique / rotation N=H / étirement N-H	protéines, azote
2080	étirement O-H / déformation O-H	sucres, amidon
2100	rotation O=H / étirement C-O étirement C-O-C, 3^{ieme} harmonique	amidon, cellulose
2130	étirement N-H	protéines
2180	rotation N-H, 2^{ieme} harmonique / étirement C-H étirement C-O, étirement C=O, étirement C-N	protéines, azote
2240	étirement C-H	protéines
2250	étirement O-H / déformation O-H	amidon
2270	rotation C-H / étirement O-H rotation CH_2 / étirement CH_2	cellulose, sucres, amidon
2280	étirement C-H / déformation CH_2	amidon, cellulose
2300	étirement N-H, étirement C=O rotation C-H, 2^{ieme} harmonique	protéines, azote
2310	rotation C-H, 2^{ieme} harmonique	huile
2320	étirement C-H / déformation CH_2	amidon
2340	étirement C-H / déformation O-H / déformation C-H / étirement O-H	cellulose
2350	rotation CH_2, 2^{ieme} harmonique déformation C-H, 2^{ieme} harmonique	cellulose, protéines, azote

Tableau 2.2: Principales bandes d'absorption des constituants biochimiques de la feuille (d'après Curran, 1989).

- **Les chlorophylles:** on distingue un pigment principal, la chlorophylle a et un pigment accessoire, la chlorophylle b (Lichtenthaler, 1987). Ces pigments situés dans les chloroplastes des feuilles vertes jouent un rôle essentiel dans la photosynthèse (conversion d'énergie lumineuse en énergie chimique pour la réduction du CO_2 en sucres). Les chlorophylles a et b présentent des bandes d'absorption vers 430/450 nm et 660/640 nm, liées à la présence d'un atome de Mg au centre de la molécule.

- **Les caroténoïdes:** il s'agit essentiellement des carotènes (α et β) et des xanthophylles (lutéine, violaxanthine...). L'absorption de ces molécules organiques est liée au nombre de groupements fonctionnels de la chaîne (liaisons C=C, C-OH par exemple). Le β- carotène et les xanthophylles présentent des pics d'absorption vers 450 nm (Lichtenthaler, 1987). Les propriétés du β-carotène sont multiples: transfert d'énergie vers la chlorophylle, protection de la chlorophylle a contre une photo-oxydation ...Le rôle physiologique des xanthophylles dans les chloroplastes est encore mal connu.

- **Les polyphénols et pigments bruns:** le brunissement des feuilles est un phénomène complexe. Les polyphénols présents sur les parois cellulaires (catéchols, anthocyanes, flavones, dérivés d'acide cinnamique ...) peuvent provoquer des réactions de brunissement enzymatique (action de polyphénoloxydases) ou non enzymatique (interaction avec des métaux lourds comme le Fer) (Mathew et Parpia, 1971). Les produits formés sont des composés à fort poids moléculaire, très peu solubles: ce sont les pigments bruns qui absorbent fortement dans le visible.

- **Autres pigments:** le phytochrome est un photorécepteur qui contrôle la morphogénèse; il absorbe dans le rouge (660 nm) et le rouge lointain (730 nm). Les flavoprotéines, les acides nucléiques absorbent la lumière bleue (400 nm - 450 nm).

Vibrations de molécules polyatomiques

Les noyaux d'une molécule peuvent se déplacer autour de leur position d'équilibre entrainant une vibration de la molécule: les phénomènes mis en jeu sont des translations (énergie cinétique), des rotations (énergie cinétique) et des vibrations (énergie cinétique et potentielle). Tout se passe comme si on avait un oscillateur harmonique dont l'énergie est caractérisée par le nombre quantique de vibration v_i. Soit $\mathcal{E}_{v_1 v_2 v_3}$ l'énergie totale:

$$\mathcal{E}_{v_1 v_2 v_3} = \mathcal{E}_{translation} + \mathcal{E}_{rotation} + \mathcal{E}_{vibration} = \sum_{i=1}^{3} h\nu_i(v_i + \frac{1}{2}) \tag{2.1}$$

où h est la constante de Planck et ν_i la fréquence de l'oscillateur. L'absorption résulte de transitions d'un état à l'autre sous l'effet d'un faisceau lumineux dont la fréquence est proche de celle de l'oscillateur. Ce type d'absorption concerne le proche et moyen infrarouge (1000 nm - 2500 nm). Curran (1989) et Elvidge (1990) ont recensé les principaux composés chimiques impliqués:

- **L'eau** représente entre 40% et 90% du poids frais des feuilles. Les mesures de l'état hydrique des feuilles donne des indications sur sa physiologie: expansion cellulaire dans les tissus en croissance, activité photosynthétique ...L'eau absorbe à 970 nm (faiblement), 1200 nm, 1450 nm, 1940 nm et 2500 nm.

- **La cellulose** est un polysaccharide formé de D-glucose. On la trouve principalement dans les parois cellulaires où, liée à la lignine et à l'hémicellulose, elle renforce et protège les structures des plantes. Elle absorbe à 1220 nm, 1480 nm, 1930 nm, 2100 nm, 2280 nm, 2340 nm et 2480 nm.

- **Le β-glucane et le xylane** sont des polysaccharides connus sous le nom d'hémicelluloses à cause de leur ressemblance avec la cellulose à la fois dans leur structure et leur fonction. Le β-glucane est un polymère de D-glucose qui absorbe à 1450 nm, 1770 nm, 1930 nm, 2090 nm,

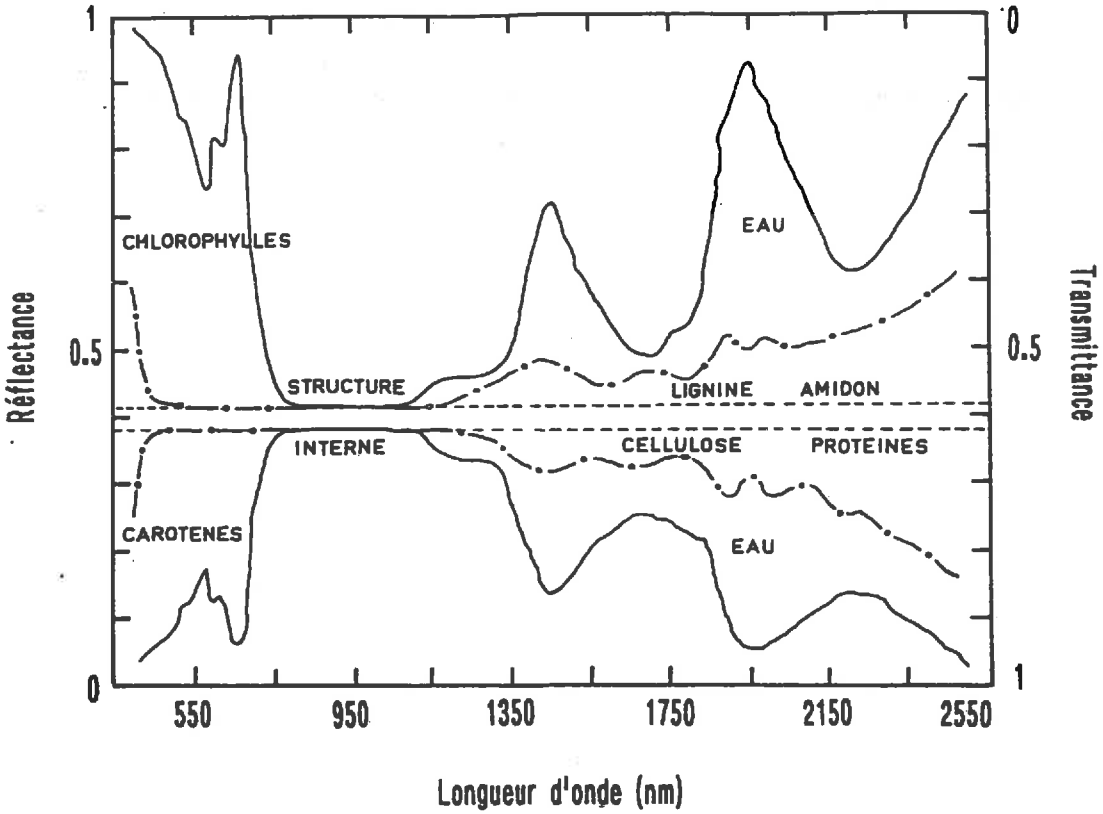


Figure 2.2: Propriétés optiques des feuilles dans le visible (400-700 nm), le proche infrarouge (700-1300 nm), et le moyen infrarouge (1300-2500 nm).

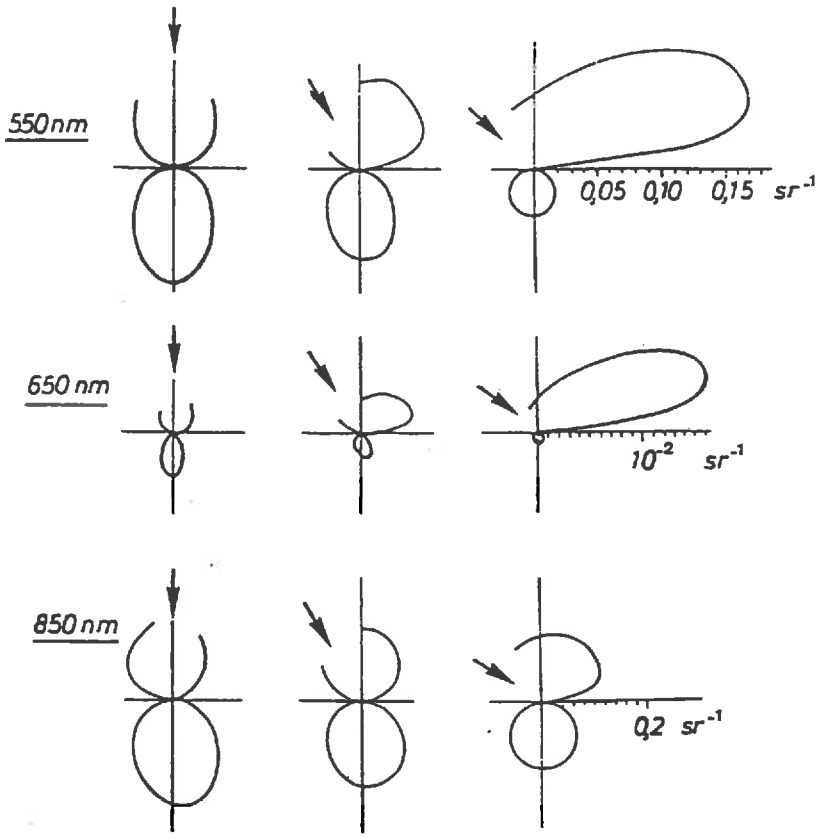


Figure 2.3: Indicatrices de réflectance et de transmittance de feuilles de soja pour 3 longueurs d'onde et 3 angles d'incidence indiqués par la flèche. La figure représente la variations relatives de l'intensité énergétique par unité d'angle solide (sr^{-1}) (d'après Breece et Holmes, 1971).

2330 nm et 2500 nm. Le xylane est un polymère de D-xylose qui absorbe à 1210 nm, 1450 nm, 1720 nm, 1790 nm, 1930 nm, 2090 nm, 2260 nm, 2330 nm et 2500 nm.

- **La lignine** est le corps dur qui confère au bois sa dureté et sa rigidité. C'est un polymère formé d'unités complexes qui pénètrent la cellulose. La lignine absorbe intensément dans l'ultra-violet (280 nm) et dans le moyen infrarouge à 1450 nm, 1680 nm, 1930 nm et vers 2100 nm.
- **L'amidon**, principale molécule de stockage dans la plante, est un polysaccharide formé de chaines de D-glucose. Il absorbe à 990 nm, 1220 nm, 1450 nm, 1560 nm, 1700 nm, 1770 nm, 1930 nm, 2100 nm, 2320 nm et 2400 nm.
- **Autres composés**: on peut aussi citer les pectines, les cires, les tanins ou autres composés azotés, présents en moindre quantité dans la feuille, et dont l'absorption dans le moyen infrarouge est faible.

2.2 Variabilité des propriétés optiques des feuilles

Le spectre de réflectance et de transmittance d'une feuille verte entre 400 nm et 2500 nm est le résultat des phénomènes de diffusion et d'absorption que nous venons de détailler. On distingue classiquement trois domaines spectraux (Figure 2.2):

- **le proche infrarouge** (700 nm - 1300 nm) appelé encore "plateau infrarouge" en raison de valeurs élevées et presque constantes de la réflectance et de la transmittance.
- **le visible** (400 nm - 700 nm) dominé par l'absorption de la lumière par les pigments foliaires, et caractérisé par une faible réflexion et transmission.
- **le moyen infrarouge** (1300 nm - 2500 nm), principale zone d'absorption de l'eau et des constituants foliaires.

2.2.1 Le domaine proche infrarouge (700 nm - 1300 nm)

C'est une région de forte réflectance et transmittance, donc de faible absorptance. Deux phénomènes contribuent à la réflectance totale: une réflexion de surface et une diffusion interne.

Réflexions de surface

La première limite optique rencontrée par les rayons solaires est l'interface air/épiderme. La réflectance de la surface des feuilles, combinaison d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire, n'est pas lambertienne: Breece et Holmes (1971), Brakke et al. (1989), ou encore Walter-Shea et al. (1989), ont mis en évidence la forte composante spéculaire de la réflectance pour des incidences obliques (Figure 2.3). C'est seulement sous incidence normale que la feuille peut être assimilée à un diffuseur lambertien. Grant (1987), Grant et al. (1987; 1992) ont mesuré la réflectance polarisée et non polarisée de feuilles de *Coleus blumei* de couleurs différentes (Figure 2.4), et ont montré que la lumière polarisée contenait des informations intéressantes sur leur surface. La surface des plantes joue un rôle physiologique très important car celles-ci peuvent la modifier en fonction des conditions externes. Ainsi, les feuilles des régions désertiques sont souvent pubescentes ce qui diminue la quantité de lumière et de chaleur dans les tissus, et se traduit par un accroissement de la réflectance diffuse. La couche de cire qui recouvre parfois la cuticule, protège les structures cellulaires sous-jacentes et accroît la réflectance surtout dans le visible mais aussi dans le proche infrarouge (Grant, 1987).

La forme même des cellules épidermiques peut influencer le trajet du rayon incident: ainsi, les cellules convexes observées chez certaines plantes agissent comme des lentilles qui concentrent la lumière dans le parenchyme palissadique riche en chloroplastes (Figure 2.5). Ce phénomène, d'abord

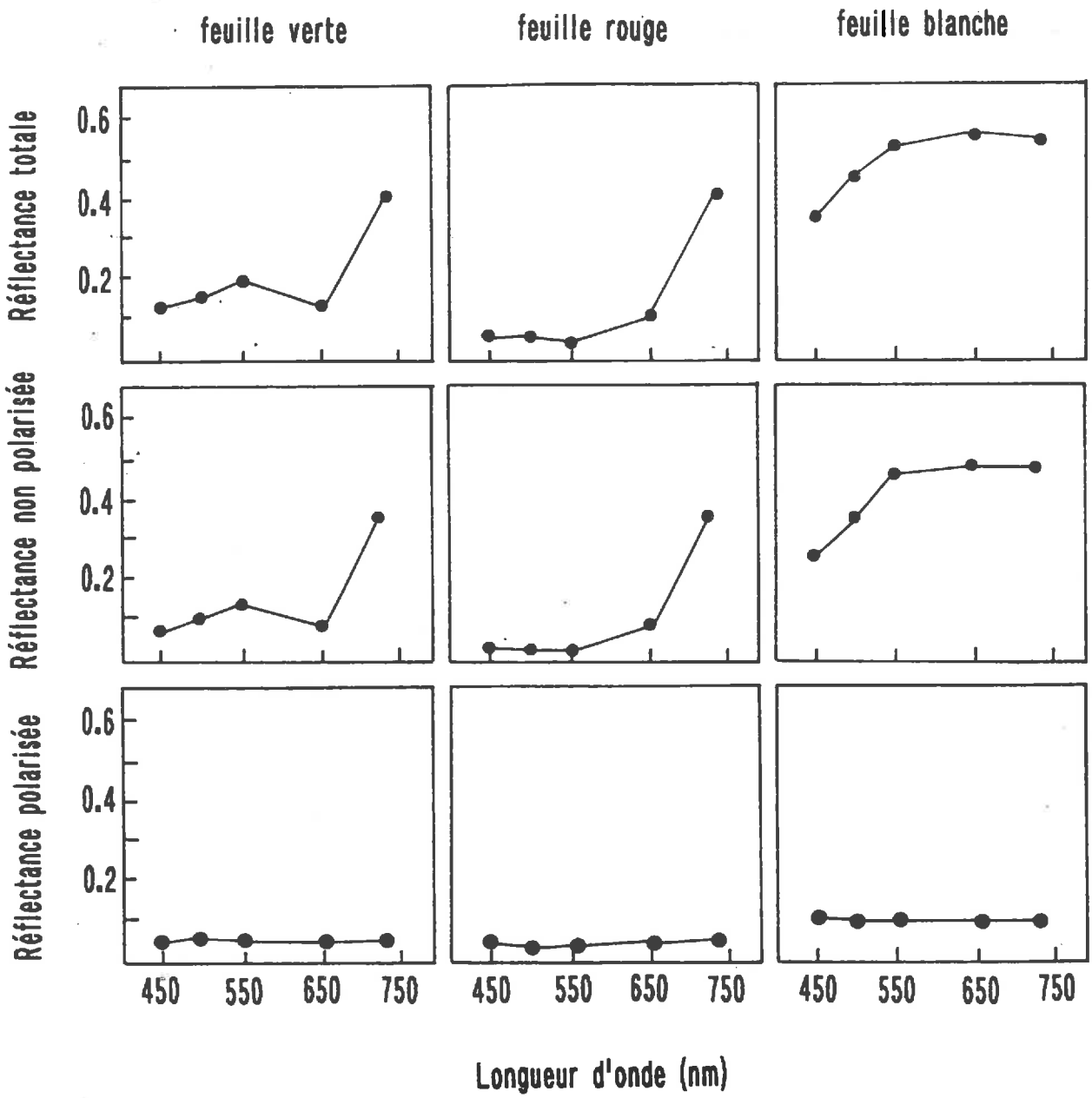


Figure 2.4: Réflectance totale, polarisée et non polarisée de 3 feuilles de *Coleus blumei* de couleur différente: feuille verte, rouge et blanche (d'après Grant et al., 1987).

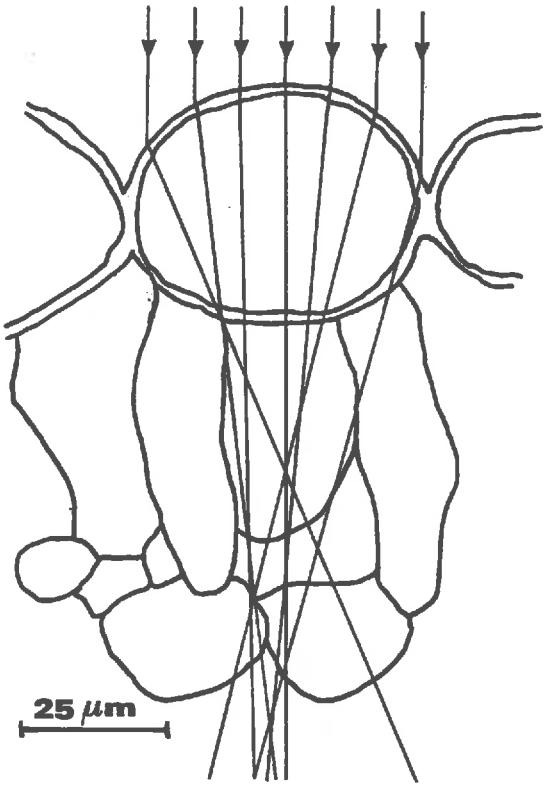


Figure 2.5: Lancer de rayon sur l'épiderme supérieur d'une feuille d'*Oxalis stricta* (d'après Poulson et Vogelmann, 1990).

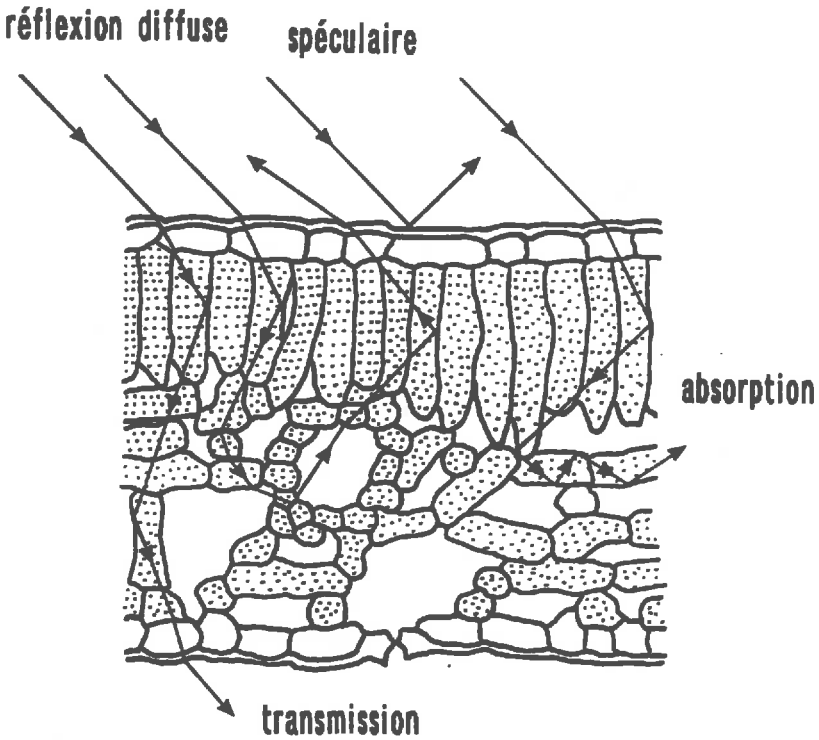


Figure 2.6: Schéma décrivant le trajet optique de la lumière à travers une feuille de Dicotylédone.

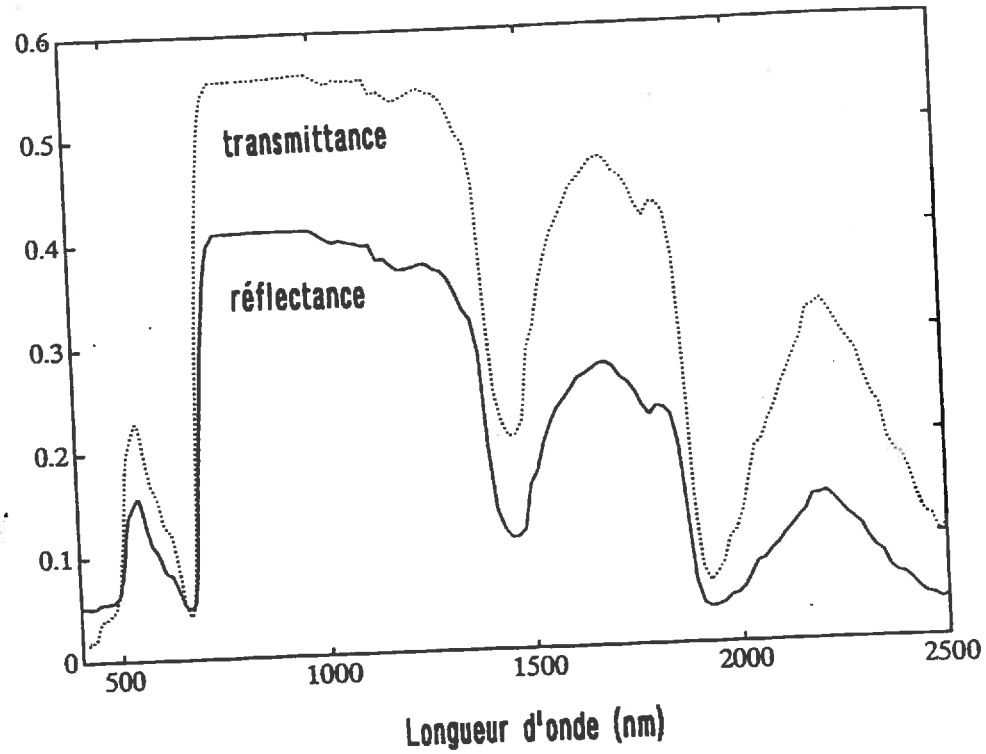


Figure 2.7: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de maïs (*Zea mays*) verte.

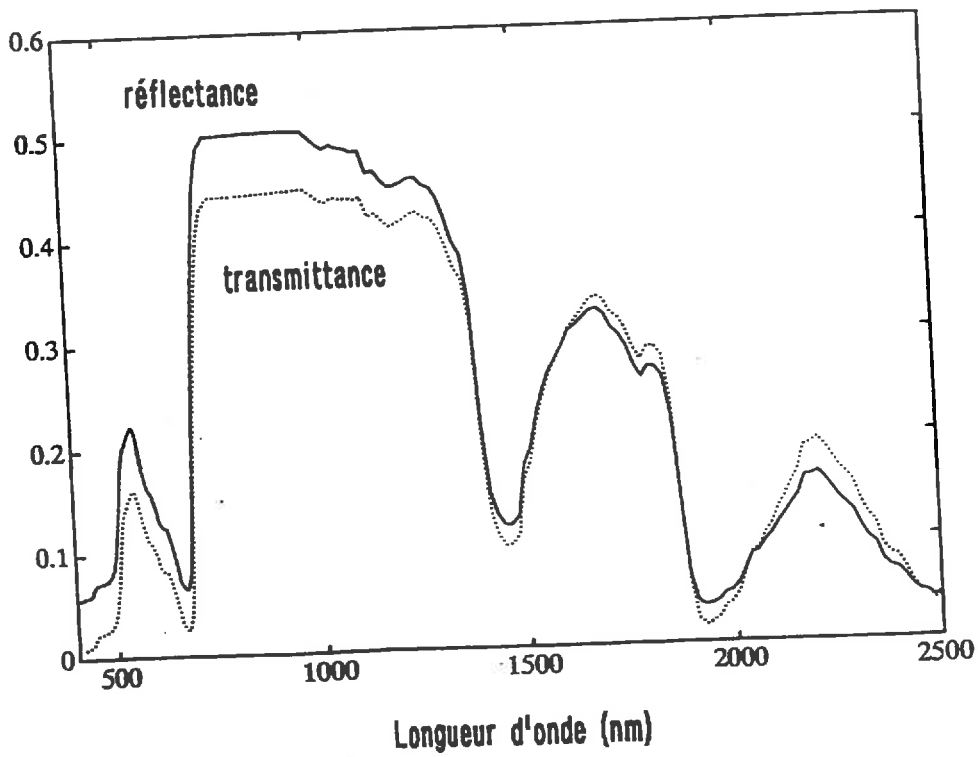


Figure 2.8: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de tournesol (*He lianthus annuus*) verte.

présenté comme une adaptation à la faible luminosité des strates inférieures d'une forêt tropicale (Bone et al., 1985), se retrouve chez des espèces cutivées où il permettrait de capter la lumière pour de faibles angles d'incidence (Martin et al., 1989): dans ce cas, le rayon de convergence augmente en se déplaçant latéralement dans le parenchyme palissadique.

Diffusion interne

Au fur et à mesure qu'elle pénètre dans la feuille, la lumière rencontre un certain nombre de limites optiques qui contrôlent sa distribution à l'intérieur des différents tissus. Par exemple, chez les Dicotylédones (Figure 2.6), la limite entre le parenchyme palissadique et le mésophylle spongieux agit comme un reflecteur interne qui renvoie la lumière dans le parenchyme palissadique riche en chloroplastes (Vogelmann et Björn, 1986). Si la lumière à la surface de la feuille est fortement collimatée - les photons se propagent selon des directions presque parallèles - les phénomènes de diffusion la rendent très isotrope. En fait, les espaces intercellulaires sont la cause principale de la diffusion de la lumière: Gausman et al. (1970) ont mis en relation les niveaux de réflectance dans le proche infrarouge avec le nombre d'espaces d'air entre les cellules. Ainsi, c'est l'organisation anatomique des feuilles qui détermine les propriétés optiques dans ce domaine spectral (Sinclair et al., 1973; Grant et al., 1987; Grant, 1987). Une augmentation de la réflectance s'expliquera par le fait que la lumière passe plus souvent d'un indice de réfraction élevé ($n \approx 1.4$ pour les parois cellulaires hydratées, $n = 1.326$ pour l'eau à 1000 nm) à un indice faible ($n = 1.0$ pour l'air).

A épaisseur égale, les Monocotylédones (Figure 2.7) dont le mésophylle est de type compact réfléchissent moins la lumière proche infrarouge que les Dicotylédones (Figure 2.8) dont le mésophylle est différencié en un parenchyme palissadique et un mésophylle spongieux; en revanche, elles la transmettent davantage. L'explication de ce phénomène est simple: à l'intérieur du mésophylle spongieux, la lumière subit des réflexions multiples et par conséquent, la réflectance totale d'une feuille de Dicotylédone est plus importante que celle d'une feuille de Monocotylédone. Des études récentes ont mis en évidence le rôle de ces cavités: elles constituent de véritables pièges à lumière - il peut y avoir entre 3 et 4 fois plus de lumière à l'intérieur de la feuille qu'à l'extérieur - qui amélioreraient l'efficience de la photosynthèse (Vogelmann et Bjorn, 1986).

Evolution des propriétés optiques

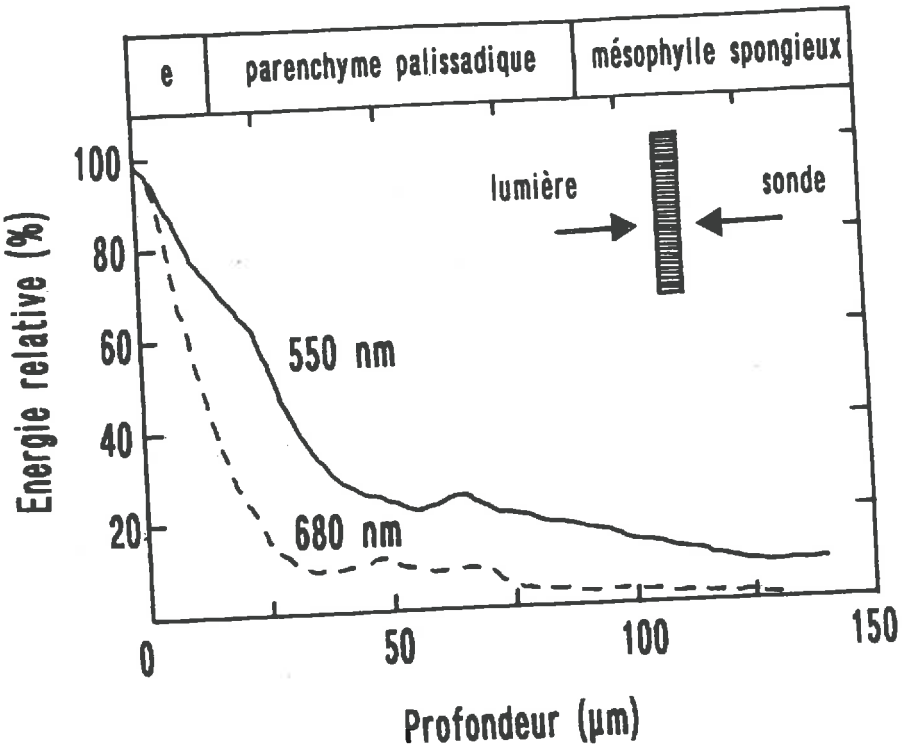
Durant la croissance, la réflectance des feuilles est assez constante pour une espèce donnée (déterminisme génétique); les changements les plus importants s'observent au cours des stades juvéniles et de sénescence (Sinclair et al., 1971; Allen et al., 1971). Le mésophylle d'une feuille jeune, Monocotylédone ou Dicotylédone, est indifférencié et de type compact: la réflectance est inférieure à la transmittance. Lors de la sénescence, les tissus de la feuille perdent une partie de leur eau et se désagrègent, laissant apparaitre de larges lacunes: la réflectance devient alors très importante.

2.2.2 Le domaine visible (400 nm - 700 nm)

C'est une région de forte absorption. La lumière visible est source d'énergie pour la photosynthèse lorsqu'elle est absorbée par la chlorophylle et les caroténoïdes; elle contrôle la morphogénèse lorsqu'elle est absorbée par les autres photorécepteurs (phytochrome, flavones ...). La contribution de ces derniers aux propriétés optiques des feuilles est négligeable et seuls les pigments photosynthétiques seront considérés.

Action des pigments sur le spectre

Les chlorophylles et les caroténoïdes situés dans les chloroplastes des plantes supérieures gouvernent les propriétés optiques des feuilles dans le visible. Le spectre de réflectance ou de transmittance classique d'une feuille verte présente un certain nombre de minima (420 nm, 490 nm et 670 nm) et de maxima (550 nm). Si on raisonne en terme d'absorption, on observe l'inverse. L'absorption de la



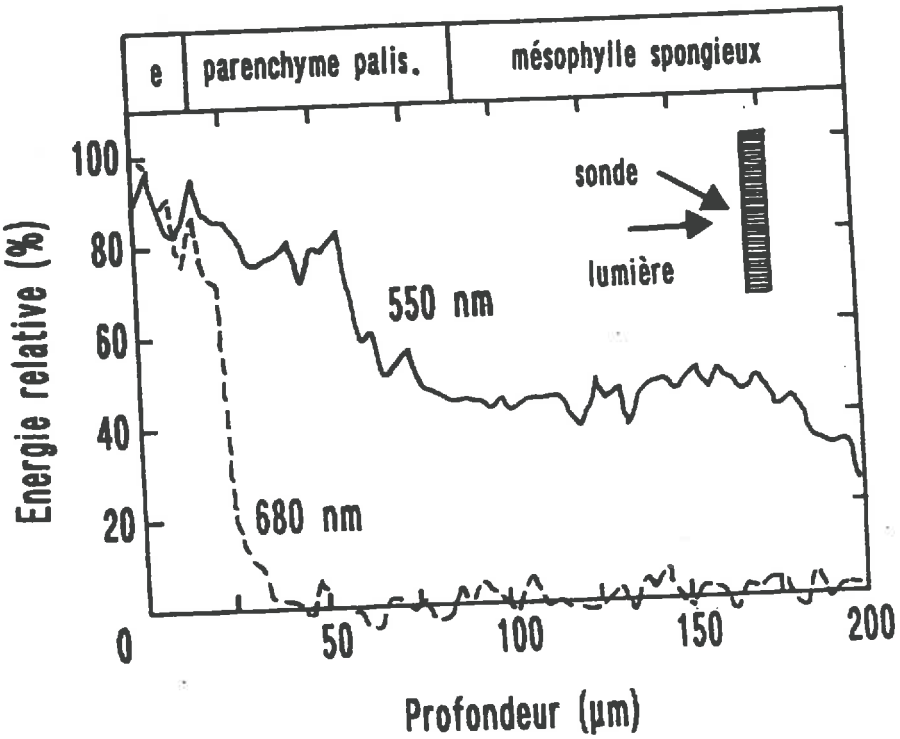


Figure 2.9: Distribution de lumière transmise (a) et diffusée (b) à travers une fe
de luzerne (*Medicago sativa*). Les courbes représentent l'atténuation de la lumière
absorption et diffusion (d'après Vogelmann et al., 1989).

lumière par les pigments foliaires varie en fonction leur concentration dans la feuille. Les chlorophylles a et b sont en moyenne 10 fois plus concentrées que les caroténoïdes si bien que, pour une feuille verte, l'effet des caroténoïdes est masqué par celui des chlorophylles. Les récents travaux de Vogelmann et al. (1989) ont montré que l'absorption intervenait surtout dans le parenchyme palissadique des feuilles (chaque cellule peut contenir jusqu'à 50 chloroplastes en suspension dans le cytoplasme). Il existe un gradient dans la morphologie des chloroplastes, doublé par un gradient de leur activité photosynthétique. Ainsi chez la luzerne, comme le montrent les Figures 2.9a et 2.9b, 90% de la lumière est atténuée après le passage de l'épiderme et du parenchyme palissadique (Vogelmann et al., 1989). Lors de la sénescence de la feuille, la chlorophylle se dégrade plus rapidement que les caroténoïdes (Sanger, 1971) qui deviennent alors les principaux pigments responsables de l'absorptance: la feuille jaunit. Enfin, à la mort de la plante, les pigments bruns apparaissent; la réflectance et la transmittance de la feuille décroîssent régulièrement entre 750 nm et 400 nm (Trigui et Baldy, 1983 ; Boyer et al., 1988).

La recherche de relations entre les propriétés optiques des feuilles et la concentration en pigments a fait l'objet de nombreux travaux car celle-ci est souvent le reflet d'un état physiologique de la plante. Ainsi, la concentration en chlorophylle peut être affectée par la salinité du sol, des déficiences en azote ou en éléments minéraux, un stress hydrique ou une pollution atmosphérique ...(Belanger, 1990). Chappelle et al. (1992) ont montré qu'il existait une corrélation significative entre la concentration en chlorophylle a et le taux de photosynthèse: cependant, cette corrélation n'est pas très forte car d'autres facteurs environnementaux peuvent intervenir.

Relations concentration en pigments/niveaux de réflectance

De nombreuses études sur la physiologie de la plante nécessitent des analyses comparatives de concentration en chlorophylle. Les méthodes classiques de dosage sont laborieuses et toujours destructrices des tissus foliaires. Des relations empiriques ont été proposées pour déterminer la concentration en chlorophylles ou en caroténoïdes par des méthodes radiométriques. Thomas et Gausman (1977) ont mis en évidence une forte corrélation entre la concentration en chlorophylle et caroténoïdes et le niveau de réflectance à 550 nm (minimum d'absorption). Chappelle et al. (1992) ont relié le rapport de réflectances $\rho_{670nm}/\rho_{550nm}$ aux concentrations en chlorophylle a ($R^2 = 0.865$), chlorophylle b ($R^2 = 0.854$) et caroténoïdes ($R^2 = 0.512$). Des photomètres portables ont été mis au point ces dernières années pour mesurer la lumière réfléchie ou transmise par une feuille à une ou plusieurs longueurs d'onde afin de déterminer, après étalonnage, la concentration en chlorophylle (Hardwick et Baker, 1973; Macnicol et al., 1976; Hardacre et al., 1984; Yadava, 1986). Afin d'estimer une valeur moyenne de concentration sur toute la feuille, Spomer et al. (1988) ont utilisé une caméra vidéo; de même, Andrieu et al. (1992) ont déterminé la concentration en chlorophylle de feuilles de betterave à sucre chlorosées, par analyse numérique de photographies de ces feuilles.

Relations concentration en pigments/glissements spectraux

Les courbes de réflectance ou de transmittance des feuilles présentent de brusques variations entre les niveaux de forte absorptance et les niveaux de faible absorptance. Ce ne sont plus les valeurs des maxima et des minima qui nous intéressent mais la position en longeur d'onde de ces transitions. La plus importante de ces transitions se situe entre le rouge et le proche infrarouge: on l'appelle plus couramment le "red edge". Le "red edge" est généralement caractérisé par la position en longueur d'onde de son point d'inflexion (λ_i). Gates et al. (1965) ont les premiers supposé qu'il existait une relation directe entre λ_i et la concentration en chlorophylle de la feuille. Une augmentation de la concentration provoque un glissement spectral vers les grandes longueurs d'onde ("red shift") ainsi qu'une augmentation de la valeur absolue des dérivées premières et secondes (Horler et al., 1983a, 1983b; Belanger, 1990). Si on empile des feuilles, le résultat est le même. Horler et al. (1983b), Guyot et Baret (1988, 1989), Baret et al. (1988) ont analysé plus finement le "red edge" et montré que la structure interne du mésophylle pouvait aussi influencer sa position.

2.2.3 Le domaine moyen infrarouge (1300 nm -2500 nm)

Le moyen infrarouge est, comme le visible, une région de forte absorption du rayonnement électromagnétique. Cette énergie, absorbée essentiellement par l'eau et les constituants biochimiques des tissus foliaires, échauffe la feuille qui dissipe cet excès d'énergie par transpiration. Nous commencerons par l'eau dont les effets masquent en partie ceux des autres constituants.

L'eau

Les principales bandes d'absorption de l'eau se situent vers 1200 nm, 1450 nm, 1940 nm et 2500 nm (Figure 2.2). Cependant, même entre ces bandes, l'absorption n'est pas nulle: les deux minima relatifs observés à 1650 nm et 2200 nm sont aussi influencés par la teneur en eau des feuilles. De façon générale, une déshydratation accroît la réflectance et la transmittance dans le moyen infrarouge. La mesure par télédétection d'un stress hydrique, par exemple consécutif à une sécheresse, a fait l'objet de nombreux travaux: la chute de la teneur en eau des feuilles se traduit par une baisse de la conductance stomatique qui limite l'absorption du CO_2 nécessaire à la photosynthèse et donc la croissance des plantes. Au total, cela entraine une réduction de la productivité primaire des plantes (Bowman, 1989; Tucker, 1980; Hunt et al., 1987). La conductance stomatique et le potentiel hydrique sont en fait les variables physiologiques qui caractérisent l'état hydrique des feuilles mais, comme c'est souvent le cas, le lien entre les variables physiologiques et les mesures radiométriques n'est pas immédiat.

Ainsi, le potentiel hydrique de la feuille n'est pas directement accessible par télédétection; il est cependant étroitement lié à des variables intermédiaires telles que la teneur relative en eau de la feuille (RWC = "Relative Water Content") définie par le rapport $RWC = (WF - WD)/(WFT - WD)$ où WF est le poids frais, WD le poids sec et WFT le poids à pleine turgescence. Tucker (1980), Hunt et al. (1987, 1989) ont donc essayé de mettre en relation RWC avec un indice spectral, le $LWCI$ ("Leaf Water Content Index") calculé de la façon suivante:

$$LWCI = \frac{\log(1 - (R^d_{1600} - R_{1600}))}{\log(1 - (R^d_{1600} - R^{ft}_{1600}))} \tag{2.2}$$

où R_{1600} est la réflectance à 1600 nm, R^d_{1600} celle d'une feuille sèche et R^{ft}_{1600} celle d'une feuille à pleine turgescence. Ils ont montré que $LWCI = RWC$. D'autres indices tels que le $NDII$ ("Normalized Difference Infrared Index"), le MSI ("Moisture Stress Index") ont été proposés dans la littérature. Thomas et al. (1971) ont directement relié la réflectance R_{1450} à RWC par une relation simple du type $R_{1450} = \alpha - \beta \log RWC$. Leur conclusion est qu'une feuille de coton en cours de déshydratation ne présente des variations significatives de réflectance que lorsque sa teneur relative en eau devient inférieure à 70%. Entre 70% et 90%, intervalle correspondant à la plupart des feuilles vertes, ces variations restent très faibles. Allen et al. (1969) ont proposé une autre variable intermédiaire: l'épaisseur équivalente en eau (EWT = "Equivalent Water Thickness"), épaisseur d'une lame d'eau liquide pure dont l'absorption équivaut à celle de la feuille. Tucker (1980) l'a utilisée pour simuler la réflectance de feuilles dans le moyen infrarouge; il a montré que les longueurs d'onde où l'absorption est modérée, étaient plus sensibles pour apprécier les variations de teneur en eau que celles où l'absorption est forte.

Les autres constituants foliaires

Comme le montre la Figure 2.2, lorsque la feuille perd son eau, la cellulose, la lignine, l'amidon ...dont l'absorption était en grande partie masquée par celle de l'eau apparaissent (Peterson et al., 1988; Wessman et al., 1988; Elvidge, 1990). Les spectres d'absorption des feuilles sèches révèlent un certain nombre de pics liés aux phénomènes de vibration-rotation des constituants foliaires. Des corrélations ont été établies entre ces pics et les concentrations en composés organiques; de telles procédures sont couramment utilisées par l'*United States Department of Agriculture* pour analyser la qualité des fourrages (Marten et al., 1985). La précision de ces mesures est comparable à celle de dosages chimiques classiques (Curran, 1989). Malheureusement, l'application directe de ces relations à

des feuilles fraiches est compliquée par plusieurs facteurs dont le principal est l'eau qui représente entre 60% et 80% du poids frais de la feuille et dont la forte absorption dans ce domaine spectral masque celle des composés qui nous intéressent. De plus, les bandes d'absorption de ces constituants foliaires sont très semblables si bien qu'une longueur d'onde donnée n'est jamais associée à un seul composé chimique. Par exemple la liaison forte $O-H$ est commune à l'eau, la cellulose, la lignine, l'amidon et les sucres (Curran, 1989). Les approches permettant de les identifier et de les séparer sont encore assez empiriques et montrent rapidement leurs limites: ainsi une analyse statistique "aveugle" peut mettre en évidence une forte corrélation entre un niveau de réflectance dans le visible et une concentration en amidon! Bien évidemment l'amidon n'absorbe pas la lumière visible et cette relation ne peut donc pas s'expliquer en terme de liaison chimique; elle est le résultat d'une très forte corrélation entre les teneurs en chlorophylle et amidon (Curran, 1989). Cependant, par deux méthodes assez différentes, Curran et al. (1992) et Goetz et al. (1990) ont récemment montré la possibilité de déterminer, avec une précision acceptable, une concentration en lignine, azote, cellulose, amidon ...à partir de feuilles fraiches.

La biochimie de la feuille intéresse beaucoup les physiologistes et les écologistes car elle peut exprimer des changements subtils dans le fonctionnement d'un écosystème. Ainsi, la teneur en lignine donne des indications sur le taux de décomposition de la litière, la teneur en azote et en polyphénols sur la disponibilité en éléments nutritifs (Peterson, 1992). Ces aspects seront développés d'avantage dans la partie concernant les couverts végétaux.

2.3 Modélisation des propriétés optiques des feuilles

Parallèlement à l'étude des propriétés optiques des feuilles et de leur déterminisme, plusieurs modèles ont été développés afin de quantifier les variables physiques et physiologiques de la feuille. Après avoir décrit succintement les quelques modèles de propriétés optiques des feuilles existant dans la littérature, nous nous attacherons à montrer l'intérêt de leur utilisation.

2.3.1 Modèles de lancer de rayon

C'est la méthode la plus naturelle pour simuler les interactions entre la lumière et les feuilles. La feuille est considérée comme un système optique à deux dimensions où toutes les interfaces sont décrites avec précision à partir de coupes transversales du limbe photographiées sous microscope. Allen et al. (1973), Kumar et Silva (1973) et plus récemment Brakke et Smith (1987) se sont inspirés de la théorie de Willstatter-Stoll pour calculer le trajet optique d'un rayon lumineux à travers ce système ("ray tracing"). En considérant les parois cellulaires, les chloroplastes, la sève et l'air qui sont les 4 constituants principaux de la feuille, Kumar et Silva (1973) ont défini 8 interfaces (air/paroi, paroi/air, sève/paroi, paroi/sève, chloroplaste/paroi, paroi/chloroplaste, sève/chloroplaste, chloroplaste/sève). Connaissant la structure interne de la feuille et les indices de réfraction de ces différents milieux, ils ont suivi le trajet d'un rayon lumineux à l'intérieur d'une feuille de soja et ont simulé avec une bonne précision ses propriétés optiques dans le proche infrarouge. Les résultats obtenus par Allen et al. (1973) ou Brakke et Smith (1987) qui ne considèrent que deux interfaces (air/paroi et paroi/air) aboutissent à une sous-estimation de la réflectance et à une surestimation de la transmittance.

2.3.2 Modèles stochastiques

Ayant constaté une forte corrélation entre la réflectance et la transmittance d'une feuille, Tucker et Garrat (1977) ont proposé un modèle où les échanges radiatifs entre et à l'intérieur des différents compartiments foliaires (épiderme, parenchyme palissadique et mésophylle spongieux) sont représentés par une chaîne de Markov. On suppose dans ce modèle stochastique que la probabilité de passage d'un état de radiation i à un état de radiation j ne dépend que du temps $n = t_j - t_i$ nécessaire pour passer de l'état i à l'état j. Ceci peut s'exprimer mathématiquement par la relation $p_{ij}(n) = Prob(X_{t+n} =$

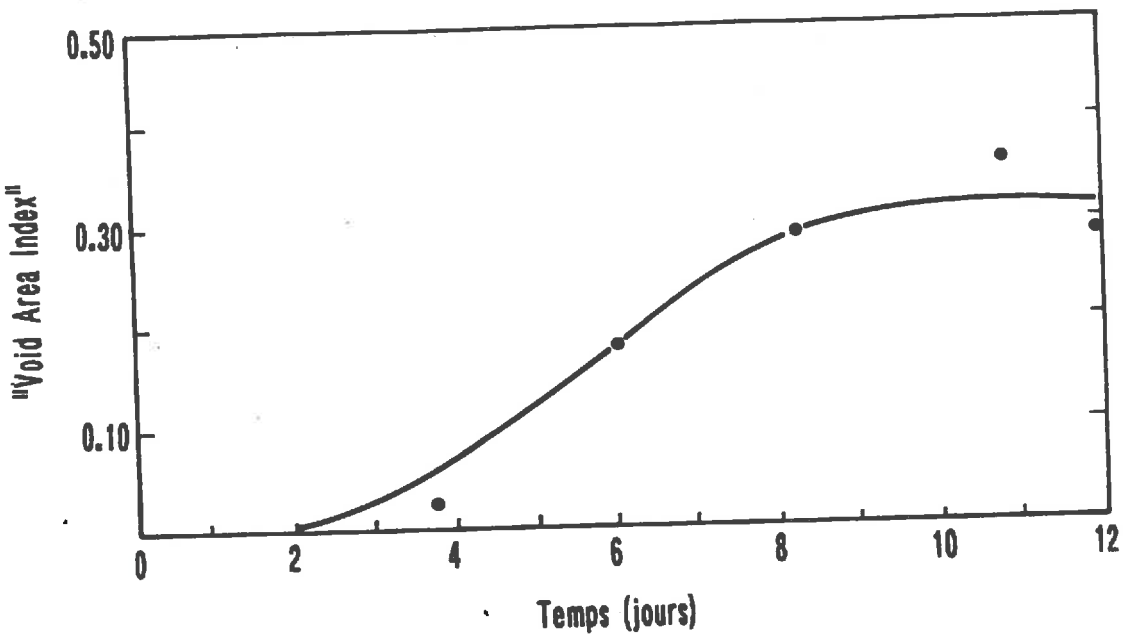


Figure 2.10: "Void Area Index" d'une feuille de coton (*Gossypium hirsutum* en cours d
maturation (d'après Gausman et al., 1970).

$j/X_t = i$). En posant $R_{ij} = p_{ij}(1)$, ces probabilités de passage d'un état à l'autre sont regroupées dans une matrice de transition P:

$$P = \begin{pmatrix} R_{11}R_{21}\cdots R_{n1} \\ R_{12}R_{22}\cdots R_{n2} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ R_{1n}R_{2n}R_{3n}R_{nn} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

Si p_0 représente l'état initial, le vecteur p de l'état final est égal à $p = \lim_{n\to\infty} P^n p_0$. La convergence vers l'état stationnaire se produit assez rapidement (Ravel, 1989). Les résulats obtenus par Tucker et Garrat (1977) pour une feuille d'érable (*Acer saccharum*) sont satisfaisants sur tout le spectre.

2.3.3 Modèles de transfert radiatif

Allen et al. (1969) ont proposé un modèle simple de réflectance et de transmittance ("plate model"), s'appliquant à une feuille compacte (maïs, blé), ou à une feuille immature dont la structure interne est caractérisée par une absence d'espaces intercellulaires. La feuille est assimilée à une lame à bords parallèles dont les constantes optiques (indice de réfraction n, coefficient d'absorption k) sont connues. La diffusion est surtout due aux réflexions multiples à l'intérieur du mésophylle. L'absorption par l'eau et les pigments est approximée par une loi de Beer. Récemment, Ma et al. (1990) ont testé sur différentes feuilles un modèle plus complexe qui, outre la diffusion multiple, prend en compte celle créée par la rugosité de surface et donc les phénomènes potentiels de polarisation de la lumière. Afin de généraliser le "plate model" aux feuilles non compactes des plantes Dicotylédones, le concept de VAI ("Void Area Index") a été introduit par Allen et al. (1970) et Gausman et al. (1970). La feuille est désormais assimilée à un empilement de N couches compactes séparées par $N-1$ espaces d'air infinitésimaux: $VAI = N - 1$. Par conséquent, le VAI d'une feuille compacte (Monocotylédone ou Dicotylédone jeune) est nul ou proche de zéro. Allen et al. (1970) ont montré que le VAI d'une Dicotylédone variait de zéro jusqu'à une valeur maximale caractéristique de l'espèce lorsque la plante a terminé sa croissance (Figure 2.10).

Allen et Richardson (1968) ont repris le système d'équations différentielles de Kubelka-Munk et ont proposé un autre modèle de transfert radiatif ("K-M model") à travers une feuille. Si $I_\downarrow$ est le flux descendant et $J_\uparrow$ le flux montant, ce système s'écrit:

$$\begin{cases} dI_\downarrow = -(k+s)I_\downarrow dx + sJ_\uparrow dx \\ dJ_\uparrow = +(k+s)J_\uparrow dx - sI_\downarrow dx \end{cases} \tag{2.4}$$

où k est le coefficient d'absorption de la feuille et s le coefficient de diffusion. Cette représentation à deux paramètres a été appliquée avec succès sur une feuille de coton. Park et Deering (1982) ont simplifié l'expression de la réflectance et adopté un formalisme de type loi de Beer. Baret et al. (1988) l'on repris pour simuler des spectres de feuilles de blé à partir de concentrations en chlorophylle et de niveaux de réflectance dans le proche infrarouge. Afin de prendre en compte plus finement l'hétérogénéité des différents tissus foliaires, Yamada et Fujimura (1988, 1992) considèrent quatre couches parallèles (deux cuticules, un parenchyme palissadique et un mésophylle spongieux) décrites chacune par la théorie de Kubelka-Munk. Ces couches ont des propriétés optiques différentes mais les équations qui gouvernent les reflexions multiples entre deux interfaces sont identiques. Ce modèle a été testé aussi bien sur des Monocotylédones que sur des Dicotylédones pour lesquelles il est capable de simuler l'asymétrie de réflectance entre la face supérieure et la face inférieure.

On remarquera que, malgré des hypothèses de départ différentes, le "plate model" généralisé et le "K-M model" sont équivalents (Bunnik, 1978). Le premier est discret, le second fait appel à des variables continues. Le passage de l'un à l'autre consiste à transformer une somme en intégrale, un entier en réel.

2.3.4 Intérêt de ces modèles

Cette revue des modèles de propriétés optiques des feuilles révèle deux catégories de modèles. Les modèles descriptifs (modèle de lancer de rayon, modèle stochastique) qui représentent de façon très précise la structure interne de la feuille et les mécanismes mis en jeu: ils nécessitent souvent beaucoup de paramètres ce qui rend leur inversion pour l'instant difficile. A l'opposé, les modèles de transfert radiatif simulent les propriétés optiques des feuilles avec un nombre plus limité de paramètres: il est possible de les retrouver à partir de données radiométriques.

Ces modèles utilisés dans le sens direct permettent de simuler des spectres de réflectance ou de transmittance entre 400 nm et 2500 nm. Les spectres peuvent être inclus directement dans la plupart des modèles de réflectance des couverts végétaux: ce couplage qui ajoute une dimension spectrale aux dimensions spatiale et directionnelle, permet de caractériser entièrement une cible par des mesures radiométriques dans le domaine optique. A l'opposé, certains de ces modèles peuvent être utilisés en mode inverse: ainsi, les modèles d'Andrieu et al. (1988) ou de Yamada et Fujimura (1990) sont-ils présentés comme des méthodes de détermination non destructrice de la concentration en chlorophylle des feuilles.

2.4 Conclusion partielle

Cette revue bibliographique a fait apparaitre les principaux facteurs affectant les propriétés optiques des feuilles, et les moyens de modéliser ces propriétés. La connaissance précise des phénomènes d'absorption et de diffusion à l'intérieur de la feuille était un préalable nécessaire à toute interprétation de la réflectance spectrale des couverts végétaux. Les relations proposées entre les valeurs de réflectance (ou de transmittance) et certaines variables physiologiques de la feuille sont souvent empiriques ou découlent de relations statistiques: une telle approche revient à ne prendre en considération que les phénomènes d'absorption, et à négliger la diffusion qui pourtant pertube le signal absorbé. La nécessité de construire des modèles physiques est rapidement apparue: le problème de la plupart des modèles que nous avons passés en revue est qu'ils ont été testés sur des cas très particuliers ... et qu'ils ne sont pas disponibles! Par exemple, certains auteurs travaillant sur une variété donnée ont ignoré le rôle de la structure interne de la feuille; d'autres ne se sont préoccupés que des feuilles vertes et ont délaissé les feuilles jaunes ou brunes. Aucun n'a pris en compte explicitement l'effet de chacun des pigments.

Face à ce constat, il nous a semblé utile de développer un modèle de propriétés optiques des feuilles, aussi général que possible, tenant compte aussi bien de l'anatomie des feuilles que leur teneur en pigments ou en eau. Ce modèle sera couplé à un modèle de propriétés optiques des sols et un modèle de réflectance de couvert afin de simuler la réflectance spectrale des couverts végétaux. La seconde partie de ce mémoire est une description de ces modèles.

Partie II

Modélisation de la réflectance spectrale du couvert

Chapitre 3

PROSPECT: un modèle de propriétés optiques des feuilles

La partie bibliographique a mis en évidence l'absence d'un modèle de propriétés optiques des feuilles général et robuste. Jusqu'à présent, les modèles de réflectance des couverts utilisaient les propriétés macroscopiques des feuilles (réflectance et transmittance de la face supérieure ou inférieure du limbe) plutôt qu'un modèle physique d'absorption et de diffusion des feuilles. Notre travail a pour ambition de construire un modèle de propriétés optiques des feuilles qui verifie les contraintes suivantes:

- il doit être basé sur des **concepts physiques**, par opposition à un ajustement statistique, afin de contrôler les paramètres d'entrée et permettre la modélisation du transfert radiatif.
- il doit être assez **simple** et faire appel, autant que possible, à des paramètres mesurables et peu nombreux.
- il doit être **inversible** afin d'estimer les variables biophysiques de la feuille à partir de mesures spectrophotométriques.

Sur cette base nous avons développé PROSPECT, un modèle de transfert radiatif simulant les propriété optiques des feuilles en fonction de trois variables: un indice décrivant la structure interne du mésophyle, N, une concentration en chlorophylle a+b exprimée en $\mu g.cm^{-2}$, C_{ab}, et une épaisseur équivalente en eau de la feuille exprimée en cm, C_w. Les autres constituants biochimiques (lignine, cellulose ...) ne sont pas explicitement pris en compte dans PROSPECT pour une raison simple: lorsque nous avons commencé ce travail, la nature de ces constituants et leurs méthodes de dosage étaient très mal connues; de plus, leurs effets sur les propriétés optiques des feuilles sont en partie occultés par ceux de l'eau, ce qui rend leur prise en compte difficile sur du matériel végétal frais. En conséquence, nous avons préféré les ignorer dans cette étude en étant conscient qu'il faudra un jour en tenir compte. Dans une première partie, nous détaillerons les bases physiques du modèle; une seconde partie consistera à déterminer les constantes optiques du modèle; enfin, la validation du modèle et son inversion termineront ce chapitre.

3.1 Théorie

3.1.1 Transfert radiatif à travers une couche compacte

Dans le cas le plus simple, la feuille est assimilée à une lame à bords parallèles, d'indice de réfraction n et de coefficient de transmission ϕ. La lumière qui arrive sur la face supérieure de la feuille est en partie réfléchie, en partie transmise, et en partie absorbée. Le premier obstacle qu'elle rencontre est l'interface air/feuille.

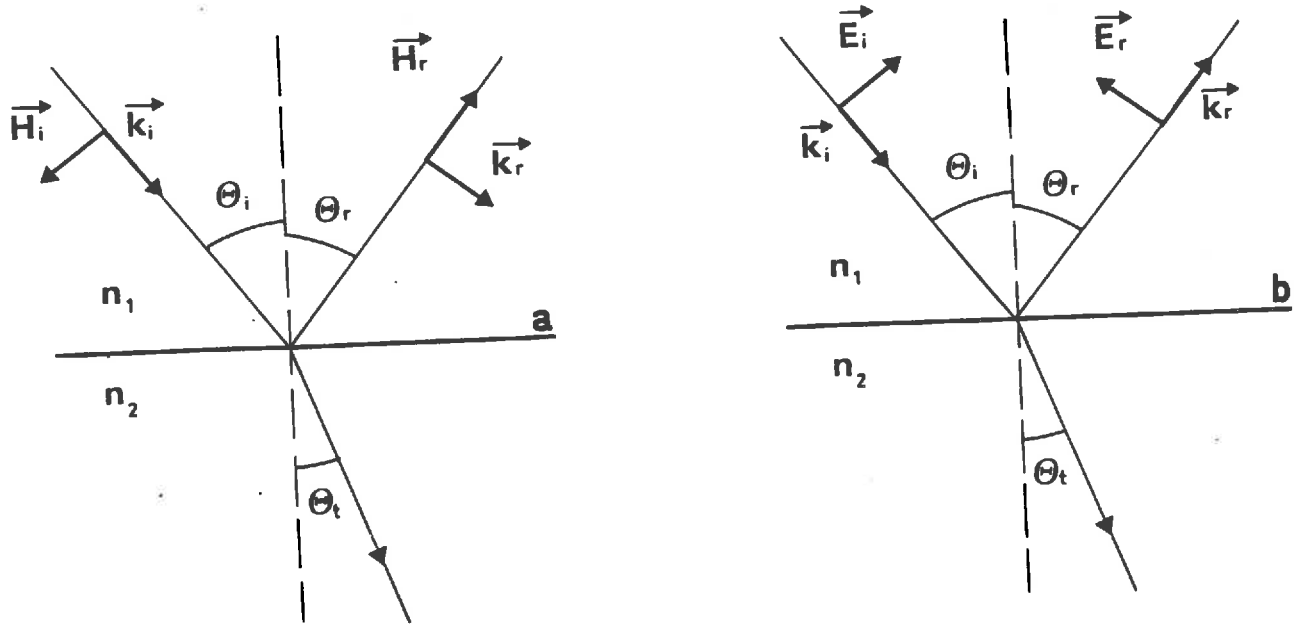


Figure 3.1 Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux: (a) polarisation perpendicu-
laire (b) polarisation parallèle.

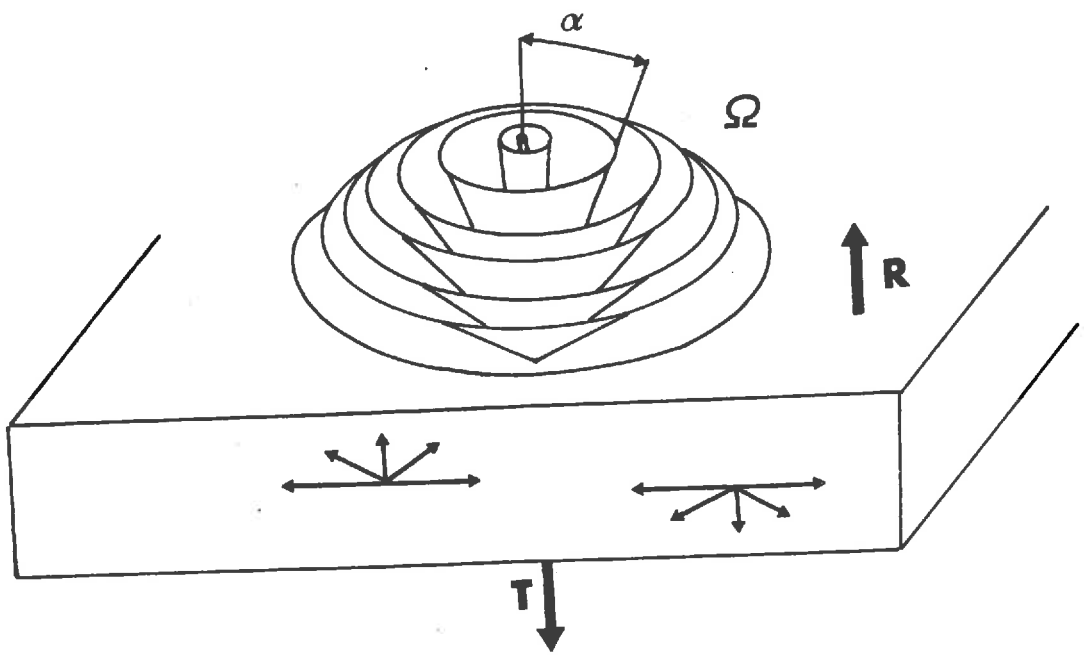


Figure 3.2: Division de l'hémisphère en angles solides Ω (demi-angle α) dans lesq
sont inscrits les rayons lumineux incidents.

Transmission de la lumière à l'interface entre deux diélectriques

La première hypothèse est que le milieu est sans pertes: il n'y a pas d'absorption à l'interface air/feuille et n est un nombre réel. Afin de calculer la transmission de la lumière à l'interface entre deux diélectriques, il est nécessaire de se ramener à la théorie des ondes électromagnétiques et d'étudier l'interaction d'une onde plane (uniforme) avec un dioptre plan (Stern, 1964; Allen, 1973). Nous allons distinguer le cas où le vecteur champ électrique $\vec{E}$ est perpendiculaire au plan d'incidence (polarisation perpendiculaire) et le cas où le vecteur champ électrique $\vec{E}$ est dans le plan d'incidence (polarisation parallèle) (Figure 3.1). Si le rayon incident fait un angle θ_i par rapport à la normale, les relations de Fresnel donnent les transmissivités à l'interface:

$$t_\perp(\theta_i, 1, n) = 4\frac{\sqrt{1-x}\sqrt{n^2-x}}{(\sqrt{1-x}+\sqrt{n^2-x})^2} \tag{3.1}$$

$$t_{||}(\theta_i, 1, n) = 4n^2\frac{\sqrt{1-x}\sqrt{n^2-x}}{(n^2\sqrt{1-x}+\sqrt{n^2-x})^2} \tag{3.2}$$

$$\text{avec } x = \sin^2\theta_i$$

La transmissivité moyenne correspondant à une polarisation moyenne s'écrit sous la forme $t_{av}(\theta_i, 1, n) = (t_\perp(\theta_i, 1, n) + t_{||}(\theta_i, 1, n))/2$ et la réflectivité moyenne se déduit facilement de $t_{av}(\theta_i, 1, n)$ par la relation $r_{av}(\theta_i, 1, n) = 1 - t_{av}(\theta_i, 1, n)$. Si on suppose maintenant que la lumière incidente est inscrite dans un angle solide Ω de demi ouverture α (Figure 3.2), on calcule la transmissivité moyenne $t_{av}(\alpha, 1, n)$ en intégrant l'expression précédente sur Ω:

$$\begin{aligned} t_{av}(\alpha, 1, n) &= \frac{\int_{\theta_i=0}^{\alpha} \frac{1}{2}[t_\perp(\theta_i, 1, n) + t_{||}(\theta_i, 1, n)]\cos\theta_i d\Omega}{\int_{\theta_i=0}^{\alpha}\cos\theta_i d\Omega} \\ &= \frac{t_{\perp,av}(\alpha, 1, n) + t_{||,av}(\alpha, 1, n)}{2} \end{aligned} \tag{3.3}$$

Le calcul de $t_{\perp,av}(\alpha, 1, n)$ et $t_{||,av}(\alpha, 1, n)$ est assez complexe, mais on peut en donner des expressions analytiques (Allen, 1973). La Figure 3.3 montre les variations de $t_{av}(\alpha, 1, n)$ en fonction de α pour différents indices de réfraction (n varie de 1.1 à 1.8): on constate que la transmissivité a des valeurs assez constantes pour des variations importantes de α (jusqu'à 60°) et que cet effet tend à diminuer lorsque n décroît. Dans le cas d'un flux incident isotrope ($\alpha = 90°$), les relations 3.1 et 3.2 s'écrivent:

$$t_{\perp,av}(90, 1, n) = \frac{4(2n+1)}{3(n+1)^2} \tag{3.4}$$

$$t_{||,av}(90, 1, n) = \frac{4n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)^2(n^2-1)} - \frac{2n^2(n^2+1)}{(n^2-1)^2}\log n + \frac{2n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3}\log\frac{n(n+1)}{n-1} \tag{3.5}$$

Si on considère maintenant la transmission de la lumière dans la direction inverse, c'est-à-dire d'un milieu d'indice de réfraction n vers un milieu d'indice de refraction 1 (l'air), on a la relation suivante:

$$t_{av}(\alpha, n, 1) = n^2 t_{av}(\alpha, 1, n) \tag{3.6}$$

Absorption de la lumière par la lame

Après avoir étudié la transmissivité aux interfaces, nous allons nous préoccuper du coefficient de transmission de la lame ϕ; pour un rayon traversant une feuille d'épaisseur D en faisant un angle θ_i avec la normale, ϕ est relié au coefficient d'absorption k par une simple loi de Beer:

$$\phi = e^{-kl} = e^{-\frac{kD}{\cos\theta_i}} \tag{3.7}$$

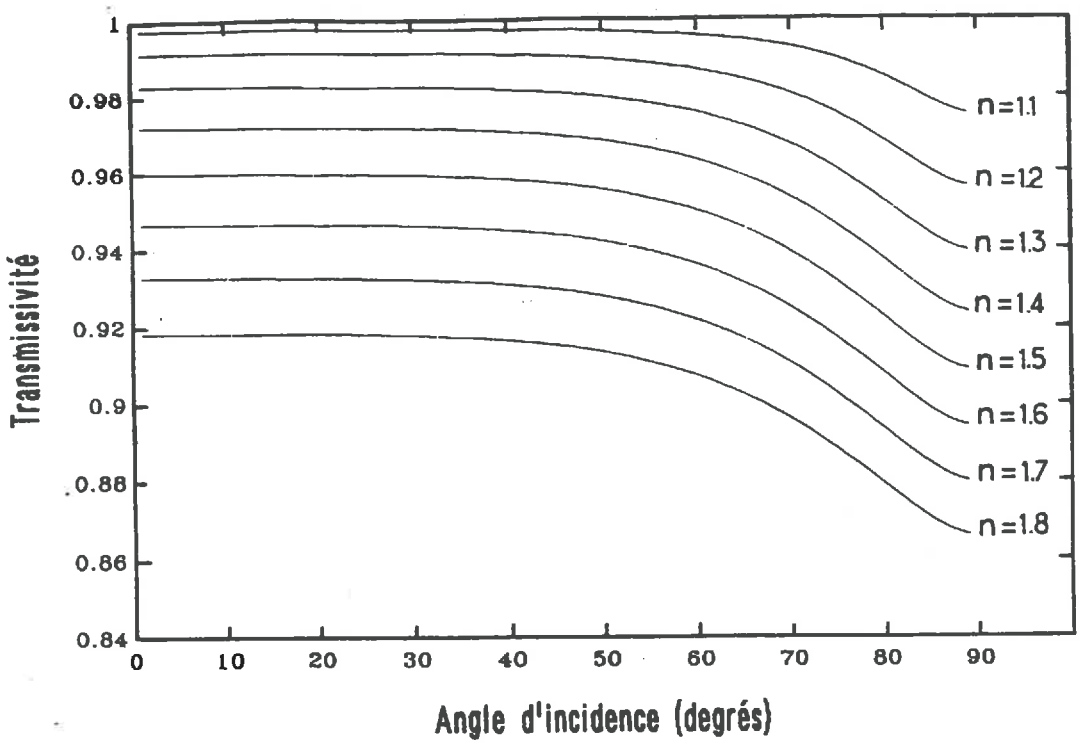


Figure 3.3: Transmissivité moyenne $t_{av}(\alpha, n)$ en fonction de l'indice de réfraction n et de l'angle d'incidence α.

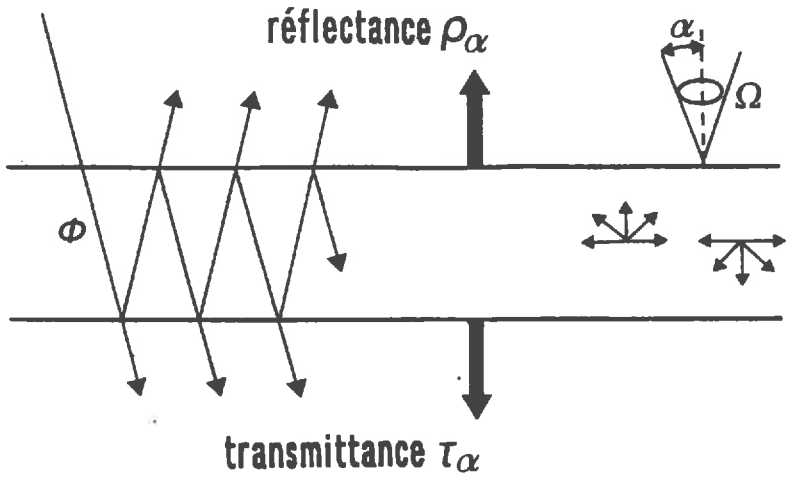


Figure 3.4: Réflexions multiples produites par une lame à bords paralèlles.

En fait, D sera implicitement pris en compte dans le coefficient d'absorption et nous le fixerons égal à 1. De plus, le flux étant diffus à l'intérieur de la feuille, il faut intégrer l'Equation 3.7 sur tout l'hémisphère ($0 < \theta_i < \pi/2$):

$$\phi = \frac{\int_{\theta_i=0}^{\frac{\pi}{2}} e^{\frac{-k}{\cos\theta_i}} \cos\theta_i d\Omega}{\int_{\theta_i=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta_i d\Omega} \tag{3.8}$$

En posant $x = \frac{k}{\cos\theta_i}$ et en intégrant par partie deux fois le numérateur de l'Equation 3.8, on obtient finalement:

$$\phi = (1-k)e^{-k} + k^2 \int_k^{\infty} e^{-x} x^{-1} dx \tag{3.9}$$

Le coefficient de transmission de la lame ϕ varie de 0 ($k = \infty$) à 1 ($k = 0$).

Réflectance et transmittance diffuses de la lame

Reprenons notre lame à bords parallèles: nous avons désormais tous les éléments pour calculer sa réflectance et sa transmittance. La lumière incidente interagit avec l'interface [1]/[2], traverse le milieu [2] puis interagit avec l'interface [2]/[1]... A l'intérieur de la feuille, le rayonnement subit de multiples réflexions (Figure 3.4). La réflectance totale est la fraction du flux incident émergeant à la face supérieure; la transmittance celle émergeant à la face inférieure. On notera r_{ij} la réflectivité et $t_{ij} = 1 - r_{ij}$ la transmissivité entre deux milieux i et j. A la première réflexion on a:

$$\rho(1) = r_{12} \tag{3.10}$$

A la seconde réflexion on a:

$$\begin{aligned} \rho(2) &= \rho(1) + t_{12}.\phi.r_{21}.\phi.t_{21} \\ &= r_{12} + t_{12}.t_{21}.r_{21}.\phi^2 \end{aligned} \tag{3.11}$$

A la troisième réflexion on a:

$$\begin{aligned} \rho(3) &= \rho(2) + t_{12}.\phi.r_{21}.\phi.r_{12}.\phi.r_{21}.\phi.t_{21} \\ &= r_{12} + t_{12}.t_{21}.r_{21}.\phi^2.(1 + r_{21}^2.\phi^2) \end{aligned} \tag{3.12}$$

A la $k+1^{ieme}$ réflexion on a:

$$\begin{aligned} \rho(k+1) &= r_{12} + t_{12}.t_{21}.r_{21}.\phi^2.[1 + r_{21}^2.\phi^2 + \cdots + (r_{21}^2.\phi^2)^{k-1}] \\ &= r_{12} + t_{12}.t_{21}.r_{21}.\phi^2.\frac{1-(r_{21}^2.\phi^2)^k}{1-r_{21}^2.\phi^2} \end{aligned} \tag{3.13}$$

Lorsque k tend vers l'infini, on obtient l'expression de la réflectance diffuse:

$$\rho = r_{12} + \frac{t_{12}.t_{21}.r_{21}.\phi^2}{1-r_{21}^2.\phi^2} \tag{3.14}$$

On peut par un raisonnement identique calculer la transmittance diffuse:

$$\tau = \frac{t_{12}.t_{21}.\phi}{1-r_{21}^2.\phi^2} \tag{3.15}$$

Dans leur modèle, Allen et al. (1969) supposaient que la lumière incidente était isotrope. Cependant, lorsqu'on mesure les propriétés optiques d'une feuille avec un spectrophotomètre de laboratoire,

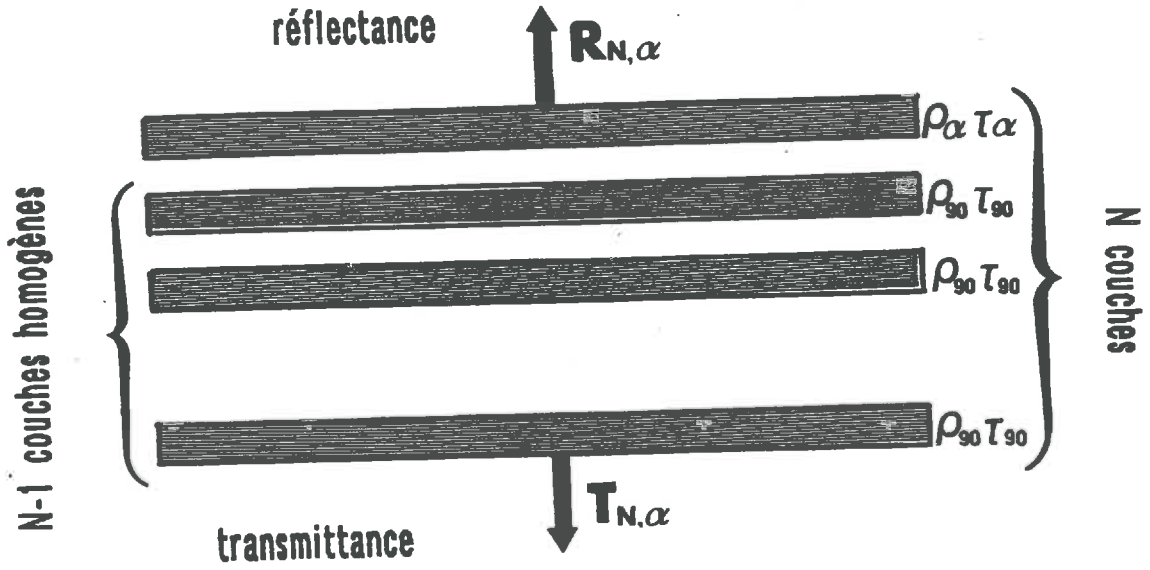


Figure 3.5: Nomenclature pour un modèle de propriétés optiques des feuilles à N couch
(N-1 couches homogènes + 1 couche).

le faisceau lumineux est généralement parallèle et perpendiculaire à la surface de la feuille. A l'échelle microscopique, la surface d'une feuille n'est pas plane mais présente une certaine rugosité (Grant, 1987). Ainsi, un faisceau de lumière parallèle arrivant sur une surface rugueuse provoque les même phénomènes qu'un faisceau inscrit dans un angle solide Ω (demi ouverture α) arrivant sur une surface plane. Une fois qu'elle a pénétré dans la feuille, la lumière est supposée isotrope ($\alpha = 90^o$). En posant $r_{12} = 1 - t_{12}$ (pas d'absorption à l'interface), $t_{12} = t_{av}(\alpha, n)$ et $t_{21} = n^{-2}t_{av}(90, n)$ (lois de diffusion à l'interface), la réflectance ρ_α et la transmittance τ_α de la lame s'écrivent désormais:

$$\rho_\alpha = 1 - t_{av}(\alpha, n) + \frac{t_{av}(90, n).t_{av}(\alpha, n).[n^2 - t_{av}(90, n)].\phi^2}{n^4 - [n^2 - t_{av}(90, n)].\phi^2} \tag{3.16}$$

$$\tau_\alpha = \frac{t_{av}(90, n).t_{av}(\alpha, n).n^2.\phi}{n^4 - [n^2 - t_{av}(90, n)].\phi^2} \tag{3.17}$$

Supposons maintenant que la lumière incidente soit isotrope ($\alpha = 90^o$): il existe une relation simple entre ρ_α et ρ_{90}, τ_α et τ_{90}:

$$\rho_\alpha = x.\rho_{90} + y \tag{3.18}$$

$$\tau_\alpha = x.\tau_{90} \tag{3.19}$$

avec $x = t_{av}(\alpha, n)/t_{av}(90, n)$ et $y = x[t_{av}(90, n) - 1)] + 1 - t_{av}(\alpha, n)$. Ce "plate model" généralisé a donc trois paramètres d'entrée: un indice de réfraction n, un angle d'ouverture α et un coefficient de transmission de la lame ϕ. Il est malheureusement limité aux feuilles compactes caractéristiques des Monocotylédones et ne permet pas de décrire les propriétés optiques des feuilles de Dicotylédones ou sénescentes. Il est donc nécessaire de généraliser ce modèle.

3.1.2 Transfert radiatif à travers N couches compactes

La généralisation du modèle monocouche a pour objectif de fournir un paramètre décrivant la structure interne des feuilles. Le modèle devra s'appliquer à tous les types de feuilles: Monocotylédones dont le mésophylle est de type compact, Dicotylédones dont le mésophylle est différencié en un parenchyme palissadique et un parenchyme lacuneux, et enfin feuilles brunes dont les propriétés optiques sont particulières du fait de la désorganisation des tissus foliaires. La feuille est donc assimilée à un empilement de N couches compactes séparées par $N - 1$ espaces intercellulaires (Figure 3.5). Le calcul de la réflectance, de la transmittance et de l'absorbance d'un milieu stratifié plan constitué de N couches de diélectriques a fait l'objet de nombreux travaux en optique où le cas de figure est courant; Stokes (1862) proposa le premier une solution géométrique de l'intensité de la lumière réfléchie ou transmise par une pile de N lames de verre homogènes. Kubelka (1954), Cadman et Sadowski (1978), Abuel-Haija et al. (1979) ...ont généralisé le problème à des couches de nature différente. Ces modèles multicouches sont à l'origine discrets (N entier), mais on peut facilement les rendre continus (N réel). Dans le cas de la feuille, le système de Stokes (1862) a été modifié afin de prendre en compte le caractère non isotrope du rayon incident; la première couche reçoit un rayonnement incident inscrit dans un angle solide Ω (demi ouverture α): soit ρ_α sa réflectance et τ_α sa transmittance. Le flux à l'intérieur de la feuille est diffus: soit ρ_{90} la réflectance et τ_{90} la transmittance de chacune des $N - 1$ autres couches. Considérons la réflectance totale de ce système pour 1,2,...N couches. Pour la première couche, on a:

$$R_{1,\alpha} = \rho_\alpha \tag{3.20}$$

En combinant deux couches et en faisant la somme de toutes les fractions réfléchies et transmises, on obtient une série géométrique convergente $R_{2,\alpha}$:

$$
\begin{aligned}
R_{2,\alpha} &= \rho_\alpha + \tau_\alpha \rho_{90} \tau_{90} + \tau_\alpha \rho_{90}^3 \tau_{90} + \cdots \\
&= \rho_\alpha + \tau_\alpha \tau_{90} \rho_{90} (1 + \rho_{90}^2 + \cdots) \\
&= \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90}}{1 - \rho_{90}^2}
\end{aligned} \tag{3.21}
$$

Si on rajoute maintenant une troisième couche, le calcul se fait en considérant deux couches (la deuxième et la troisième par exemple) comme une couche unique et en la combinant avec la première. On obtient alors comme expression de $R_{3,\alpha}$:

$$
\begin{aligned}
R_{3,\alpha} &= \rho_\alpha + \tau_\alpha . R_{2,90} . \tau_{90} + \tau_\alpha . R_{2,90} . \rho_{90} . R_{2,90} . \tau_{90} + \cdots \\
&= \rho_\alpha + \tau_\alpha \tau_{90} R_{2,90} (1 + \rho_{90} R_{2,90} + \cdots) \\
&= \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90} R_{2,90}}{1 - \rho_{90} R_{2,90}}
\end{aligned} \tag{3.22}
$$

Le raisonnement est le même pour le calcul de la transmittance et lorsqu'on étend le système à N couches, on montre par récurrence que:

$$
R_{N,\alpha} = \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90} R_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1,90}} \tag{3.23}
$$

$$
\text{et } T_{N,\alpha} = \frac{\tau_\alpha T_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1,90}} \tag{3.24}
$$

En éliminant ρ_α et τ_α au moyen des relations 3.18 et 3.19, il est possible d'exprimer la reflectance $R_{N,\alpha}$ et la transmittance $T_{N,\alpha}$ du système non-homogène en fonction de la réflectance $R_{N,90}$ et de la transmittance $T_{N,90}$ du système homogène.

$$
R_{N,\alpha} = x . R_{N,90} + y \tag{3.25}
$$

$$
\text{et } T_{N,\alpha} = x . T_{N,90} \tag{3.26}
$$

où x et y sont déjà connus. Cette relation est fondamentale car elle permet de passer d'un système non-homogène à un système homogène dont la résolution a été donnée par Stokes (1862):

$$
\frac{R_{N,90}}{b_{90}^N - b_{90}^{-N}} = \frac{T_{N,90}}{a_{90} - a_{90}^{-1}} = \frac{1}{a_{90} b_{90}^N - a_{90}^{-1} b_{90}^{-N}} \tag{3.27}
$$

$$
\text{avec } a_{90} = \frac{1 + \rho_{90}^2 - \tau_{90}^2 + \delta_{90}}{2\rho_{90}} \tag{3.28}
$$

$$
b_{90} = \frac{1 - \rho_{90}^2 + \tau_{90}^2 + \delta_{90}}{2\tau_{90}} \tag{3.29}
$$

$$
\delta_{90} = \sqrt{(\tau_{90}^2 - \rho_{90}^2 - 1)^2 - 4\rho_{90}^2} \tag{3.30}
$$

3.1.3 Conclusion

Le modèle tel qu'il est écrit, fonctionne avec 4 paramètres: le paramètre de structure N, l'indice de réfraction n, l'angle α, et le coefficient de transmission de la lame ϕ. N et α sont, *a priori*, indépendants de la longueur d'onde; n est indépendant du type de feuille; l'angle α peut être interprété comme une mesure de la rugosité moyenne de la face supérieure du limbe: s'il augmente, cela signifie que la rugosité est plus importante. La connaissance de cette rugosité étant très imparfaite, nous admettrons qu'elle est la même pour toutes les feuilles. La prochaine étape va donc consister à déterminer les constantes optiques des feuilles à partir d'un jeu de données expérimentales.

#	*type de feuille*	C_a	C_b	C_{x+c}	C_w	$\hat{N}$
1	maïs vert	14.12	5.95	5.27	0.0170	1.0627
2	maïs albinos	0.10	0.12	0.052	0.0157	1.0000
3	maïs vert	18.63	4.06	3.14	0.0165	1.1829
4	maïs étiolé	1.38	0.37	1.44	0.0159	1.0289
5	tournesol vert	23.18	8.23	6.36	0.0247	1.7692
6	maïs vert	29.95	8.13	5.89	0.0154	1.2318
7	maïs sec	31.67	7.04	5.55	0.0062	1.0596
8	maïs sec	23.84	3.41	3.52	0.0000	1.2790
9	blé vert	34.04	10.38	5.77	0.0144	1.2572
10	soja vert	23.12	11.12	5.55	0.0137	1.8320
11	érable albinos	0.72	0.25	0.30	0.0087	1.1054
12	tournesol albinos	0.12	0.069	0.24	0.0207	1.5059
13	érable vert	19.12	6.78	8.08	0.0087	1.2677
14	maïs sec	0.20	0.34	0.59	0.0003	1.9136
15	chêne sec	4.38	3.02	1.09	0.0006	5.0835
16	chêne sec	0.25	0.32	0.67	0.0007	3.7075
17	chêne vert	60.21	16.32	14.72	0.0091	1.5234
18	chêne vert	21.55	6.21	5.97	0.0120	1.1235
19	tomate verte	13.88	9.17	2.48	0.0173	1.6755
20	blé vert	30.38	13.11	10.41	0.0111	1.4935
21	blé vert*	"	"	"	"	1.3639
22	soja sec	1.64	2.03	0.32	0.0005	2.7881
23	tournesol sec	1.38	0.87	0.52	0.0019	3.1048
24	soja vert	3.47	2.89	2.67	0.0131	1.8426
25	blé sec	0.39	0.30	0.69	0.0002	4.0127
26	maïs jaune	0.96	0.66	4.18	0.0065	1.1091
27	maïs vert	6.44	1.43	2.42	0.0084	1.0871
28	soja jaune	1.88	0.71	3.51	0.0136	1.4262
29	plante suc. verte	43.83	15.61	9.81	0.0467	2.0032
30	plante suc. verte*	"	"	"	"	1.8108
31	blé sec	0.61	0.34	0.44	0.0005	3.0144
32	tomate violette	2.68	1.23	1.75	0.0172	1.8191

Tableau 3.1: Quelques caractéristiques biophysiques des feuilles: concentrations en chlorophylle a (C_a), chlorophylle b (C_b), carotènes + xanthophylles (C_{x+c}) exprimées en $\mu g.cm^{-2}$. Epaisseur équivalente en eau (C_w) exprimée en cm. Paramètre de structure des feuilles $\hat{N}$ estimé par le modèle PROSPECT à la longueur d'onde du minimum d'absorption (proche infrarouge). Le signe $*$ signifie que la surface de la feuille a été nettoyée de la couche de cire qui la recouvrait.

3.2 Mesure des propriétés biophysiques des feuilles

3.2.1 Choix du matériel végétal

Les propriétés optiques des feuilles sont influencées par la structure interne du mésophylle (proche infrarouge mais aussi visible et moyen infrarouge en dehors des bandes d'absoption), la concentration en pigments (visible) et la teneur en eau (moyen infrarouge). Le choix des plantes a été guidé par ces facteurs.

- **Structure interne:** afin d'avoir une large gamme de variation de la structure interne des feuilles, des plants de maïs (*Zea mays*), de blé (*Triticum aestivum*), de tomate (*Lycopersicon esculentum*), de soja (*Glycine max*) et de tournesol (*Helianthus annuus*) ont été cultivés en pot sous serre. Des feuilles de chêne (*Quercus robur*), d'érable (*Acer negundo*) et de plantes succulentes (*Othonopsis cheiriifolia*) ont été collectées dans le centre INRA de Montfavet.

- **Concentration en pigments:** les pigments foliaires étant les principaux facteurs affectant les propriétés optiques des feuilles dans le visible, le calage du modèle implique que nous disposions de plantes ayant des concentrations en pigments très variées, et même de cas extrêmes qu'on ne trouve pas à l'état naturel. La production de chlorophylle est un processus qui dépend de la lumière: ainsi, si on fait germer des graines dans le noir, on obtient des plantules étiolées qui présentent des anomalies morphologiques (entre-noeuds longs, feuilles de petite taille) et physiologiques (pas de chlorophylle, présence de carotènoïdes). L'obtention de Dicotylédones étiolées est difficile car ces plantes ne peuvent pas survivre dans un milieu sans sucres assimilables une fois les réserves des cotylédons épuisées. Seul le maïs dont la graine est riche en amidon a fourni des feuilles exploitables. Nous avons aussi cultivé des plantes albinos exemptes de tout pigment en laissant imbiber les graines pendant une nuit dans une solution acqueuse contenant 10% (v:v) de fluridone (1-méthyl-3-phényl-5-[3-(trifluorométhyl)-phényl]-4(1H)-pyridinone). La fluridone est un herbicide aquatique qui inhibe la synthèse de chlorophylle, de carotène et autres pigments colorés (Berard et al., 1978; Maas et Dunlap, 1989). Les plantules, de couleur blanche, ressemblent morphologiquement à des plantules normales et constituent des sujets idéaux pour étudier les propriétés optiques des feuilles. Comme pour les plantes étiolées, les Dicotylédones ne se prêtent pas à cette méthode; cependant il a été possible d'obtenir des feuilles de tournesol albinos en pulvérisant régulièrement une solution de fluridone sur des plantules de quelques semaines: des taches blanches apparaissent sur les feuilles existantes alors que les feuilles nouvellement formées sont totalement blanches.

- **Teneur en eau:** en conditions naturelles, la teneur en eau des feuilles varie assez peu au cours de la vie des plantes. En plaçant des feuilles à l'étuve durant des laps de temps différents, il est possible de la faire varier artificiellement. De plus, nous avons choisi une plante succulente dont le mésophylle est un véritable réservoir d'eau si bien que ses feuilles absorbent beaucoup le rayonnement moyen infrarouge.

Au total, 32 types de feuilles ont été choisis en tenant compte des trois contraintes précédentes. Le Tableau 3.1 montre que la gamme de variation dont nous disposons est suffisante pour chaque facteur et qu'on devrait pouvoir caler correctement le modèle.

3.2.2 Mesures physiques

Pour chaque type de plante, 9 feuilles sont prélevées (5 pour les mesures radiométriques puis biochimiques, 4 pour les mesures biophysiques). Surface, épaisseur, poids frais et poids sec (mise à l'étuve à 85°C pendant 24 heures) ont été mesurés. Nous n'avons pas caractérisé l'état hydrique de la feuille par sa teneur en eau, mais par sa densité spécifique en eau (C_w) qui est le poids d'eau surfacique:

$$C_w = \frac{pf - ps}{S} \tag{3.31}$$

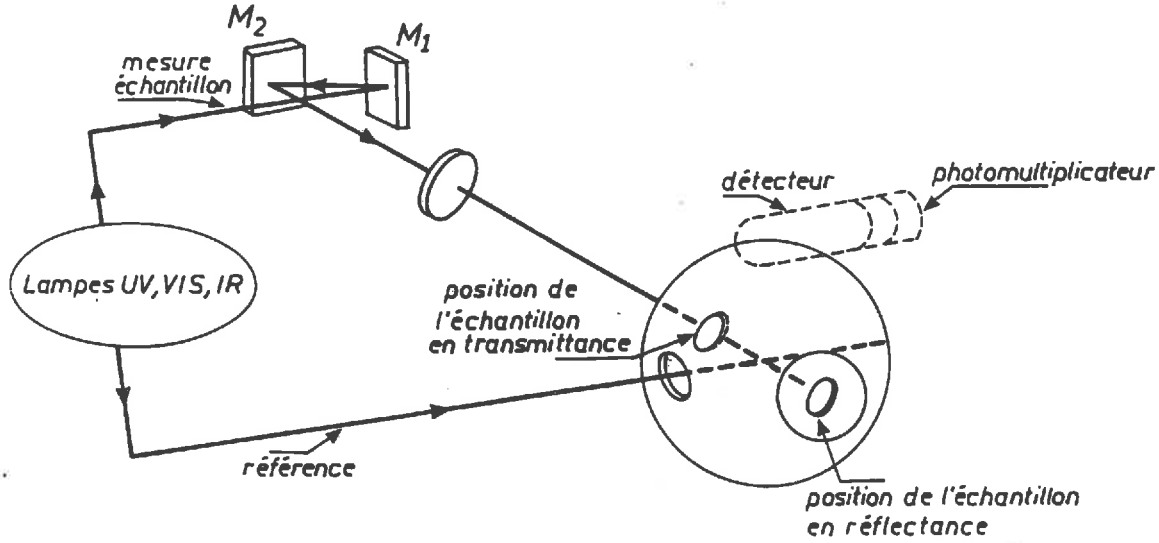


Figure 3.6: Schéma optique du spectrophotomètre Varian Cary 17DI.

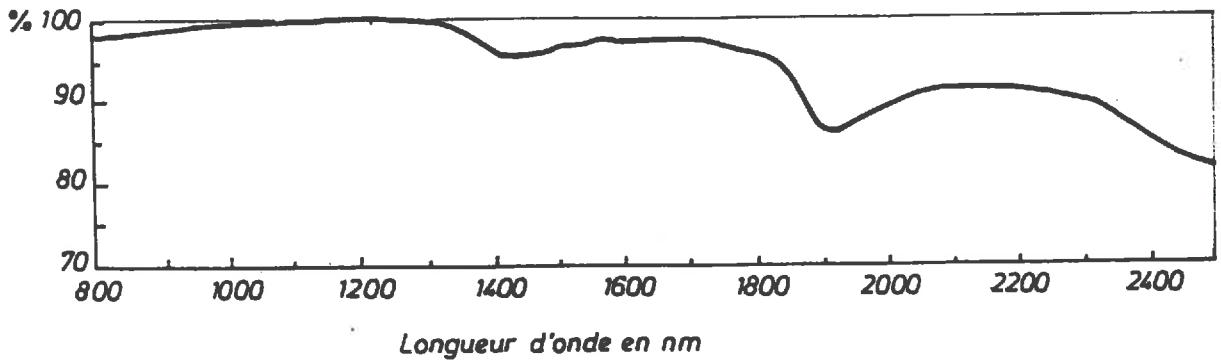


Figure 3.7 Réflectance d'une référence de sulfate de Baryum ($BaSO_4$) mesurée r
tivement à une référence d'oxyde de magnésium (MgO) fraichement préparée.

avec pf=poids frais de la feuille, ps=poids sec et S=surface correspondante. C_w s'exprime donc en $g.cm^{-2}$ ou encore en cm ($1gH_2O \longleftrightarrow 1cm^3$). Ainsi, C_w peut être assimilé à une épaisseur équivalente en eau (Danson et al., 1992).

3.2.3 Mesures radiométriques

Les mesures radiométriques ont été réalisées sur 5 feuilles homogènes prélevées sur une des plantes de notre échantillon. La réflectance R et la transmittance T de la face supérieure des feuilles est mesurée au laboratoire grâce au spectrophotomètre Varian Cary 17 DI. Le principe est le suivant (Figure 3.6): une lampe de Tungstène émet un rayon lumineux collimaté sur un prisme qui le rend monochromatique; un miroir oscillant renvoie ce faisceau alternativement sur l'échantillon étudié (en réflectance ou en transmittance) et sur une surface de référence très réfléchissante recouverte de sulfate de baryum dont les propriétés optiques sont connues. La réflectance (ou de transmittance) est directionnelle- hémisphérique (flux incident normal à la surface, flux réfléchi ou transmis analysé par un photomultiplicateur après de multiples réflexions dans une sphère intégrante, elle aussi recouverte de sulfate de baryum). Les spectres ont été acquis sur le domaine 400-800 nm avec un pas de mesure de 4 nm et sur le domaine 800-2500 nm avec un pas de 17 nm, soit au total 200 valeurs. La précision de la mesure (δ R ou δ T) est de l'ordre de 1% à 2 % de la valeur de R ou T. L'absorbance A, qui est la troisième composante de la réponse spectrale des feuilles, peut être calculée à partir de la relation $R + T + A = 1$. Les facteurs affectant les propriétés optiques des feuilles variant en général de façon exponentielle, chaque spectre est la moyenne logarithmique des spectres effectués sur le jeu de 5 feuilles homogènes. Immédiatement après la mesure, les feuilles sont enfermées hermétiquement dans un sac plastique et conservés au congélateur à -15^oC pour les dosages biochimiques.

Les valeurs de réflectance et de transmittance fournies par l'appareil sont des données brutes qui nécessitent un certain nombre de corrections avant d'être exploitées:

- **Correction de la référence:** elle consiste à diviser les valeurs brutes par les valeurs de réflectance de la référence directement mesurées. La référence elle-même ne réfléchit pas 100% de la lumière: si dans le visible et le proche infrarouge, le sulfate de baryum a une réflectance de plus de 0.99, dans le moyen infrarouge, selon l'hygrométrie ambiante, on peut observer une absorption non négligeable dans les bandes de l'eau (Grum et Luckey, 1968). Cette absorption a pu être quantifiée en utilisant une seconde référence d'oxyde de magnésium (MgO) et nous avons introduit un second terme correctif (Figure 3.7).

- **Correction de la réflectance du fond noir:** lorsqu'on mesure la réflectance d'une feuille, celle-ci est maintenue plaquée contre la lucarne par un poussoir qui normalement absorbe totalement la lumière. En fait, sa réflectance varie entre 5% et 8% selon la longueur d'onde, ce qui introduit un biais qu'on peut modéliser et corriger.

- **Correction liée à la géométrie de la sphère intégrante:** il est apparu que les trajets optiques du rayon de référence et du rayon qui rencontre l'échantillon étudié n'étaient pas identiques; normalement, un écran fixé à l'intérieur de la sphère évite au flux transmis diffus d'exciter directement le photomultiplicateur. En l'absence d'un tel écran, les valeurs de transmittance étaient surévaluées et nous avons dû introduire un dernier terme correctif.

3.2.4 Mesures biochimiques

Les concentrations en chlorophylle a et b, carotènoïdes totaux (carotène + xanthophylle) ont été déterminées selon la méthode de Lichtenthaler et Wellburn (1983). Les feuilles ont d'abord été broyées sous azote liquide et réduites à l'état de poudre. Les pigments chlorophylliens ont ensuite été extraits à l'acétone 80% (v:v); la mesure d'absorbance (A) de l'extrait à trois longueurs d'ondes différentes (λ=663 nm, 646 nm et 470 nm) permet de calculer les concentration C_a, C_b et C_{x+c} ($\mu g.ml^{-1}$):

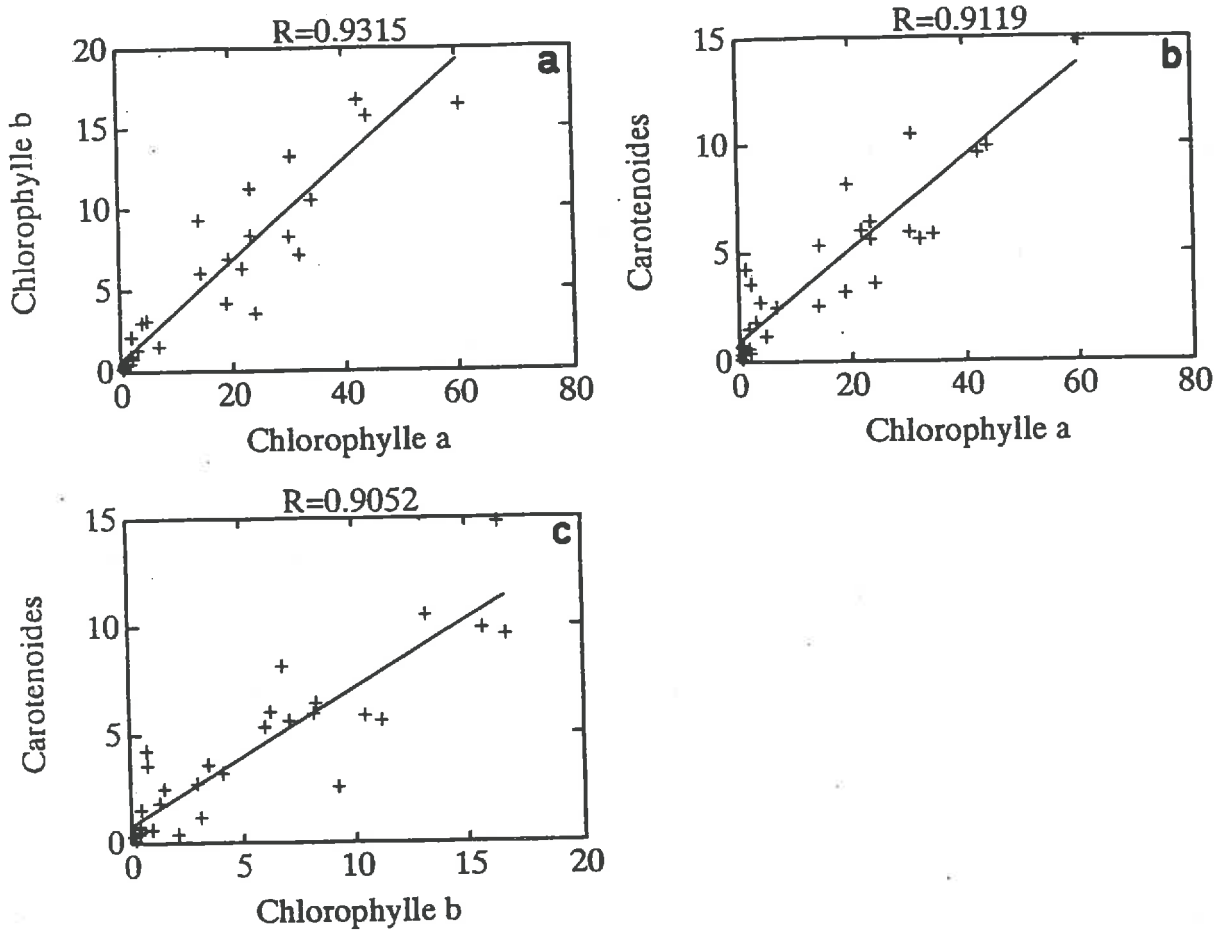


Figure 3.8: Relations entre concentrations en pigments: (a) chlorophylle a et chlorophylle b, (b) chlorophylle a et caroténoïdes, (c) chlorophylle b et caroténoïdes.

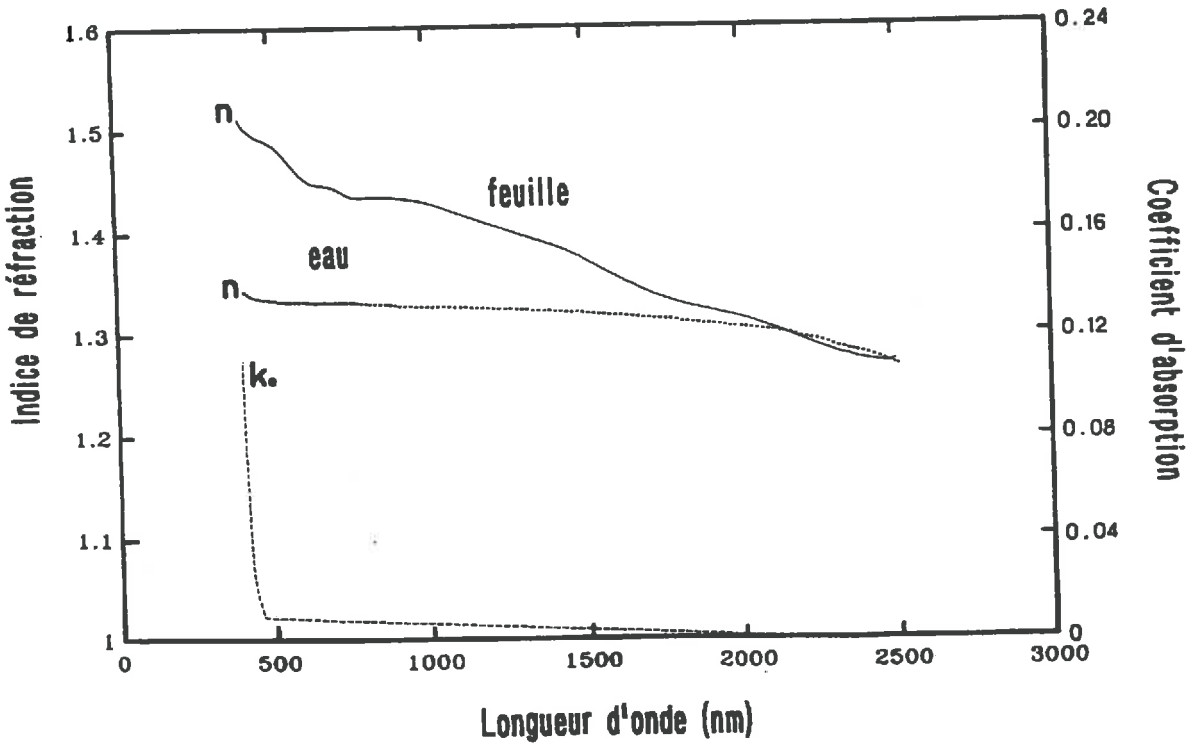


Figure 3.9: Indices de réfraction des matériaux foliaires (—) et de l'eau (···) (d'après Palmer et Williams, 1974), et coefficient d'absorption k_e d'une feuille de maïs albinos et sèche (- - -).

$$C_a = 12.21\ A_{663} - 2.81\ A_{646} \quad (3.32)$$
$$C_b = 20.13\ A_{646} - 5.03\ A_{663} \quad (3.33)$$
$$C_{x+c} = (1000\ A_{470} - 3.27\ C_a - 104\ C_b)/229 \quad (3.34)$$

Ces concentrations exprimées en $\mu g.cm^{-2}$ de feuille sont rassemblées dans le Tableau 3.1. L'étude des valeurs mesurées montre qu'il existe une très forte corrélation entre les différents pigments (Figure 3.8):
Chlorophylle b = 0.31 Chlorophylle a + 0.36 (R=0.93)
Carotènes = 0.21 Chlorophylle a + 0.61 (R=0.91)
Carotènes = 0.62 Chlorophylle b + 0.53 (R=0.90)

3.3 Etalonnage du modèle: détermination des constantes physiques et optiques

La diffusion et l'absorption sont les deux processus d'interaction de la lumière avec la feuille: les phénomènes de diffusion contrôlent les niveaux de réflectance et de transmittance dans le proche infrarouge, et dans une moindre mesure, dans les autres domaines spectraux; les phénomènes d'absorption sont principalement sensibles dans les domaines du visible et du moyen infrarouge. Le modèle PROSPECT intègre la diffusion par l'intermédiaire du paramètre de structure des feuilles N, de l'indice de réfraction n, et de l'angle α. Alors que le paramètre N varie d'une feuille à l'autre, l'angle α et la variation spectrale de n sont des constantes qu'il faudra déterminer dans un premier temps. On pourra, dans un deuxième temps, analyser les processus d'absorption.

3.3.1 Calcul de l'indice de réfraction n et de l'angle α

L'indice de réfraction n et l'angle α sont deux constantes du modèle de transfert radiatif à travers une couche compacte (cf §3.1.1). Afin d'éviter de mélanger les phénomènes d'absorption et de diffusion dans le calcul de l'indice de réfraction (Allen et al., 1969), il est nécessaire d'utiliser une feuille compacte ($N = 1$) sans eau ni pigments. Nous avons choisi une feuille de maïs albinos entre 400 et 800 nm, et une feuille de maïs verte mise à l'étuve à 80°C pendant 16 heures entre 800 et 2500 nm. Le maïs albinos était, parmi les 32 feuilles, celle qui réfléchissait le moins (≈ 0.4) et transmettait le plus (≈ 0.6) la lumière dans le proche infrarouge; il constitue un matériel végétal de choix pour définir la couche compacte (Breece et Holmes, 1971). Le maïs sec ne peut pas être considéré comme une couche compacte ($N > 1$) car il ne présente pas de valeurs extrêmes de réflectance et de transmittance; nous avons dû inverser le système de Stokes à 796 nm (minimum d'absorbance du maïs albinos) afin de calculer la réflectance et la transmittance équivalentes d'une couche compacte entre 800 et 2500 nm.

C'est sur cette couche élémentaire de réflectance ρ_e et de transmittance τ_e que nous allons appliquer le "plate model". Le coefficient de transmission ϕ, l'indice de réfraction n et l'angle α en sont les 3 paramètres d'entrée. Allen et al. (1968) supposaient que le rayonnement incident était isotrope ($\alpha = 90^o$). Si on se réfère aux indices de réfraction publiés dans la littérature (Tableau 2.1), une telle hypothèse peut conduire à des absurdités: considérons la réflectivité moyenne à l'interface air/feuille $r_{av}(\alpha, n)$ ou la transmissivité $t_{av}(\alpha, n)$ liée à $r_{av}(\alpha, n)$ par la relation $r_{av}(\alpha, n) = 1 - t_{av}(\alpha, n)$. Pour chaque longueur d'onde, on doit avoir $r_{av}(\alpha, n) < \rho_\alpha$ et $t_{av}(\alpha, n) > \tau_\alpha$. La deuxième relation est toujours vérifiée; en revanche, les mesures expérimentales montrent que, pour les longueurs d'onde correspondant à de très fortes absorbances, donc de très faibles réflectances, et en supposant $\alpha = 90^o$, on peut avoir $r_{av}(\alpha, n) > \rho_\alpha$ ce qui est physiquement impossible! Par conséquent, nous avons calé l'angle α sur la valeur de réflectance mesurée la plus faible et avons trouvé $\alpha = 59^o$. Cette valeur, qui rappelons-le, est censée représenter une rugosité de surface de la feuille, est supposée constante et il

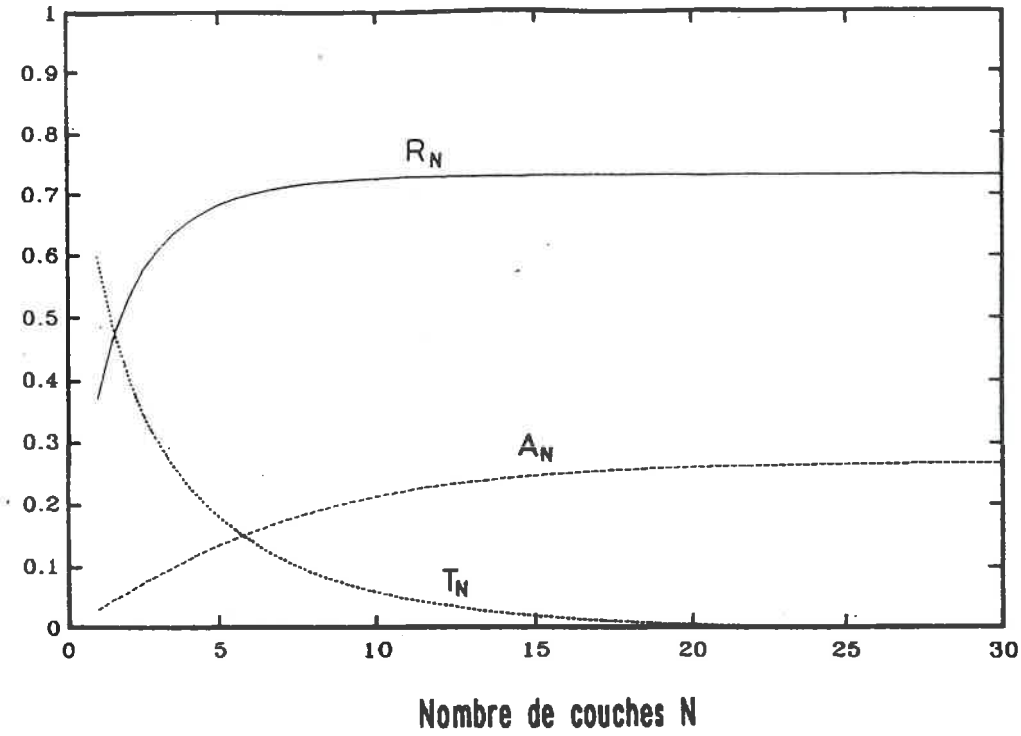


Figure 3.10: Variations de la réflectance totale R_N, de la transmittance T_N, et de l'absorptance A_N pour différentes valeurs de N.

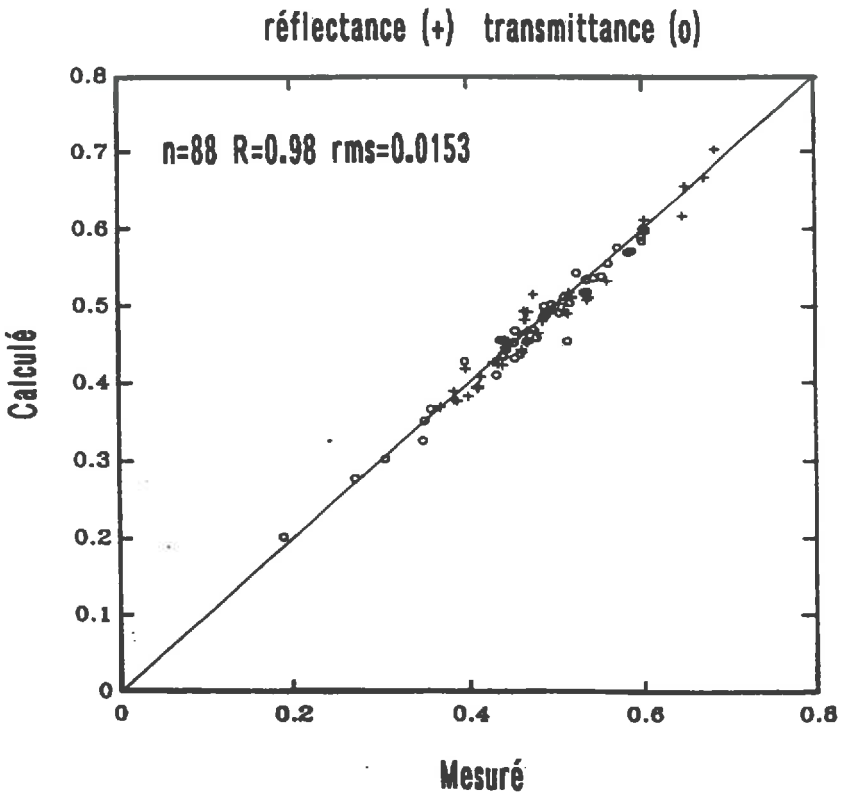


Figure 3.11: Comparaison entre les valeurs de réflectance (x) et de transmittance (o) simulées et mesurées.

serait bien vain de lui donner un sens réel. Connaissant α, ρ_e et τ_e, nous pouvons éliminer ϕ_e entre les Equations 3.16 et 3.17, et calculer l'indice de réfraction n en résolvant:

$$(\tau_e - [\rho_e - 1 + t_{av}(59,n)]^2)(n^2 - t_{av}(90,n)) - t_{av}(90,n)t_{av}(59,n)(\rho_e - 1 + t_{av}(59,n)) = 0 \quad (3.35)$$

Le spectre lissé de n (Figure 3.9) décroît de façon continue de 400 à 2500 nm, comme l'indice de réfraction de l'eau liquide pure (Palmer et Williams, 1974). Ces valeurs expérimentales sont en accord avec celles publiés dans la littérature (Tableau 2.1).

On peut alors déterminer les caractéristiques d'absorption de cette couche élémentaire: malgré l'absence de pigments chlorophylliens et d'eau, cette couche a un coefficient de transmission ϕ_e, et par conséquent un coefficient d'absorption k_e, non nuls (Figure 3.9).

La plupart des feuilles n'étant pas des couches compactes, on doit encore déterminer le nombre équivalent de couches compactes (N) pour chaque feuille afin d'accéder à la réflectance ($R_{1,59}$) et à la transmittance ($T_{1,59}$) d'une couche élémentaire.

3.3.2 Calcul de l'indice de structure N

Pour chaque type de plante, nous avons déterminé le paramètre N à la longueur d'onde correspondant au minimum d'absorptance (plateau proche infrarouge) en minimisant $(R-R_{N,59})^2+(T-T_{N,59})^2$ où R et T sont les valeurs de réflectance et de transmittance mesurées, $R_{N,90}$ et $T_{N,90}$ des fonctions de ρ_e, τ_e et N, donc de α, n, ϕ_e et N. La Figure 3.10 montre l'intérêt d'utiliser à la fois la réflectance et la transmittance plutôt que la réflectance seule: la transmittance est plus sensible aux variations de N que la réflectance. On constate que chacune atteint un palier pour de fortes valeurs de N. N est indépendant de la longueur d'onde et caractéristique du type de feuille; c'est aussi un nombre réel: s'il est facile de raisonner avec des nombres entiers de couches, ce n'est plus le cas pour des nombres réels! N n'est plus un nombre de couches compactes, mais un nombre moyen d'interfaces air/parois cellulaires qui influence les propriétés optiques des feuilles dans le proche infrarouge. De façon générale, le Tableau 3.1 montre que $N \in$[1;1.5] pour les feuilles dont le mésophylle est de type compact, que $N \in$[1.5;2] pour les Dicotylédones, et enfin que $N > 2$ pour les feuilles brunes et sèches. On peut apprécier la validité du modèle en portant sur un graphe les valeurs expérimentales de réflectance et de transmittance (2×32=64 valeurs) en fonction des valeurs théoriques calculées par le modèle de Stokes (Figure 3.11).

L'indice de structure N est bien corrélé avec la surface spécifique de la feuille (SLA="Leaf Specific Area"), rapport entre la surface et le poids sec de la feuille. En supposant que les parois cellulaires ont un poids surfacique constant, un accroissement de la surface spécifique s'accompagne d'une diminution du nombre de parois cellulaires dans la feuille et donc d'espaces intercellulaires. Ceci entraîne une diminution de la réflectance, une augmentation de la transmittance et donc des valeurs croissantes de N. On observe effectivement une relation de type hyperbole entre le SLA et N (Figure 3.12). La notion de surface spécifique est importante: combiné avec le taux d'échange en CO_2 (CER="CO_2 Exchange Rate"), le SLA fournit des informations intéressantes sur la croissance des plantes (Rawson et al., 1987).

Une fois le paramètre de structure N connu, il est possible d'inverser sur tout le domaine optique le système de Stokes et de calculer pour chaque feuille la réflectance et la transmittance d'une couche compacte équivalente (Gausman et al.; 1970). Considérons deux feuilles de structures internes très différentes: pour une feuille de maïs verte ($N = 1.1829$), l'inversion tend à diminuer la réflectance et à augmenter la transmittance (Figure 3.13a); Pour une feuille de tournesol verte($N = 1.7692$), l'effet de l'inversion est plus spectaculaire puisque les positions respectives des réflectances et transmittances de la feuille entière et de la couche élémentaire sont inversées (Figure 3.13b). Dans tous les cas, on se

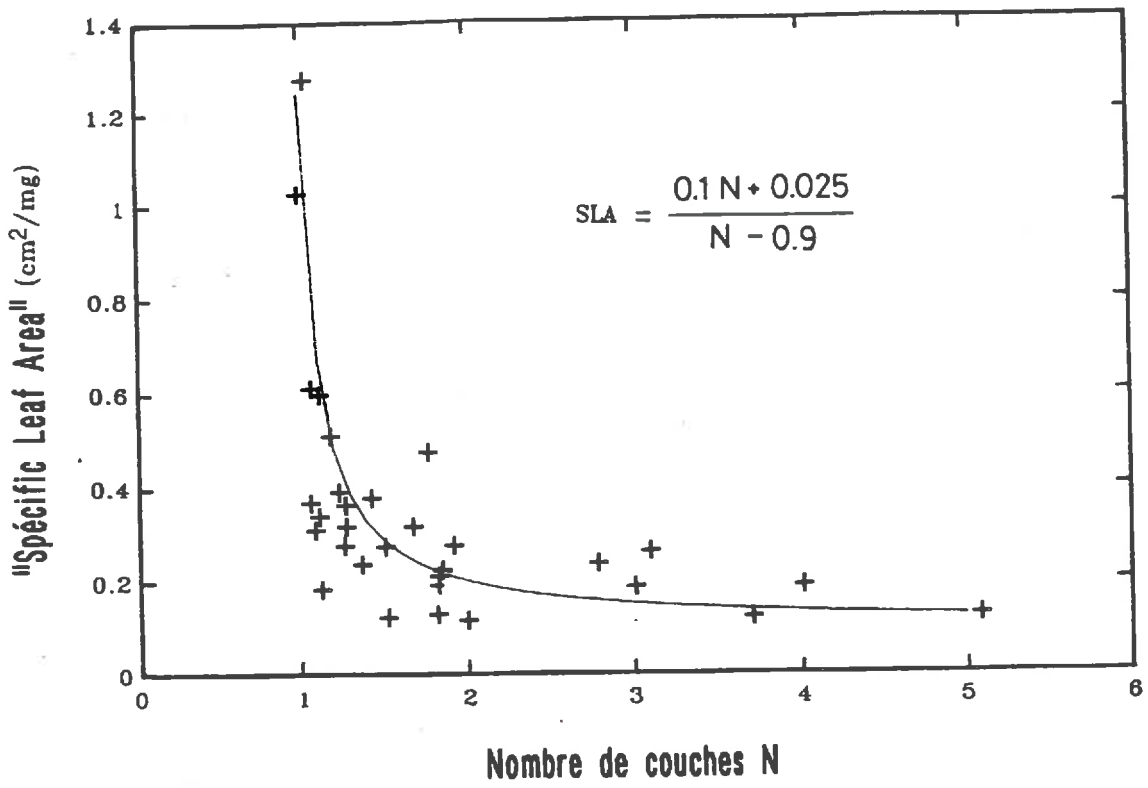


Figure 3.12: Relation entre le nombre de couches élémentaires N et la surface specifique des feuilles (SLA="Specific Leaf Area").

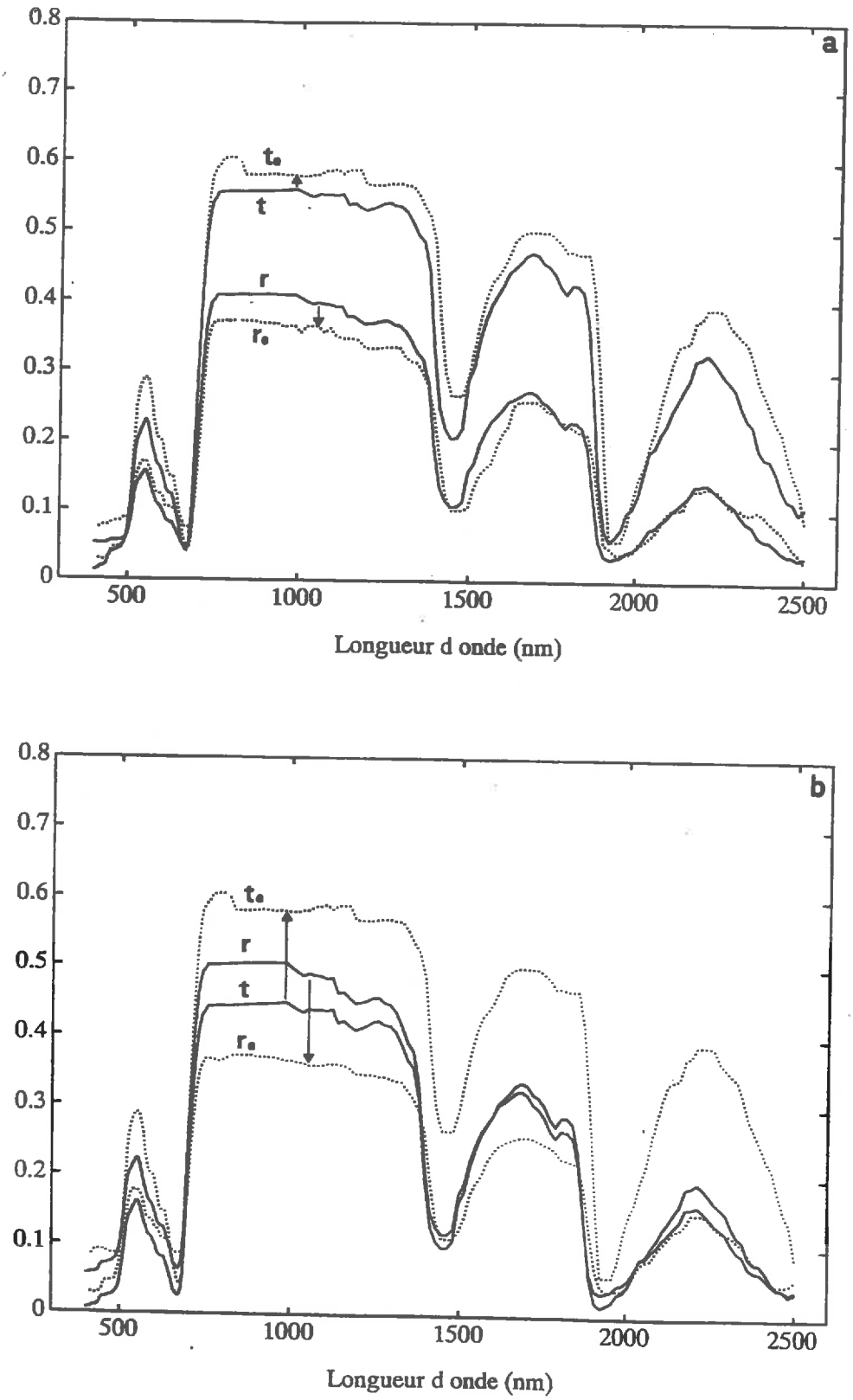


Figure 3.13: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de: (a) maïs vert (b) tournesol vert. Les traits pleins représentent le feuille entière, les pointillés la couche élémentaire.

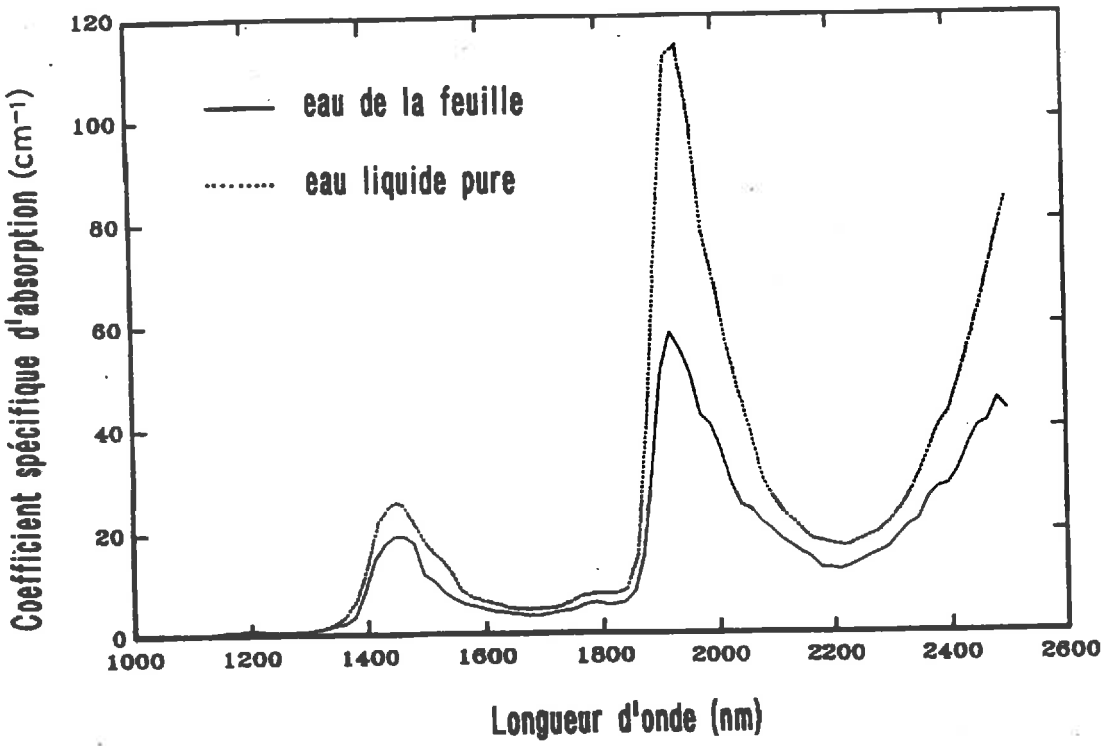


Figure 3.14: Coefficient spécifique d'absorption de l'eau des feuilles *in vivo* K_w (—) comparé au coefficient d'absorption de l'eau liquide pure (···) à 20°C (d'après Curcio et Petty, 1951).

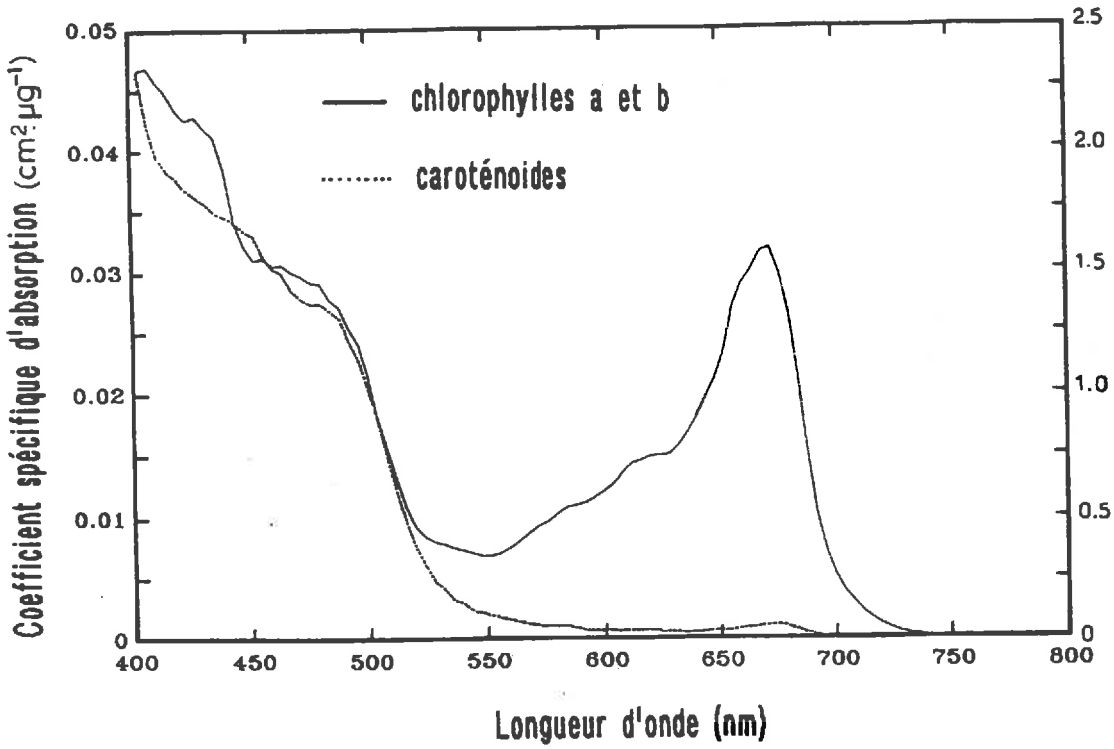


Figure 3.15: Coefficient spécifique d'absorption des caroténoïdes *in vivo* K_{x+c} (échelle de droite) (···) et de la chlorophylle a+b *in vivo* K_{ab} (échelle de gauche) (—).

ramène à des spectres dont les niveaux de réflectance et de transmittance dans le proche infrarouge sont identiques. Nous sommes désormais en mesure d'estimer les caractéristiques d'absorption intrinsèques des composants foliaires.

3.3.3 Calcul du spectre d'absorption spécifique des pigments et de l'eau

Une première étape consiste à calculer le coefficient de transmission ϕ de la couche compacte en minimisant, pour chaque longueur d'onde, $(\rho - \rho_\alpha)^2 + (\tau - \tau_\alpha)^2$ où ρ et τ sont la réflectance et la transmittance de la couche compacte, ρ_α et τ_α étant définis par les Equations 3.16 et 3.17. La minimisation porte ici sur la réflectance et la transmittance: on aurait pu de la même façon déterminer ϕ à partir de l'absorptance définie par $1 - (\rho + \tau)$; les résultats n'auraient guère été différents. Le coefficient d'absorption k est relié à ϕ par la relation 3.9 et, pour une longueur d'onde λ donnée, on peut l'écrire sous la forme:

$$k(\lambda) = \sum_i K_i(\lambda).C_i \tag{3.36}$$

où K_i est le coefficient d'absorption spécifique du composé i, C_i est la teneur en composé i par unité de surface. L'hypothèse de linéarité adoptée pour l'Equation 3.36 n'a pas vraiment de justification théorique: en l'absence d'information sur les effets conjugués des différents éléments absorbants, nous nous en contenterons. Pour revenir au cas de notre couche compacte idéale (albinos et sèche), les concentrations C_i (eau et pigments folaires) sont nulles alors que l'absorption ne l'est pas. Il faut donc ajouter un terme à l'Equation 3.36:

$$k(\lambda) = \sum_i K_i(\lambda).C_i + k_e(\lambda) \tag{3.37}$$

La Figure 3.9 montre une forte décroissance de k_e en deçà de 450 nm et met en évidence le rôle de composés autres que les pigments chlorophylliens dans l'absorption de la lumière. Il semble que l'activité optique de certains photorécepteurs joue un rôle dans la protection des cellules contre les dommages causés par la lumière lorsqu'on s'approche de l'ultraviolet (Maas et Dunlap, 1989). Dans le moyen infrarouge, on constate une absorption faible mais non nulle du rayonnement liée à la lignine, aux celluloses ...Les domaines d'influence de l'eau et des pigments étant clairement séparés, ces composants seront étudiés séparément.

L'eau

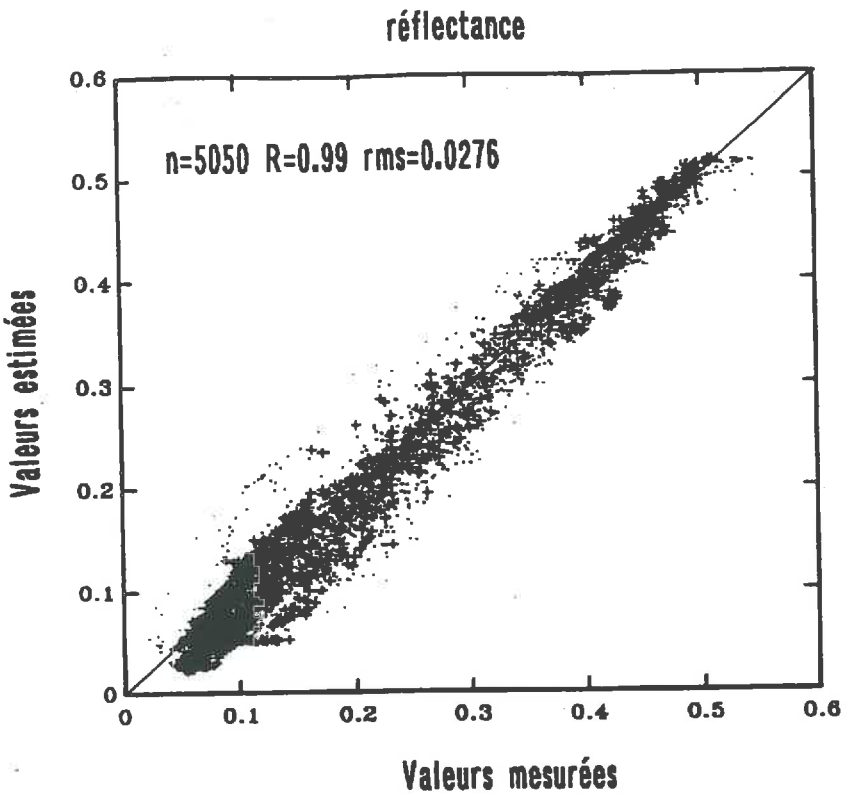
Entre 800 et 2500 nm, l'absorption du rayonnement par les molécules d'eau masque presque entièrement les effets de la cellulose, de la lignine, des sucres et des protéines (Peterson et al., 1988). On peut donc écrire:

$$k(\lambda) = K_w(\lambda).C_w + k_e(\lambda) \tag{3.38}$$

où $K_w(\lambda)$ est le coefficient d'absorption spécifique de l'eau exprimé en cm^{-1}, et C_w l'épaisseur équivalente en eau exprimée en cm. A chaque longueur d'onde λ, on calcule K_w qui est la pente de la relation linéaire 3.38. Le spectre de $K_w(\lambda)$ est conforme aux constantes fondamentales publiées par Curcio et Petty (1951) pour l'eau pure (Figure 3.14). Cela confirme le choix de Tucker et Garrat (1977) qui utilisent les coefficients de Curcio et Petty dans leur modèle, supposant que les différences entre ces données et les valeurs réelles (*in vivo*) étaient très faibles.

Les pigments foliaires

Dans le visible, l'absorption de la lumière par les feuilles vertes est due principalement aux chlorophylles a et b, et aux caroténoïdes. Théoriquement, le coefficient d'absorption k est relié à ces pigments par la relation:



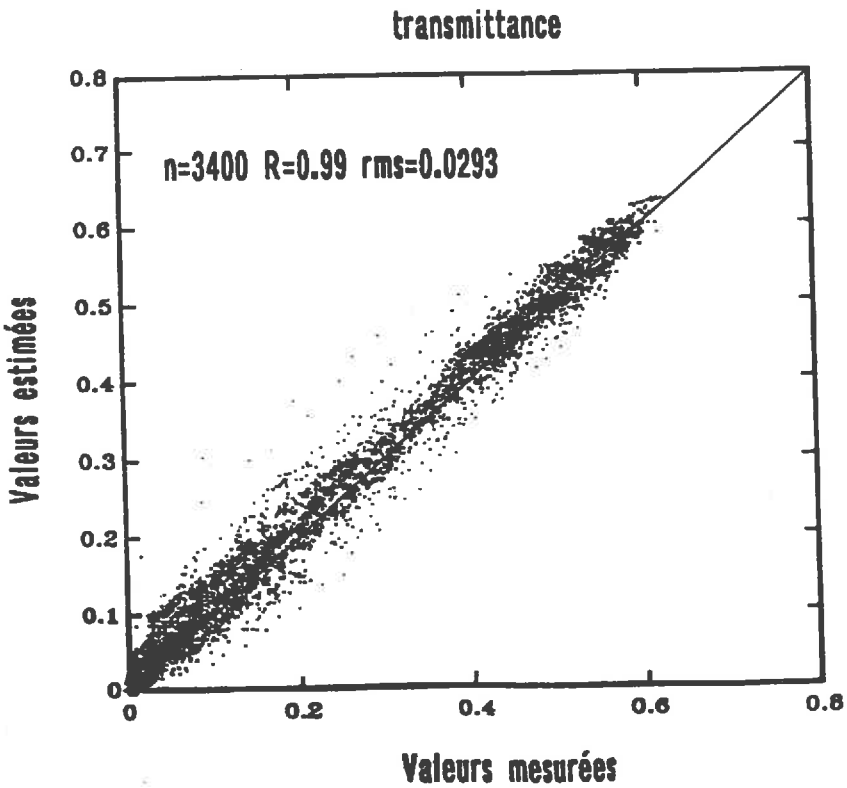


Figure 3.16 Comparaison entre valeurs mesurées et simulées de réflectance (a) et de transmittance(b). Les données correspondent à plusieurs expériences: la notre, celle de Andrieu et al. (1988), et celle de Malthus et al. (1989).

$$k(\lambda) = K_a(\lambda).C_a + K_b(\lambda).C_b + K_{x+c}(\lambda).C_{x+c} + k_e(\lambda) \tag{3.39}$$

où $K_a(\lambda), K_b(\lambda)$ et $K_{x+c}(\lambda)$ sont les coefficients d'absorption spécifiques de ces pigments ($cm^2.\mu g^{-1}$), et C_a, C_b et C_{x+c} les concentrations correspondantes ($\mu g.cm^{-2}$). A cause des fortes corrélations observées entre ces pigments photosynthétiques (Figure 3.8), nous n'avons pas pu séparer par une analyse statistique classique les différents coefficients d'absorption spécifique: les spectres présentaient des pics mal placés, voire absents là où on les attendait. Nous avons dû distinguer les feuilles vertes d'une part, et les feuilles étiolées jaunes pour lesquelles la concentration en chlorophylle est très faible d'autre part. Les spectres de K_{ab} et K_{x+c} sont classiques (Figure 3.15) et conformes aux spectres de ces pigments *in vitro* (Lichtenthaler, 1987). Il semble cependant que le coefficient spécifique d'absorption des chlorophylle a+b K_{ab} prenne implicitement en compte l'effet des caroténoïdes.

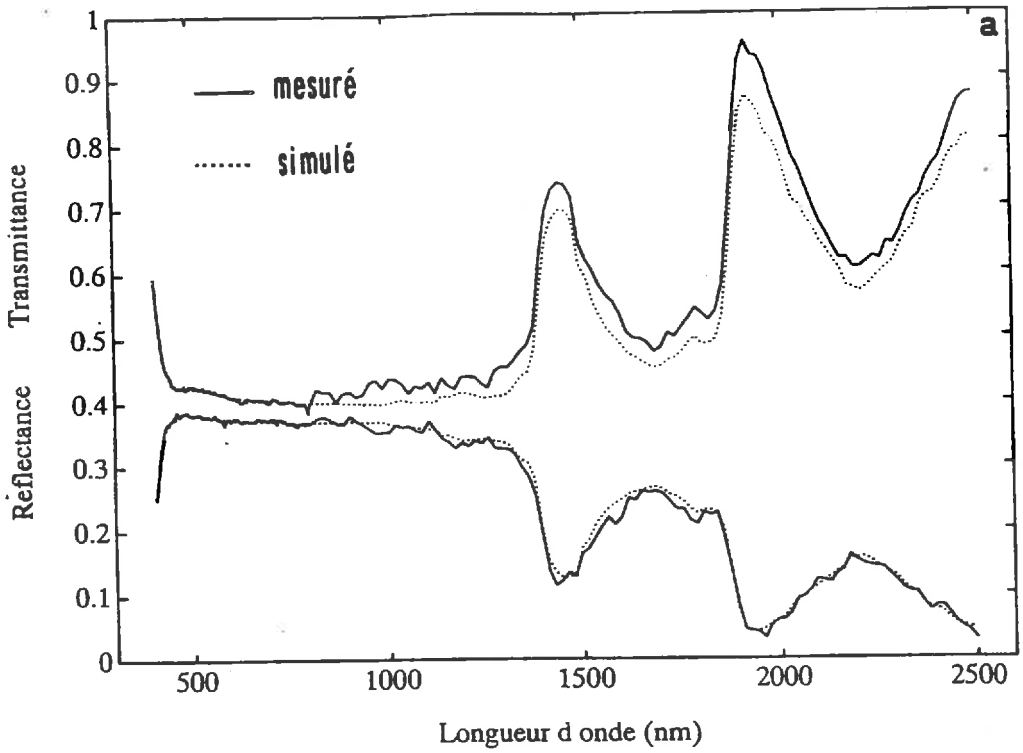
En ce qui concerne les pigments bruns qui apparaissent à la sénescence des feuilles, il n'existe pas à ce jour de méthode pour déterminer leur concentration: les feuilles sénescentes ont donc été écartées de cette étude. La difficulté rencontrée pour extraire et séparer les pigments photosynthétiques peut avoir plusieurs causes: d'abord, lorsqu'on mesure une concentration en caroténoïdes, on peut oublier d'autres pigments accessoires (lutéine, néoxanthine...) dont l'analyse quantitative n'est pas suffisamment précise (Sestak, 1985). D'autre part, les molécules de chlorophylle peuvent s'altérer dans le solvant, ce qui conduit à des estimations erronnées de leur concentration (Tucker et Garratt, 1977). Enfin, une des difficultés dans l'étude d'une régression multiple réside dans la structure des variables explicatives (les concentrations en pigments). En particulier, leur non orthogonalité rend très difficile leur séparation.

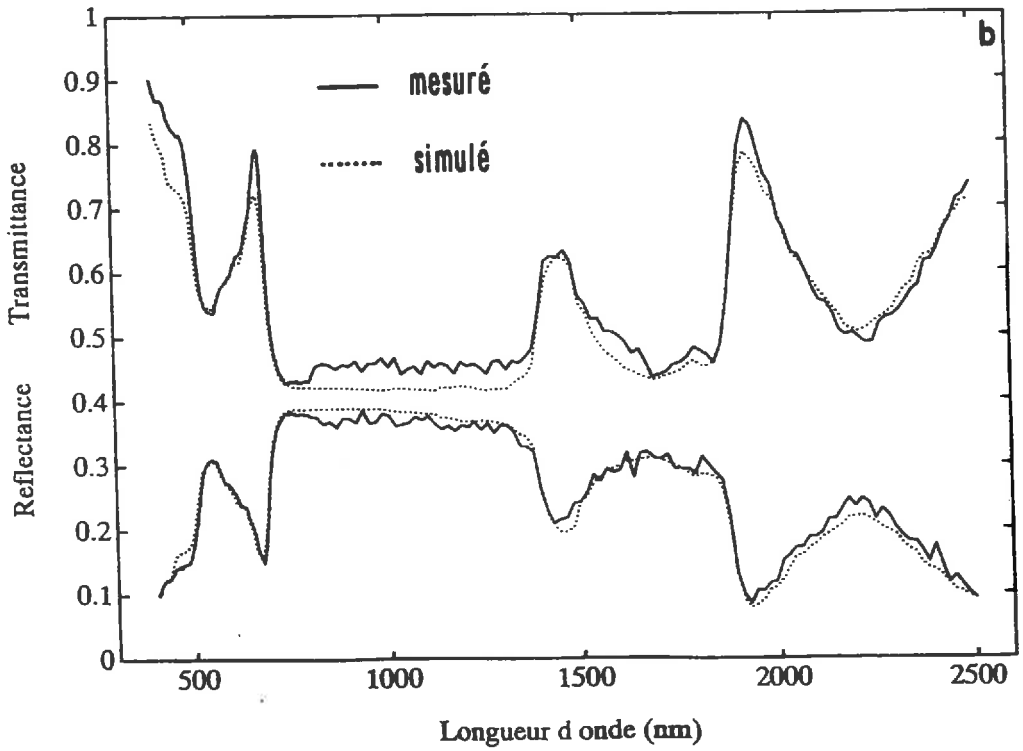
L'indice de réfraction n, l'absorption spécifique de l'eau K_w et de la chlorophylle K_{ab} qui représentent les propriétés optiques des matériaux foliaires, seront désormais considérés comme constants. Il est temps de tester la validité du modèle PROSPECT et de l'inverser.

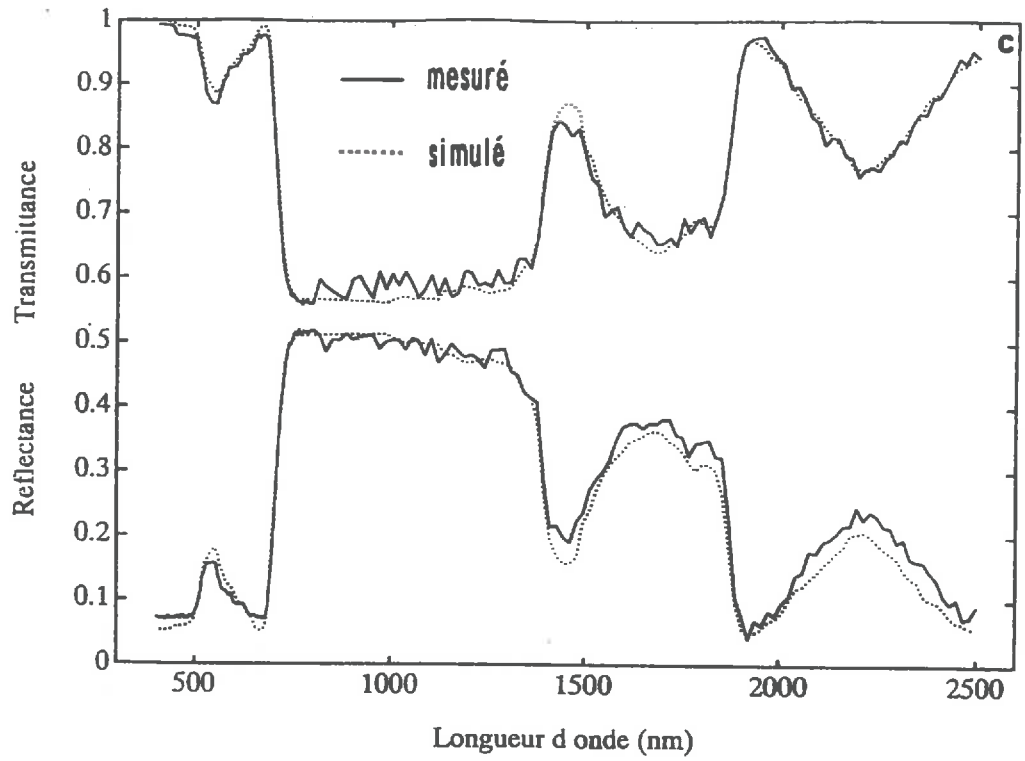
3.4 Validation du modèle PROSPECT

La validation a été menée sur quatre jeux de données indépendants: celui qui nous a servi à construire le modèle, et trois jeux extérieurs correspondant à des feuilles de blé (*Triticum aestivum*) (Andrieu et al., 1988) ou de betterave à sucre (*Beta vulgaris*) (Malthus et al., 1989). Des mesures de réflectance et parfois de transmittance étaient disponibles pour chaque feuille, ce qui n'était pas le cas pour les mesures biologiques. Ces jeux de données présentent une bonne variation de structure interne, de concentration en pigment et de teneur en eau. La relation entre les données simulées et les données mesurées montre une corrélation supérieure à 0.99 à la fois pour la réflectance et la transmittance. La Figure 3.16 ne présente pas de différences significatives entre les jeux de données: les *rms* sont de l'ordre de 0.03. Enfin, la précision du modèle semble être indépendante de la longueur d'onde, sauf dans le visible où les valeurs mesurées ont tendance à sous-estimer les sorties du modèle. On peut attribuer ce biais aux difficultées rencontrées pour séparer les pigments; cependant, l'hypothèse d'une distribution uniforme des pigments dans la feuille et la description simpliste de la rugosité de surface peuvent aussi l'expliquer. La transmittance dont la dynamique est plus grande est en général bien simulée sur tout le spectre.

La comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de réflectance et de transmittance à la longueur d'onde du minimum d'absorption (Figure 3.11) conduit à un *rms* encore plus faible ($rms = 0.0153, 2 \times 44 = 88$ points). Cela signifie que le paramètre N est une bonne représentation de la structure interne des feuilles. C'est vrai aussi pour les feuilles sénescentes caractérisées par une désorganisation cellulaire du mésophylle (faible réflectance et forte transmittance). Les résultats confirment la validité du modèle de structure et l'inversion du modèle de Stokes. Cette généralisation des travaux d'Allen, c'est-à-dire l'inversion à la fois sur les valeurs de réflectance et de transmittance, est


a
mesuré
simulé
Transmittance
Réflectance
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
500
1000
1500
2000
2500
Longueur d onde (nm)


b
mesuré
simulé
Transmittance
Reflectance
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
500
1000
1500
2000
2500
Longueur d onde (nm)



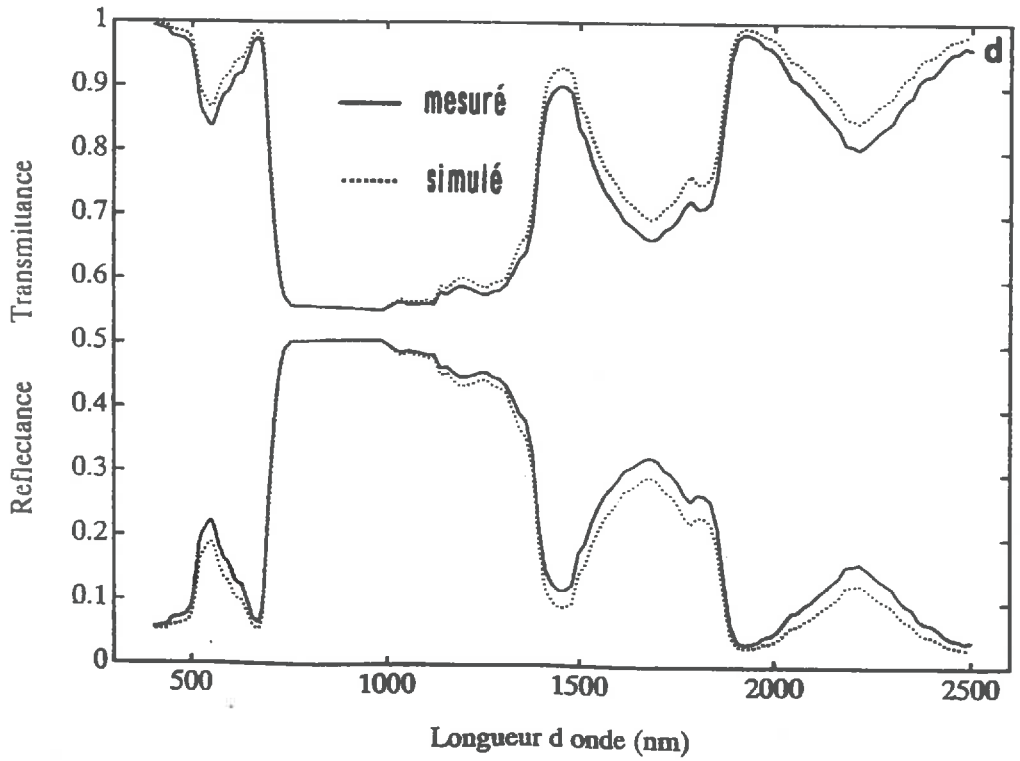
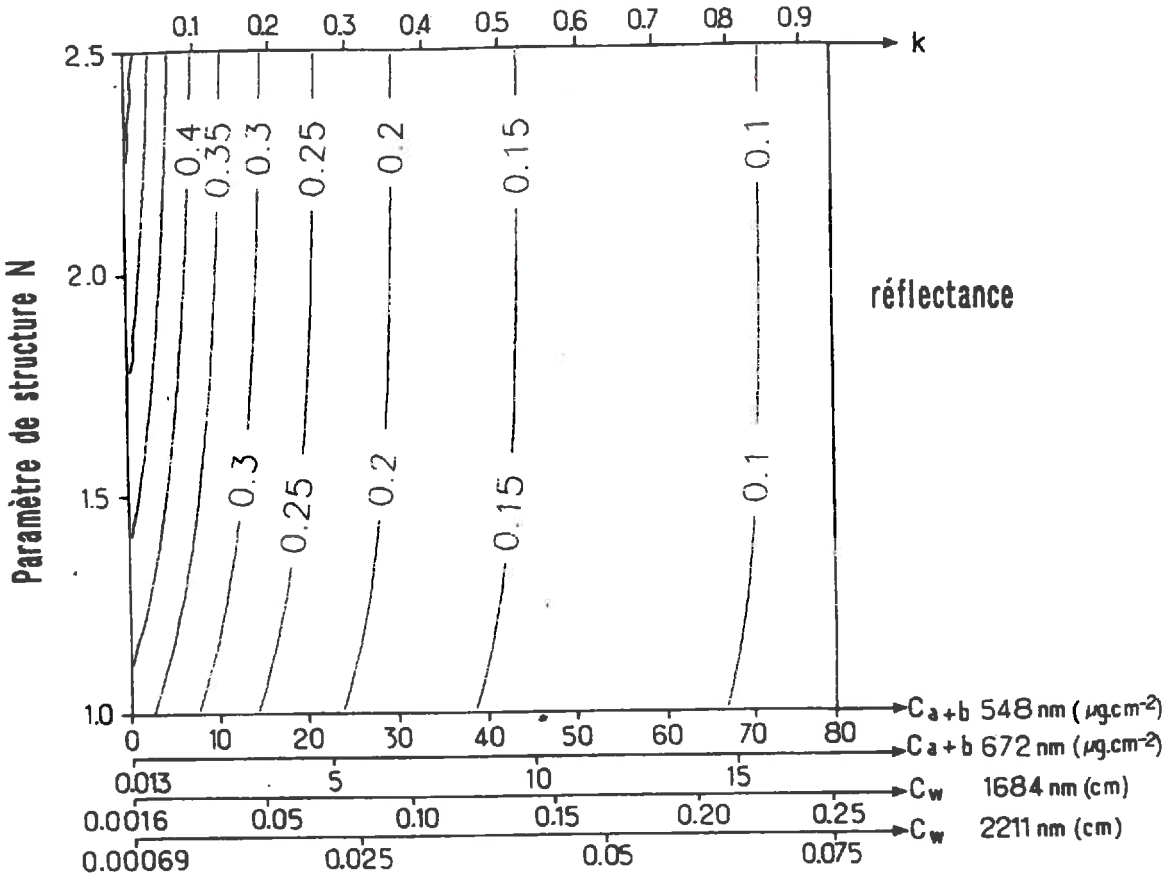


Figure 3.17: Comparaison entre la réflectance et la transmittance spectrales mesurées (—) et modélisées (···) pour: (a) une feuille de maïs albinos, (b) une feuille de maïs jaunissante, (c) une feuille de soja verte, (d) une feuille de tournesol verte.



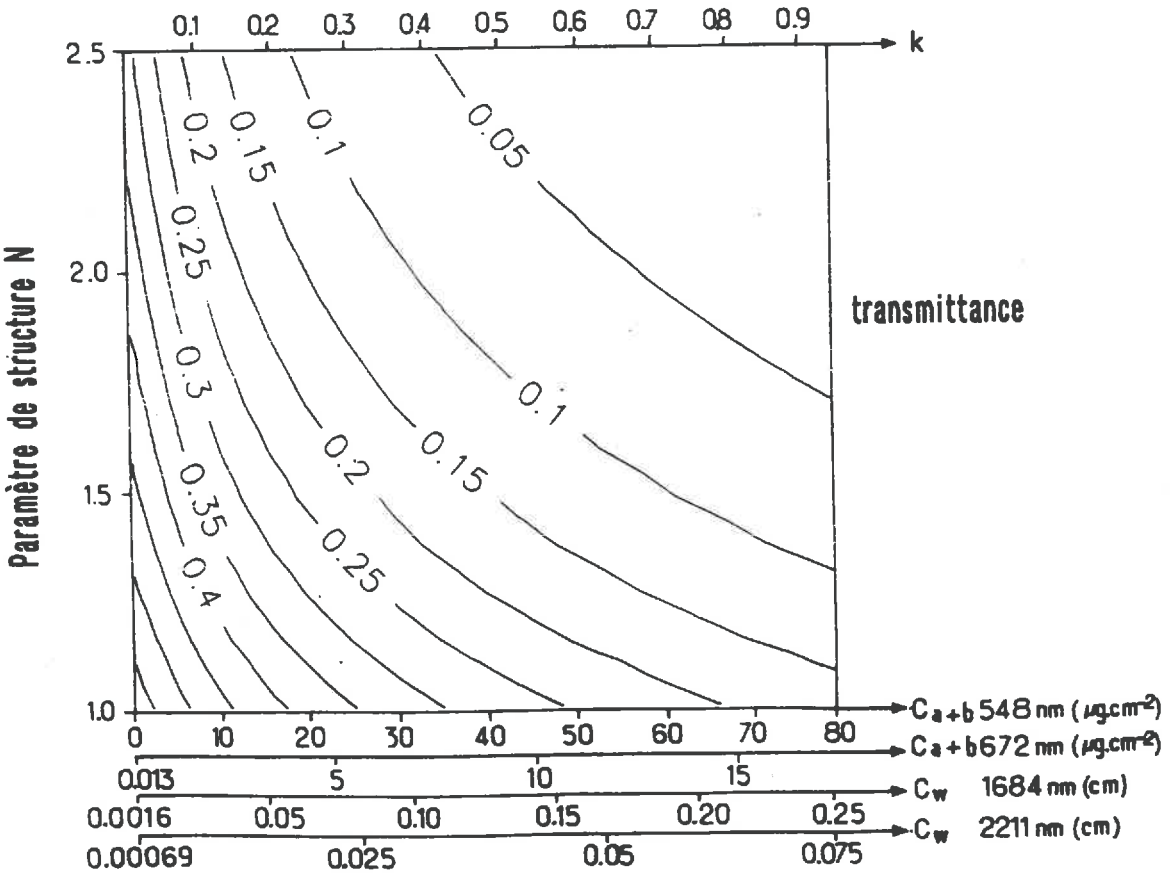


Figure 3.18: Réflectance (a) et transmittance (b) pour différentes valeurs de N et C (concentration en chlorophylle ou épaisseur équivalente en eau) à différentes longueurs d'onde.

nécessaire pour avoir une description correcte des propriétés optiques dans les domaines d'absorption.

En conclusion, PROSPECT permet de calculer, avec seulement trois variables d'entrée, des spectres de réflectance et de transmittance de feuilles entre 400 et 2500 nm pour des feuilles très différentes (Figure 3.17). Les différences de structure du mésophylle entre les Monocotylédones et les Dicotylédones sont correctement décrites par le paramètre N. L'absorption par les pigments et l'eau est correctement simulée avec les concentrations C_{ab} et C_w. Il est donc possible d'envisager l'inversion du modèle.

3.5 Inversion du modèle PROSPECT

L'inversion a pour but d'estimer les paramètres foliaires à partir des valeurs de réflectance et de transmittance mesurées au spectrophotomètre. Nous allons d'abord procéder à une analyse de sensibilité du modèle (fonctionnement en mode direct) qui devrait nous donner des informations utiles sur l'inversion.

3.5.1 Analyse de sensibilité

La simulation de spectres de feuilles permet de tester l'influence relative de chaque paramètre contrôlant la réponse spectrale. L'absorption est déterminée par un coefficient d'absorption k défini comme le produit d'un coefficient spécifique d'absorption dépendant de la longueur d'onde mais indépendant de la feuille, par une concentration en pigment (C_{ab}) ou une épaisseur équivalente en eau (C_w) qui elles, dépendent seulement de l'état physiologique de la plante. Pour donner plus de généralité à l'analyse de sensibilité, nous raisonnerons désormais en terme de coefficient d'absorption. Les Figures 3.18a et 3.18b représentent les variations de la réflectance et de la transmittance des feuilles en fonction de l'indice de structure N et du coefficient d'absorption k. Comme nous l'avons déjà constaté, la transmittance est plus sensible aux paramètres du modèle que la réflectance. Pour une valeur de N donnée, la réflectance et la transmittance varient fortement lorsque le coefficient d'absorption est faible, et elles tendent vers une limite pour de fortes absorptions. En outre, les propriétés optiques des feuilles sont d'autant plus sensibles à la structure interne du mésophylle que k est faible. En conclusion, l'inversion du modèle pour le paramètre N est plus efficace dans le proche infrarouge. L'inversion du modèle pour la concentration en pigments et la teneur en eau est plus complexe car la longueur d'onde optimum dépend du niveau de concentration: comme le montrent les relations expérimentales (Figure 3.19) et théoriques (Figure 3.20) établies avec la chlorophylle, pour de faibles concentrations, la sensibilité est maximum lorsque l'absorption est maximum, c'est-à-dire le rouge (672 nm) ou le bleu (450 nm); lorsque la concentration en pigments est forte, l'inversion est plus efficace dans les bandes de faible absorption, c'est-à-dire le vert (548 nm) et la transition entre le rouge et le proche infrarouge ("red edge"). En l'absence d'information sur la concentration, il serait astucieux de choisir des longueurs d'onde correspondant à une variation brusque du coefficient spécifique d'absorption: c'est justement le cas du "red edge". Ces simulations sont utiles car elles guident l'inversion qui sera développée dans le paragraphe suivant.

3.5.2 Inversion

Toute méthode d'inversion doit respecter un certain nombre de conditions dont les plus importantes sont l'existence, l'unicité et la stabilité des solutions. Il est souvent nécessaire d'imposer des contraintes. Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le choix d'une ou plusieurs longueurs d'onde est assez délicat en l'absence d'information sur les feuilles. Il a donc été décidé de conserver toute l'information spectrale et de minimiser Δ^2 sur tout le spectre:

$$\Delta^2 = \sum_{\lambda=400\ nm}^{\lambda=2500\ nm} [R_{mes}(\lambda) - R_{mod}(\lambda, N, C_{ab}, C_w)]^2 + [T_{mes}(\lambda) - T_{mod}(\lambda, N, C_{ab}, C_w)]^2 \qquad (3.40)$$

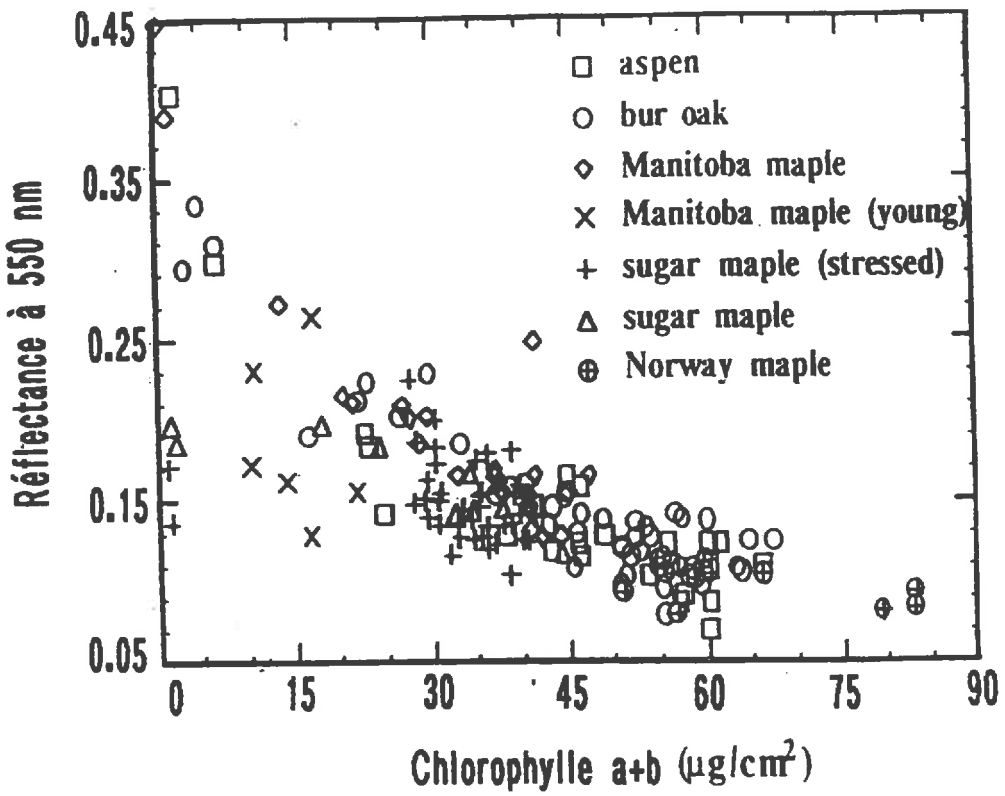


Figure 3.19: Relation entre la réflectance à 550 nm et la concentration en chlorophylle a+b pour six espèces de feuilles caduques (d'après Belanger, 1990).

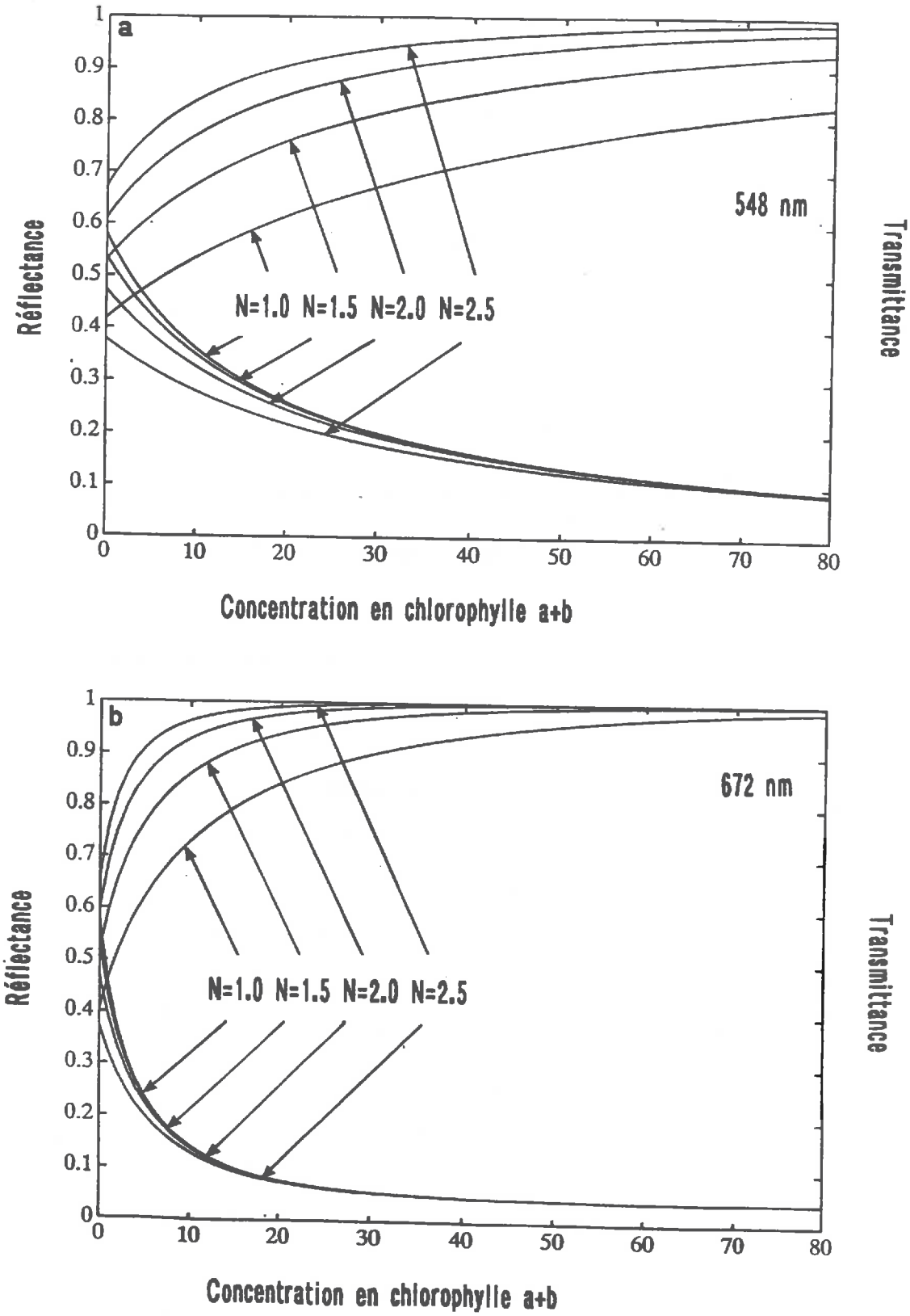


Figure 3.20: Variation de la réflectance et de la transmittance d'une feuille en fonction de la concentration en chlorophylle a+b: (a) à 548 nm, (b) à 672 nm, pour différents indices de structure N.

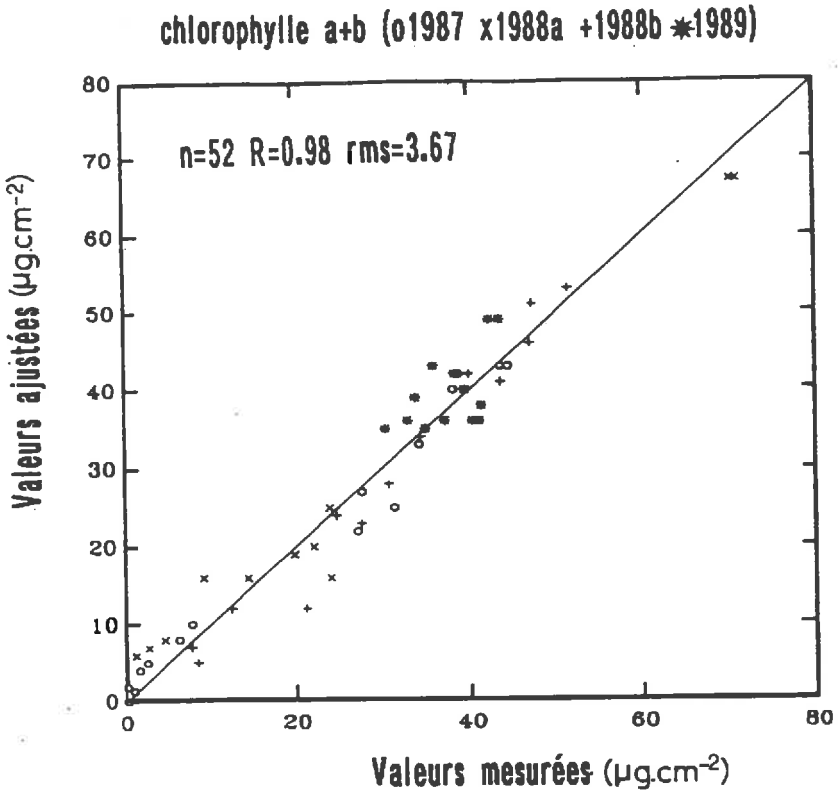


Figure 3.21: Estimation de la concentration en chlorophylle a+b pour différents jeux de données.

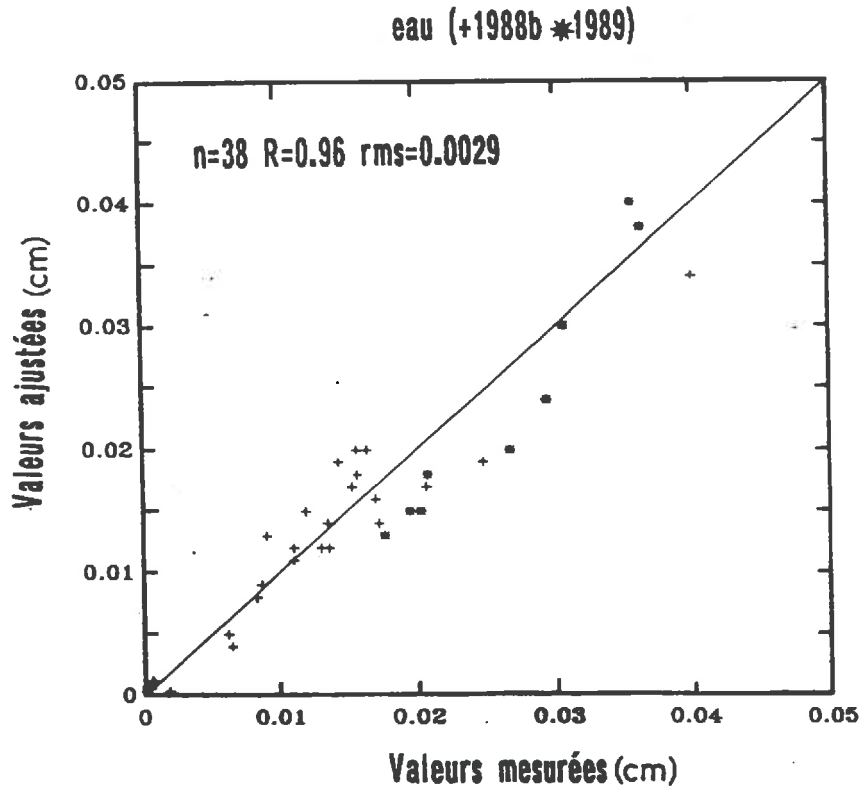


Figure 3.22: Estimation de l'épaisseur équivalente en eau pour différents jeux de données.

avec R_{mes} et T_{mes} les données expérimentales, R_{mod} et T_{mod} les données simulées par PROSPECT pour un indice de structure N, une concentration en chlorophylle C_{ab}, et une épaisseur équivalente en eau C_w. L'inversion a été testée sur notre jeu de données et sur les jeux extérieurs pour lesquels les mesures biologiques étaient disponibles. On peut remarquer que Δ^2 peut être calculé avec le premier terme de l'Equation 3.40 si seules les réflectances sont mesurées. Les Figures 3.21 et 3.22 montrent que les estimations de C_w et C_{ab} sont en accord avec les valeurs mesurées. Il n'y a pas de biais systématique et la précision ne dépend pas des niveaux de concentration. Le rms pour la concentration en chlorophylle ($rms = 3.669 \mu g.cm^{-2}$) est meilleur que celui obtenu par Yamada et Fujimura (1990), certes sur des données différentes, avec leur modèle multicouche. Une telle méthode peut être proposée comme mesure non destructrice *in situ* des paramètres biologiques de la feuille.

La reconstruction de spectre à partir de valeurs ajustées de C_{ab}, C_w et N est un autre moyen de tester la qualité de PROSPECT. Pour cela, tous les spectres disponibles ont été inversés afin de déterminer les trois paramètres du modèle. Ces variables ont alors été utilisées pour simuler les propriétés optiques des feuilles. La comparaison entre les spectres réels et reconstruits conduit à des coefficients de corrélation forts ($R^2 = 0.99$) et des rms faibles (8657 données, $rms = 0.0262$ pour la réflectance; 5200 données, $rms = 0.0274$ pour la transmittance).

3.6 Conclusion partielle

Ce chapitre montre la capacité de PROSPECT à synthétiser les propriétés optiques de feuilles très différentes avec 3 paramètres seulement: un indice de structure N, la concentration en chlorophylle C_{ab} et l'épaisseur équivalente en eau C_w. Sa simplicité est son atout majeur; elle est aussi sa principale limitation. Par exemple, la description succinte de la structure interne du mésophylle ne permet pas de modéliser la différence entre la réflectance de la face supérieure du limbe et la face inférieure. De même, nous supposons que l'eau et les pigments sont distribués de façon uniforme dans la feuille: or dans une feuille de Dicotylédone, les cellules du parenchyme palissadique sont beaucoup plus riches en chloroplastes que celles du mésophylle spongieux. Les aspects de surface sont mal pris en compte par le modèle. Enfin, il faudrait inclure dans le modèle les autres pigments foliaires tels que les carotènes et les anthocyanes, et surtout les autres constituants tels que la lignine, la cellulose, l'azote ... dont nous avons vu l'importance dans les modèles de croissance des plantes ou les modèles de cycles biogéochimiques.

Enfin PROSPECT peut être couplé directement à la plupart des modèles de réflectance des couverts: on dispose ainsi d'un outil très puissant d'étude de la réflectance spectrale de la végétation. Il manque cependant encore un élément: les propriétés optiques des sols dont la modélisation fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

SOILSPECT: un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol

Si on veut relier les propriétés spectrales d'un sol avec sa composition minérale ou sa teneur en eau, il est nécessaire de s'affranchir des effets liés à la rugosité et à la géométrie de mesure (angles zénithaux et azimutaux). Comme Vincent et Hunt (1968) ou Idso et al. (1975), on peut corriger ces effets par des relations empiriques, mais dans ce cas, on perd l'information concernant la rugosité et la fonction de phase de la surface étudiée. Un meilleur moyen serait d'utiliser un modèle de réflectance bidirectionnelle qui permettrait de séparer "proprement" les composantes spectrale et directionnelles du signal. Nous avons suivi cette dernière approche en généralisant le modèle de transfert radiatif d'Hapke (1981) de manière à isoler les paramètres dépendants de la longueur d'onde, des autres paramètres du modèle. Bien qu'il existe de nombreux modèles de réflectance bidirectionnelle dans la littérature (cf chapitre 1), nous avons choisi ce modèle pour plusieurs raisons:

- la réflectance de la surface est reliée à des paramètres qui ont un sens physique: un albédo de simple diffusion, une fonction de phase des particules, et la rugosité de surface.
- ce modèle a été validé au laboratoire, sur des surfaces planétaires variées (Hapke, 1977) et sur des sols terrestres (Pinty et al., 1989).

Une première partie consistera à décrire le modèle d'Hapke et les modifications que nous y avons apporté. Pour simplifier, nous l'appellerons désormais SOILSPECT. Afin de tester la validité de ce modèle, nous avons réalisé une expérience au laboratoire, dont les données nous servirons à caler les paramètres du modèle. La dépendance spectrale de ces paramètres sera discutée en fonction des résultats de l'inversion.

4.1 Théorie

4.1.1 Présentation du modèle

L'équation de transfert radiatif

Considérons une surface plane d'altitude $z = 0$, contenant des particules sphériques irrégulières, orientées au hasard et dont la dimension est grande devant la longueur d'onde (on ignore les diffusions de Rayleigh et Mie). Ce milieu est éclairé dans la direction (i, ψ) par un faisceau lumineux collimaté d'intensité J et est observé par un détecteur dans la direction $(e, 0)$. L'angle de phase g est décrit par l'écart entre ces deux directions. La radiance par unité de surface et d'angle solide du détecteur I peut être considérée comme la somme d'une diffusion simple I_s et d'une diffusion multiple I_m: $I = I_s + I_m$. Chandrasekhar (1960) a montré que, pour un milieu semi infini, I_m était moins sensible à la fonction

auteur	*catégorie*	*fonction de phase*
Hapke (1963)	spéculaire	$\frac{4}{9}(1-\frac{1}{2}\cos g)^2$
Van de Hulst (1957)	rétrodiffusion	$\frac{2}{3\pi}(\sin g+(\pi-g)\cos g)/\pi$
Hapke (1963)		$\frac{2}{3\pi}[\frac{\sin g+(\pi-g)\cos g}{\pi}+\frac{(1-\cos g)^2}{10}]$
Henyey et Greenstein (1941)	mixte	$\frac{1-\theta^2}{[1+\theta^2-2\theta\cos(\pi-g)]^{3/2}}$
Hapke (1981), Pinty et al. (1989)		$1+b\cos g+c\frac{3\cos^2 g-1}{2}$
Pinty et Ramond (1986)		$1+(1-k)\cos^2 g$

Tableau 4.1: Quelques fonctions de phase extraites de la littérature.

de phase des particules que I_s. Le terme de diffusion simple est donc calculé de façon exacte pour n'importe quelle fonction de phase $P(g)$, alors qu'on suppose une diffusion isotrope ($P(g) = 1$) pour la diffusion multiple:

$$I_s = \frac{J\omega}{4\pi}\frac{\cos i}{\cos i + \cos e}P(g) \tag{4.1}$$

$$I_m = \frac{J\omega}{4\pi}\frac{\cos i}{\cos i + \cos e}\{H(\cos i)H(\cos e) - 1\} \tag{4.2}$$

où ω est l'albédo de simple diffusion (rapport entre l'énergie diffusée et l'énergie totale soit diffusée, soit absorbée par les particules) et $P(g)$ la fonction de phase des particules; l'expression $H(\cos i)H(\cos e) - 1$ permet d'approximer la diffusion multiple:

$$H(x) = \frac{1 + 2\,x}{1 + 2\sqrt{1-\omega}\,x} \tag{4.3}$$

L'équation de transfert radiatif s'écrit donc:

$$I = \frac{J\omega}{4\pi}\frac{\cos i}{\cos i + \cos e}\{P(g) + H(\cos i)H(\cos e) - 1\} \tag{4.4}$$

Ces équations ont été utilisées avec succès par Hapke (1981) et Pinty et al. (1989) pour décrire la réflectance bidirectionnelle de sols rugueux. Nous les avons un peu modifiées afin de les généraliser.

La fonction de phase $P(g)$

Elle décrit la distribution spatiale de la lumière réfléchie par une surface donnée. Selon la nature des objets constituant cette surface, la fonction de phase peut être de 4 types:

- **diffusion isotrope:** $P(g) = 1$.
- **diffusion spéculaire:** la lumière est réfléchie préférentiellement dans la direction opposée à celle de l'éclairement.
- **rétrodiffusion:** la lumière est réfléchie préférentiellement dans la direction d'éclairement. Ce cas s'applique à des particules opaques présentant des faces rugueuses orientées au hasard.
- **diffusion mixte:** elle regroupe tous les cas intermédiaires entre la diffusion spéculaire et la rétrodiffusion, les deux effets pouvant être conjugués avec un minimum de diffusion près de la normale à la surface.

L'expression de la fonction de phase n'a souvent aucune justification théorique: on la choisit pour sa simplicité et parce qu'elle illustre un type de diffusion pour une expérience donnée (Tableau **4.1**). On constate dans ce tableau que la fonction de phase dépend toujours de l'angle de phase g quel que soit le comportement de la surface. Considérons les courbes isophases (même angle de phase) correspondant à différents angles d'éclairement: pour un éclairement vertical ($i = 0^o$), on observe des cercles concentriques, ce qui signifie qu'il n'y a pas de direction privilégiée en azimut (Figure 4.1a). Lorsque l'angle d'éclairement augmente ($i = 30^o$ et $i = 60^o$), les isophases deviennent des portions d'ellipses incurvées vers la direction d'éclairement et parallèles entre elles (Figures 4.1b et 4.1c).

On peut de même tracer les isocontours d'une fonction de phase: nous allons prendre pour $P(g)$ un polynôme de Legendre (Pinty et al., 1989), $P(g) = 1 + b\cos g + c\frac{3\cos^2 g - 1}{2}$, et considérer un angle d'éclairement rasant, $i = 60^o$. Une rétrodiffusion dominante (Figure 4.2a) est assez bien simulée par $P(g)$; en revanche, une telle paramétrisation ne peut pas représenter correctement l'effet spéculaire qui est concentré dans la direction opposée à celle de l'éclairement (Figure 4.2b). Nous avons donc été amenés à définir un angle d'anti-phase g', dont les isocontours sont symétriques à ceux de l'angle

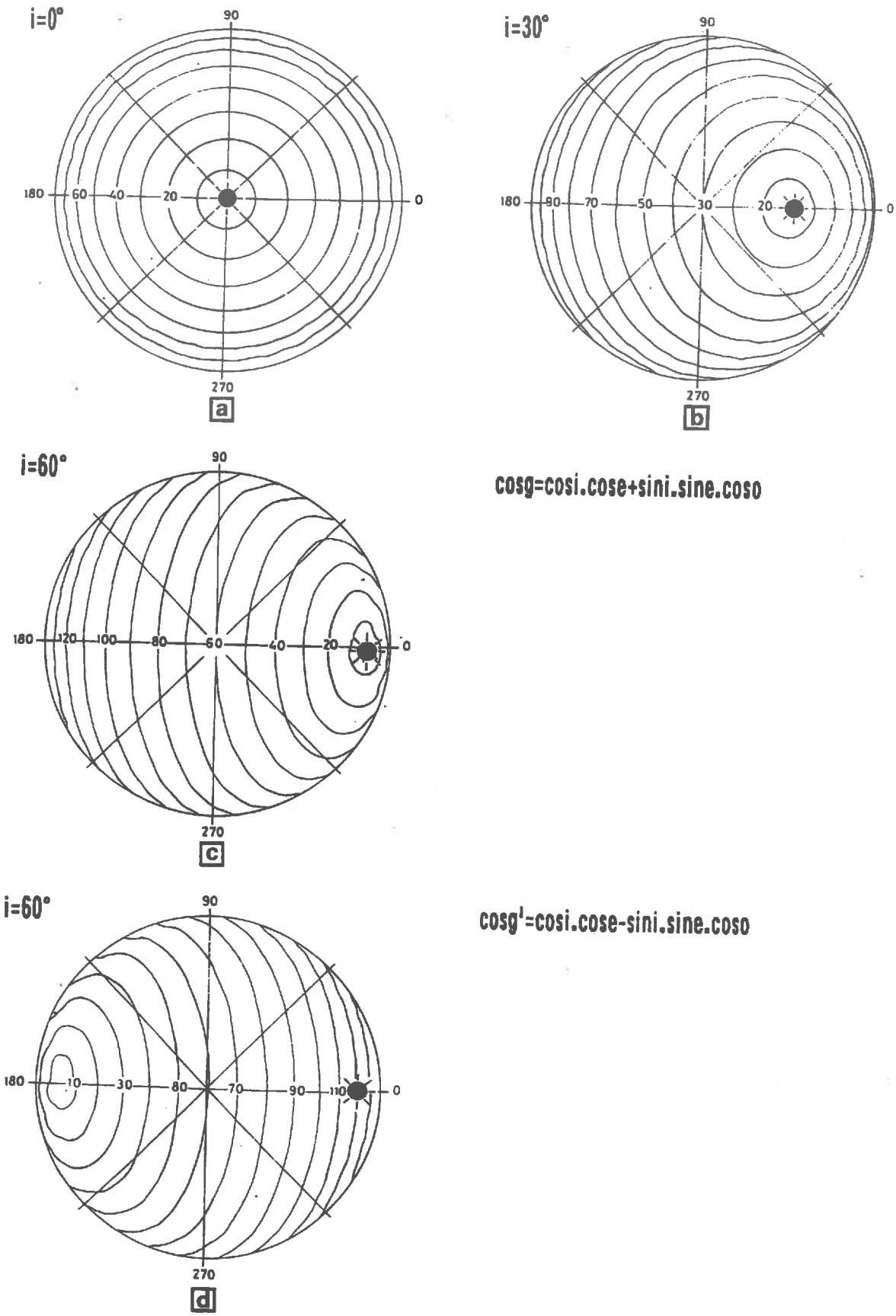


Figure 4.1: Isocontours de l'angle de phase pour trois angles d'incidence: (a) i=0°, (b) i=30°, (c) i=60°. Isocontours de l'angle d'anti- phase pour: (d) i=60°.

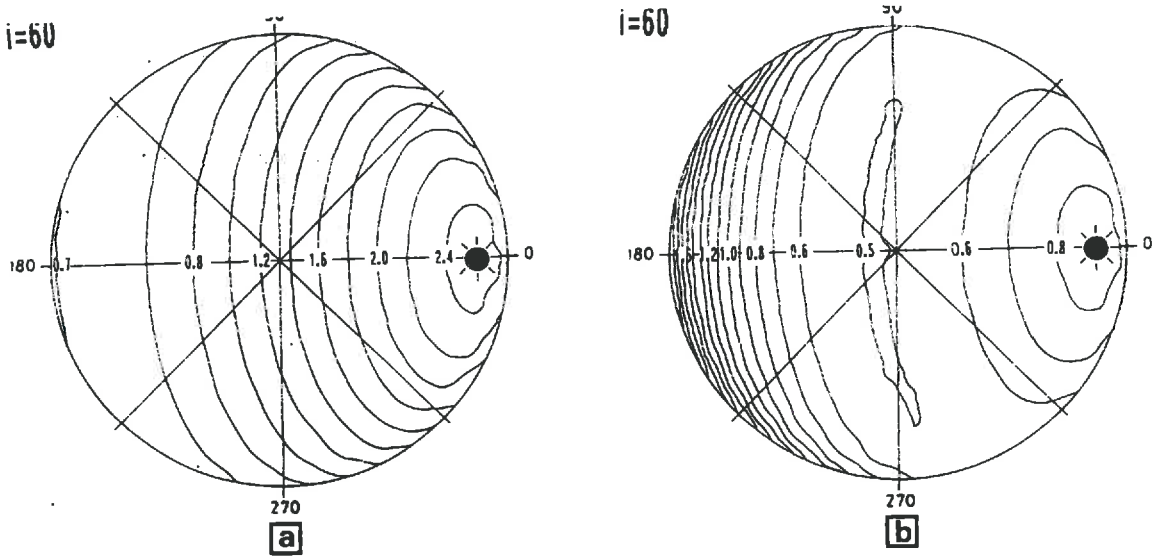


Figure 4.2: fonction de phase $P(g) = 1 + b\cos g + c\frac{3\cos^2 g - 1}{2}$ pour les paramètres suivants: (a) b=0.82 et c=0.67, (b) b=-0.82 et c=0.67 (d'après les valeurs déterminées par Pinty et al., 1989).

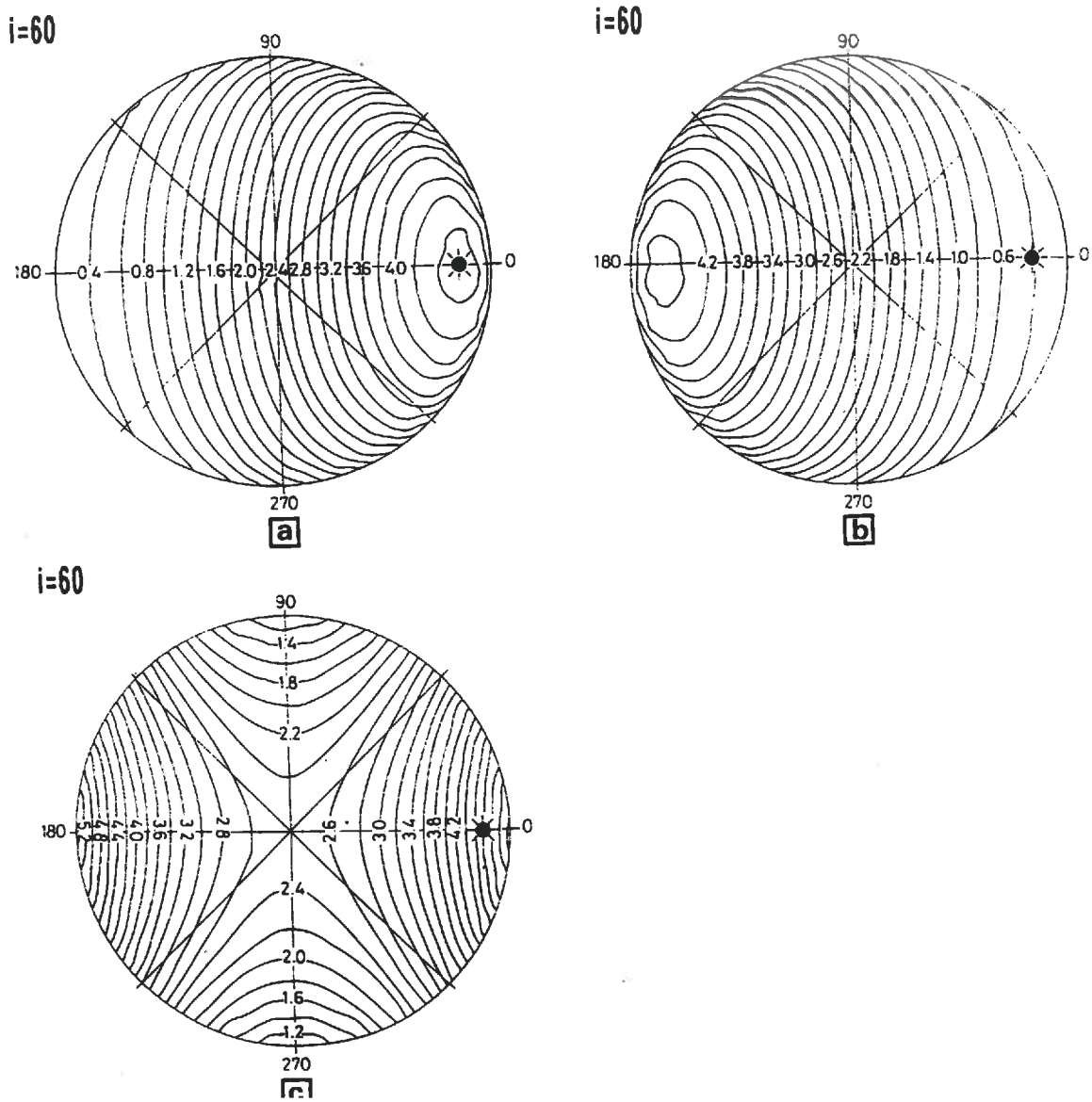


Figure 4.3: Fonction de phase $P(g, g') = 1 + b\cos g + c\frac{3\cos^2 g - 1}{2} + b'\cos g' + c'\frac{3\cos^2 g' - 1}{2}$ pour trois types de réflexion: (a) rétrodiffusion (b,c,b',c')=(2,1,0,0), (b) réflexion spéculaire (b,c,b',c')= (0,0,2,1), (c) diffusion mixte (b,c,b',c')=(0,2,0,2).

de phase g (Figure 4.1d), et à construire une fonction de phase moyenne $P(g,g')$ approximée par des polynômes de Legendre, capable d'expliquer aussi bien la rétrodiffusion que l'effet spéculaire qui caractérise les sols lisses.

$$P(g,g') = 1 + b\ \cos g + c\ \frac{(3\cos^2 g - 1)}{2} + b' \cos g' + c' \frac{(3\cos^2 g' - 1)}{2} \tag{4.5}$$

$$\text{avec} \begin{cases} cosg = \cos i \cos e + \sin i \sin e \cos \psi \\ cosg' = \cos i \cos e - \sin i \sin e \cos \psi \end{cases} \tag{4.6}$$

Comme pour toute fonction de phase, $P(g,g')$ est normalisée de façon à avoir $\int_{4\pi} P(g,g') \frac{d\Omega}{4\pi} = 1$ (cas conservatif d'une diffusion parfaite). La Figure 4.3 montre les variations de $P(g,g')$ pour trois types de diffusion: rétrodiffusion (4.3a), effet spéculaire (4.3b), et diffusion mixte (4.3c). On constate que les régimes de diffusion sont représentés de façon réaliste, ce qui n'était pas le cas auparavant. Cependant, la fonction de phase n'est pas suffisante pour expliquer les propriétés de réflectance des sols rugueux: il faut prendre en compte l'effet d'opposition ou de "hot spot".

L'effet d'opposition

Supposons que la macrostructure du sol soit modélisée par un système discontinu de particules, séparées par des vides d'air: Hapke (1963) a montré que pour un angle de phase faible ($g \leq 20^o$), la probabilité d'éclairement d'une particule et celle de fuite de la lumière vers le détecteur n'étaient pas indépendantes car la lumière s'échappe préférentiellement dans la direction du "hot spot". Cette fuite de probabilité 1 s'applique uniquement au terme de diffusion simple I_s. Hapke (1963) a introduit une fonction de rétrodiffusion $B(g)$ afin de prendre en compte l'effet d'opposition. Cette fonction dépendait initialement, de l'angle de phase g, d'un paramètre de rugosité h relié à la porosité du milieu et d'un terme empirique B_o décrivant l'amplitude du "hot spot". Becker et al. (1985) ont de même construit une fonction de cavité CF dépendant d'un paramètre de cavité p défini par $p = \frac{R}{d}$, R étant le rayon et d la profondeur de la cavité. En supposant que les particules formant la surface n'étaient pas opaques, Hapke (1986) a introduit un terme $S(0)$ défini comme la fraction de lumière diffusée près de la surface pour un angle de phase nul: $B_o = \frac{S(0)}{\omega P(0)}$. Comme l'ont fait remarquer Pinty et Verstraete (1990), le paramètre B_o ne découle pas directement de la théorie. Dans certains cas, l'inversion du modèle conduit à $S(0) > 1$ ce qui est un non-sens physique! En ce qui nous concerne, nous sommes revenu à une formulation simplifiée de B_o en le fixant à 1. L'équation de transfert radiatif 4.4 s'écrit donc:

$$I = \frac{J\omega}{4\pi} \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} \{([1 + B(g)]P(g) + H(\cos i)H(\cos e) - 1\} \tag{4.7}$$

$$\text{avec } B(g) = \frac{1}{1 + \frac{1}{h} \tan \frac{g}{2}} \tag{4.8}$$

l'équation 4.8 montre clairement que, pour un angle de phase donné g, une augmentation de h conduit à une augmentation de la fonction de rétrodiffusion.

4.1.2 Conséquences

La réflectance bidirectionnelle des sols s'écrit donc en fonction des six paramètres suivants: ω, h, b, c, b' et c'. L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet de calculer la réflectance pour des géométries de mesure autres que celles qui ont servi à la calibration (Pinty et al., 1989), et donc d'améliorer l'estimation de l'albédo. En outre, du fait de la formulation simple du modèle, on peut donner une expression analytique de la réflectance directionnelle/hémisphérique (albédo) et la réflectance bihémisphérique qui sont des variables d'entrée du modèle $SAIL$.

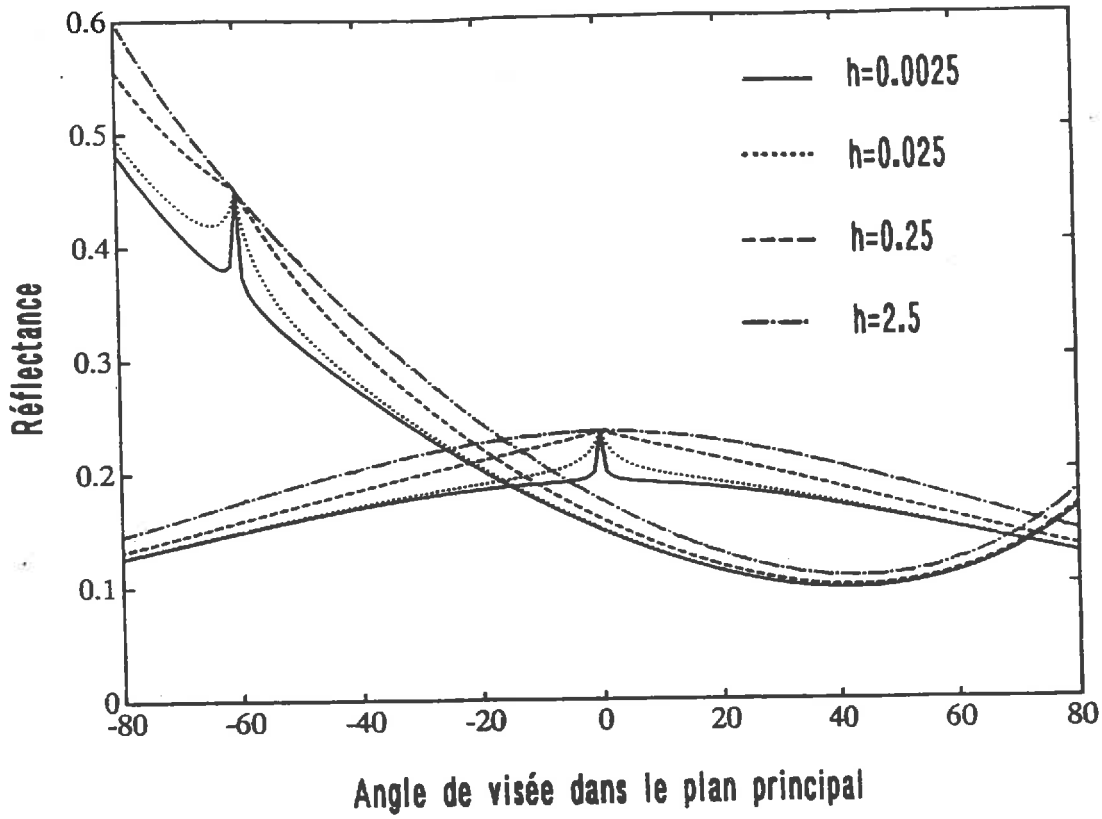


Figure 4.4: Réflectance bidirectionnelle calculée dans le plan principal (les valeurs négatives indiquent une visée dans la direction d'éclairement) pour 2 angles d'incidence du soleil (0° et 60°), et 4 valeurs du paramètre de rugosité h (0.0025, 0.025, 0.25, et 2.5). Les autres paramètres du modèle sont fixes: $\omega = 0.25, b = 0.82, c = 0.67, b' = 0$ et $c' = 0$ (valeurs adaptées de Pinty et al., 1989).

Analyse de sensibilité

Plaçons-nous dans l'hypothèse d'une rétrodiffusion afin de tester la sensibilité de la réflectance à l'angle d'incidence de la source lumineuse, et au paramètre de rugosité h. Dans toutes ces simulations, la réflectance est calculée dans le plan principal de mesure de 0° à 180°. Si on fait varier l'angle d'illumination i, on constate une rétrodiffusion importante pour des valeurs moyennes et fortes de i (Figure 4.4). L'effet d'opposition apparait clairement lorsque l'angle de phase g s'approche de zéro. On peut aussi fixer i et faire varier h: nos simulations montrent qu'en dehors du "hot spot", le paramètre h à une influence non négligeable sur la réflectance du sol. Une augmentation du paramètre de rugosité h entraine une augmentation de la réflectance et un élargissement de la zone où l'effet du "hot spot" est significatif.

Réflectance directionnelle/hémisphérique (albédo)

L'albédo contrôle le bilan radiatif net à la surface de la Terre. On le calcule en intégrant sur tout l'hémisphère la réflectance bidirectionnelle:

$$r(i) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{2\pi} r(i,e,\psi)\sin e\cos e\; d\psi de \tag{4.9}$$

La fonction de rétrodiffusion $B(g)$ empêche le calcul exact de cette intégrale. Cependant, en notant que la contribution de $B(g)$ est faible à cause de l'étroitesse du pic correspondant au "hot spot", on peut la négliger et approximer la réflectance directionnelle/hémisphérique par $\boldsymbol{r(i)} = r_s(i) + r_m(i)$ avec:

$$\begin{aligned} r_s(i) &= \frac{\omega}{2}\left\{\frac{\cos i[4(b+b')\cos^2 i-(c+c')(3\cos^2 i-1)^2-4]}{4}\log\frac{\cos i+1}{\cos i}\right. \\ &\left. -\frac{(b+b')(2\cos i-1)\cos i}{2}+(c+c')\frac{3\cos i(6\cos^3 i-3\cos^2 i-2\cos i+1}{8}+1\right\} \quad (4.10) \\ r_m(i) &= \frac{\omega(\gamma-1)}{2\gamma\cos i-1}\left\{\frac{2(\gamma+1)\cos^3 i}{2\gamma\cos i-1}\log\frac{\cos i+1}{\cos i}-\frac{2\cos i(1+\gamma)+1}{2\gamma}\right. \\ &\left. -\frac{1+2\cos i}{4\gamma^2(2\gamma\cos i-1)}\log 2\gamma+1\right\} \quad (4.11) \end{aligned}$$

où $\gamma = \sqrt{1-\omega^2}$, les autres termes ayant été décrits précédemment.

Réflectance bihémisphérique

On intègre à nouveau l'albédo sur l'hémisphère.

$$r = 2\int_0^{\frac{\pi}{2}} r(i)\sin i\cos i\; di \tag{4.12}$$

L'expression finale qui est aussi une approximation ne sera pas présentée.

4.2 Acquisition des données expérimentales

4.2.1 Protocole expérimental

Afin de nous affranchir des conditions naturelles d'éclairement, nous avons conçu une expérimentation au laboratoire. Des mesures de réflectance directionnelle et spectrale ont été réalisées sur un jeu de 26 sols très différents: un sable (3 humidités × 2 rugosités), un sol argileux (3 humidités × 3 rugosités), une tourbe (3 humidités × 3 rugosités), de la pouzzolane et des galets (Tableau 4.2). Ces sols disposés dans des bacs de 50 cm de coté, présentent une large gamme de variation des paramètres du modèle

#	*type de sol*	*humidité*	*rugosité*	ω_1	ω_2	R
1	sol argileux (Montfavet)	humide	rugueux	0.000232	0.107	0.948
2			moyen	0.000184	0.007	0.945
3			lisse			
4		moyen	rugueux	0.000338	0.172	0.981
5			moyen	0.000292	0.149	0.984
6			lisse	0.000268	0.595	0.986
7		sec	rugueux	0.000319	0.254	0.989
8			moyen	0.000281	0.221	0.976
9			lisse	0.000272	0.616	0.978
10	sable fin	humide	rugueux	0.000579	0.208	0.998
11			lisse	0.000435	0.439	0.994
12		moyen	rugueux	0.000433	0.431	0.997
13			lisse	0.000258	0.672	0.997
14		sec	rugueux	0.000455	0.384	0.998
15			lisse	0.000241	0.690	0.997
16	terreau	humide	rugueux	0.000413	-0.208	0.968
17			moyen	0.000610	-0.316	0.978
18			lisse	0.001137	-0.517	0.993
19		moyen	rugueux	0.000719	-0.336	0.994
20			moyen	0.000959	-0.452	0.995
21			lisse	0.001449	-0.659	0.999
22		sec	rugueux	0.000705	-0.319	0.995
23			moyen	0.000885	-0.408	0.995
24			lisse	0.001259	-0.531	0.998
25	pouzzolane	sec	rugueux	0.000030	0.258	0.378
26	galets	sec	rugueux	0.000079	0.558	0.699

Tableau 4.2: Description des 26 échantillons de sol mesurés durant l'expérience. Les paramètres ω_1 et ω_2 sont les coefficients de la régression linéaire: $\omega = \omega_1.\lambda + \omega_2$, pour 672 nm $< \lambda <$ 780 nm. R est le coefficient de corrélation de la régression.

éclairement		*visée*							
i	ψ	e							
0	0	5	10	15	<u>30</u>	45	60		
34	0	0	15	20	40	45	50	60	
	90	0	15	<u>30</u>	45	60			
	180	15	<u>30</u>	34	40	55	70		
60	0	0	15	30	40	45	50	65	70
	90	0	15	<u>30</u>	45	60			
	180	15	<u>30</u>	45	60	70			

Tableau 4.3: Géométries de mesure des données directionnelles et spectrales (valeurs soulignées).

d'Hapke (albédo et rugosité). Un profilomètre laser (Bertuzzi and Caussignac, 1988) a été utilisé pour mesurer la rugosité des sols en terme de profils de hauteur. Les échantillons sont éclairés alternativement par 5 projecteurs de 2000 Watts à faisceau lumineux étroit: 1 vertical, 2 dans le plan principal de mesure ($i = 34^o, 60^o$) et 2 dans le plan perpendiculaire ($i = 34^o, 60^o$). Nous avons utilisé deux types d'instruments: un radiomètre Barringer HHRR à 5 canaux (bandes larges centrées sur $\lambda_1 = 538$ nm, $\lambda_2 = 631$ nm, $\lambda_3 = 851$ nm, $\lambda_4 = 1768$ nm et $\lambda_5 = 2209$ nm) pour la réflectance directionnelle dans le plan principal, et le spectroradiomètre Barringer REFSPEC IIA (1000 bandes spectrales étroites entre 450 nm et 2450 nm) pour la réflectance spectrale. Les champs de vue sont respectivement de $2.6^o \times 15.6^o$ (dans le plan perpendiculaire) et $6^o \times 7.5^o$, si bien que les détecteurs ne voient pas la même surface de sol. Les mesures directionnelles ont été acquises dans 42 positions différentes (Tableau 4.3). Le principe de réciprocité permet d'évaluer la précision des mesures: en permutant la position du capteur et de la source (les variations d'éclairement sont négligeables), nous avons vérifié, pour chaque bande large du radiomètre, la relation $r(\theta, \theta') = r(\theta', \theta)$ où r est la réflectance absolue du sol. L'écart quadratique moyen de cette* relation varie entre 0.01 et 0.02.

Les spectres ont été acquis dans les cinq configurations soulignées. Les deux types de données ont été calibrées par rapport à un panneau de référence en halon (Jackson et al., 1987; Marjoram et al., 1990). Nous avons dû corriger les données spectrales afin qu'elles s'accordent avec les données directionnelles acquises en bande large dans la même configuration de mesure. En effet, les deux radiomètres ont des champs de vue différents et ne sont pas placés à la même distance de la cible. La surface de sol visée n'est donc pas identique et cela induit un effet d'échelle. Cet effet, qui ne dépend pas de la longueur d'onde, varie en fonction de la position de mesure et a pu être facilement corrigé.

4.2.2 Résultats expérimentaux

Considérons deux sols argileux dont l'état de surface est très différent: le premier est très rugueux alors que le second est très lisse. lorsque les spots éclairent la cible dans le plan perpendiculaire, les variations de réflectance avec l'angle zénithal de visée sont très faibles dans les deux cas (Figure 4.5). En revanche, on observe des comportements très marqués et différents dans le plan principal: le sol rugueux présente une forte rétrodiffusion (Figure 4.5a) alors que le sol lisse réfléchit de façon préférentielle dans la direction speculaire (Figure 4.5b). Ces effets sont amplifiés lorsque l'angle d'incidence augmente; on remarquera que les résultats expérimentaux sont en accord avec les sorties du modèles (Figure 4.4).

4.3 Ajustement des paramètres du modèle

4.3.1 Inversion du modèle SOILSPECT sur les données directionnelles

L'étude de la réflectance spectrale des sols passe d'abord par l'inversion du modèle sur les données directionnelles (26 sols $\times$ 5 canaux, soit 130 échantillons de 42 mesures chacun). Elle devrait nous renseigner sur les variables du modèle qui décrivent la surface, et celles qui représentent les propriétés optiques intrinsèques du sol. Intuitivement, nous allons d'abord déterminer les premières qui ne devraient pas dépendre de la longueur d'onde; elles nous servirons alors à inverser le modèle sur les données spectrales afin de déterminer la variation spectrale des autres variables. Nous allons considérer trois étapes différentes correspondant à une généralisation dans l'inversion.

Première hypothèse: aucune contrainte

Nous ne formulons *à priori* aucune hypothèse sur la dépendance spectrale des paramètres du modèle et appliquons l'inversion sur chacun des 26 sols: cela représente au total 130 sous-échantillons, car les 5 bandes spectrales larges décrites précédemment ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, et λ_5) sont supposées indépendantes. Le modèle étant non linéaire, nous avons résolu le problème numériquement en utilisant la routine

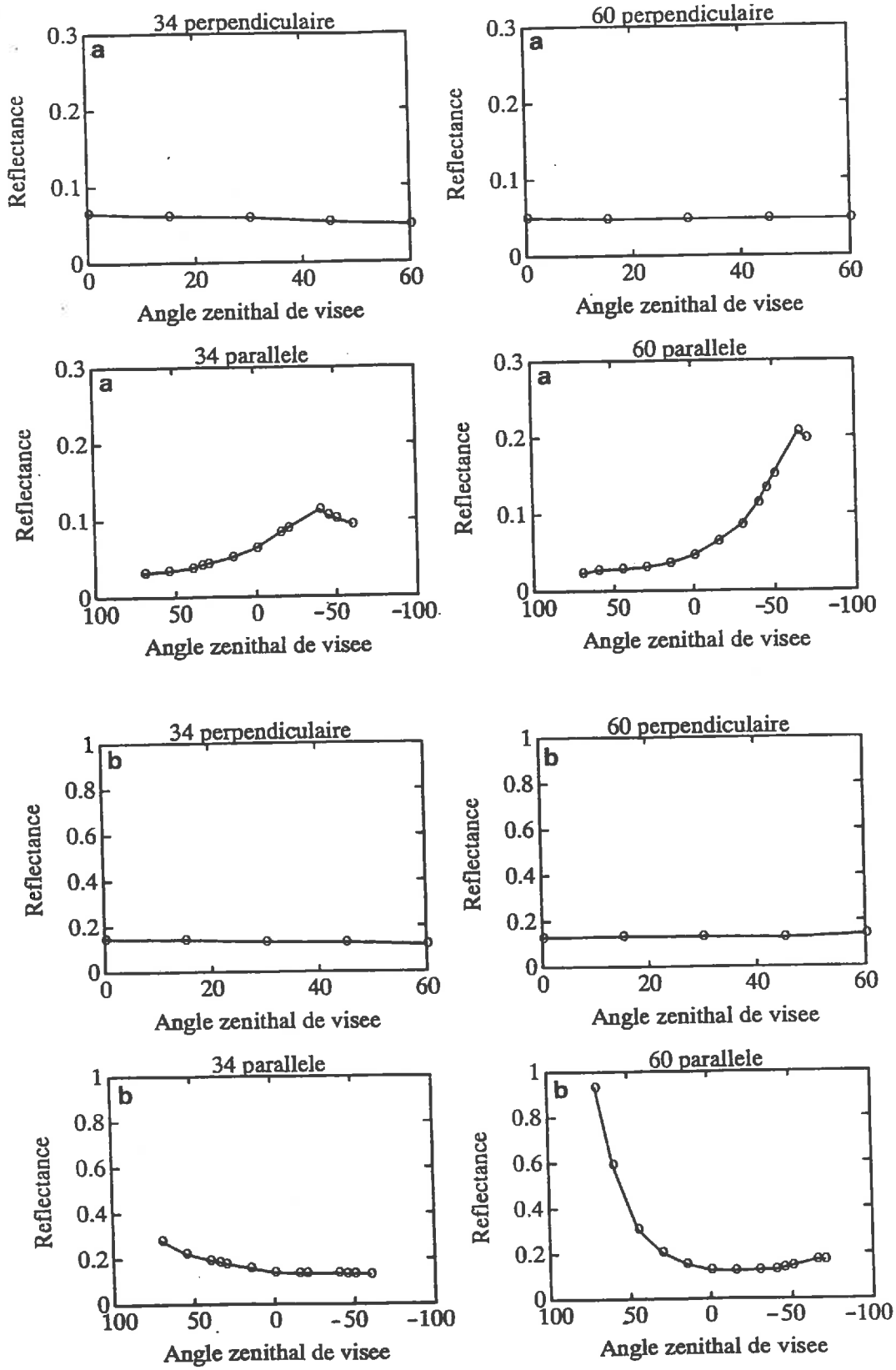


Figure 4.5: Variation directionnelle de la réflectance de deux sols: (a) un sol argileux très rugueux, (b) le même sol argileux très lisse. Les mesures ont été acquises dans 4 configurations différentes (2 positions d'éclairement dans le plan perpendiculaire et, 2 dans le plan principal), à une longueur d'onde donnée ($\lambda_1 = 538$ nm).

fmins de *MATLAB* (méthode du simplex; Nelder-Mead, 1965). Pour chaque échantillon, cette procédure minimise Δ_λ^2 (42 points expérimentaux, 6 inconnues) défini de la manière suivante:

$$\Delta_\lambda^2 = \sum_{k=1}^{42} \{R_{mes}(k) - R_{mod}(k,p)\}^2 \tag{4.13}$$

où $R_{mes}(k)$ est la réflectance bidirectionnelle de la surface mesurée pour la géométrie $k = (i, e, \psi)$, $R_{mod}(k,p)$ est la réflectance bidirectionnelle simulée pour la même géométrie et le jeu de paramètres $p = p(\omega_\lambda, h, b, c, b', c')$. L'application et la précision de cette procédure ont été testées avec succès dans les mêmes conditions que Pinty et al. (1989) avec un jeu de données "propres" et un jeu de données bruitées, générées par le modèle. Le modèle permet de décrire aussi bien la réflectance de sols rugueux rétrodiffusants ($0.003 < rms < 0.015$) que celle de sols lisses caractérisés par un effet spéculaire important ($0.008 < rms < 0.02$) et ce, quelle que soit la longueur d'onde. Quelques résultats détaillés sont donnés dans le Tableau 4.4 avec le cas du sol argileux rugueux pris à 3 humidités différentes (#1, #4, et #7): on constate, comme Pinty et al. (1989), que les termes de fonction de phase ainsi que le paramètre de rugosité h sont peu sensibles à la longueur d'onde. En effet, l'indice de réfraction (partie réelle) des constituants des sols (Iron et al., 1989) et surtout les propriétés mécaniques sont peu ou pas dépendants de la longueur d'onde. Cette propriété s'observe pour les autres sols: en conséquence, nous supposerons que les paramètres h, b, c, b' et c' sont constants pour un sol donné.

Seconde hypothèse: seul ω dépend de λ

Le calcul suivant consiste à ajuster globalement les 5 paramètres précédents en même temps que les cinq valeurs d'abédo ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ et ω_5) correspondant aux 5 bandes spectrales. Pour chaque échantillon de sol, cela revient à minimiser Δ^2 avec 42×5=210 valeurs mesurées et 5+5=10 paramètres inconnus:

$$\Delta^2 = \sum_{k=1}^{210} \{R_{mes}(k) - R_{mod}(k,p)\}^2 \tag{4.14}$$

où le vecteur p peut s'écrire $p = p(\omega_1, \ldots, \omega_5, h, b, c, b', c')$. Les rms du Tableau 4.4 justifient cette hypothèse. Les bons résultats obtenus sur tous les sols ($0.006 < rms < 0.023$) nous ont conduits à formuler une hypothèse supplémentaire.

Troisième hypothèse: seul ω dépend de l'humidité et de λ

Si le sol se dessèche sans que ses propriétés mécaniques soient altérées, alors les valeurs de h, b, c, b' et c' ne devraient pas changer. Pour un même sol à trois humidités différentes, nous avons réajusté les paramètres h, b, c, b' et c' en même temps que les 15 valeurs d'albédo (42×5×3=630 valeurs mesurées; 5+3×5=20 inconnues). Les sols rugueux dont les propriétés de rétrodiffusion ne sont pas altérées par le dessèchement répondent bien à notre hypothèse (Tableau 4.4). En revanche, les propriétés mécaniques de certains sols lisses changent avec le niveau de teneur en eau: près du point de saturation, ces sols présentent un effet spéculaire prédominant qui n'entre pas dans le cadre des hypothèses du modèle; à l'inverse, le déssèchement qui affecte particulièrement les sols argileux lisses (apparition de fentes de retrait) diminue cet effet et accroît la rétrodiffusion: ceci entraine une variation importante des paramètres de rugosité et de fonction de phase. Dans ce cas, nous avons dû séparer à nouveau les différents niveaux d'humidité. La Figure 4.6 montre la validité du modèle sur des sols de nature très différente.

Discussion

Ces trois étapes qui correspondent à une généralisation de l'étape 1 à l'étape 3 sont rassemblées dans le Tableau 4.4 avec l'exemple du sol rugueux argileux. On constate que les paramètres h, b et c ne varient pas beaucoup avec la longueur d'onde, quel que soit l'état d'humidité. Ce n'est pas le cas

Tableau 4.4: Inversion du modèle SOILSPECT sur le sol argileux rugueux, à trois humidités différentes, sous couvert de trois hypothèses différentes.

	sol très humide					*sol moyennement humide*					*sol sec*				
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
ω	0.165	0.190	0.253	0.304	0.285	0.321	0.361	0.425	0.537	0.422	0.317	0.363	0.404	0.542	0.532
h	0.104	0.122	0.101	0.180	0.107	0.093	0.112	0.111	0.114	0.115	0.101	0.101	0.115	0.107	0.121
b	1.223	1.362	1.452	1.344	1.103	1.359	1.464	1.537	1.492	1.432	1.549	1.665	1.796	1.618	1.582
c	0.410	0.483	0.407	0.295	0.306	0.796	0.779	0.680	0.560	0.535	0.878	0.864	0.775	0.590	0.549
b'	-0.021	0.397	0.239	0.418	0.178	0.052	0.211	0.163	0.238	0.217	0.163	0.357	0.405	0.339	0.322
c'	0.153	-0.085	0.009	-0.065	-0.030	0.007	-0.051	0.001	-0.060	-0.074	0.047	-0.041	-0.016	-0.060	-0.056
rms	0.003	0.004.	0.008	0.005	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.007	0.008	0.008	0.010	0.009
ω	0.157	0.201	0.261	0.322	0.259	0.318	0.378	0.443	0.544	0.521	0.322	0.381	0.438	0.539	0.528
h			0.124					0.101					0.101		
b			1.294					1.442					1.606		
c			0.351					0.640					0.686		
b'			0.282					0.186					0.319		
c'			-0.029					-0.050					-0.043		
rms			0.007					0.011					0.011		
ω	0.131	0.165	0.221	0.271	0.216	0.290	0.349	0.405	0.506	0.475	0.311	0.366	0.423	0.526	0.509
h								0.191							
b								1.395							
c								0.744							
b'								0.271							
c'								0.017							
rms								0.013							

	sol très humide		*sol moyennement humide*		*sol sec*		*ensemble*	
	moyenne	*écart type*	*moyenne*	*écart type*	*moyenne*	*écart type*	*moyenne*	*écart type*
h	0.123	0.033	0.109	0.009	0.109	0.009	0.114	0.020
b	1.297	0.136	1.457	0.067	1.642	0.096	1.465	0.175
c	0.380	0.079	0.670	0.121	0.731	0.153	0.594	0.194
b'	0.242	0.179	0.176	0.067	0.317	0.092	0.245	0.129
c'	-0.004	0.095	-0.035	0.037	-0.025	0.044	-0.021	0.061
h							0.109	0.013
b							1.447	0.156
c							0.559	0.182
b'							0.262	0.068
c'							-0.041	0.011

Tableau 4.5: Variabilité des différents paramètres estimés par le modèle pour les deux premiers cas du Tableau 4.4.

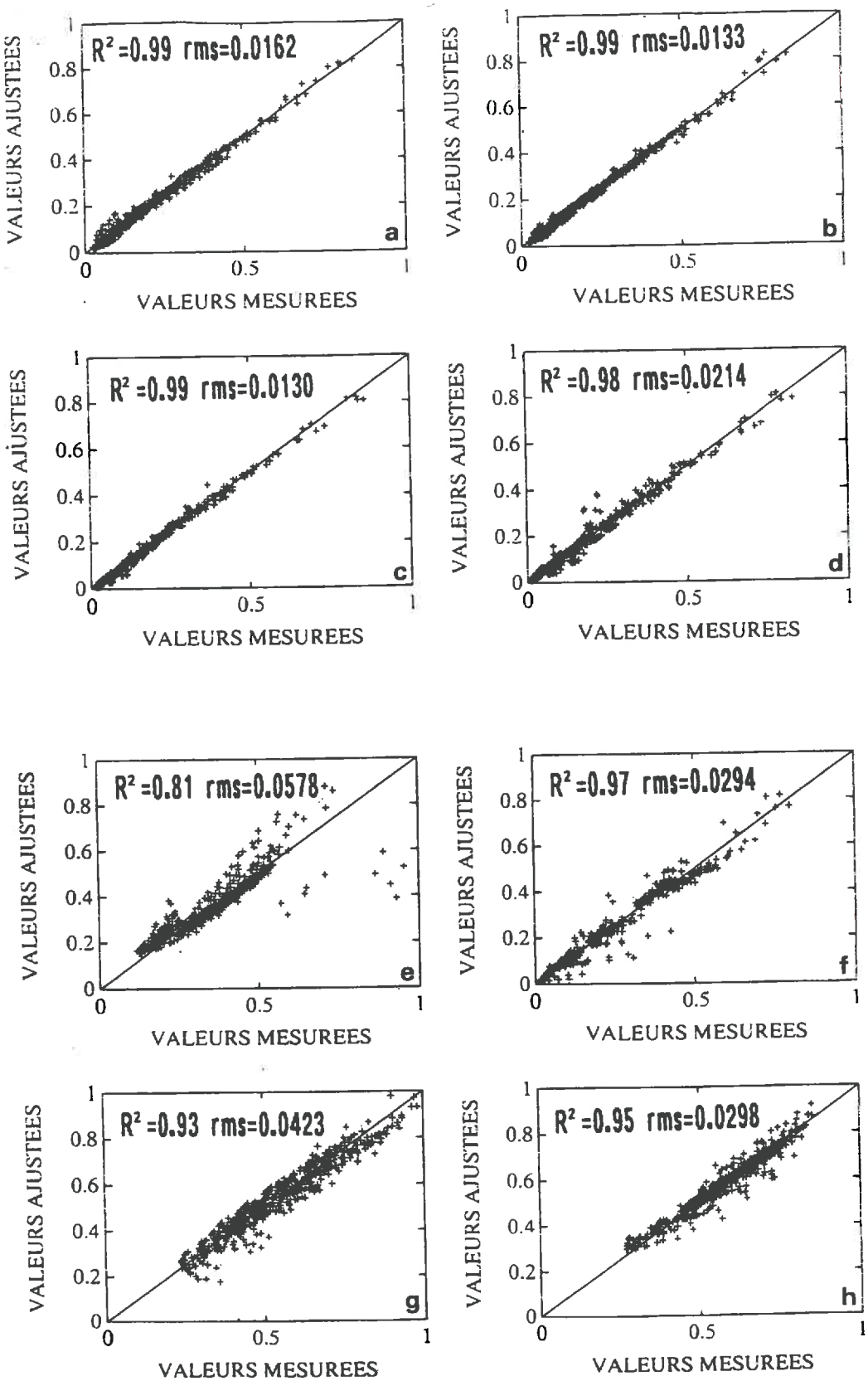


Figure 4.6: Comparaison entre la réflectance bidirectionnelle mesurée et estimée pour 6 sols: (a) sol argileux très rugueux, (b) sol argileux moyennement rugueux, (c) terreau très rugueux, (d) terreau moyennement rugueux, (e) sol argileux lisse, (f) terreau lisse, (g) sable rugueux, (i) sable lisse.

des paramètres b' et c' qui sont positifs ou négatifs: cette instabilité est probablement due à leur faible poids dans l'expression de la fonction de phase, lié au comportement essentiellement de rétrodiffusion de ce sol. Le rms, bien qu'il augmente de l'étape 1 à l'étape 3, se maintient autour de 0.01, ce qui conforte nos hypothèses. Le Tableau 4.5 résume la variabilité des différents paramètres, sauf ω. Arrêtons-nous un instant sur les difficultés rencontrées durant l'inversion pour séparer les paramètres de rugosité h et de fonction de phase b, c, b' et c'. Théoriquement et comme l'avaient constaté Woessner et Hapke (1987), si $g < 20^o$, alors $B(g) \ll 1$ et peut être ignoré. Cela signifie qu'il n'y a pas de conflit entre la fonction de phase $P(g, g')$ et la fonction de rétrodiffusion $B(g)$ lorsqu'on étudie la diffusion spéculaire des sols. Mais dans ce cas, la signification de h peut être très affectée et sa valeur estimée inutilisable pour l'interprétation ou la comparaison avec d'autres paramètres physiques de rugosité. En conclusion, le seul paramètre qui varie spectralement de façon significative est l'albédo de simple diffusion ω. Jusqu'à présent, nous étions limités à cinq bandes larges. L'étape suivante consistera à déterminer ses variations spectrales fines entre 450 nm et 2450 nm.

4.3.2 Inversion du modèle sur les données spectrales

Ajustement du spectre d'albédo de simple diffusion

Le spectre d'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ a été estimé à partir des cinq spectres de réflectance mesurés dans les 5 géométries d'éclairement définies précédemment, les paramètres h, b, c, b' et c' déjà calculés étant supposés connus. La Figure 4.7 montre la capacité du modèle à représenter la réflectance du sol avec une bonne précision pour des conditions de mesure très différentes (R=0.997, rms=0.016). La plus grande dispersion concerne le sable dont la réflectance bidirectionnelle n'était pas décrite aussi précisément que pour les autres sols.

Le spectre de l'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ représente les propriétés optiques intrinsèques des matériaux du sol: il est indépendant des conditions de mesure (angles d'éclairement et de visée). La forme de ces spectres varie d'un sol à l'autre en fonction de la nature des minéraux ou de la matière organique et de la teneur en eau. Le sol argileux, le terreau et le sable (Figure 4.8) présentent des caractéristiques classiques d'absorption avec une diminution de ω entre le proche infrarouge et le visible. Par exemple, le terreau caractérisé par une forte teneur en matière organique a une faible réflectance dans le visible alors qu'elle augmente fortement dans le proche infrarouge (Baumgardner et al., 1985). Dans le moyen infrarouge, on remarquera trois pics principaux dus à l'absorption de l'eau à 1450 nm, 1770 nm et 1950 nm. Ces bandes sont dues à des phénomènes de vibration/rotation des molécules d'eau présentes dans le sol. Lors d'un déssèchement, on observe une augmentation de l'albédo de simple diffusion sur tout le spectre (Figure 4.9) qui se traduit visuellement par un "éclaircissement" du sol. La modélisation de la réflectance spectrale du sol en fonction de la teneur en eau est complexe. Selon Bedidi et al. (1992), les signatures spectrales de sols latéritiques dans le visibles ne peuvent pas se déduire facilement de celles mesurées dans des conditions sèches. Cependant, nos sols présentent des variations quasi-homothétiques lorsque la teneur en eau varie: ces variations affectent tout le domaine optique et sont couplées avec des phénomènes d'absorption de l'eau. Malheureusement, en l'absence d'un nombre suffisant d'états d'humidité intermédiaires entre un sol très sec et un sol à saturation, il ne nous a pas été possible d'aller plus loin dans le travail de modélisation.

4.4 Conclusion partielle

Ce modèle permet de décrire avec une bonne précision la réflectance spectrale et directionnelle de sols entre 450 et 2450 nm. On distingue deux catégories de variables d'entrée: celles qui varient spectralement (albédo de simple diffusion ω) et celles qui sont indépendantes de la longueur d'onde (paramètres de rugosité h et de fonction de phase b, c, b' et c'). Ces derniers sont surtout fonction de l'indice de réfraction (partie réelle) des constituants du sols: leur variation spectrale est suffisamment faible pour qu'on puisse les supposer constants sur tout le domaine optique. Un des avantages de SOILSPECT est son inversibilité. On notera cependant la difficulté parfois rencontrée pour séparer

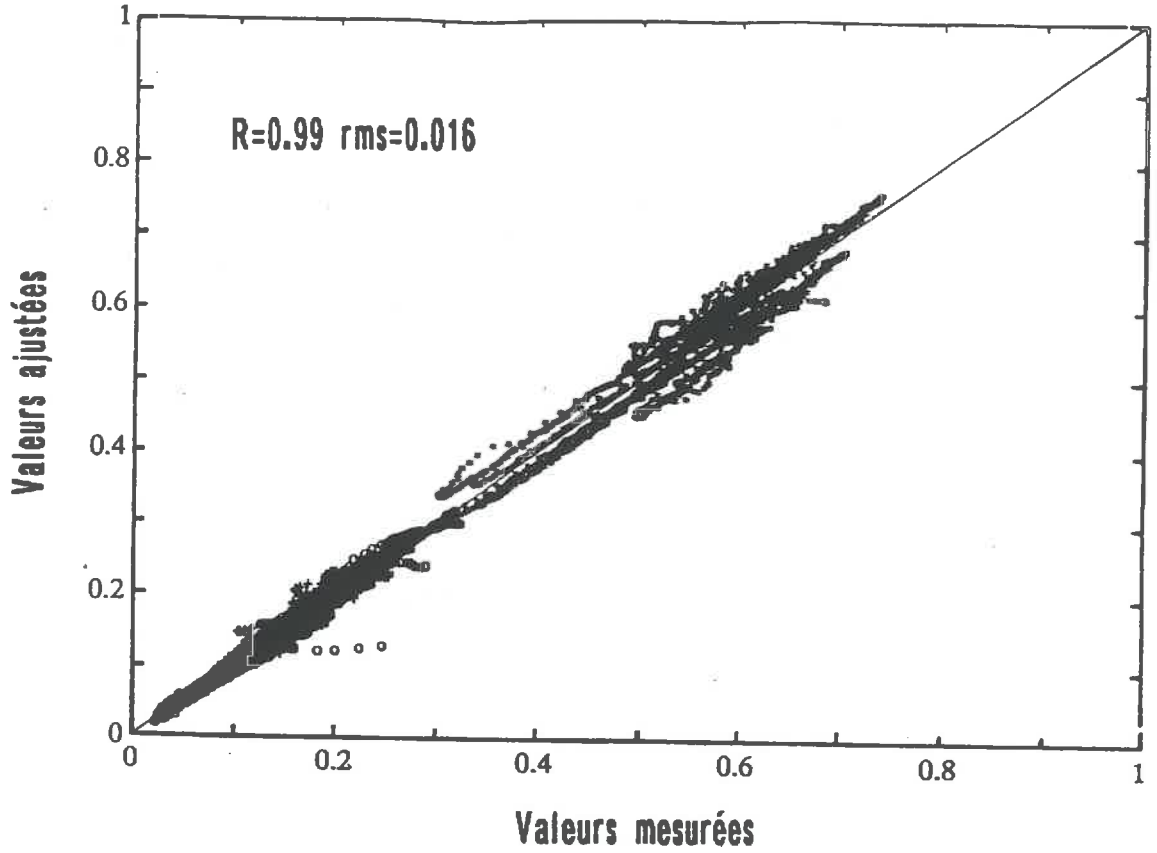


Figure 4.7: Comparaison entre la réflectance spectrale mesurée et estimée (5000 données par type de sol): (+) sol argileux, (o) terreau, (*) sable.

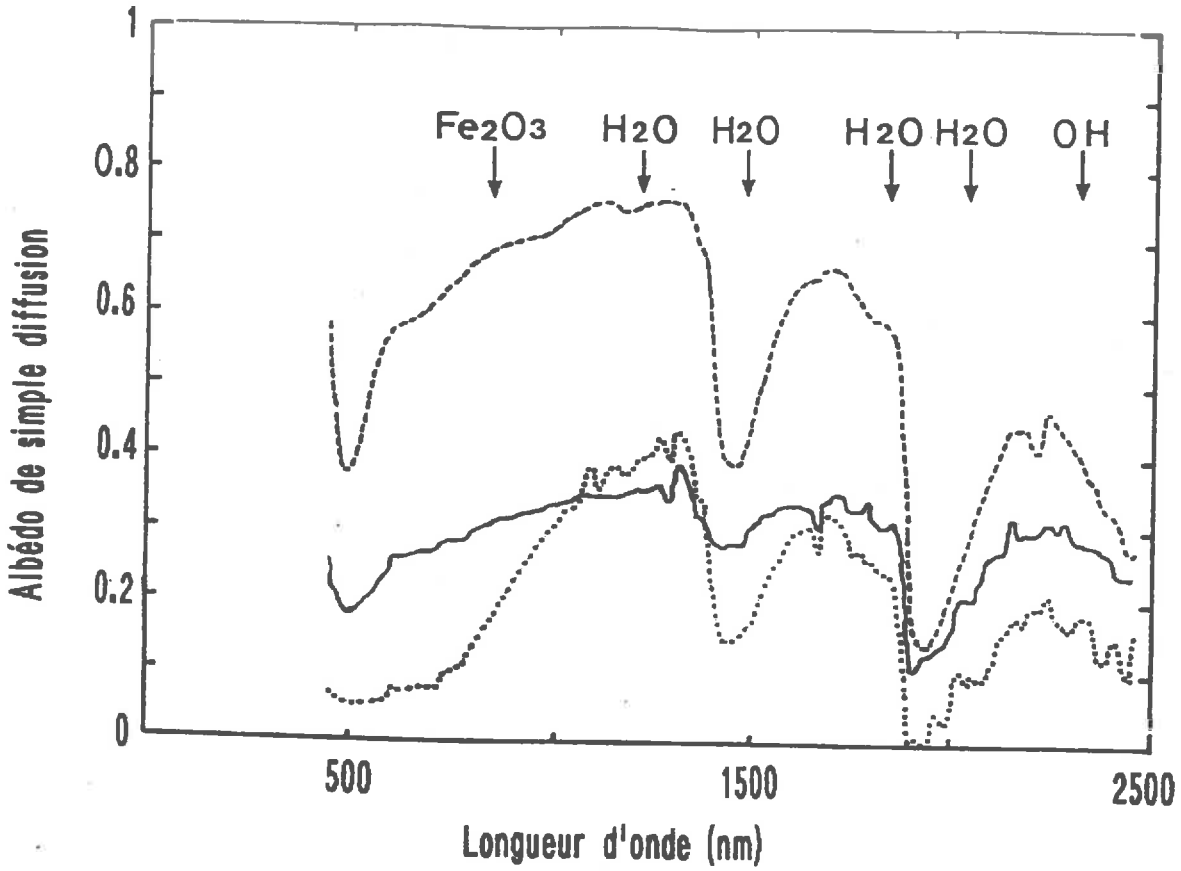


Figure 4.8: Variation spectrale de l'albédo de simple diffusion ω de trois sols: (—) sol argileux, (· · ·) terreau, (- - -) sable.

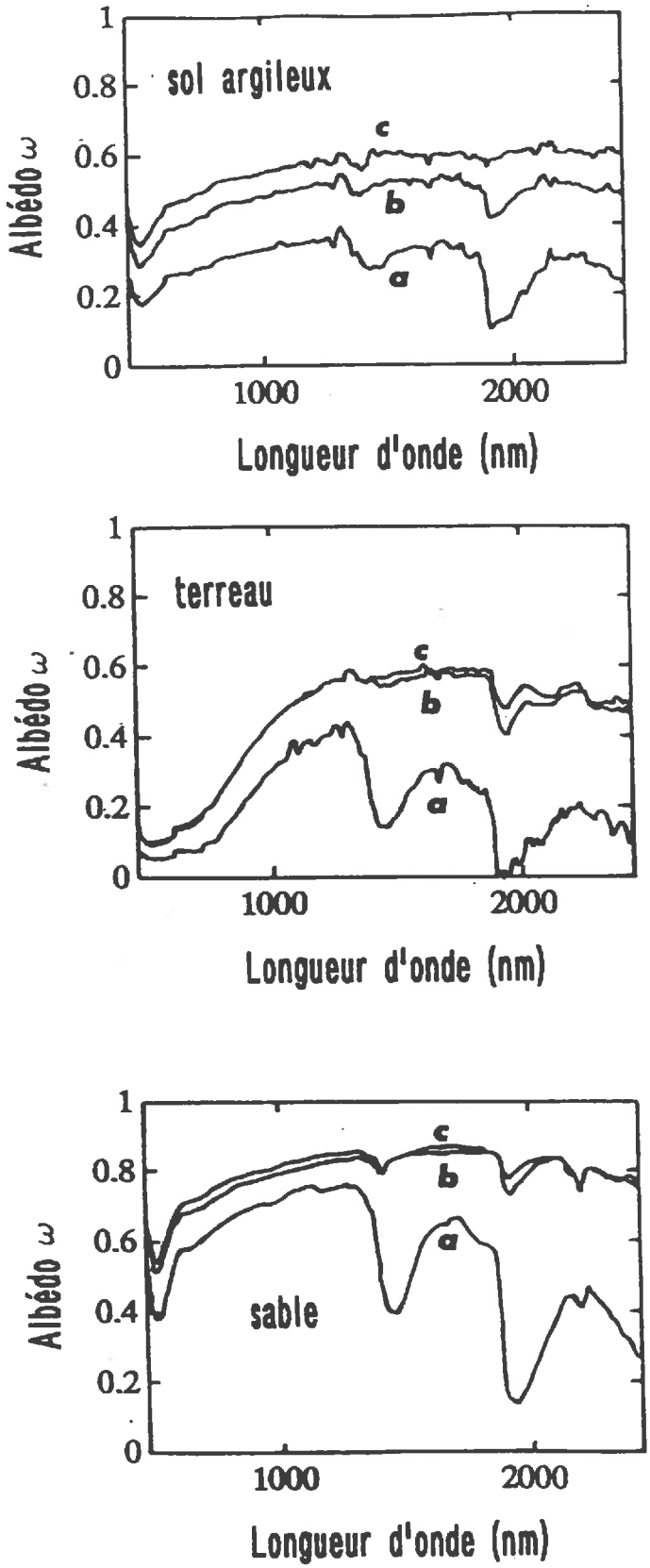


Figure 4.9: Effets du désèchement sur l'albédo de simple diffusion pour 3 sols (sol argileux, terreau, sable) à différents niveau d'humidité: (a) sol très humide, (b) sol moyennement humide, (c) sol sec.

le paramètre de rugosité h et les paramètres de fonction de phase. Ce modèle nous permet de nous affranchir des conditions de mesure (géométrie d'éclairement et de visée) et de proposer des variables caractéristiques des propriétés optiques intrinsèques des sols. Ceci est très important si on veut comparer des spectres de sol acquis dans différentes conditions. Enfin, on peut désormais simuler la réflectance spectrale des sols et l'utiliser directement dans des modèles de couverts végétaux.

Il faudrait relier les paramètre h à la rugosité mesurée du sol, ou le paramètre ω à l'humidité du sol. Pour l'instant, les caractéristiques de surface des sols peuvent être correctement estimées à partir de données hyperfréquences. Dans le domaine optique, il y a eu peu de tentatives pour comprendre ces phénomènes complexes: ces travaux devraient améliorer notre connaissance de la réflectance spectrale et directionnelle des surfaces naturelles.

Chapitre 5

Simulation de la réflectance spectrale des couverts végétaux

La réflectance et la transmittance spectrales des feuilles, la réflectance directionnelle et spectrale des sols, sont les paramètres de sortie des modèles PROSPECT et SOILSPECT. La plupart des modèles de réflectance des couverts (cf Chapitre 1) peuvent les utiliser comme paramètres d'entrée. Outre la qualité du rayonnement incident, ils constituent la seule source de variation spectrale de la réflectance du couvert. Au niveau du sol, nous avons adopté le modèle SAIL; le modèle 5S a été choisi pour simuler la réflectance apparente au niveau du satellite. Ces modèles déjà décrits dans la littérature ne seront pas repris en détail dans ce court chapitre.

5.1 Au niveau du sol

5.1.1 Le modèle SAIL (Verhoef, 1984, 1985)

Parmi les différents modèles de réflectance décrits dans la littérature, le modèle SAIL ("Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves") a été retenu pour sa simplicité, son nombre limité de paramètres d'entrée et son temps d'exécution assez court. Tous les paramètres ont un sens physique et peuvent être mesurés au champ (avec plus ou moins de difficulté!). Le modèle SAIL qui est de type "transfert radiatif" repose sur le système d'équations différentielles suivant:

$$\frac{dE_s}{dx} = k^* E_s \tag{5.1}$$

$$\frac{dE_-}{dx} = -sE_s + aE_- - \sigma E_+ \tag{5.2}$$

$$\frac{dE_+}{dx} = s'E_s + \sigma E_- - aE_+ \tag{5.3}$$

$$\frac{dE_o}{dx} = wE_s + vE_- + uE_+ - K^* E_o \tag{5.4}$$

où x représente l'épaisseur du milieu, E_s le flux directionnel incident, E_- le flux diffus descendant, E_+ le flux diffus montant, E_o le flux directionnel dans la direction de l'observateur. Les coefficients d'extinction (k^* et K^*) et de diffusion (s, s', a, σ, u, v et w) sont définis en fonction des propriétés optiques des feuilles (ρ et τ) et de la géométrie du couvert (LAI et θ_l). Les principales hypothèses du modèle sont que le couvert est homogène et infiniment étendu, que les feuilles sont lambertiennes, de propriétés optiques identiques sur les deux faces, et de distribution azimutale aléatoire. La hauteur du couvert n'intervient pas explicitement mais par l'intermédiaire du LAI. La résolution du système d'Equations 5.1 à 5.4 permet de calculer la réflectance et la transmittance directionnelles et hémisphériques du couvert, les propriétés optiques du sol étant connues. Bien que le sol puisse être caractérisé par sa réflectance bidirectionnelle (r_{so}), directionnelle/hémisphérique (r_{sd} et r_{do}) et bihémisphérique (r_{dd}), il est très souvent décrit uniquement par r_{so} supposé lambertien.

N	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	δ
ρ_l	0.3683	0.4213	0.4646	0.5003	0.5302	0.1619
τ_l	0.6008	0.5401	0.4895	0.4464	0.4093	-0.1914
$1-(\rho_l+\tau_l)$	0.0309	0.0386	0.0459	0.0533	0.0605	0.0296
$\mathcal{R}$	0.4138	0.4249	0.4317	0.4355	0.4374	0.0236

Tableau 5.1: Effets du paramètre de structure des feuilles N sur la réflectance ρ_l, la transmittance τ_l et l'absorptance $1-(\rho_l+\tau_l)$ des feuilles (modèle PROSPECT). Idem pour la réflectance du couvert $\mathcal{R}$ (modèle SAIL). Simulations à 804 nm. δ représente la différence entre les valeurs calculées pour $N = 2.0$, et celles calculées pour $N = 1.0$.

5.1.2 Couplage de PROSPECT, SOILSPECT et SAIL

Le modèle SAIL tel que nous l'avons décrit succintement, simule la réflectance des couverts végétaux $\mathcal{R}$ en fonction d'un nombre limité de paramètres. Pour simplifier, nous distinguerons:

- **les géométries d'éclairement et de visée:** elles correspondent à un minimum de trois paramètres, l'angle zénithal (θ_o) et azimutal (ψ_o) de visée, et l'angle zénithal solaire (θ_s).
- **un paramètre atmosphérique:** pourcentage de rayonnement diffus ($skyl$).
- **les caractéristiques de l'architecture du couvert:** au minimum deux paramètres sont nécessaires, l'indice foliaire (LAI) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l).
- **des propriétés optiques des feuilles:** réflectance (ρ) et transmittance (τ) supposées lambertiennes.
- **des propriétés optiques du sol:** réflectance (ρ_s).

L'intérêt d'un couplage des modèles PROSPECT, SOILSPECT et SAIL est qu'il permet de simuler des spectres de réflectance de couvert sur tout le domaine optique en fonction de variables directement interprétables en terme d'état physiologique de la feuille (concentration en chlorophylle a+b, épaisseur équivalente en eau) ou de propriétés de surface des sols (rugosité, fonction de phase). Au total donc, un jeu minimum de 12 paramètres indépendants de la longueur d'onde est donc nécessaire pour décrire le spectre de réflectance d'un couvert de 450 nm à 2450 nm. Les propriétés optiques des sols ne pouvant pas être réduites à quelques paramètres - le spectre d'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ varie d'un sol à l'autre - nous admettrons par la suite que le sol ne change pas; nos simulations seront donc conduites avec le sol riche en matière organique (terreau) décrit au chapitre précédent, dont le spectre l'albédo de simple diffusion est présenté sur la Figure 4.8.

Analyse de sensibilité

Considérons la configuration de mesure suivante ($\theta_o = 0, \psi_o = 0, \theta_s = 40^o$ et $skyl = 0.1$) et le jeu de paramètres moyen C_{ab}=32 $\mu g.cm^{-2}$, C_w=0.0255 cm, LAI=3 et $\theta_l = 45^o$. Bien que les variables biophysiques du couvert ne soient pas totalement indépendantes (un changement de teneur en eau des feuilles peut entrainer une modification de la concentration en chlorophylle, de la structure du mésophylle, ou encore de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles), nous ferons varier chacune de ces variables séparément.

La Figure 5.1a illustre les variations de la réflectance spectrale du couvert $\mathcal{R}(\lambda)$ en fonction du paramètre de structure des feuilles N. Comme l'ont noté Clevers et Verhoef (1991), l'influence de N n'est pas très grande ce qui, au premier abord, peut sembler surprenant. Le Tableau 5.1 permet de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu ici: les propriétés optiques des feuilles (réflectance ρ_l et transmittance τ_l) sont simulées avec le modèle PROSPECT dans le proche infrarouge (804 nm) pour différentes valeurs de N. Lorsque N passe de 1 (Monocotylédones) à 2 (Dicotylédones), ρ_l augmente de 0.162 et τ_l diminue de 0.191. Ces variations sont suffisamment significatives pour identifier deux espèces de feuille différentes à partir de mesures spectrophotométriques réalisées au laboratoire. Toujours au niveau de la feuille, on constate que l'absorbance définie par $1-(\rho_l+\tau_l)$ augmente seulement de 0.03; or, l'albédo de simple diffusion des feuilles ω_l dépend de la somme $\rho_l+\tau_l$, et le modèle SAIL, comme de nombreux autres modèles de réflectance de couverts, est une fonction de ω_l. Ceci rend les résultats de la Figure 5.1a très plausibles: l'augmentation de la réflectance des feuilles est compensée par une diminution de la transmittance. La reconnaissance d'une culture par l'intermédiaire du paramètre N apparait donc improbable.

Comme prévu, la chlorophylle a+b absorbe la lumière dans le visible (Figure 5.1b), et l'eau dans le moyen infrarouge (Figure 5.1c). Les domaines d'action de ces deux constituants foliaires sont

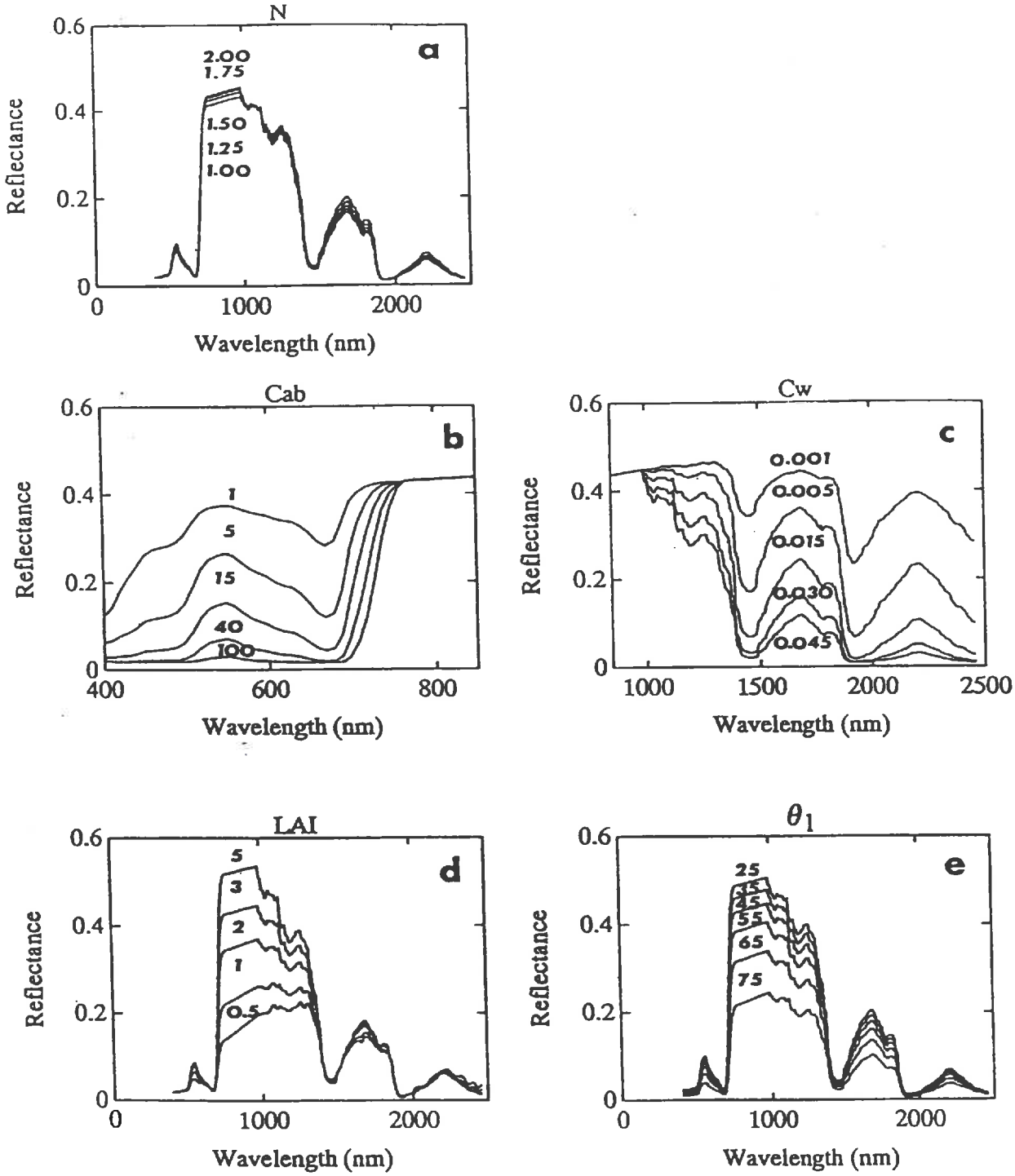


Figure 5.1: Variations de la réflectance spectrale du couvert en fonction de: (a) le paramètre de structure des feuilles N, (b) la concentration en chlorophylle a+b, C_{ab} exprimée en $\mu g.cm^{-2}$, (c) l'épaisseur équivalente en eau, C_w exprimée en cm, (d) l'indice foliaire, LAI, (e) l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, θ_l. Le jeu moyen de paramètres est: $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255\ cm, LAI = 3, \theta_l = 58^o, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$, et $skyl = 0.2$.

complètement séparés par le plateau proche infrarouge. La sensibilité de la réflectance du couvert à C_{ab} ou C_w est similaire à celle observée à l'échelle de la feuille: on distingue des domaines de forte absorption (450 nm, 672 nm pour les chlorophylles, 1160 nm, 1450 nm, 1950 nm et 2500 nm pour l'eau) très sensibles aux faibles valeurs de concentration, et des domaines de faible absorption (548 nm pour les chlorophylles, 1684 nm et 2211 nm pour l'eau), les plus sensibles aux fortes concentrations. Pour des concentrations observées dans la nature ($C_{ab} < 100\ \mu g.cm^{-2}$ et $C_w < 0.05\ cm$), cette simulation montre que les changements de réflectance sont suffisamment importants pour être mesurés par télédétection. En conséquence, la variabilité des couverts est potentiellement accessible.

L'indice foliaire (Figure 5.1d) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (Figure 5.1e) contrôlent les niveaux de réflectance principalement dans le proche infrarouge, et dans une moindre mesure sur le reste du spectre. On constate qu'augmenter le LAI revient à diminuer θ_l; en d'autres termes, le spectre de réflectance d'un couvert planophile épars est très proche de celui d'un couvert érectophile dense. Ces phénomènes ne sont cependant pas totalement symétriques: dans certaines régions du spectre (vers 548 nm, 1684 nm et 2211 nm), la réflectance sature rapidement avec le LAI, ce qui n'est pas le cas de θ_l.

Ces simulations qui nous ont permis de tester l'influence relative de chaque paramètre d'entrée. On note que la sensibilité de la réflectance du couvert à chacun de ces paramètres biophysiques varie avec la longueur d'onde, et la valeur des autres paramètres. Hormis le paramètre de structure interne de la feuille N, la variabilité des autres paramètres est bien représentée par les spectres de réflectance. Nous n'avons pas parlé ici de la variation naturelle des paramètres du couvert: en tenir compte impose un certain nombre de contraintes. Considérons un couvert végétal affecté par un stress hydrique important; ce stress va d'abord modifier l'architecture des plantes, en particulier l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, et entraîner des variations rapides de réflectance. S'il s'accentue, alors l'épaisseur équivalente en eau et la concentration en chlorophylle des feuilles, dont les valeurs avaient jusque là peu évolué, deviendront les facteurs principaux de variation de la réflectance. En conditions naturelles, ces paramètres ne sont donc pas indépendants.

Détermination de la fraction journalière de PAR absorbé: ε_i

L'efficience d'interception du PAR incident par un couvert végétal (ε_i) qui dépend principalement des propriétés optiques des feuilles, de la structure du couvert, de la réflectance de la strate inférieure non photosynthétiquement active (sol ou végétation sénescente) et des caractéristiques de l'éclairement (Baret et Olioso, 1989), peut être calculée journalièrement par le modèle SAIL en déterminant la différence entre l'énergie qui pénètre dans le couvert et celle qui en sort. Les valeurs d'énergie absorbée sont intégrées durant la période de jour entre 400 nm et 700 nm.

Comme nous l'avions signalé en introduction générale, de nombreuses études expérimentales ou théoriques ont établi des relations entre ε_i et des indices de végétation. Ces relations souffrent d'une variabilité importante dont les causes sont difficiles à appréhender. Baret et Olioso (1989), Hall et al. (1990) ou encore Goward et Huemmrich (1992), ont mis en évidence, par des simulations avec le modèle SAIL, l'effet perturbateur des propriétés optiques du sol ou de la strate sénescente sur ces relations. Afin de mieux comprendre les relations entre ε_i et un indice de végétation fréquemment utilisé, le $NDVI$ ("Normalized Difference Vegetation Index"), nous avons simulé ces deux variables à partir d'un jeu de paramètres initiaux, choisis selon des lois de probabilité connues:

- **distribution uniforme** pour N ($1 \leq N \leq 2.5$), θ_o ($0^o \leq \theta_o \leq 60^o$), ψ_o ($0^o \leq \psi_o \leq 180^o$), θ_s ($20^o \leq \theta_s \leq 70^s$) et θ_l ($20^o \leq \theta_l \leq 80^o$)
- **distribution lognormale** pour C_{ab} ($0.1 \leq C_{ab} \leq 80\ \mu g.cm^{-2}$) et LAI ($0.1 \leq LAI \leq 16$).

Nous obtenons une relation statistique "linéaire" (Figure 5.2) du même type que celle obtenue par Baret et Olioso (1989). On constate une variabilité importante autour de la droite moyenne malgré

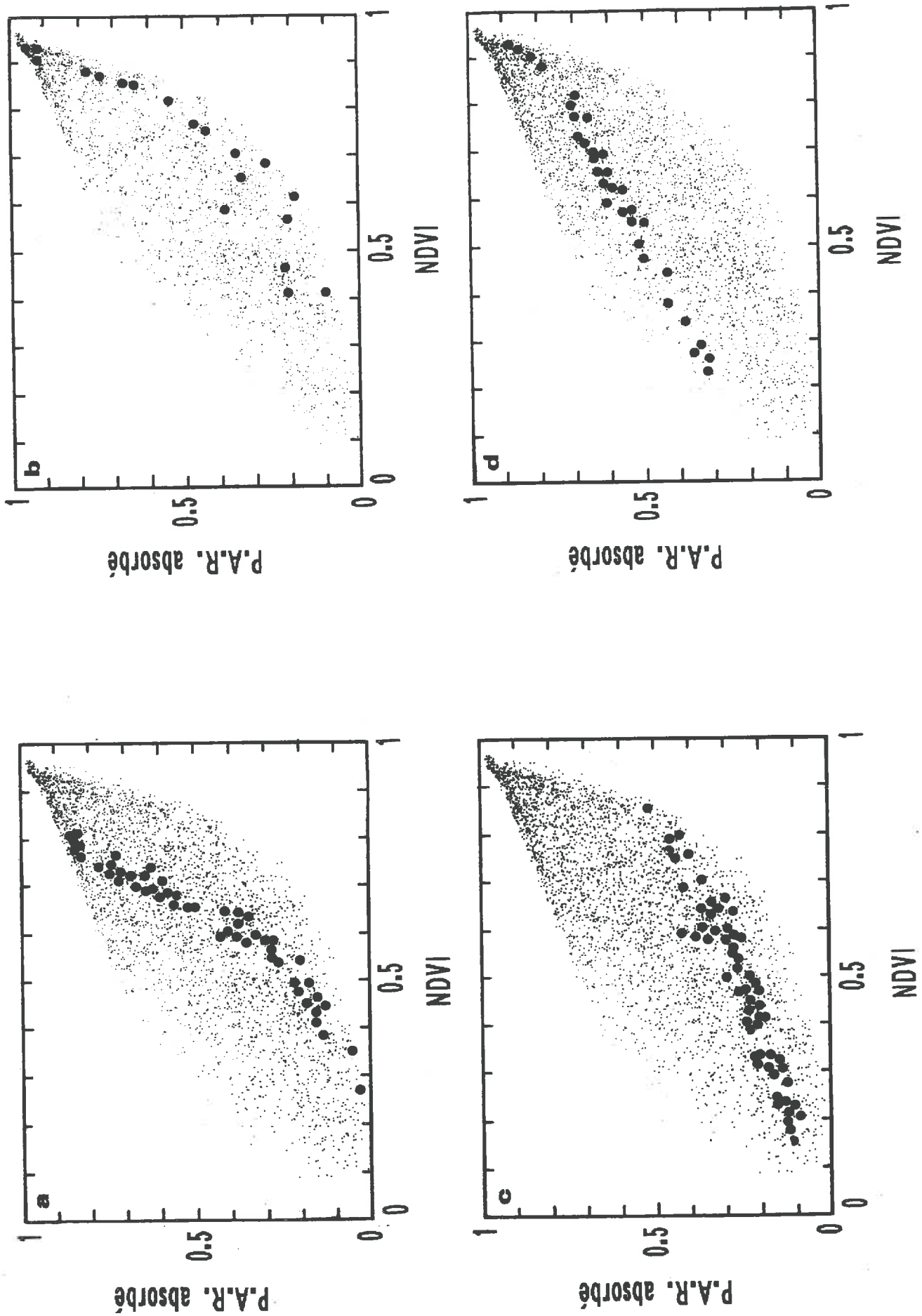


Figure 5.2: Relation entre le NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") et la fraction de PAR absorbé ε_i. Les symboles • représentent des classes particulières: (a) $10 < C_{ab} < 15 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (b) $30 < C_{ab} < 35 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (c) $0.5 < LAI < 1.0$ et $N < 1.2$; (d) $2.5 < LAI < 3.0$ et $N < 1.2$.

un sol constant. On peut rappeler que le sol est généralement l'effet perturbateur le plus important dans ces relations! Il est possible, dans ce nuage de points, de séparer les effets de la concentration en chlorophylle (Figures 5.2a et 5.2b), de ceux de l'indice foliaire (Figures 5.2c et 5.2d), ou encore de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles qui sont les principaux facteurs de variation de ε_i. Ce type d'étude a permis de repérer des cas de couverts très différents, ayant des valeurs identiques de $NDVI$ mais très différentes de ε_i (Figure 5.3). Même s'il existe désormais dans la littérature d'autres indices de végétation plus performants car moins sensibles aux effets perturbateurs, la Figure 5.3 montre les limites d'une telle approche pour déterminer avec précision ε_i.

5.1.3 Validation

Protocole expérimental

La validation repose sur une expérience Anglo-Française (Malthus et al., 1989) réalisée en juillet 1989 à la station expérimentale de Brooms Barn (Suffolk, RU): 36 parcelles expérimentales ont été semées avec de la betterave à sucre (*Beta vulgaris L.*), à des dates et densités différentes afin de disposer de taux de couverture très variables (de 3 à 15 plantes par m^2). En outre, la moitié des parcelles a été infectée par un virus afin d'induire un jaunissement du feuillage (chlorose).

Des spectres de réflectance ont été acquis sur 24 parcelles différentes grâce au spectroradiomètre de terrain GER IRIS Mk IV. IRIS était porté au bout d'un bras hydraulique à une hauteur de 4.75 m: son angle d'ouverture étant de $3^o \times 6.5^o$, la surface de sol visée représente 27×55 cm. L'instrument couvre tout le domaine optique en 975 bandes spectales dont la largeur dépend de la longueur d'onde: 2 nm entre 350 et 1000 nm, 4 nm entre 1000 et 1800 nm, et 5 nm entre 1800 et 2500 nm. Les mesures de radiances ont été transformées en valeurs de réflectance après calibration par rapport à un panneau de référence recouvert de $BaSO_4$ (Malthus et al., 1989).

Trois différents types de sols ont été utilisés: le sol originel de Brooms Barn (24 mesures), du terreau très sombre (24 mesures), et du sable sec réfléchissant (3 mesures) dont les propriétés optiques ont été mesurées sur des parcelles sans végétation. Au total, 51 spectres sont donc disponibles (Tableau 5.2). En outre, les variables biophysiques telles que la concentration en chlorophylle a+b des feuilles (C_{ab}), leur épaisseur équivalente en eau (C_w), l'indice foliaire (LAI), ou encore l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l), ont été mesurés. Malheureusement, certaines de ces données étant manquantes, seule une validation partielle a pu avoir lieu.

Calage du paramètre de structure des feuilles N

Les trois paramètres d'entrée du modèle PROSPECT sont le paramètres de structure (N), la concentration en chlorophylle a+b (C_{ab}), et l'épaisseur équivalente en eau (C_w). La mesure expérimentale de C_{ab} ou C_w ne pose pas de problème majeur: par exemple dans cette étude, la concentration en chlorophylle des feuilles a été estimée par une méthode photographique indirecte. Il n'en est pas de même pour N qui, dans l'abstrait, représente la structure interne des feuilles, mais dont la mesure directe n'est pas possible. Par une méthode identique à celle développée dans le chapitre 3, les spectres de réflectance acquis sur une quinzaine de feuilles nous ont permis de caler N. Ce dernier varie entre 1.114 et 1.399; nous l'avons fixé à sa valeur moyenne $N = 1.266$, ce qui ne devrait pas nuire à la qualité de la validation compte tenu de la faible sensibilité de la réflectance du couvert à ce paramètre (Figure 5.1a).

Calage de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l

Mesurer avec précision l'angle moyen d'inclinaison des feuilles d'un couvert végétal est un travail long et ingrat, si bien qu'il a été déterminé sur trois parcelles seulement: θ_l varie entre 39^o8 et 55^o7, avec une moyenne de 47^o1. Etant donnée la forte sensibilité de la réflectance du couvert à θ_l (Figure 5.1e), en particulier dans le proche infrarouge, il n'est pas possible d'attribuer cette valeur moyenne à

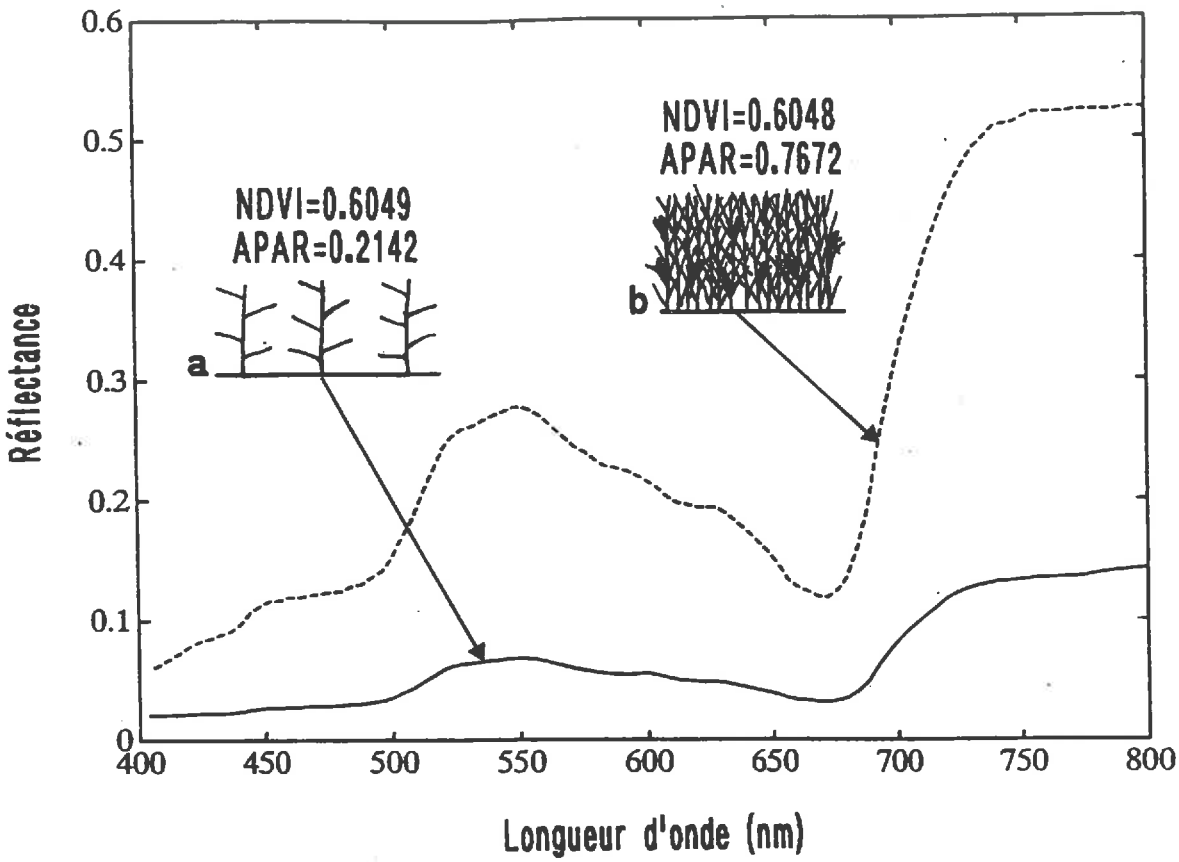


Figure 5.3: Exemple de deux couverts végétaux très différents ayant un NDVI identique mais des valeurs d'ε_i différentes. Le couvert (a) correspond à: $N = 1.05, C_{ab} = 20.77\ \mu.cm^{-2}, LAI = 0.41$ et $\theta_l = 29°2$. Le couvert (b) correspond à: $N = 2.11, C_{ab} = 3.96\ \mu g.cm^{-2}, LAI = 8.2$ et $\theta_l = 52°5$. Les autres paramètres du couvert sont: $\theta_s = 40°, \theta_o = 0°, \psi_o = 0°$ et $skyl = 0.2$.

parcelle	*sol*	C_{ab}	C_w	LAI	$\hat{\theta}_l$	*rms*	$\overline{\theta_l}$
000	S1	40.58	0.0270	3.36	47.89	0.064	50.50
	S2				53.12	0.073	
005	S1	35.69	0.0293	3.08	39.37	0.069	37.83
					36.29	0.074	
006	S1	35.98	0.0285	4.06	47.73	0.070	52.72
	S2				57.71	0.062	
013	S1	32.28	0.0309	3.27	57.54	0.048	59.51
	S2				61.49	0.166	
015	S1	30.60	0.0311	3.96	57.24	0.062	54.07
	S2				50.91	0.063	
016	S1	28.92	0.0373	1.15	41.63	0.024	47.24
	S2				52.86	0.018	
017	S1	35.29	0.0344	1.22	39.39	0.025	40.39
	S2				41.40	0.021	
018	S1	27.64	0.0387	0.47	38.83	0.037	47.69
	S2				56.56	0.010	
022	S1	41.26	0.0379	3.44	43.64	0.075	43.90
	S2				44.16	0.090	
024	S2	34.88	0.0408	2.31	22.90	0.075	22.90
025	S1	38.10	0.0272	2.20	47.32	0.135	48.12
	S2				48.93	0.150	
027	S1	36.42	0.0267	3.40	32.79	0.200	37.74
	S2				42.70	0.188	
029	S1	21.25	0.0489	0.15			
	S2						
030	S1	23.02	0.0453	0.15			
	S2						
031	S1	35.29	0.0409	1.95	26.33	0.113	28.37
	S2				30.42	0.185	
032	S1	29.82	0.0296	3.42	40.69	0.080	40.02
	S2				39.36	0.070	
033	S1	34.25	0.0334	3.09	47.09	0.097	44.84
	S2				42.60	0.108	
034	S1	32.15	0.0323	3.66	65.57	0.055	62.99
	S2				62.11	0.062	
	S3				61.30	0.231	
035	S1	28.44	0.0288	4.63	63.43	0.066	66.78
	S2				67.59	0.159	
	S3				69.32	0.210	
036	S1	32.48	0.0334	3.31	55.57	0.072	57.54
	S2				56.65	0.066	
	S3				60.41	0.071	
106	S1	35.98	0.0285	2.03	51.61	0.062	49.38
	S2				47.16	0.051	
115	S1	30.60	0.0311	1.98	47.14	0.040	49.09
	S2				51.04	0.042	
123	S1	41.75	0.0279	1.82	24.56	0.111	28.87
	S2				33.19	0.061	
206	S1	35.98	0.0285	1.02	59.14	0.083	59.14
215	S1	30.60	0.0311	0.99	50.96	0.022	42.15
	S2				33.34	0.027	

Tableau 5.2: Quelques caractéristiques biophysiques du couvert végétal: concentration en chlorophylle a+b (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), indice foliaire (LAI), et angle moyen d'inclinaison des feuilles $\hat{\theta}_l$ calé à partir des spectres de réflectance IRIS et des autres paramètres. N est fixé à une valeur moyenne (N=1.266) estimée par le modèle PROSPECT à partir des spectres de réflectance des feuilles.

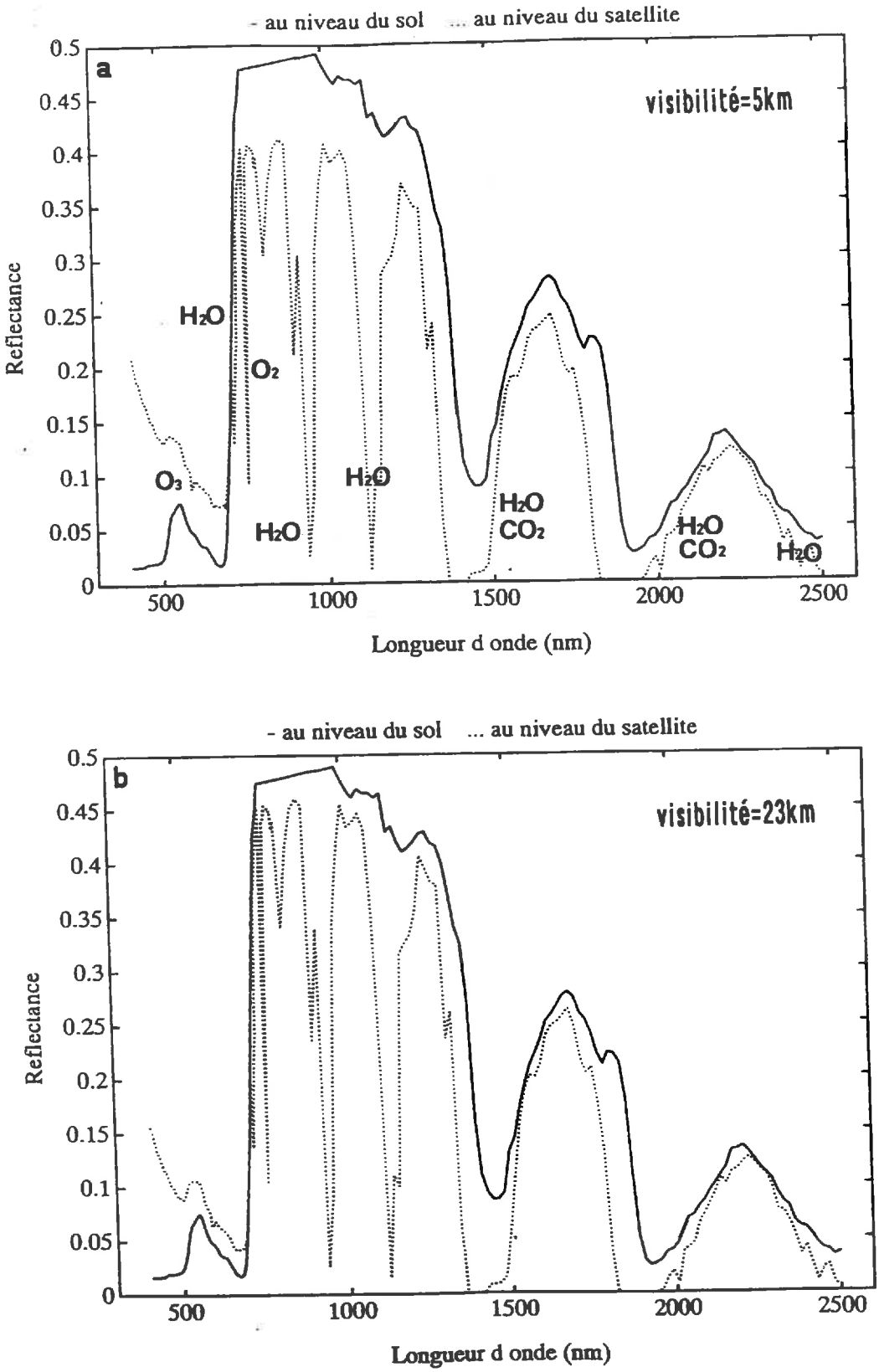


Figure 5.4: Réflectance spectrale d'un couvert végétal au niveau du sol (traits pleins) et au niveau du satellite (pointillés) pour deux visibilités: (a) V=5 km, (b) V=23 km. Les paramètres du modèle sont: $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.01\ cm, LAI = 5, \theta_l = 58^o, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o$ **et** $\psi_o = 0^o$.

des parcelles où les mesures n'ont pas été effectuées. Nous avons donc, dans un premier temps, calé ce paramètre grâce au modèle PROSPECT + SAIL. Sur 51 spectres disponibles, cette procédure a échoué 4 fois: il s'agit des parcelles #029 et #030 qui ont un faible LAI (LAI=0.15). Ces échecs peuvent être attribués à des erreurs sur les propriétés optiques des sols, ou bien à des problèmes d'aggrégation non pris en compte par les hypothèses du modèle SAIL. Les valeurs de θ_l s'échelonnent entre 22°9 et 66°8 (Tableau 5.2), avec une moyenne de 46°7 qui est très proche de la moyenne mesurée (47°1).

Hodanova (1972) a publié quelques valeurs de θ_l pour des couverts de betterave à sucre à différents stades de croissance: l'angle moyen d'inclinaison des feuilles varie de 61°6 au stade de développement de la surface foliaire ($LAI \approx 2.3$), à 54°1 lorsque la plante a atteint sont développement maximum ($LAI \approx 4.4$), et 41°7 au moment de la récolte ($LAI \approx 2.5$). Dans l'ensemble, les valeurs de θ_l que nous avons estimées à partir des spectres de réflectance (Tableau 5.2) sont comparables à celles publiées par Hodanova (1972), à l'exception des parcelles #024, #031, et #123, pour lesquelles θ_l est inférieur à 30° (couvert planophile). On peut attribuer ces faibles valeurs à une sur-estimation du LAI mesuré (nous avons montré précédemment que diminuer le LAI revenait à augmenter θ_l), ou à un stress hydrique qui entraine une diminution de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. En conclusion, nous supposerons que les valeurs de θ_l présentées dans le Tableau 5.2 sont effectivement celles des parcelles étudiées.

Conséquences

L'absence d'une partie des données expérimentales n'a pas permis de valider totalement le modèle PROSPECT + SAIL; on ne peut parler que d'une pseudo validation qui n'est cependant pas sans intérêt. Premièrement, les valeurs d'angle moyen d'inclinaison des feuilles estimées sont plausibles. Ensuite, les faibles rms du Tableau 5.2 montrent qu'on a une bonne reconstruction des spectres mesurés. En supposant le sol connu, cela signifie que 5 paramètres (N, C_{ab}, C_w, LAI et θ_l) suffisent à décrire une grande partie de la réflectance spectrale d'un couvert végétal. On peut remarquer que les écarts quadratiques moyens sont moins bons que ceux obtenus auparavant avec les feuilles ou les sols nus: le nombre de données expérimentales plus faible, la complexité accrue du modèle peuvent expliquer cela. Il est désormais possible d'envisager la modélisation du transfert atmosphérique et la simulation de spectres de réflectance apparente au niveau du satellite.

5.2 Au niveau du satellite

5.2.1 Le modèle 5S (Tanré et al., 1985)

Tanré et al. (1985) ont développé un modèle de simulation des effets atmosphériques qui permet d'estimer rapidement le signal au niveau d'un capteur aéroporté ou satellisé avec une bonne précision: c'est le modèle 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire). Ce modèle assez complexe et exhaustif - il peut simuler les capteurs METEOSAT, AVHRR, TM ou HRV - ne sera pas détailé ici. Nous l'avons simplifié en ne considérant qu'un seul modèle d'atmosphère (Midlatitude Summer) et d'aérosol (continental). Les paramètres d'entrée sont:

- les géométries d'éclairement (θ_s) et de visée (θ_o et ψ_o).
- la réflectance de la cible (ρ_c) et celle de l'environnement (ρ_e) qu'on assimile par commodité à ρ_c.
- la visibilité horizontale au sol V.

Le pas de calcul ($\Delta\lambda$) est constant entre 400 nm et 2500 nm et est égal à 5 nm.

5.2.2 Couplage de PROSPECT+SOILSPECT+SAIL et 5S

La réflectance directionnelle du couvert ρ_c est le paramètre de sortie du modèle PROSPECT + SOILSPECT + SAIL: il devient désormais un paramètre d'entrée du modèle 5S. Les conditions de mesure étant déjà définies, la visibilité V est le seul paramètre nouveau à introduire dans ce modèle. Il n'existe pas de relation simple entre le pourcentage de rayonnement diffus *skyl* et la visibilité V: celle-ci dépend de l'angle zénithal solaire θ_s et de la longueur d'onde à laquelle on se place. Pour une valeur de V donnée, le modèle 5S nous a permis de simuler un spectre de *skyl* qui est réintroduit dans le modèle PROSPECT + SOILSPECT + SAIL + 5S pour déterminer la réflectance apparente ρ_* au niveau du satellite. Nous supposerons que les propriétés optiques de l'environnement sont identiques à celles de la cible. Les Figures 5.4a et 5.4b présentent un spectre de réflectance de couvert au niveau du sol et à l'extérieur de l'atmosphère pour V=5 km (mauvaise visibilité) et V=23 km (ciel très clair). On remarquera les bandes d'absorption gazeuses plus ou moins larges, liées à la vapeur d'eau, au dioxide de carbone, à l'oxygène et à l'ozone. Ces bandes affectent surtout le proche et le moyen infrarouge. Le visible est marqué par les processus de diffusion qui affectent d'autant plus le signal radiométrique qu'on se dirige vers les courtes longueurs d'onde.

5.3 Conclusion partielle

Nous disposons, avec le couplage de PROSPECT, SOILSPECT, SAIL et 5S, d'un outil de modélisation de la réflectance spectrale des couverts végétaux très puissant. Que ce soit au niveau de la feuille, du couvert ou du satellite, ces modèles représentent la réalité de façon imparfaite, mais ils devraient nous suffire à évaluer le potentiel et les limites de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux. Nous essayerons, dans la troisième partie, de comprendre les déterminismes des glissements spectraux qui ont, jusqu'à présent, été étudiés de façon très qualitative; nous montrerons ensuite dans quelles limites on peut, à partir d'un spectre de réflectance acquis au nadir, extraire des informations pertinentes sur les propriétés biophysiques du couvert par inversion de modèle.

Partie III

Caractérisation du couvert par radiométrie haute résolution spectrale

Chapitre 6

Etude des glissements spectraux

Différentes expérimentations conduites depuis l'échelle de la feuille jusqu'à celle du couvert observé depuis le satellite, ont tenté de relier les déformations spectrales de la réflectance aux propriétés biophysiques de la végétation. La plupart de ces études se limitent au "red edge", augmentation brutale des propriétés optiques des couverts entre le rouge (650 nm) et le proche infrarouge (800 nm). Les déformations sont décrites le plus souvent par les dérivées premières ou secondes de la réflectance par rapport à la longueur d'onde, ou par les glissements spectraux de points singuliers tels que le point d'inflexion du "red edge". Relativement peu d'études ont analysé le contenu en information de ces caractéristiques spectrales fournies par les spectro-imageurs avec celui des bandes larges des satellites actuels.

Ce chapitre essaie d'analyser les déformations spectrales à l'échelle de la feuille et du couvert. Bien que ces déformations concernent tout le spectre, nous nous intéresserons surtout aux glissements spectraux du "red edge", et à la position du point d'inflexion λ_i. Nous évaluerons l'intérêt de cet indice spectral par rapport à des combinaisons de bandes larges classiques. Ces analyses reposent sur des simulations de modèles à l'échelle de la feuille et du couvert. Ensuite, nous étudierons les problèmes liés à une observation satellitaire et aux effets atmosphériques.

6.1 Analyse à l'échelle de la feuille

6.1.1 Dérivation analytique du modèle PROSPECT

L'expression analytique du modèle PROSPECT rend possible sa dérivation formelle par rapport à la longueur d'onde, et par conséquent le calcul de points d'inflexion ou d'extrema les encadrant. Comme nous l'avons détaillé au chapitre 3, PROSPECT permet de simuler les propriétés optiques des feuilles en fonction de leurs caractéristiques biophysiques. La structure interne du mésophylle est décrite par le paramètre N qui représente un nombre moyen d'interfaces air/parois cellulaires. Ce sont les variations d'indice de réfraction à chaque interface qui créent la diffusion. N ne dépendant pas de λ, seul l'indice de réfraction $n(\lambda)$ varie faiblement avec la longueur d'onde: nous supposerons qu'il est constant sur un domaine restreint. Les principales variations spectrales sont liées à l'absorption de la lumière par l'eau et les constituants biochimiques de la feuille. Sur tout le domaine optique, le coefficient d'absorption $K(\lambda)$ peut s'écrire (Equation 3.37):

$$k(\lambda) = \sum_i K_i(\lambda).C_i + k_e(\lambda) \tag{6.1}$$

où $k_e(\lambda)$ caractérise l'absorption faible mais non nulle d'une feuille albinos (sans pigments) et sèche (sans eau). $K_i(\lambda)$ est le coefficient d'absorption spécifique du constituant i, et C_i sa concentration. La dérivation formelle de PROSPECT suppose que nous ayons une expression analytique de k_e et K_i en fonction de la longueur d'onde. Au delà de 450 nm, $k_e(\lambda)$ est presque linéaire et nous l'assimilerons, en première approximation, à une droite; en remarquant que les domaines d'absorption des pigments

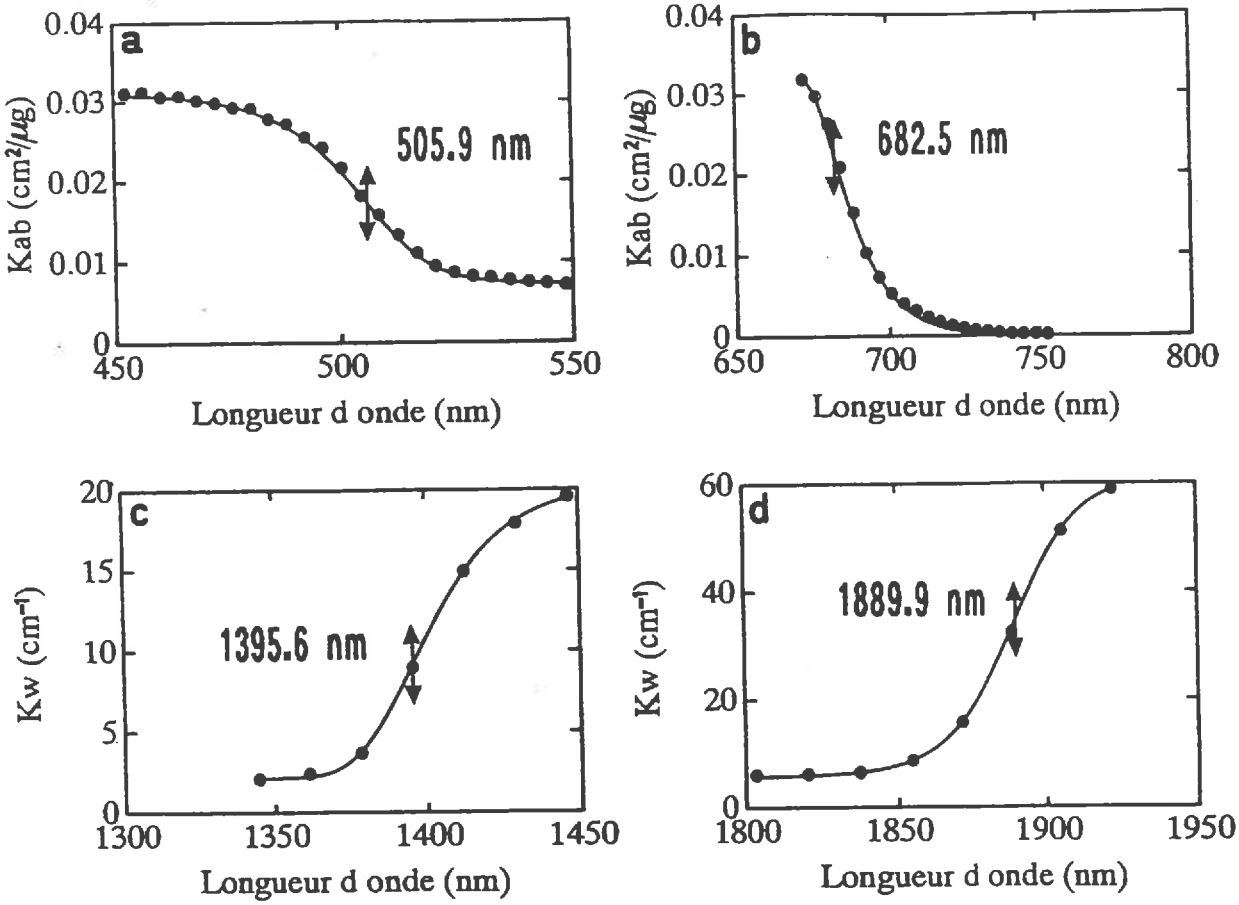


Figure 6.1: Ajustement de portions du coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle a+b (Figures a et b) et de l'eau (Figures c et d) à des logistiques généralisées, et détermination analytique du point d'inflexion correspondant.

λ (nm)	452-548	672-752	1340-1446	1800-1922
α_1	-0.0239	-0.0317	18.0795	55.2895
α_2	-1.3020	-1.0000	0.1182	0.1021
α_3	-21.4672	0.9396	-0.5505	-16.8349
α_4	0.1588	0.0982	0.0609	0.0990
α_5	491.2	672.0	1371.8	1864.1
α_6	-0.4806	2.9942	-7.7388	-0.7681
n	1.4867	1.4422	1.3868	1.3258
k_e	-0.0487λ+114.06			
λ_i (nm)	505.9	682.5	1395.6	1889.9

Tableau 6.1: Valeurs des coefficients α de la logistique généralisée (Equation 6.2) et de l'indice de réfraction n pour 4 domaines spectraux. λ_i est la longueur d'onde du point d'inflexion de la courbe $K(\lambda)$ exprimée en $cm^2.\mu g^{-1}$.

chlorophylliens ($K_{ab}(\lambda)$) et de l'eau ($K_w(\lambda)$) sont distincts (Figures 3.14 et 3.15), nous avons décrit chaque portion de la courbe $K(\lambda)$ par une logistique généralisée (Figure 6.1):

$$K(\lambda) = \alpha_1(\alpha_2 + (1 - \alpha_3 e^{-\alpha_4(\lambda-\alpha_5)})^{\alpha_6}) \tag{6.2}$$

Le Tableau 6.1 donne les valeurs des coefficients α pour quatre domaines spectraux où une variation brutale des propriétés optiques peut être observée, les indices de réfraction moyens ainsi que l'équation de k_e. Ces expressions analytiques de $K(\lambda)$ permettent donc de calculer, par dérivation formelle du modèle PROSPECT, la position du point d'inflexion (λ_i) de la réflectance ou de la transmittance des feuilles pour différents domaines spectraux.

6.1.2 Etude de sensibilité

Considérons d'abord la région du "red edge" (672-752 nm): la Figure 6.2a montre une très forte dépendance de λ_i vis-à-vis de la concentration en chlorophylle, mais aussi une sensibilité à la structure interne du mésophylle (N). λ_i varie de 683 nm pour de très faibles concentrations en chlorophylle, à un maximum de 715 nm pour des feuilles très vertes, épaisses, ayant un mésophylle spongieux ($N > 2.0$). Ces simulations sont en parfait accord avec les résultats expérimentaux obtenus par Belanger (1990) sur des espèces d'arbres à feuilles caduques ou par Horler et al. (1983) sur des espèces arborées Dicotylédones et des céréales Monocotylédones. Le point d'inflexion calculé à partir de la courbe de transmittance (Figure 6.2b) est plus sensible au paramètre de structure. Des comportements similaires sont observés dans les domaines du bleu-vert (452 nm - 548 nm) avec la concentration en chlorophylle (C_{ab}) et du moyen infrarouge (1340 nm -1446 nm et 1800-1922 nm) en fonction de l'épaisseur équivalente en eau (C_w). Les Figures 6.3 illustrent clairement la dérive du point d'inflexion dans différents domaines spectraux.

6.1.3 Equivalence entre λ_i et la réflectance en bandes larges

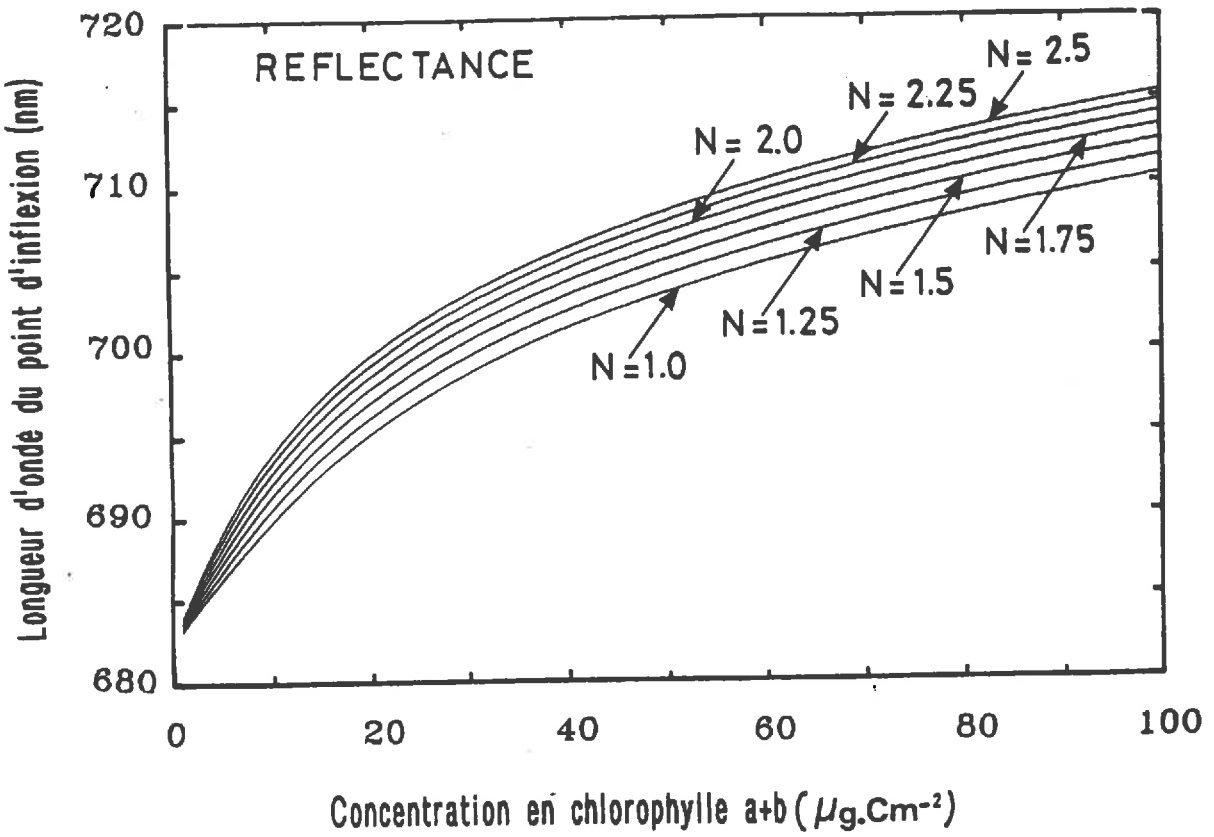
Du fait de la non superposition des domaines d'absorption de l'eau et des pigments chlorophylliens, les propriétés optiques des feuilles sont en réalité entièrement expliquées par les deux variables d'entrée C et N sur un domaine spectral limité (visible / proche infrarouge ou proche infrarouge / moyen infrarouge). A l'intérieur d'un de ces domaines, la connaissance de la réflectance ρ (et/ou de la transmittance τ) dans deux bandes spectrales indépendantes λ_1 et λ_2 devrait théoriquement permettre d'extraire les variables C et N par inversion du modèle, puis de calculer la valeur de λ_i correspondante. Il existerait donc une relation univoque $\mathcal{F}$ entre le glissement spectral λ_i et le couple de réflectance (ou de transmittance) ($\rho_{\lambda_1}, \rho_{\lambda_2}$):

$$\lambda_i = \mathcal{F}(\rho_{\lambda_1}, \rho_{\lambda_2}) \tag{6.3}$$

Dans le domaine du "red edge", λ_i s'ajuste très bien ($r^2 = 0.995, rms = 0.73$ nm) à une surface polynômiale d'ordre 4 en ρ_{672} (longueur d'onde du maximum d'absorption) et ρ_{780} (plateau proche infrarouge) qui représente la fonction $\mathcal{F}$:

$$\begin{aligned}\lambda_i \;=\; & c_0 + c_1.\log\rho_{672} + c_2.\log^2\rho_{672} + c_3.\log^3\rho_{672} + c_4.\log^4\rho_{672} + c_5.\rho_{780} + c_6.\rho_{780}\log\rho_{672} \\ & + c_7.\rho_{780}\log^2\rho_{672} + c_8.\rho_{780}\log^3\rho_{672}\end{aligned} \tag{6.4}$$

avec $c_0 = 754.7, c_1 = 158.4, c_2 = 117.4, c_3 = 37.4, c_4 = 4.5, c_5 = -61.6, c_6 = -105.4, c_7 = -42.3$ et $c_8 = -5.6$. Nous confondons ici les réflectances en bande large rouge et proche infrarouge (bandes LANDSAT ou SPOT par exemple) aux réflectances en haute résolution spectrale ρ_{672} et ρ_{780} à cause de la faible variation de la réflectance spectrale autour de ces longueurs d'onde. A l'échelle de la feuille, il y donc équivalence entre les caractéristiques des déformations spectrales et un jeu très limité de réflectances spectrales. En particulier, quand un seul constituant absorbant est considéré, hypothèse en partie justifiée, deux bandes suffisent à caractériser les déformations spectrales sur un domaine de longueur d'onde donné.



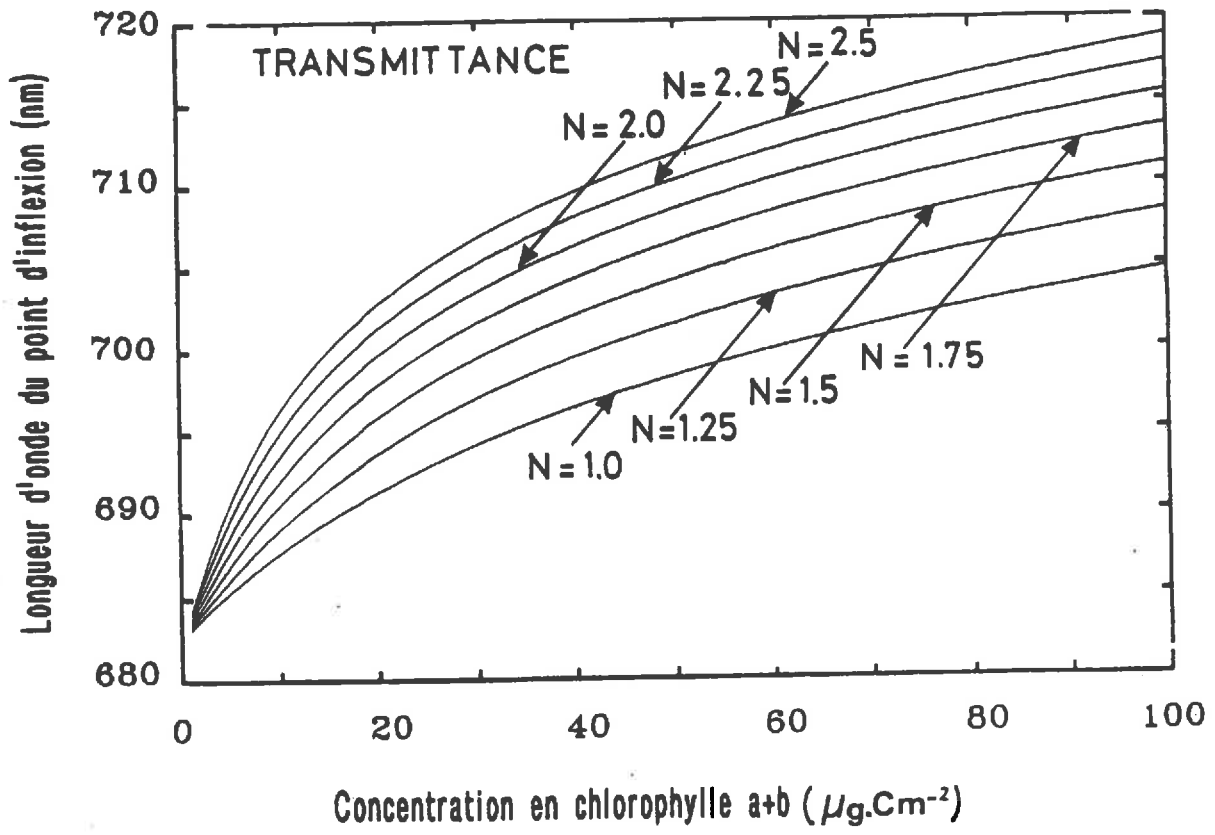


Figure 6.2: Sensibilité de la position du point d'inflexion du "red edge" λ_i à la concentration en chlorophylle (C_{ab}) et à la structure interne du mésophylle (N): (a) réflectance, (b) transmittance.

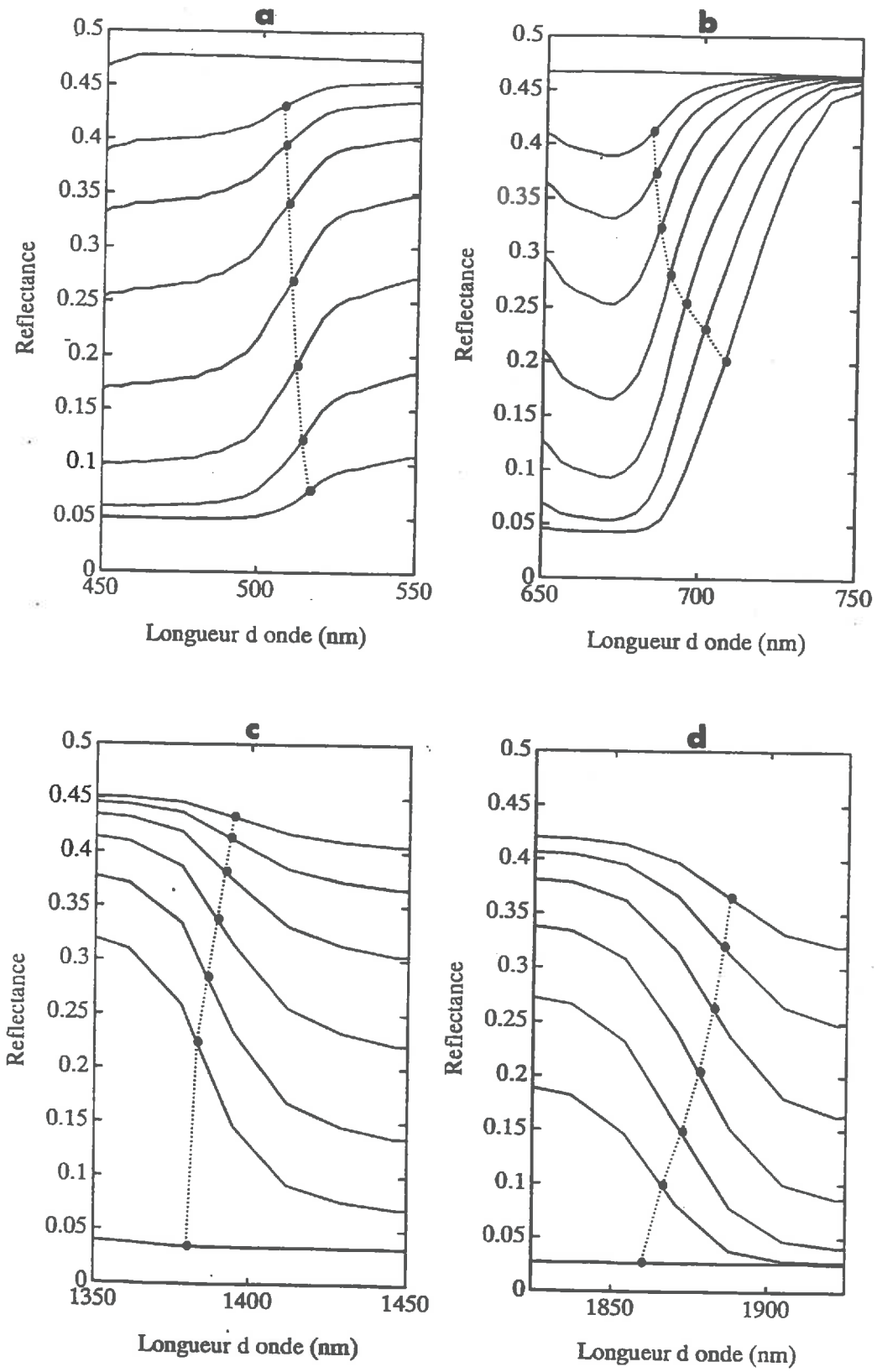


Figure 6.3: Dérive des points d'inflexion de différentes portions de réflectance dans le visible (Figures a et b) et le moyen infrarouge (Figures c et d), en fonction de la concentration en chlorophylle et de l'épaisseur équivalente en eau.

6.2 Analyse à l'échelle du couvert

Comme pour les indices de végétation, il existe une variation temporelle de λ_i liée à l'état phénologique ou physiologique des plantes (Baret et al., 1987). Les variations de λ_i observées sur des couverts végétaux sont en partie dues aux variations observées sur les feuilles, mais aussi à d'autres facteurs propres au couvert. Ce paragraphe est destiné à établir, au moyen de modèles, les relations entre λ_i et les variables biophysiques du modèle.

6.2.1 Dérivation analytique du modèle PROSPECT+SAIL

Théorie

Le couplage des modèles PROSPECT et SAIL permet de simuler des spectres de réflectance de couverts végétaux sur tout le domaine optique. Sur le "red edge", la réflectance du couvert $R(\lambda)$ est définie par la fonction $\mathcal{R}_1$:

$$R(\lambda) = \mathcal{R}_1(\rho(\lambda), \tau(\lambda), LAI, \theta_l, \theta_o, \psi_o, \theta_s, skyl(\lambda), \rho_s(\lambda)) \tag{6.5}$$

Parmi les variables de la fonction $\mathcal{R}_1$, on distinguera:

- **celles qui ont une dépendance spectrale:** réflectance $\rho(\lambda)$ et transmittance $\tau(\lambda)$ de la feuille, réflectance du sol $\rho_s(\lambda)$, pourcentage de rayonnement diffus $skyl(\lambda)$.
- **celles qui ne dépendent pas de la longueur d'onde:** indice foliaire LAI, angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l, angle zénithal θ_o et azimutal ψ_o de visée, angle zénithal solaire θ_s.

Entre 672 nm et 780 nm, les propriétés optiques des feuilles peuvent être réduites à deux paramètres: N et C_{ab}. Comme nous l'avons signalé au Chapitre 4, le modèle SOILSPECT ne permet pas, pour l'instant, de synthétiser le spectre d'albédo de simple diffusion $\omega(\lambda)$ en quelques paramètres. Sur les 26 échantillons de sol étudiés, nous avons cependant mis en évidence une variation lineaire de ω avec la longueur d'onde (Tableau 4.2):

$$\omega(\lambda) = \omega_1.\lambda + \omega_2 \tag{6.6}$$

Le modèle SOILSPECT permet de distinguer la fraction de rayonnement ayant subi une diffusion simple I_s (Equation 4.1), de celle ayant subi des réflexions multiples I_m (Equation 4.2). I_s est proportionnel à l'albédo de simple diffusion ω et donc à la longueur d'onde λ. En outre, nos simulations montrent que pour $\omega < 0.4$ (c'est le cas le plus fréquent), I_m est aussi proportionnel à ω. En conséquence, la diffusion totale I peut s'écrire sous la forme: $I = I_1.\lambda + I_2$. Cette confirmation des travaux de Bowers et Hanks (1965), ou Stoner et Baumgardner (1985), nous a amenés à reprendre le concept de droite du sol moyenne entre le rouge (672 nm) et le proche infrarouge (780 nm) qui permet d'exprimer simplement ρ_s en fonction de λ et d'un indice de brillance du sol, qui est la réflectance rouge $\rho_s(672)$ (Richardson et Wiegand, 1977; Baret et Guyot, 1991):

$$\rho_s(\lambda) = \rho_s(672) + \frac{\lambda - 672}{780 - 672}(1.2\,\rho_s(672) + 0.04) \tag{6.7}$$

Enfin le pourcentage de rayonnement diffus $skyl$ variant faiblement avec la longueur d'onde et ayant une influence limitée sur la réflectance du couvert, nous le fixerons à 0.2 (80% du rayonnement incident est supposé provenir d'une source ponctuelle). On définit alors une nouvelle fonction $\mathcal{R}_2$:

$$R(\lambda) = \mathcal{R}_2(\lambda, X) \tag{6.8}$$

où $X = (N, C_{ab}, LAI, \theta_l, \theta_o, \psi_o, \theta_s, \rho_s(672))$ est le vecteur des variables indépendantes de la longueur d'onde. L'équation 6.8 permet donc de calculer analytiquement la dérivée seconde $\frac{d^2R(\lambda)}{d\lambda^2}$ et de rechercher λ_i tel que cette dérivée s'annule.

Conditions d'indépendance de λ_i vis-à-vis de certains paramètres du modèle

Le but de ce paragraphe est d'établir dans quelles conditions λ_i est indépendant de variables perturbant l'information propre au couvert. La réflectance spectrale du couvert peut s'écrire sous la forme $R = \mathcal{R}_3(\Omega(\lambda), \Theta(\lambda))$, où Ω représente les variables qu'on souhaite estimer à partir d'indices spectraux et Θ les variables pertubatrices dont on souhaite réduire les effets. La dérivée seconde de la réflectance par rapport à la longueur d'onde est définie par $g = \frac{d^2R(\lambda)}{d\lambda^2}$. La position du point d'inflexion λ_i s'obtient en annulant g et est définie comme une fonction implicite: $g(\lambda_i, \Theta) = 0$. Les propriétés des fonctions implicites permettent d'écrire:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \Theta} = -\frac{\frac{\partial g}{\partial \Theta}}{\frac{\partial g}{\partial \lambda}} \tag{6.9}$$

Il y a équivalence entre l'indépendance du point d'inflexion λ_i vis-à-vis de la variable perturbatrice Θ, et celle de la dérivée seconde g vis-à-vis de cette même variable:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \Theta} = 0 \Longleftrightarrow \frac{\partial g}{\partial \Theta} = 0 \tag{6.10}$$

Quelles conditions doit remplir la variable Θ pour que λ_i soit indépendant de celle-ci? Le calcul de la dérivée seconde de la réflectance du couvert par rapport à λ donne:

$$g = \frac{d^2R}{d\Theta^2}\left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + \frac{dR}{d\Theta}\frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{d^2R}{d\Omega^2}\left(\frac{d\Omega}{d\lambda}\right)^2 + \frac{dR}{d\Omega}\frac{d^2\Omega}{d\lambda^2} \tag{6.11}$$

La dérivée de g par rapport à Θ s'écrit:

$$\frac{dg}{d\Theta} = \frac{d^3R}{d\Theta^3}\left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + 3\frac{d^2R}{d\Theta^2}\frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{dR}{d\Theta}\frac{d\lambda}{d\Theta}\frac{d^3\Theta}{d\lambda^3} + \frac{d\Omega}{d\Theta}\left[\frac{d^3R}{d\Omega^3}\left(\frac{d\Omega}{d\lambda}\right)^2 + 3\frac{d^2R}{d\Omega^2}\frac{d^2\Omega}{d\lambda^2} + \frac{dR}{d\Omega}\frac{d\lambda}{d\Omega}\frac{d^3\Omega}{d\lambda^3}\right] \tag{6.12}$$

Par hypothèse, les paramètres Ω et Θ sont indépendants ($\frac{d\Omega}{d\Theta} = 0$). L'Equation 6.12 se simplifie donc et donne la condition pour laquelle g, et donc λ, ne dépendent pas de Θ:

$$\frac{d^3R}{d\Theta^3}\left(\frac{d\Theta}{d\lambda}\right)^2 + 3\frac{d^2R}{d\Theta^2}\frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} + \frac{dR}{d\Theta}\frac{d\lambda}{d\Theta}\frac{d^3\Theta}{d\lambda^3} = 0 \tag{6.13}$$

qui est vérifiée en particulier si:

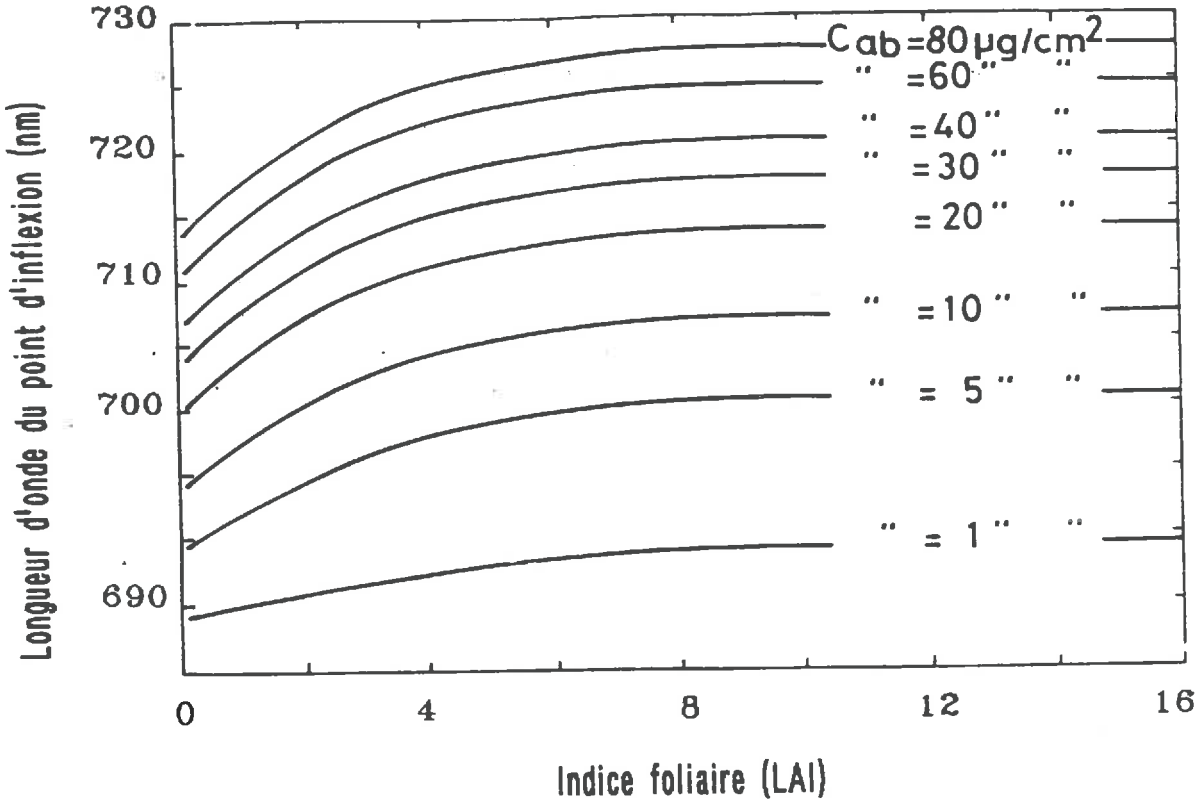
$$\frac{d^2R}{d\Theta^2} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d^2\Theta}{d\lambda^2} = 0 \tag{6.14}$$

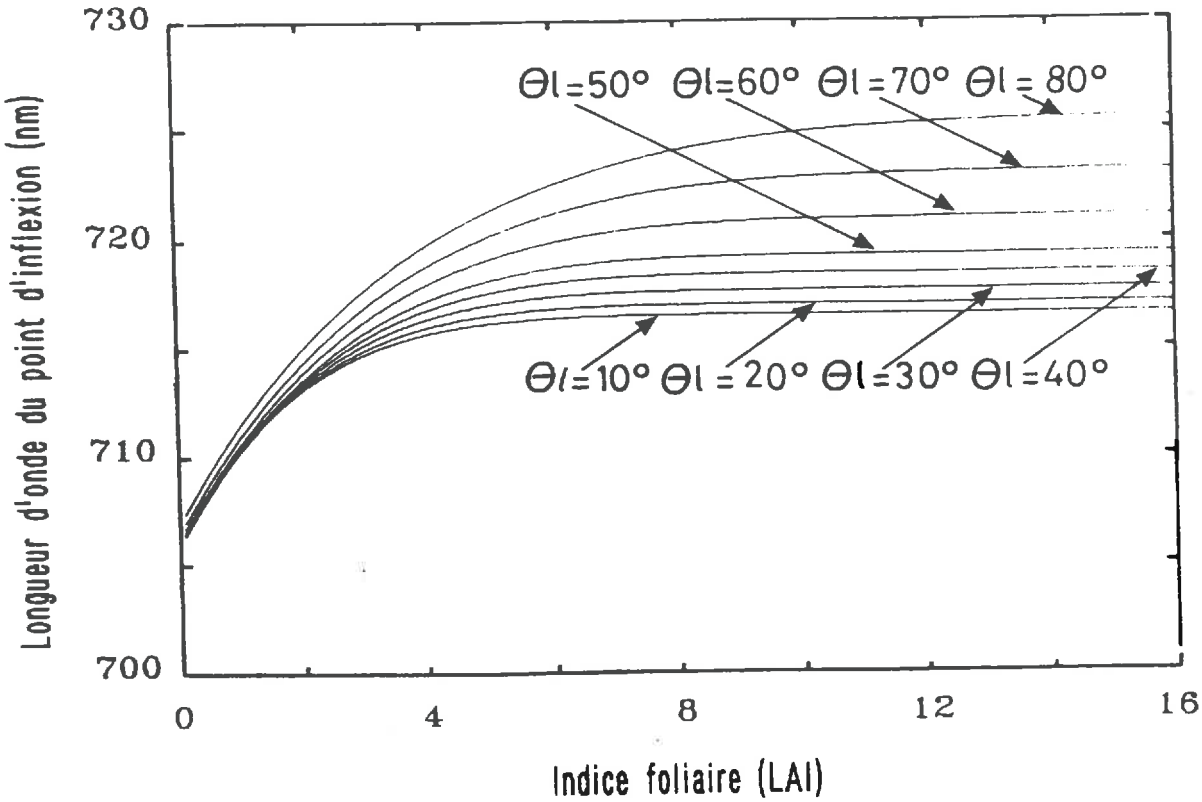
Les conditions 6.14 sont vérifiées lorsque la réflectance du couvert est liée linéairement à un facteur, et si ce facteur varie lui aussi linéairement avec la longueur d'onde sur une portion du spectre: alors, la dérivée seconde g, et la position du point d'inflexion λ_i, sont indépendantes de ce facteur sur cette même portion de spectre. Cette propriété peut s'appliquer à la réflectance du sol: la relation entre ρ_s et la réflectance du couvert peut être considérée comme linéaire (Baret, 1988), et le spectre de réflectance d'un sol nu est lui aussi proche de la linéarité sur un domaine spectral réduit. En conséquence, on devrait observer une faible sensibilité de λ_i vis-à-vis de ρ_s.

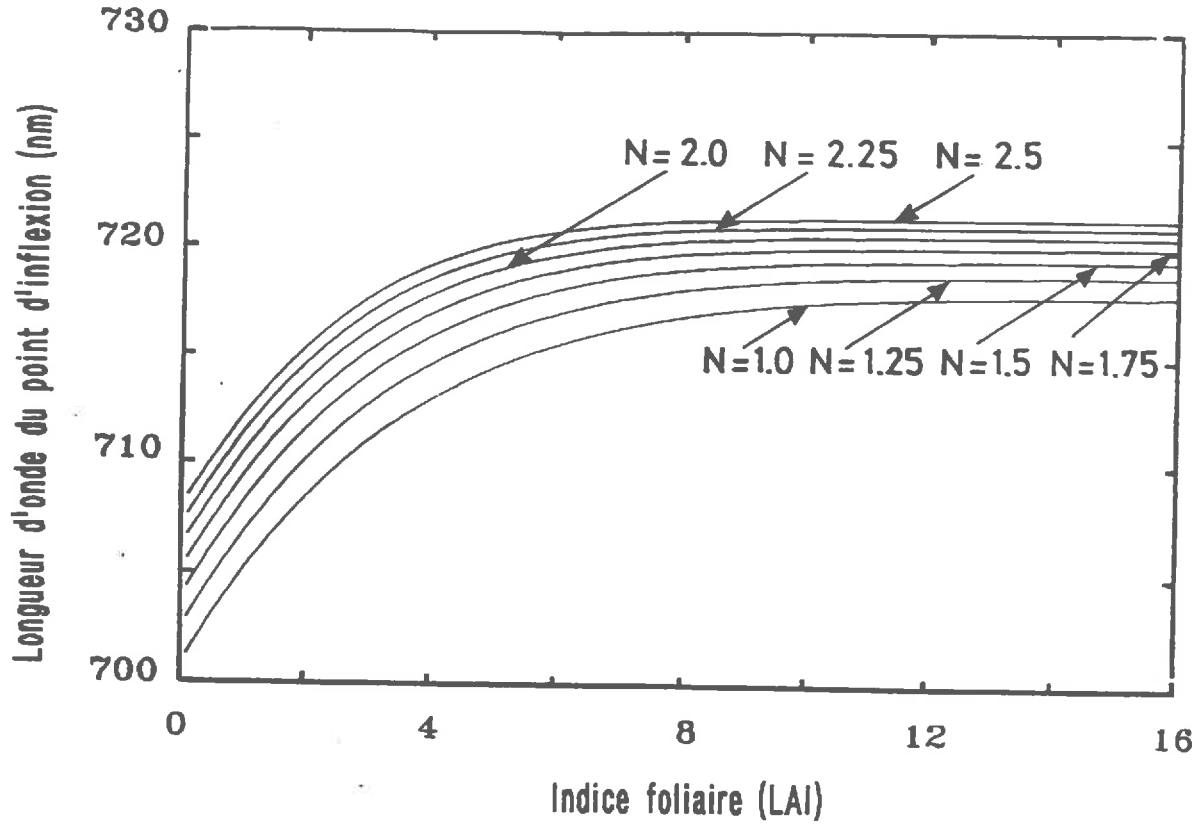
6.2.2 Etude de sensibilité

Relations entre λ_i et les variables d'état du couvert

Les simulations sont réalisées en visée verticale ($\theta_o = 0$). L'indice foliaire LAI étant la variable la plus importante contrôlant le fonctionnement du couvert, nous analyserons la sensibilité des différentes variables d'entrée en interaction avec le LAI. Il apparait que les glissements spectraux sont principalement déterminés par la concentration en chlorophylle et l'indice foliaire (Figure 6.4a).


Cab =80 µg/cm2
" =60 " "
" =40 " "
" =30 " "
= 20 " "
" =10 " "
" = 5 " "
" = 1 " "
730
720
710
700
690
0
4
8
12
16
Longueur d'onde du point d'inflexion (nm)
Indice foliaire (LAI)


Θl=50° Θl=60° Θl=70° Θl = 80°
Θl=10° Θl = 20° Θl=30° Θl=40°
730
720
710
700
0
4
8
12
16
Longueur d'onde du point d'inflexion (nm)
Indice foliaire (LAI)



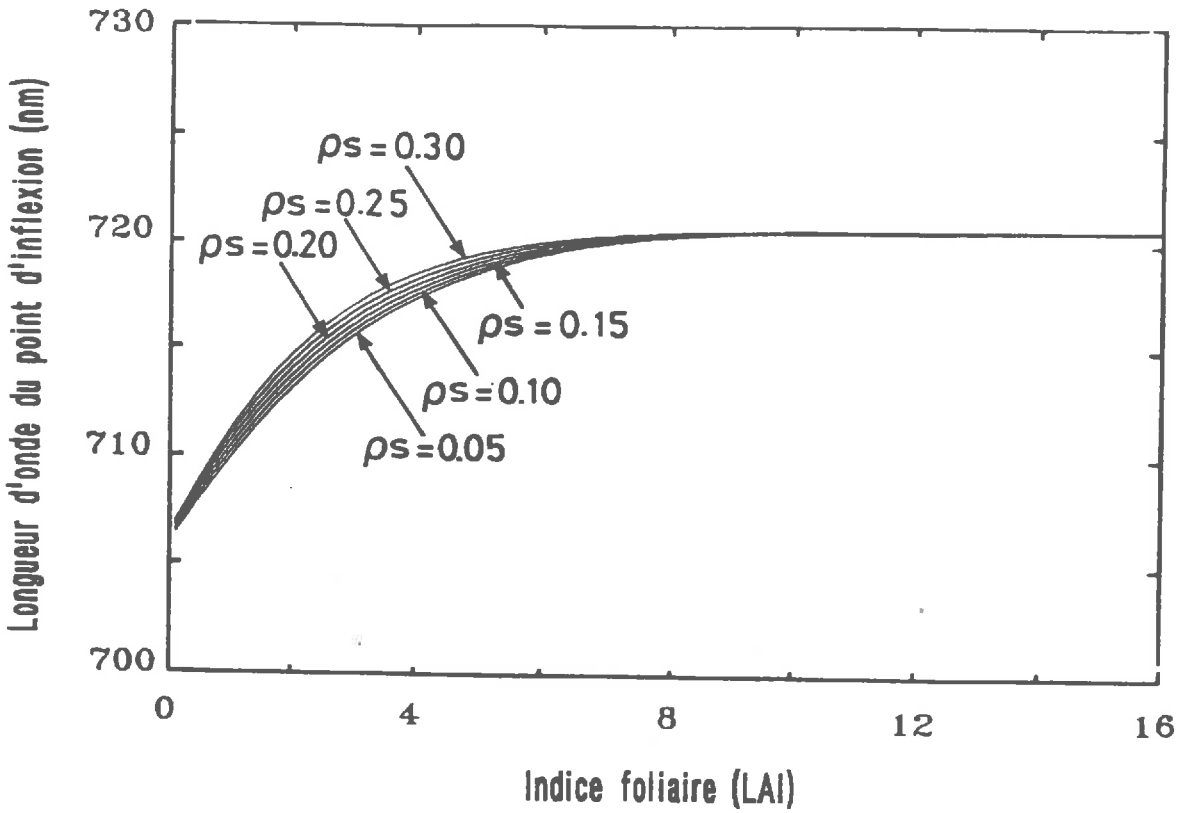


Figure 6.4: Sensibilité de λ_i à l'indice foliaire à: (a) la concentration en chlorophylle (C_{ab}, (b) la structure interne du mésophylle (N), (c) l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l), (d) la réflectance du sol ($\rho_s(672)$). Le jeu moyen de paramètres est: $N = 2.0, C_{ab} = 40\ \mu g.cm^{-2}, \theta_l = 58^o, \rho_s(672) = 0.15, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$, et $skyl = 0.2$.

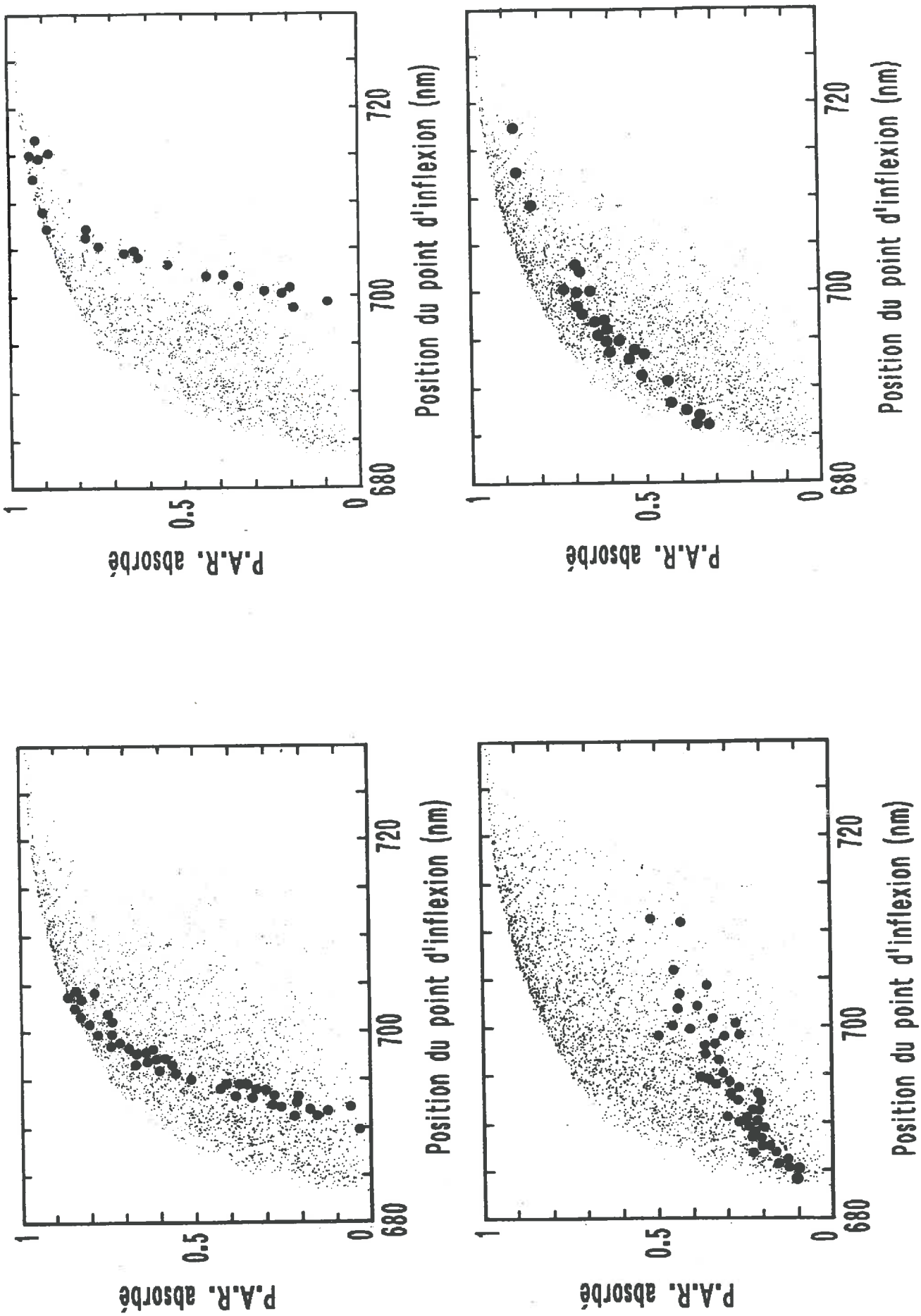


Figure 6.5: Relation entre la position du point d'inflexion du "red edge" λ_i et la fraction de PAR absorbé ε_i: Les symboles • représentent des classes particulières: (a) $10 < C_{ab} < 15\mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (b) $30 < C_{ab} < 35\mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (c) $0.5 < LAI < 1.0$ et $N < 1.2$; (d) $2.5 < LAI < 3.0$ et $N < 1.2$.

Une augmentation de la concentration en chlorophylle ou de l'indice foliaire provoque un glissement de λ_i vers les grandes longueurs d'onde ("red shift"). Ces résultats sont en bon accord avec ceux de Demetriades-Shah et Steven (1988) ou de Rock et al. (1988). On remarquera que la gamme de variation de λ_i pour un couvert est relativement proche de celle observée à l'échelle de la feuille, si l'on considère l'ensemble des valeurs de concentration en chlorophylle. En revanche, pour une concentration en chlorophylle donnée, la dynamique de λ_i est réduite à un maximum de 20 nm. L'effet de l'architecture du couvert n'est pas négligeable (Figure 6.4b). Comme l'avaient constaté Vanderbilt et al. (1988), le vent peut induire des glissements spectraux importants, particulièrement dans le cas de couverts érectophiles. Une variation de la structure interne du mésophylle provoque un glissement spectral de l'ordre de 4 nm lorsque N passe de 1.0 à 2.0 (Figure 6.4c). Enfin, on peut constater une relative indépendance de λ_i vis-à-vis des propriétés optiques du sol (Figure 6.4d). Ceci confirme le développement théorique du paragraphe précédent. Des simulations non présentées ici montrent une très faible influence des conditions d'éclairement (géométrie et rapport direct/diffus) sur λ_i.

Relations entre λ_i et ε_i

Le glissement spectral du "red edge" est un critère très sensible aux variables d'état du couvert (concentration en chlorophylle, indice foliaire). A l'instar des travaux de Hall et al. (1990), nous avons essayé de relier ce critère à une variable de fonctionnement du couvert: l'efficience de l'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif ε_i. Nous avons utilisé le jeu de paramètres défini dans le Chapitre 5 pour simuler ε_i et λ_i. Malgré l'utilisation d'un seul type de sol (sol naturel argileux), la Figure 6.5 montre une dispersion aussi forte que celle obervée entre ε_i et le $NDVI$ (Figure 5.2). Les Figure 6.5a et 6.5b montrent que pour un type de feuille donné (N et C_{ab} fixes), il existe une relation très nette entre λ_i et ε_i, les autres paramètres étant variables. On observe un comportement identique lorsqu'on fixe N et le LAI (Figures 6.5c et 6.5d). Ceci explique pourquoi des relations établies entre le $NDVI$ ou λ_i et ε_i sur un type de culture (la littérature en est riche!) ne peuvent pas être généralisées sans précaution à tous les couverts végétaux.

Conclusion

Il n'existe donc pas de relation univoque entre λ_i et les variables d'état ou de fonctionnement du couvert. Nous nous heurtons peut être ici aux même difficultés que celles rencontrées avec les indices de végétation classiques, à savoir leur incapacité à découpler les effets de la concentration en chlorophylle, de l'indice foliaire ou de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. Ces limitations sont évidement liées à la construction de ces indices qui se rapproche plus d'une méthode empirique que d'une méthode physique.

Cependant, les glissements spectraux semblent plus sensible aux caractéristiques propres du couvert et moins dépendants de facteurs perturbateurs comme la réflectance du sol, que les indices classiques. Les phénomènes de saturation qui rendent inutilisables ces indices au delà d'un LAI de 3 ou 4, apparaissent seulement pour des couverts très denses ($LAI > 8 - 9$). On remarquera cependant la faible dynamique du signal qui pourrait constituer un grave handicap lors de l'utilisation de données spatiales nécessairement bruitées. Mais avant de passer aux problèmes que posent l'utilisation de ce critère au niveau spatial, nous allons essayer de comparer cet indice haute résolution spectrale avec des combinaisons de bandes larges classiques et d'autres indices spectraux.

6.2.3 Proposition d'une paramétrisation simple de λ_i

Méthodes de calcul de λ_i

La position du point d'inflexion du "red edge" (λ_i) n'est pas directement accessible par mesure d'un spectre de réflectance de couvert; son calcul suppose des transformations préliminaires. On distinguera 3 grands types de méthodes:

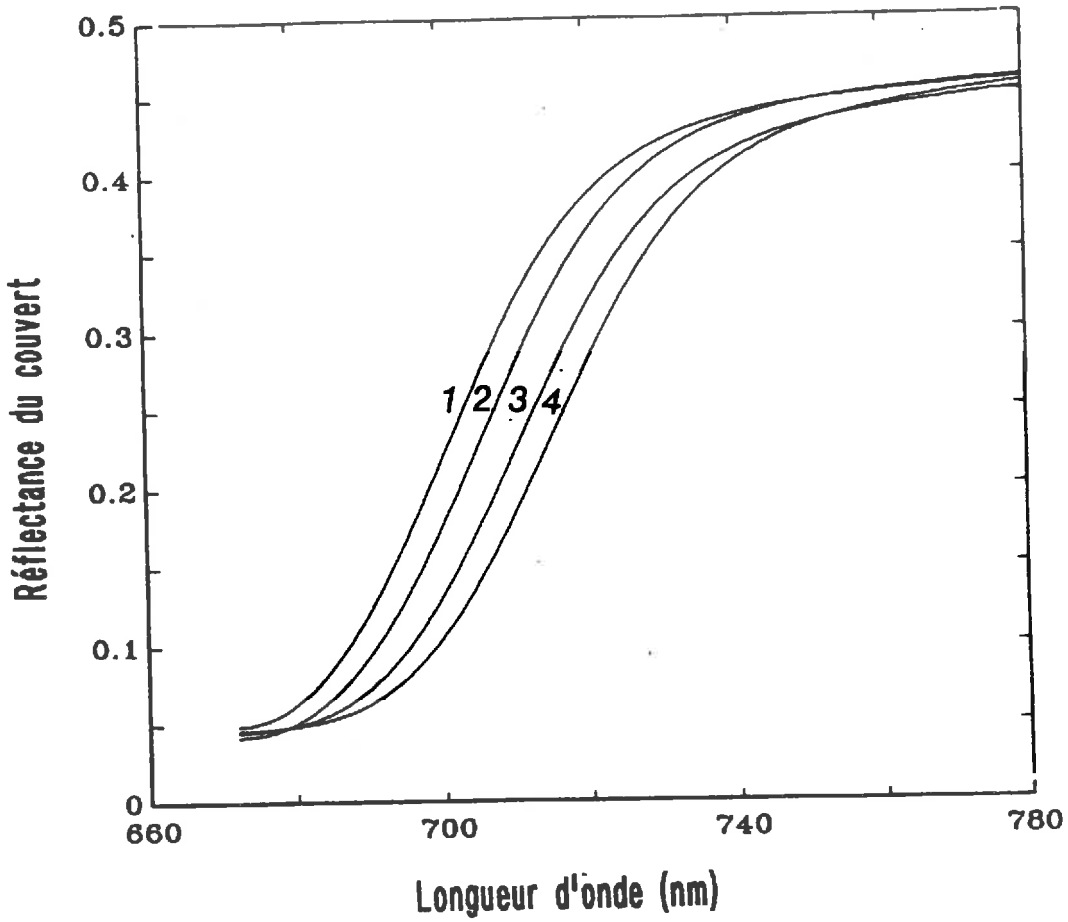


Figure 6.6: Spectres simulés de quatre types de couverts ayant des λ_i différents, mais des niveaux de réflectance rouge et proche infrarouge identiques. 1: X=(8.8, 2.43, 1.58, 54.5, 163.3, 66.6, 72, 0.22); 2:X=(46.5, 2.5, 1.2, 31, 27.8, 67, 45, 0.25); 3: X=(35.5, 2.27, 1.02, 48, 1.8, 69.3, 74.6, 0.18); 4: X=(17.9, 1.78, 1.9, 37.6, 106.8, 60.1, 44.9, 0.20).

- **lissage et dérivation numérique** sont couramment utilisés lorsqu'on dispose d'un grand nombre de bandes spectrales non perturbées (Chang et Collins, 1983; Horler et al., 1983a; Ferns et al., 1984).

- **l'ajustement des valeurs de réflectance spectrale à un modèle,** le plus souvent empirique, permet de lisser le bruit et de calculer analytiquement λ_i. Miller et al. (1990), Belanger (1990) ont utilisé un modèle gaussien inverse pour ajuster le "red edge": il comporte trois paramètres et nécessite donc un minimum de trois bandes spectrales pour son inversion.

- **des modèles linéaires** ont été proposés du fait de la quasi linéarité du spectre à proximité de λ_i. Gauthier et Neville (1985) caractérisent les glissements spectraux par le point d'interception de cette ligne droite avec l'abscisse. Guyot et Baret (1988) définissent le glissement spectral par la longueur d'onde du point ayant une valeur de réflectance égale à la moyenne entre celle du rouge et du proche infrarouge. Cette simplification extrême peut entraîner des erreurs importantes.

Equivalence entre λ_i et la réflectance en bandes larges

Parmi les paramètres du couvert, 3 ou 4 seulement influencent les glissements spectraux. A l'égal de ce que nous avons présenté au niveau de la feuille, nous allons tester si l'information fournie par la haute résolution spectrale sous la forme du point d'inflexion λ_i, est significativement différente ou non de celle contenue dans des bandes larges classiques. Pour une large gamme de variation des paramètres d'entrée (X) du modèle, nous avons simulé les réflectances R_{672} à 672 nm, R_{780} à 780 nm, et λ_i. Plutôt que de calculer toutes les combinaisons possibles des paramètres d'entrée du modèle (cela conduit très rapidement à des quantités astronomiques de jeux de données!), nous avons réalisé 8000 tirages aléatoires du vecteur X, en prenant les distributions déjà décrites au paragraphe 5.1.2 pour les paramètres N, C_{ab}, LAI, θ_l, θ_o, ψ_o, θ_s, et une distribution uniforme pour $\rho_s(672)$ ($0.1 \leq \rho_s(672) \leq 0.30$).

La surface correspondant à l'approximation polynômiale de λ_i en fonction de $\rho(672)$ et $\rho(780)$ n'est pas aussi lisse (rms=5.2 nm) que celle obtenue à l'échelle de la feuille. Ce résultat, illustré par la Figure 6.6, prouve que le critère λ_i n'est pas strictement équivalent à la connaissance des réflectances rouge et proche infrarouge. Si on ajoute une bande spectrale supplémentaire - on choisira par exemple une bande étroite centrée sur 710 nm - on améliore très sensiblement la part de variance expliquée de λ_i (rms=1.6 nm). Le polynôme reliant λ_i à $R_1 = R_{672}$, $R_2 = R_{710}$, et $R_3 = R_{780}$ s'écrit:

$$\begin{aligned}\lambda_i(pol) &= c_0 + c_1.R_1 + c_2.R_2 + c_3.R_3 + c_4.R_1^2 + c_5.R_2^2 + c_6.R_3^2 + c_7.R_1R_2 + c_8.R_1R_3 + c_9.R_2R_3 \\ &\quad + c_{10}.R_1R_2R_3 \end{aligned} \tag{6.15}$$

avec $c_0 = 703.1, c_1 = -183.5, c_2 = -202.0, c_3 = 141.8, c_4 = 44.2, c_5 = 34.1, c_6 = -162.6, c_7 = -303.6, c_8 = 769.7, c_9 = 180.4$ et $c_{10} = -379.0$. La Figure 6.7a montre la validité de cette paramétrisation. Il apparait donc que le glissement spectral caractérisé par λ_i contient des informations différentes de celles des bandes classiques rouge et proche infrarouge, et par conséquent des indices de végétation qui utilisent tous ces bandes. Il est probable qu'une grande part de la variablilité résiduelle de λ_i pourrait s'expliquer en utilisant un nombre relativement limité de bandes spectrales situées sur le "red edge" (de l'ordre de 4 à 5). Mais ces bandes spectrales devront être d'une part relativement étroites, et d'autre part correctement positionnées sur le spectre afin d'éviter les régions de forte absorption gazeuse. Il serait intéressant de comparer la valeur "réelle" de λ_i avec d'autres indices spectraux, qui représentent aussi la position en longueur d'onde du point d'inflexion du "red edge", mais dont la construction est différente.

Comparaison entre λ_i et d'autres indices haute résolution spectrale

Nous avons choisi les deux indices spectraux les plus utilisés dans la littérature: le premier, que nous noterons $\lambda_i(lin)$, est le centre de symétrie du "red edge" proposé par Baret et al. (1987); le

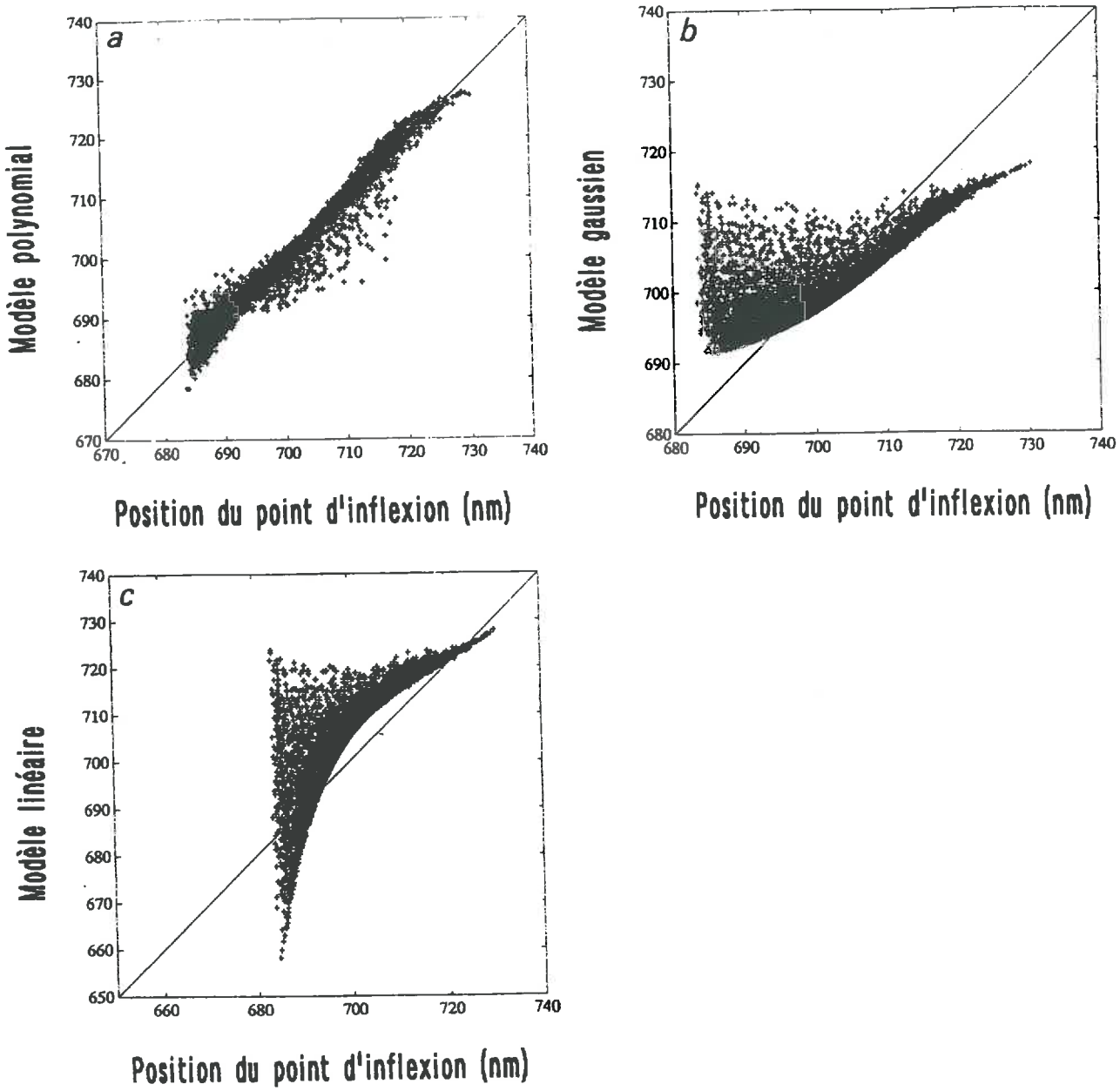


Figure 6.7: Relations entre λ_i calculé de façon analytique et: (a) λ_i estimé par ajustement polynomial des réflectances $(\rho(672), \rho(710), \rho(780))$, (b) λ_i estimé par inversion du modèle gaussien, (c) λ_i estimé par le modèle linéaire.

second, noté $\lambda_i(inv)$, est le point d'inflexion du "red edge" calculé après ajustement des valeurs de réflectance spectrale à une gaussienne (Bonham- Carter, 1988; Miller et al., 1990). Les Figures 6.7b et 6.7c montrent les difficultés de ces indices à représenter λ_i.

L'amplitude des glissements spectraux étant en général assez faible, il nous a semblé nécessaire d'estimer la répercution, sur le calcul de $\lambda_i(pol)$, $\lambda_i(lin)$, $\lambda_i(inv)$ ou du $NDVI$, d'éventuelles erreurs de mesures (surtout les niveaux de réflectance, la position en longueur d'onde des bandes spectrales utilisées pour construire ces indices étant supposée exacte $\Longrightarrow \Delta\lambda = 0$). La Figures 6.8 présente les erreurs relatives pour chaque indice en fonction de la concentration en chlorophylle (Figure 6.8a) et de l'indice foliaire (Figure 6.8b): on constate que celle-ci est plus importante pour de faibles valeurs de C_{ab} et LAI et qu'elle est généralement plus importante pour le $NDVI$ que pour les indices spectraux. Cette évaluation repose sur des hypothèses simplifiées, et l'erreur devrait être maximum. Cette étude nous conduit naturellement à analyser les effets atmosphériques et plus généralement à étudier le passage à l'échelle spatiale.

6.3 Analyse à l'échelle spatiale

Lorsqu'on essaie de transposer à l'échelle spatiale, les résultats obtenus au niveau du sol, on doit tenir compte des effets de l'atmosphère comme le montre la Figure 5.4. Il est essentiel de savoir si les glissements spectraux observés au niveau du sol seront conservés au niveau du satellite. Guyot et Baret (1988) se sont les premiers préoccupés de cette question: ils ont montré que $\lambda_i(lin)$ n'était pratiquement pas affecté par l'atmosphère. Nous essaierons, dans cette section, d'expliquer ce phénomène qui donne aux indices spectraux tout leur intérêt.

6.3.1 Les effets atmosphériques

Malgré la complexité des mécanismes du transfert atmosphérique, on peut en première aproximation relier de manière simple la réflectance apparente au niveau du satellite (ρ_*) à la réflectance intrinsèque de la cible (ρ_c), dans le cas où l'environnement et la cible ont des caractéristiques spectrales voisines (Conel et al., 1988). On peut décomposer ρ_* de la façon suivante:

$$\rho_* = \mathcal{T}_g(a\rho_c + \rho_e + \rho_a) \tag{6.16}$$

avec $\mathcal{T}_g$=transmission gazeuse, ρ_e la réflectance de l'environnement, et ρ_a la réflectance de l'atmosphère. Dans le domaine du "red edge", des simulations réalisées à partir du modèle 5S (Tanré et al., 1990) ont montré que:

$$a \approx a1\lambda + a2 \tag{6.17}$$

$$\rho_e \approx \rho_{e1}\rho_c + \rho_{e2} \tag{6.18}$$

$$\rho_a \approx \rho_{a1}\lambda + \rho_{a2} \tag{6.19}$$

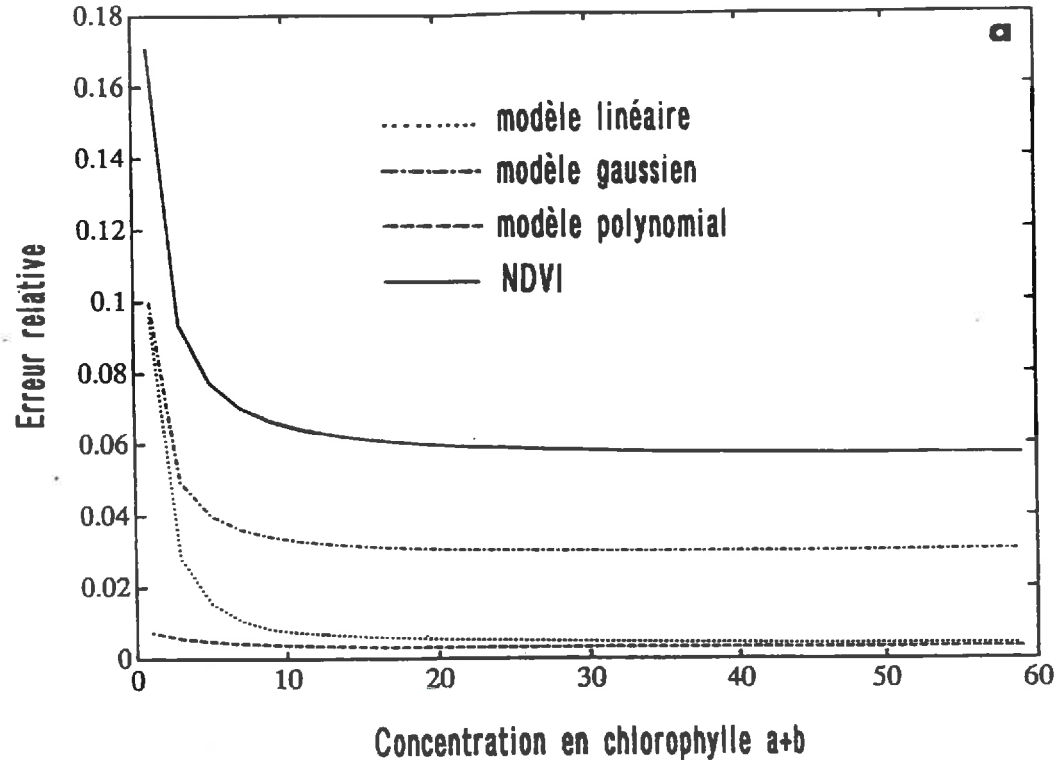
Si de plus, on ne se préoccupe pas, pour l'instant, de la transmission gazeuse $\mathcal{T}_g$, ρ_* peut s'écrire sous la forme:

$$\rho_* = u(\lambda).\rho_c + v(\lambda) \tag{6.20}$$

La dérivée seconde de ρ_* par rapport à la longueur d'onde s'écrit alors:

$$\frac{d^2\rho_*}{d\lambda^2} = 2\,\frac{du}{d\lambda}\frac{d\rho_c}{d\lambda} + u\,\frac{d^2\rho_c}{d\lambda^2} + \rho_c\,\frac{d^2u}{d\lambda^2} + \frac{d^2v}{d\lambda^2} \tag{6.21}$$

Comme le montre la Figure 6.9, u et v varient linéairement avec la longueur d'onde ($\frac{d^2u}{d\lambda^2} \approx 0$ et $\frac{d^2v}{d\lambda^2} \approx 0$). De plus, la pente de u est très faible ($\frac{du}{d\lambda} \approx 0$). En conséquence, l'Equation 6.21 peut être approximée par:



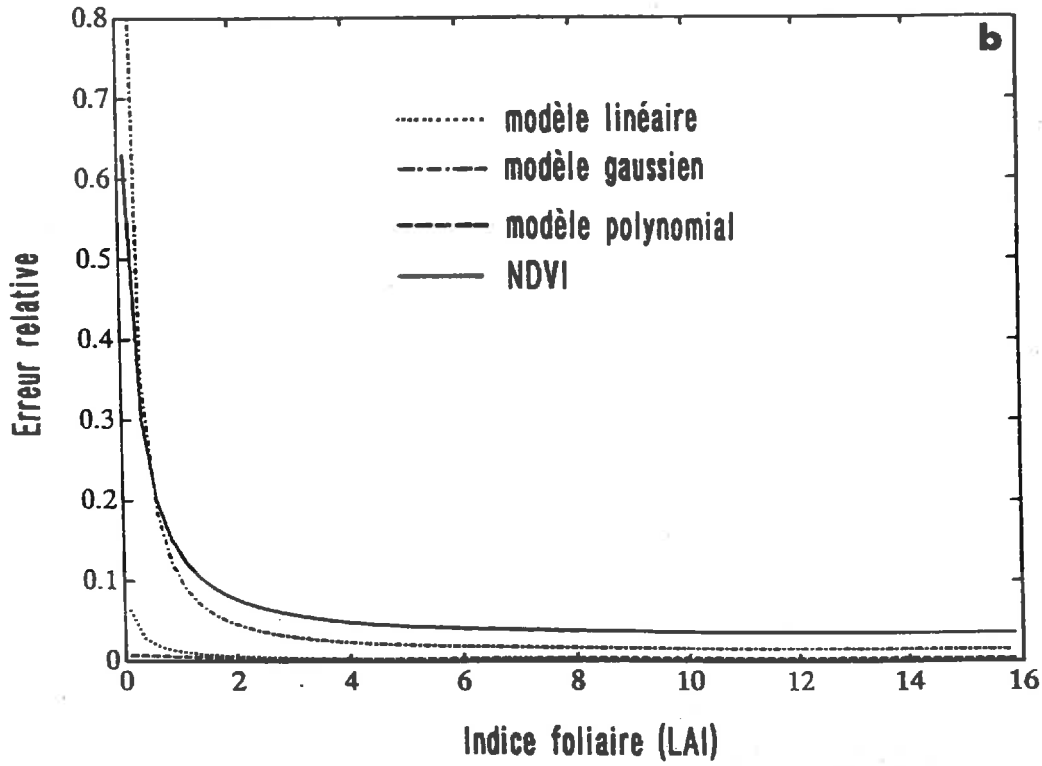


Figure 6.8: Simulation de l'erreur relative sur λ_i (calculé par trois méthodes différentes: modèle linéaire, modèle gaussien, et modèle polynômial) et NDVI en fonction de: (a) la concentration en chlorophylle a+b (LAI=3), (b) l'indice foliaire (C_{ab} = 40 $\mu g.cm^{-2}$). L'erreur sur la réflectance est $\Delta\rho$=0.01, et on suppose que l'erreur sur la position en longueur d'onde $\Delta\lambda$ est nulle. L'erreur relative est calculée pour le jeu de paramètres suivant: $N = 1.2, \theta_l = 58^o, \rho_s = 0.15, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$ et $skyl$=0.2.

$$\frac{d^2\rho_*}{d\lambda^2} \approx u\frac{d^2\rho}{d\lambda^2} \tag{6.22}$$

Cette équation montre clairement que, pour un capteur donné, le glissement spectral au niveau du sol (λ_i) est équivalent à celui observé au niveau satellitaire (λ_i^*) en prenant en compte les effets atmosphériques. La Figure 6.10 illustre très bien l'intéret de cet indice spectral par rapport à l'utilisation d'indices utilisant des bandes larges, tels que la différence normalisée ($NDVI$).

6.3.2 Caractérisation de λ_i au niveau spatial

S'il est aisé de calculer λ_i à partir de simulations de modèles ou de mesures de réflectance en haute résolution spectrale réalisées au niveau du sol, le problème est nettement plus complexe quand il s'agit de calculer λ_i à partir de données de spectro-imageurs aéroportés ou spatiaux. Trois contraintes majeures vont conditionner le choix d'une méthode de calcul de λ_i:

- **l'absorption gaseuse** qui oblige à ne retenir, en absence de corrections préalables, que des portions limitées du "red edge" (670-687 nm, 705-715 nm, 732-737 nm, 743-756 nm, et 772-780 nm).
- **le nombre** de bandes spectrales disponibles et la **rapidité** de l'algorithme de calcul.
- **le bruit** associé au capteur lui même (en longueur d'onde et en luminance) dont la minimisation oblige à multiplier le nombre de bandes spectrales.

Au niveau du sol, nous avons établi une relation polynômiale entre le point λ_i et la réflectance du couvert dans trois longueurs d'onde 672 nm, 710 nm, et 780 nm (Equation 6.15). Au niveau du satellite, nous avons vu qu'il existait une relation simple reliant ρ et ρ_* (Equation 6.20). En combinant les Equations 6.15 et 6.20, il est possible d'écrire λ_i(pol) directement en fonction de ρ_*:

$$\begin{aligned}\lambda_i(pol) &= c_0^* + c_1^*.\rho_1^* + c_2^*.\rho_2^* + c_3^*.\rho_3^* + c_4^*.\rho_1^{*2} + c_5^*.\rho_2^{*2} + c_6^*.\rho_3^{*2} + c_7^*.\rho_1^*\rho_2^* + c_8^*.\rho_1^*\rho_3^* \\ &\quad + c_9^*.\rho_2^*\rho_3^* + c_{10}^*.\rho_1^*\rho_2^*\rho_3^*\end{aligned} \tag{6.23}$$

Les coefficients $c_0^* \ldots c_{10}^*$ se déduisent facilement de $c_0 \ldots c_{10}$ par l'intermédiaire des termes $u(\lambda)$ et $v(\lambda)$ de l'Equation 6.20. Il serait intéressant de voir si les coefficients établis au niveau du sol peuvent aussi s'appliquer à des réflectances apparentes mesurées au sommet de l'atmosphère. Cela aurait pour principal avantage d'ignorer les effets atmosphériques. Afin de répondre à cette question, nous avons calculé $\lambda_i(pol)$ en fonction des coefficients $c_0 \ldots c_{10}$ et de $\rho_*(672)$, $\rho_*(710)$ et $\rho_*(780)$ pour différentes visibilités V; nous l'avons comparé à la valeur réelle de λ_i déterminée par dérivation formelle du modèle. On observe une relation linéaire (Figure 6.11) dont le coefficient de corrélation et le rms augmentent avec la visibilité. Lorsque la visibilité passe de 5 km à 20 km, le rms est divisé par deux. Il devrait, en toute logique, égaler les valeurs calculées au niveau du sol pour une visibilité infinie. Finalement, la relation établie au niveau du sol est applicable au sommet de l'atmosphère pour une visibilité supérieure à 20 km, c'est-à-dire un temps clair nécessaire à toute acquisition d'image satellitaire. Cette méthode présente l'avantage d'être très facile à mettre en oeuvre et de nécessiter de faibles temps de calcul. Elle est ici testée sur des simulations de modèles, mais pourrait parfaitement être calée sur des jeux de spectres haute résolution acquis au niveau du sol ou au niveau spatial, pour lesquels λ_i serait mesuré par lissage et dérivation, puis mis en relation avec un jeu optimal de bandes spectrales.

6.4 Conclusion partielle

Cette étude montre la puissance de l'outil modélisation pour l'étude des glissements spectraux. Les simulations de spectres de réflectance d'une feuille ou d'un couvert végétal, de la réflectance apparente au niveau du satellite nous ont permis d'analyser le déterminisme de ces glissements entre

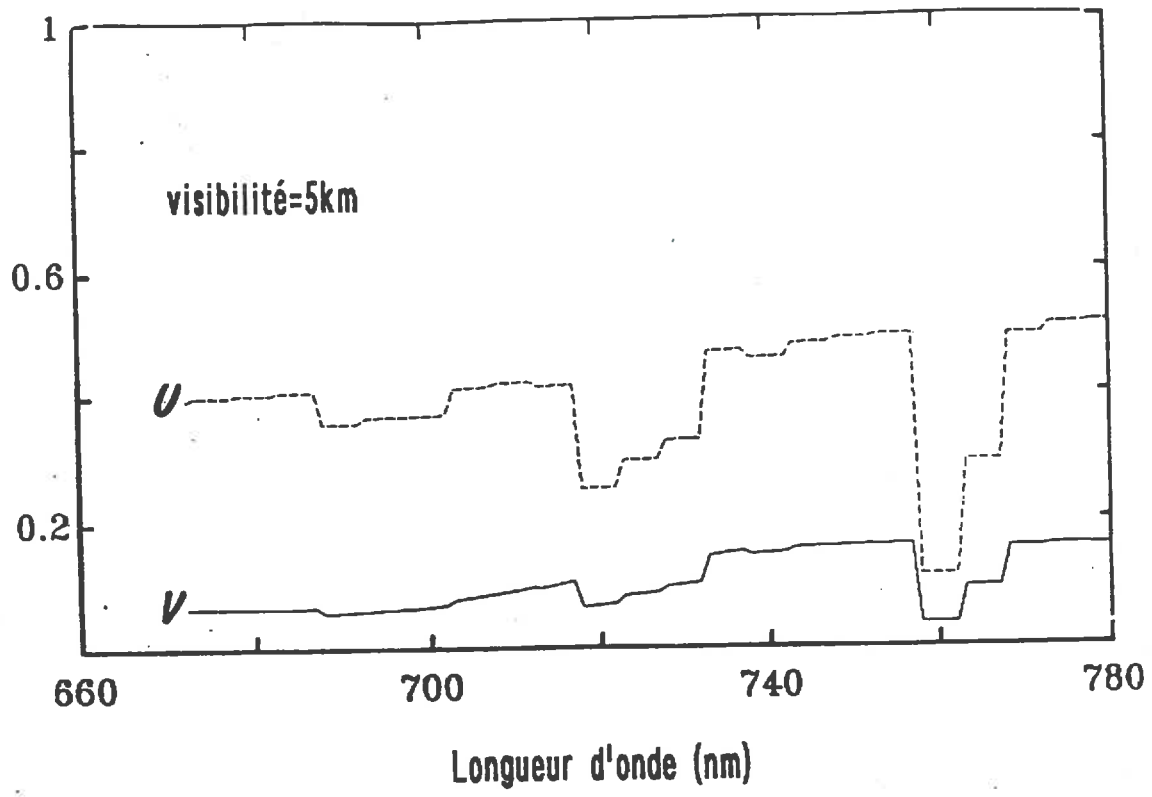


Figure 6.9: Variation spectrale des paramètres u et v calculés à partir du modèle 5S, pour une visibilité de 5 km et une atmosphère continentale de latitude moyenne. Les deux puits principaux à 730 nm et 760 nm correspondent à l'absorption gazeuse.

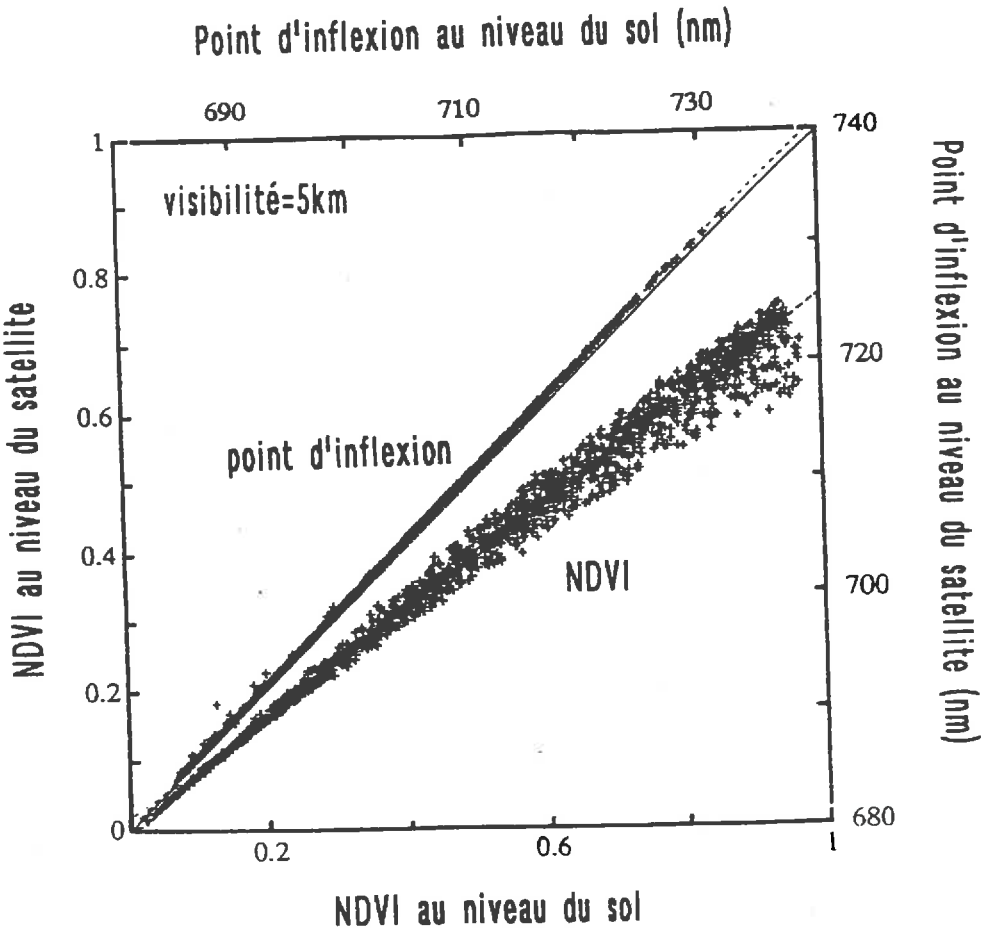


Figure 6.10: Relation entre les valeurs au sol et au niveau du satellite, des indices λ_i et $NDVI$.

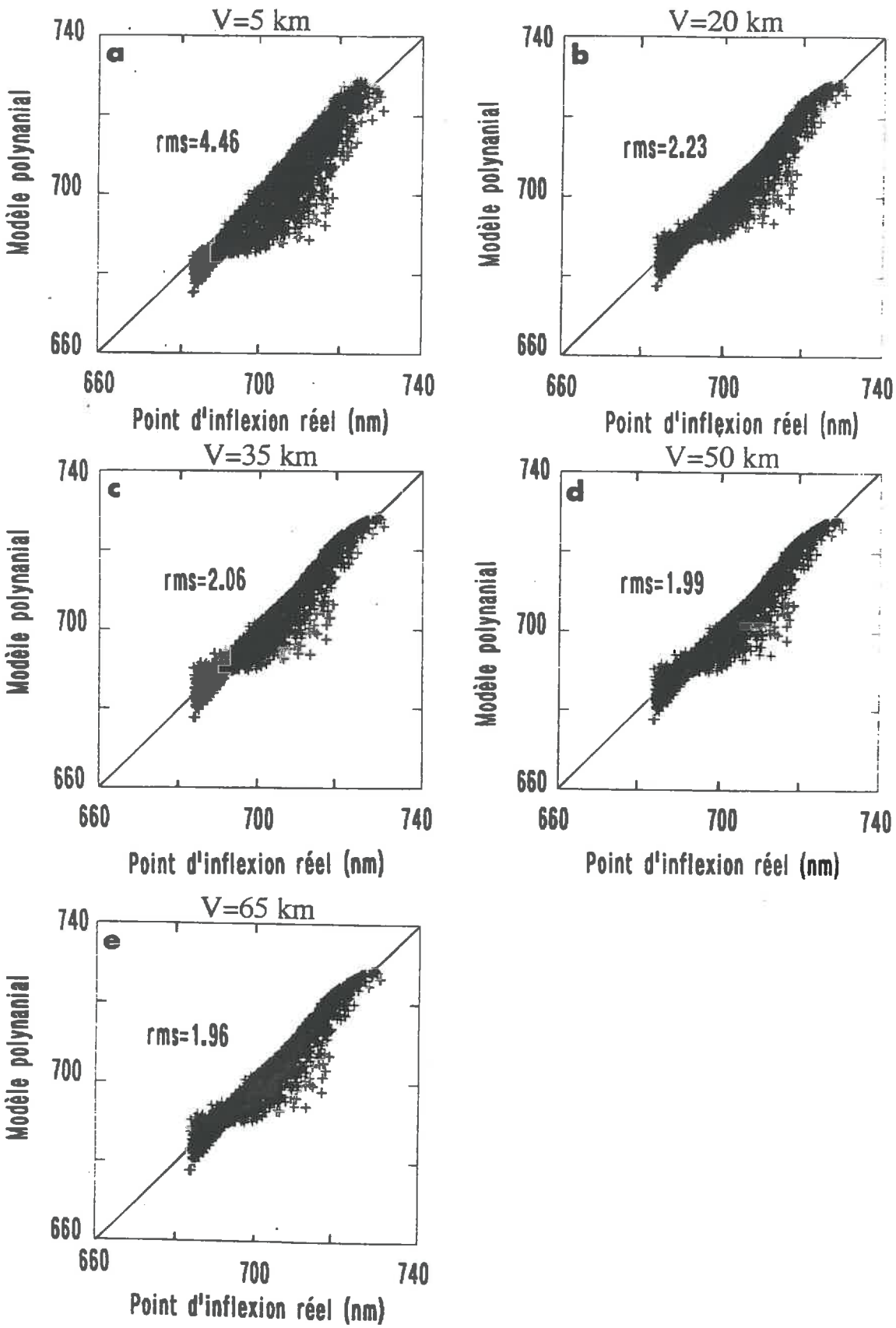


Figure 6.11: Relation entre la position du point d'inflexion du "red edge" calculée au niveau du sol et le même point calculé au niveau du satellite par le modèle polynômial pour différentes visibilités: (a) V=5 km, (b) V=20 km, (c) V=35 km, (d) V=50 km, (e) V=65 km.

le rouge et le proche infrarouge. Nos résultats s'accordent bien avec les observations expérimentales qu'on peut trouver dans la littérature, malgré les nombreuses hypothèses et simplifications introduites par les différents modèles. Au niveau de la feuille, il y a équivalence entre les réflectances spectrales larges et la position du "red edge" λ_i. En revanche, au niveau du couvert, λ_i apporte des informations différentes de celles des bandes larges rouge et proche infrarouge. λ_i est surtout sensible aux caractéristiques du couvert (indice foliaire et concentration en chlorophylle) et très peu dépendant de facteurs perturbateurs comme la réflectance du sol ou les conditions d'irradiance. En outre, cet indice spectral n'est pas affecté par la traversée de l'atmosphère. Ces diverses qualités en font un bon indicateur potentiel de la capacité photosynthétique des couverts.

Cependant, ces résultats demandent à être confirmés par des mesures à l'échelle rapprochée et spatiale. La faible dynamique de λ_i pose le problème du bruit associé aux capteurs et du choix de la méthode de calcul. Enfin, nous avons proposé une nouvelle méthode de détermination directe de λ_i, peu gourmande en temps de calcul, mais qui devra être aussi confrontée à l'expérimentation.

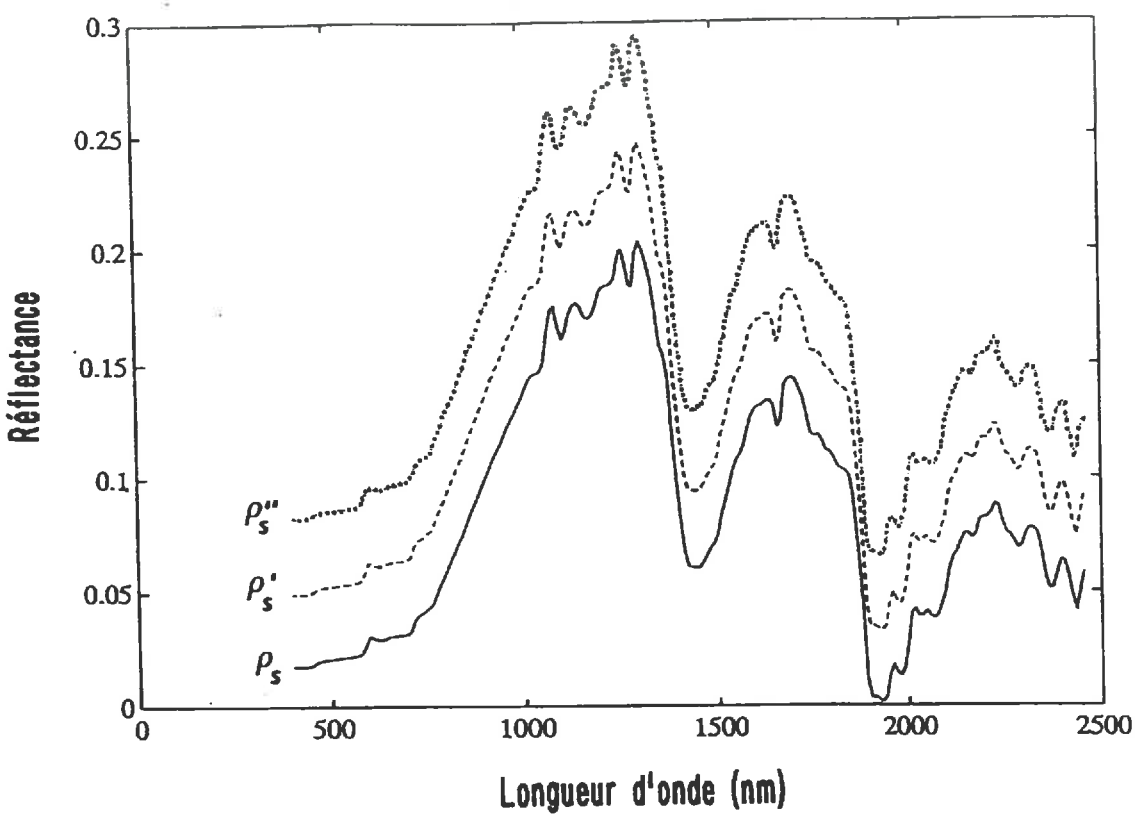


Figure 7.1: Réflectance spectrale du sol utilisée pour les simulations. ρ_s **est calculé à partir du modèle SOILSPECT et de l'albédo de simple diffusion** ω_s **du terreau.** ρ_s' **et** ρ_s'' **correspondent à** $\omega_s + 0.075$ **et** $\omega_s + 0.15$.

	N	C_{ab} $(\mu g.cm^{-2})$	C_w (cm)	LAI	θ_l
minimum	1.0	2	0.001	1	25°
moyen	1.5	32	0.0255	3	45°
maximum	2.0	62	0.05	5	65°

Tableau 7.1: Paramètres du couvert utilisés pour simuler les spectres synthétiques. Le jeu de paramètre moyen est le vecteur initial. $\theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$ **et** $skyl = 0.2$. **Le spectre de sol** $\rho_s(\lambda)$ **est présenté sur la Figure 7.1.**

Chapitre 7

Estimation des paramètres biophysiques du couvert végétal par inversion de modèles

Avec le couplage des modèles de propriétés optiques des feuilles, des sols, et des couverts végétaux, nous disposons d'un outil puissant qui va nous permettre de tester une nouvelle méthode d'extraction de l'information à partir de données spectrales: l'inversion. Le problème inverse a déjà été abordé au niveau de la feuille et du sol. Au niveau du couvert, le nombre important de paramètres à estimer et la complexité des relations entre les différents éléments imposent une simplification de la paramétrisation du modèle. Ainsi, bien que la fraction de rayonnement diffus *skyl* depende de la longueur d'onde et des conditions atmosphériques, nous la supposerons constante; de toute façon, comme l'ont montré Clevers et Verhoef (1991), son influence sur la réflectance est faible. Il apparait aussi que la réflectance spectrale d'un sol ne peut pas se réduire à quelques paramètres: l'albédo de simple diffusion ω_s varie d'un sol à l'autre si bien que nous supposerons sa variation spectrale connue (Figure 7.1). En conséquence, la réflectance spectrale du couvert, simulée par le modèle PROSPECT+SAIL, dépend des paramètres suivants:

- **les paramètres biophysiques** C_{ab}, C_w, N, LAI et θ_l.
- **la réflectance du sol** qu'on supposera connue
- **les paramètres externes** qui ne changeront pas au cours des simulations: $\theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o, \theta_s = 40^o$, et $skyl = 0.2$ ce qui correspond à une visibilité de 50 km.

Ce chapitre s'articulera donc de la façon suivante: l'inversion sera d'abord testée sur des données simulées par le modèle PROSPECT+SAIL (spectres synthétiques) dans les bandes AVIRIS, puis nous utiliserons les données expérimentales acquises à Brooms Barn (spectres réels). Nous discuterons enfin les possibilités d'améliorer l'estimation de la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (ε_i) à partir des variables biophysiques du couvert estimées par inversion.

7.1 Etude de spectres synthétiques simulant les bandes AVIRIS

7.1.1 Inversion du modèle PROSPECT+SAIL

Les analyses de sensibilité accomplies au Chapitre 5 peuvent être résumées ainsi: la réflectance du couvert est peu sensible au paramètre de structure des feuilles N. La concentration en chlorophylle C_{ab} et l'épaisseur équivalente en eau C_w influencent fortement les niveaux de réflectance dans le visible et le proche infrarouge. Enfin, il est apparu que l'indice foliaire LAI et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l jouaient des rôles symétriques dans la réponse du couvert. L'inversion du modèle

N	C_{ab}	C_w	LAI	θ_l	rms	ε_i
			$LAI = 6$			
2.02	34.74	0.0269	4.2	25.49	$2.1\ 10^{-4}$	0.925
1.75	33.13	0.0260	5.1	35.87	$5.0\ 10^{-5}$	0.932
1.25	31.51	0.0255	6.9	52.92	$5.3\ 10^{-5}$	0.931
1.02	31.83	0.0262	7.8	59.40	$2.8\ 10^{-4}$	0.922
			$LAI = 3$			
1.92	34.37	0.0270	2.10	27.03	$2.0\ 10^{-4}$	0.788
1.70	32.93	0.0260	2.55	36.98	$4.4\ 10^{-5}$	0.817
1.29	31.77	0.0256	3.45	51.19	$3.5\ 10^{-5}$	0.848
1.04	33.26	0.0271	3.90	55.83	$1.2\ 10^{-4}$	0.853
			$LAI = 2$			
1.86	33.81	0.0272	1.40	28.21	$2.5\ 10^{-4}$	0.652
1.68	32.68	0.0261	1.70	37.67	$5.2\ 10^{-5}$	0.692
1.32	31.95	0.0255	2.30	50.45	$3.8\ 10^{-5}$	0.744
1.08	33.45	0.0268	2.60	54.20	$1.2\ 10^{-4}$	0.758
			$LAI = 1$			
1.78	32.79	0.0279	0.70	29.61	$3.4\ 10^{-4}$	0.411
1.64	32.22	0.0264	0.85	38.49	$7.5\ 10^{-5}$	0.451
1.34	32.40	0.0253	1.15	49.49	$5.7\ 10^{-5}$	0.515
1.09	34.87	0.0267	1.30	51.59	$1.9\ 10^{-4}$	0.538
			$LAI = 0.5$			
1.68	32.34	0.0289	0.35	29.79	$2.6\ 10^{-4}$	0.232
1.59	32.08	0.0269	0.425	38.59	$5.9\ 10^{-5}$	0.260
1.39	32.36	0.0247	0.575	49.34	$5.0\ 10^{-5}$	0.311
1.21	33.92	0.0248	0.65	51.65	$1.8\ 10^{-4}$	0.332
			$LAI = 0.25$			
1.58	32.46	0.0299	0.175	29.05	$1.1\ 10^{-4}$	0.123
1.53	32.27	0.0274	0.2125	38.14	$2.7\ 10^{-5}$	0 140
1.46	31.80	0.0239	0.2875	49.94	$2.5\ 10^{-5}$	0.172
1.41	31.85	0.0228	0.325	53.38	$9.6\ 10^{-5}$	0.188

Tableau 7.2: Inversion de spectres synthétiques définis par $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255\ cm, LAI = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 6$ et $\theta_l = 45^o$. Dans chaque cas, LAI est maintenu fixe à une valeur proche de celles mentionnées plus haut. La dernière colonne présente la fraction journalière de PAR absorbée ε_i correspondante.

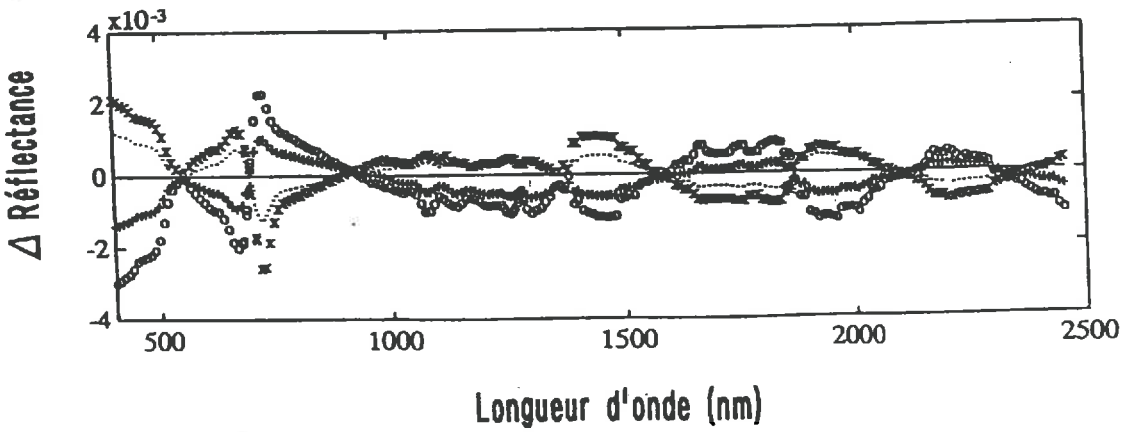


Figure 7.2: Ecarts entre le spectre de réflectance de couvert calculé avec le jeu de paramètres $(N, C_{ab}, C_w, LAI, \theta_l)$=(1.5, 32, 0.0255, 3, 45) et les spectres calculés avec les autres jeux de paramètres du Tableau 7.x correspondants à: (o) $LAI = 2.10$, (+) $LAI = 2.55$, (o) $LAI = 3.45$, (x) $LAI = 3.90$.

PROSPECT+SAIL consiste à déterminer le jeu de paramètres $P = (N, C_{ab}, C_w, LAI, \theta_l)$ qui minimise Δ^2 sur tout le spectre:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^{i=224} (\mathcal{R}_{mes}(\lambda) - \mathcal{R}_{mod}(\lambda, P))^2 \qquad (7.1).$$

où $\mathcal{R}_{mes}(\lambda)$ et $\mathcal{R}_{mod}(\lambda, P)$ sont les réflectances mesurées et modélisées du couvert. Le carré des écarts entre la réflectance mesurée et simulée est sommé sur les 224 bandes AVIRIS. On peut immédiatement remarquer que 224 bandes spectrales ne sont probablement pas nécessaires pour estimer 5 paramètres. Price (1991), qui a travaillé sur des données AVIRIS, a montré que le signal radiométrique pouvait être expliqué par 5 à 10 bandes spectrales. Cependant, il reconnait que la réduction du nombre de bandes spectrales est un problème sensible qui n'a pas trouvé de solution à ce jour. D'un point de vue théorique, cinq bandes indépendantes devraient suffire à estimer les cinq paramètres de notre modèle mais pour les raisons citées auparavant, nous conserverons dans cette étude toute l'information spectrale.

Données non bruitée

Le modèle PROSPECT+SAIL est-il numériquement inversible? Pour répondre à cette question, nous avons simulé des spectres de réflectance de couvert en prenant pour chaque paramètre, sa valeur maximum, sa valeur minimum et une valeur moyenne (Tableau 7.1): cela correspond à 3^5=243 spectres différents. L'inversion a d'abord été testée sur ce jeu de données non bruitée, avec comme paramètres initiaux $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255\ cm, LAI = 3$ et $\theta_l = 45^o$. Dans tous les cas, l'inversion a convergé vers les bonnes valeurs des paramètres du couvert, suggérant que le modèle PROSPECT+SAIL utilisé en mode spectral est **numériquement inversible**. Cela signifie qu'on peut, en principe, déterminer tous les paramètres du couvert en utilisant seulement un spectre de réflectance acquis au nadir, le spectre du sol étant connu.

Test d'unicité des paramètres

Différents jeux de paramètres peuvent-ils conduire à des spectres identiques? Afin de répondre à cette question, nous avons fait les calculs suivants:

1. considérons le jeu de paramètres moyen décrit au paragraphe précédent ($N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}$, $C_w = 0.0255\ cm, LAI = 3, \theta_l = 45^o$) et simulons le spectre de réflectance correspondant;

2. on inverse alors le modèle en fixant un des 5 paramètres, par exemple le LAI, à une valeur proche de sa valeur initiale ($LAI \pm \delta LAI$).

Les modifications dans l'estimation des autres paramètres (N, C_{ab}, C_w et θ_l) engendrées par une variation du LAI de 15% ou 30% sont présentées dans le Tableau 7.2 pour des LAI de 0.25, 0.5, 1, 2, 3 et 6. La concentration en chlorophylle a+b et l'épaisseur équivalente en eau sont assez stables autour de leur valeur moyenne. D'autre part, une diminution du LAI revient à accroître le paramètre de structure des feuilles N et à diminuer l'angle moyen d'inclinaison des feuilles θ_l. Pour chaque jeu de paramètres, les valeurs de rms sont très faibles ($10^{-4}/10^{-5}$) ce qui signifie que les spectres correspondants sont très proches les uns des autres. Si on prend le cas $LAI = 3$, l'écart par rapport au spectre moyen (Figure 7.2) montre que les courbes sont visuellement inséparables. Dans un second temps, nous avons inversé le modèle sur ces spectres en laissant libres tous les paramètres: on retrouve bien les jeux de paramètres initiaux comme le laissaient suggérer les résultats précédents. En conclusion, ces tests montrent que, mathématiquement, il existe une relation univoque entre l'ensemble des jeux de paramètres et l'ensemble des spectres. Cependant, plusieurs jeux de paramètres différents peuvent correspondre à des spectres presques identiques; cela laisse présager un certain nombre de difficultés lorsque nous étudierons des spectres bruités ou réels.

		N	C_{ab}	C_w	LAI	θ_l
jeu X		1.2	20	0.005	0.5	30
$\sigma = 0.01$	moyenne	1.2104	19.959	0.0050	0.4998	29.999
	écart type	0.0927	0.8063	0.0002	0.0178	3.2823
	ϵ	0.1823	1.6472	0.0003	0.0276	5.8223
$\sigma = 0.05$	moyenne	1.3238	19.5304	0.0049	0.5233	30.969
	écart type	0.3799	2.9639	0.0005	0.0825	13.418
	ϵ	0.9522	7.2326	0.0013	0.1387	29.069
jeu Y		1.7	40	0.030	3.5	60
$\sigma = 0.01$	moyenne	1.6934	39.929	0.0300	3.5188	60.111
	écart type	0.0503	0.6444	0.0004	0.0961	0.7448
	ϵ	0.1457	1.4072	0.0009	0.3012	2.3957
$\sigma = 0.05$	moyenne	1.6923	41.415	0.0309	3.5268	59.613
	écart type	0.3088	5.1228	0.0039	0.5193	4.3726
	ϵ	0.7289	9.1806	0.0063	1.4540	12.166

Tableau 7.3: Inversion de 100 spectres bruités pour les jeux de paramètres X et Y. Si $\overline{p_i}$ est la valeur moyenne estimée du paramètre i, l'intervalle de confiance à 95% est donné par: $\overline{p_i} - \epsilon < \overline{p_i} < \overline{p_i} + \epsilon$.

N		1	1.5	2
$\sigma = 0.01$	moyenne	0.9947	1.4711	1.9707
	écart type	0.0994	0.1337	0.1227
$\sigma = 0.05$	moyenne	1.0694	1.5109	2.0153
	écart type	0.2985	0.3534	0.3721
C_{ab}		2	32	62
$\sigma = 0.01$	moyenne	1.9546	31.646	61.043
	écart type	0.0409	0.8010	1.3690
$\sigma = 0.05$	moyenne	1.8179	30.628	58.257
	écart type	0.1730	2.8771	5.3929
C_w		0.001	0.0255	0.05
$\sigma = 0.01$	moyenne	0.0010	0.0251	0.0490
	écart type	0.0000	0.0003	0.0008
$\sigma = 0.05$	moyenne	0.0011	0.0237	0.0467
	écart type	0.0001	0.0013	0.0024
LAI		1	3	5
$\sigma = 0.01$	moyenne	1.0110	3.1661	5.3995
	écart type	0.0196	0.2188	0.3810
$\sigma = 0.05$	moyenne	1.0670	3.8569	5.9333
	écart type	0.1122	1.1208	0.9662
θ_l		25	45	65
$\sigma = 0.01$	moyenne	28.823	47.292	65.747
	écart type	4.3275	2.6717	1.1100
$\sigma = 0.05$	moyenne	36.592	51.472	67.285
	écart type	11.636	6.9258	3.4788

Tableau 7.4: Inversion de spectres bruités calculés à partir des paramètres du Tableau 7.1. Le nombre d'inversions ayant abouti est de 237 pour $\sigma = 0.01$ et 215 pour $\sigma = 0.05$.

Données bruitées

Les données réelles sont le plus souvent bruitées. Dans quelle mesure la précision de l'inversion peut-elle être affectée par ce bruit? Afin de mesurer l'effet du bruit, nous avons ajouté à chaque valeur de réflectance du spectre synthétique un bruit aléatoire (distribution gaussienne $\mathcal{N}$ centrée, de variance σ) simulant un bruit instrumental. Soient $\mathcal{R}$ la réflectance simulée et $\mathcal{R}^*$ la réflectance bruitée:

$$\mathcal{R}^* = \mathcal{R}\ (1 + \mathcal{N}(0,1)\ \sigma) \tag{7.2}$$

Nous avons d'abord créé deux jeux de données: X pour lequel $N = 1.2, C_{ab} = 20\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.005\ cm, Lai = 0.5$ et $\theta_l = 30^o$, et Y pour lequel $N = 1.7, C_{ab} = 40\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.03\ cm, LAI = 3.5$ et $\theta_l = 60^o$. L'inversion est appliquée sur chaque spectre qui a été au préalable perturbé par un bruit aléatoire. Le Tableau 7.3 montre qu'on peut estimer un minimum satisfaisant quelle que soit l'écart type de l'erreur ($\sigma = 0.01$ ou $\sigma = 0.05$). Les écarts types et intervalles de confiance (hypothèse linéaire, 95%) sont raisonnables, en comparaison des valeurs moyennes correspondantes. Ces simulations correspondent à des rapports signal/bruit de 100 et 20. Par comparaison, la calibration en vol 1991 du spectro-imageur AVIRIS a montré que ce rapport était bien supérieur à 100 en dehors des bandes d'absorption atmosphériques (Green et al., 1992). Afin de quantifier la sensibilité de l'ajustement en fonction des valeurs des paramètres, considérons maintenant les 243 spectres synthétiques définis précédement, ajoutons le même bruit et inversons le modèle. Le Tableau 7.4 montre qu'avec un niveau de bruit relatif de 0.05, l'inversion fournit des paramètres estimés très proches des paramètres initiaux. Comme l'avaient constaté Goel et Thompson (1984), les sensibilités pour toutes les variables semblent plus fortes pour un couvert planophile ($\theta_l = 25^o$) que pour un couvert érectophile ($\theta_l = 65^o$), probablement parce que la sensibilité de la réflectance est plus forte pour un couvert érectophile.

Influence du sol en arrière plan

Il est bien connu que le sol perturbe les relations entre la réflectance du couvert et les indices de végétation (Baret et Guyot, 1991; Clevers et Verhoef, 1991). Jusqu'à présent, nous avons supposé qu'il était parfaitement connu. Il serait intéressant de tester l'influence de la réflectance du sol sur la précision des paramètres de la végétation déterminés par inversion. Supposons qu'on translate le spectre de réflectance ayant servi aux simulations en ajoutant 0.075 et 0.15 à l'albédo de simple diffusion ω_s:

$$\omega_s'(\lambda) = \omega_s(\lambda) + 0.075 \quad \text{et } \omega_s''(\lambda) = \omega_s(\lambda) + 0.15 \tag{7.3}$$

Une telle variation peut être attribuée à une modification de la teneur en eau du sol comme nous l'avons vu au Chapitre 4. Les spectres de réflectance correspondants (ρ_s, ρ_s' et ρ_s'') sont présentés sur la Figure 7.1. Le test consiste à simuler huit spectres de reflectance avec ρ_s et le jeu de données suivant: $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.005\ cm, \theta_l = 30^o$ et $LAI = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Alors, pour chaque valeur de LAI, on inverse le modèle PROSPECT+SAIL avec les réflectance de sol surestimées ρ_s' et ρ_s''. Comme on peut s'y attendre, les erreurs d'estimation les plus fortes correspondent à de faibles LAI ($LAI < 2$), lorsque la végétation ne couvre pas entièrement le sol (Tableau 7.5). Pour des LAI supérieurs à 2, la sensibilité à la réflectance du sol est minimale. L'estimation de la concentration en chlorophylle a+b et de la teneur en eau est assez bonne jusqu'à $LAI = 1$. Dans cette étude, l'incertitude sur la réflectance spectrale du sol est forte.

Conclusion

A partir des résultats théoriques obtenus sur spectres synthétiques, nous avons montré que le modèle PROSPECT+SAIL était numériquement inversible. Cela signifie, qu'on peut estimer les variables biophysiques du couvert à partir d'un spectre de réflectance acquis au nadir. La réalité est malheureusement plus complexe: les données radiométriques sont souvent erronées; de plus le modèle

	N	C_{ab}	C_w	LAI	θ_l	rms	ε_i
ρ_s	1.5	32	0.0255	6	45	0	0.934
ρ'_s	1.50	31.83	0.0254	5.99	45.55	$1.8\ 10^{-6}$	0.933
ρ''_s	1.49	31.57	0.0253	6.02	46.37	$1.2\ 10^{-5}$	0.933
ρ_s	1.5	32	0.0255	5	45	0	0.920
ρ'_s	1.49	31.67	0.0253	5.04	46.21	$5.0\ 10^{-6}$	0.920
ρ''_s	1.47	31.17	0.0251	5.13	47.90	$3.1\ 10^{-5}$	0.920
ρ_s	1.5	32	0.0255	4	45	0	0.893
ρ'_s	1.47	32.38	0.0252	4.13	47.67	$1.3\ 10^{-5}$	0.893
ρ''_s	1.42	30.50	0.0247	4.33	50.96	$7.9\ 10^{-5}$	0.896
ρ_s	1.5	32	0.0255	3	45	0	0.836
ρ'_s	1.39	31.03	0.0251	3.30	50.85	$3.3\ 10^{-5}$	0.845
ρ''_s	1.29	29.81	0.0246	3.67	56.35	$1.9\ 10^{-4}$	0.854
ρ_s	1.5	32	0.0255	2	45	0	0.721
ρ'_s	1.17	32.04	0.0261	2.57	56.27	$6.3\ 10^{-5}$	0.759
ρ''_s	1.01	31.65	0.0265	3.05	62.90	$4.1\ 10^{-4}$	0.764
ρ_s	1.5	32	0.0255	1	45	0	0.486
ρ'_s	0.89	39.45	0.0305	1.64	61.48	$4.5\ 10^{-4}$	0.573
ρ''_s	1.03	30.91	0.0238	2.33	72.00	$1.9\ 10^{-3}$	0.651
ρ_s	1.5	32	0.0255	0.5	45	0	0.286
ρ'_s	1.02	43.02	0.0273	1.20	70.39	$2.4\ 10^{-3}$	0.466
ρ''_s	1.20	31.58	0.0176	2.03	79.75	$5.3\ 10^{-3}$	0.603
ρ_s	1.5	32	0.0255	0.25	45	0	0.156
ρ'_s	1.16	57.48	0.0226	1.01	78.17	$4.9\ 10^{-3}$	0.424
ρ''_s	1.26	48.58	0.0139	1.81	85.64	$9.5\ 10^{-3}$	0.590

Tableau 7.5: Inversion du modèle sur les spectres synthétiques, avec les spectres de réflectance de sol ρ_s, ρ'_s et ρ''_s presentés sur la Figure 7.1. Les albedos de simple diffusion sont respectivement ω_s, $\omega_s + 0.075$, et $\omega_s + 0.15$. La dernière colonne présente la fraction journalière de PAR absorbé ε_i correspondante.

SAIL, comme la plupart des modèles de réflectance des couverts, représente de façon simplifiée la structure du couvert et le transport des photons à l'intérieur de la végétation. Par exemple, un couvert épars avec un LAI faible n'est pas n'est pas décrit correctement par le modèle. Toutes ces raisons peuvent compliquer la procédure d'inversion et son interprétation.

L'estimation des paramètres de géométrie du couvert, *i.e.* le LAI et θ_l, est la plus difficile. Comme le montrent les Figures 5.1d et 5.1e, ces deux variables ne sont pas totalement indépendantes; leur coefficient de corrélation proche de 1, suggère une nouvelle paramétrisation du modèle. En pratique, cela signifie qu'il sera difficile de séparer le LAI et θ_l sans introduire de contraintes sur la connaissance d'un des deux paramètres. Le paramètre de structure de la feuille N, qui influence faiblement la réflectance du couvert, pourra être fixé à 1.5 (valeur moyenne). Enfin, la concentration en chlorophylle et l'épaisseur équivalente en eau peuvent être raisonnablement estimées quelle que soit l'architecture du couvert. Ces résultats nous encouragent à tester cette nouvelle approche d'estimation des paramètres biophysiques d'un couvert végétal sur des spectres réels acquis au champ.

7.1.2 Conséquences pour le calcul de la fraction de PAR absorbé: ε_i

Il serait intéressant de répondre aux questions suivantes: existe-t-il une relation univoque entre ε_i et un spectre de réflectance? Différents jeux de paramètres $(N, C_{ab}, LAI, \theta_l)$ produisant des spectres de réflectance identiques ou presques, ont-ils la même valeur d'ε_i? Des calculs de la fraction journalière d'ε_i ont été effectués à partir des paramètres d'entrée des Tableau 7.2 et 7.5: le Tableau 7.2 montre que l'erreur absolue dans l'estimation de la variable ε_i ne dépasse pas 0.12; ces résultats sont plus précis que ceux obtenus à partir de la différence normalisée ($NDVI$) ou d'autres combinaisons visible / proche infrarouge. La précision est bonne aussi bien pour de forts LAI (couvert dense) que pour de faibles LAI (effets du sol non négligeables). Le Tableau 7.5 corrobore ces résultats.

7.2 Inversion sur spectres réels

Nous avons appliqué la même procédure d'inversion que précédemment sur les spectres de couverts de betteraves à sucre (*Beta vulgaris L*) acquis en 1989 à Brooms Barn (Malthus et al., 1989). Le spectroradiomètre IRIS ayant une très forte sensibilité spectrale (975 bandes spectrales de 2, 4, ou 5 nm de large selon le domaine de longueur d'onde), il est facile de simuler les bandes étroites du spectro-imageur AVIRIS (224 bandes spectrales d'environ 10 nm de large), mais aussi celles de capteurs à bandes larges comme HRV (3 bandes) ou TM (6 bandes), en convoluant les spectres IRIS par les fonctions de filtre de ces instruments. Comme pour la validation du modèle, les propriétés optiques des trois sols sont connues.

7.2.1 Inversion du modèle sur des spectres équivalents AVIRIS

Si nous laissons libres tous les paramètres, on observe une très bonne reconstruction des spectres mesurés ($rms < 0.05$) mais les valeurs de N, LAI et θ_l sont souvent totalement aberrantes. Les craintes exprimées à la section précédente quant-à l'interdépendance entre paramètres estimés se confirment. En revanche, les valeurs estimées de concentration en chlorophylle ($\hat{C_{ab}} = 34.48\ \mu g.cm^{-2}$) et d'épaisseur équivalente en eau ($\hat{C_w} = 0.0293\ cm$) sont, en moyenne, conformes aux valeurs mesurées ($\overline{C_{ab}} = 33.17\ \mu g.cm^{-2}$ et $\overline{C_w} = 0.0332\ cm$). Il apparaît donc qu'un certain nombre de contraintes doivent nécessairement être introduites pour stabiliser les processus d'inversion.

L'étude de sensibilité ayant montré une influence limitée du paramètre de structure N des feuilles sur la réflectance du couvert, nous le fixerons à sa valeur moyenne $N = 1.266$. De plus, les paramètres LAI et θ_l qui semblaient très liés, ne pourront être estimés simultanément: nous avons décidé de fixer l'angle d'inclinaison des feuilles en lui attribuant les valeurs estimées précédemment. Comme

parcelle	sol	C_{ab}	$\hat{C}_{ab}$	C_w	$\hat{C}_w$	LAI	$\hat{LAI}$	$\overline{\theta_l}$	rms
000	S1	40.58	35.68	0.0270	0.0259	3.36	3.49	50.50	0.063
	S2		37.15		0.0257		3.09		0.070
005	S1	35.69	43.66	0.0293	0.0304	3.08	3.13	37.83	0.062
			42.63		0.0295		3.26		0.067
006	S1	35.98	38.12	0.0285	0.0255	4.06	4.57	52.72	0.066
	S2		43.19		0.0292		3.60		0.060
013	S1	32.28	29.60	0.0309	0.0271	3.27	3.40	59.51	0.046
	S2		33.21		0.0294		3.01		0.016
015	S1	30.60	32.04	0.0311	0.0281	3.96	3.47	54.07	0.053
	S2		27.27		0.0249		4.04		0.049
016	S1	28.92	27.22	0.0373	0.0325	1.15	1.26	47.24	0.026
	S2		33.27		0.0376		1.01		0.016
017	S1	35.29	32.27	0.0344	0.0373	1.22	1.23	40.39	0.023
	S2		35.56		0.0342		1.19		0.021
018	S1	27.64	26.41	0.0387	0.0590	0.47	0.57	47.69	0.011
	S2		28.74		0.0785		0.38		0.004
022	S1	41.26	44.19	0.0379	0.0335	3.44	3.37	43.90	0.069
	S2		42.20		0.0297		3.25		0.067
024	S2	34.88	39.78	0.0408	0.0367	2.31	2.30	22.90	0.068
025	S1	38.10	34.71	0.0272	0.0191	2.20	2.05	48.12	0.095
	S2		42.50		0.0224		2.13		0.140
027	S1	36.42	44.49	0.0267	0.0282	3.40	4.06	37.74	0.179
	S2		47.44		0.0323		3.44		0.172
029	S1	21.25		0.0489		0.15			
	S2								
030	S1	23.02		0.0453		0.15			
	S2								
031	S1	35.29	30.12	0.0409	0.0289	1.95	1.83	28.37	0.071
	S2		30.94		0.0218		1.70		0.074
032	S1	29.82	29.74	0.0296	0.0265	3.42	3.27	40.02	0.075
	S2		30.47		0.0264		3.39		0.066
033	S1	34.25	32.17	0.0334	0.0275	3.09	2.77	44.84	0.078
	S2		31.02		0.0228		2.97		0.062
034	S1	32.15	35.75	0.0323	0.0322	3.66	3.20	62.99	0.052
	S2		30.05		0.0259		3.65		0.051
	S3		26.27		0.0301		2.56		0.012
035	S1	28.44	29.56	0.0288	0.0218	4.63	5.31	66.78	0.052
	S2		31.22		0.0158		4.05		0.050
	S3		39.73		0.0414		2.30		0.068
036	S1	32.48	30.19	0.0334	0.0277	3.31	3.36	57.54	0.064
	S2		32.83		0.0259		3.27		0.050
	S3		35.28		0.0408		2.68		0.066
106	S1	35.98	43.14	0.0285	0.0368	2.03	2.06	49.38	0.042
	S2		39.81		0.0340		2.21		0.039
115	S1	30.60	30.08	0.0311	0.0280	1.98	2.03	49.09	0.039
	S2		30.21		0.0277		1.86		0.038
123	S1	41.75	37.77	0.0279	0.0241	1.82	1.87	28.87	0.107
	S2		44.73		0.0298		1.73		0.062
206	S1	35.98	38.78	0.0285	0.0533	1.02	1.14	59.14	0.015
215	S1	30.60	33.26	0.0311	0.0474	0.99	0.82	42.15	0.012
	S2		30.28		0.0246		1.13		0.024

Tableau 7.6: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur des sepctres équivalents AVIRIS en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

précédemment, les *rms* du Tableau 7.6 sont faibles ($rms < 0.07$): cela signifie que la réflectance spectrale du couvert est correctement simulée par le modèle. Les Figures 7.3a et 7.3b présentent les spectres mesurés et simulés de deux parcelles (#000 et #018) dont les *LAI* et les sols sous-jacents sont différents. On constate une bonne adéquation entre les deux spectres, excepté entre 900 et 1200 nm où les pics d'absorption par l'eau sont mal reproduits, voire décalés. //

Globalement, le Tableau 7.6 montre que la concentration en chlorophylle a+b peut être estimée avec une bonne précision à partir de spectres de couvert (Figure 7.4a). L'épaisseur équivalente en eau pose d'avantage de problèmes (Figure 7.4b), en particulier pour le sol naturel de Brooms Barn dont l'humidité et la rugosité de surface ont pu varier d'une mesure à l'autre. Enfin le *LAI* est estimé avec un niveau de précision acceptable (Figure 7.4c).

7.2.2 Inversion du modèle sur les bandes TM

Le capteur Thematic Mapper (TM), embarqué sur le satellite Landsat 5, possède 6 bandes spectrales larges centrées sur 500 nm, 592 nm, 678 nm, 800 nm, 1701 nm, et 2194 nm. A partir des spectres de réflectance IRIS, nous avons simulé ces 6 bandes équivalentes TM et testé la procédure d'inversion avec les mêmes contraintes qu'au paragraphe précédent (N fixé à 1.266, θ_l connu, et réflectance spectrale du sol donnée). Les résultats de l'inversion sont rassemblés dans le Tableau 7.7. La Figure 7.5a montre une sous-évaluation de la concentration en chlorophylle a+b, alors que l'épaisseur équivalente en eau et le *LAI* sont estimés avec des niveaux de précision semblables à ceux observés précédemment (Figures 7.5b et 7.5c).

7.2.3 Inversion du modèle sur les bandes HRV

Le capteur High Resolution Visible (HRV), embarqué sur le satellite SPOT 1, possède 3 bandes spectrales larges centrées sur 564 nm, 648 nm, et 834 nm. Comme pour les bandes TM, nous avons simulé une réflectance HRV équivalente et testé la procédure d'inversion (Tableau 7.8). On constate une sous- évaluation de la concentration en chlorophylle a+b et une bonne estimation du *LAI* (Figures 7.6a et 7.6c). L'épaisseur équivalente en eau reste, bien sûr, égale à sa valeur initiale 0.0255 (Figure 7.6b).

7.2.4 Conséquences sur l'estimation de ε_i

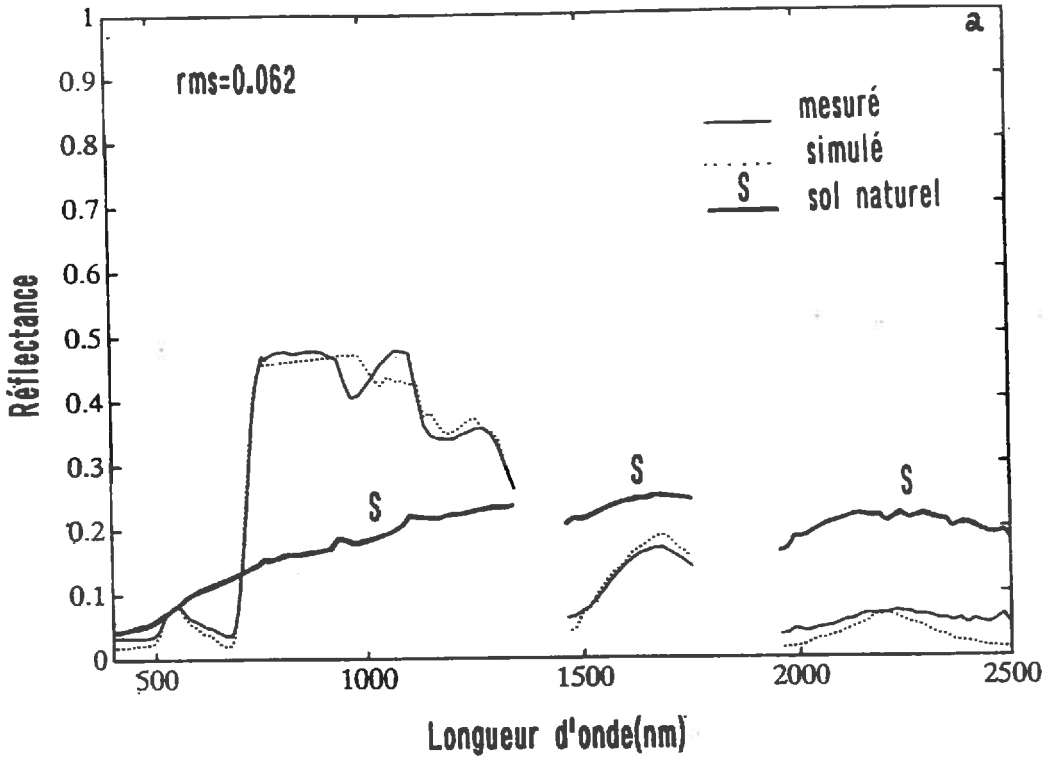
A partir des valeurs estimées (C_{ab}, LAI) ou calées (N, θ_l) des paramètres du modèle PROSPECT + SAIL, nous avons calculé la fraction de PAR absorbé ε_i. La comparaison avec ε_i calculé à partir des valeurs mesurées des paramètres du couvert, est très bonne quelle que soit la situation (Figure 7.7).

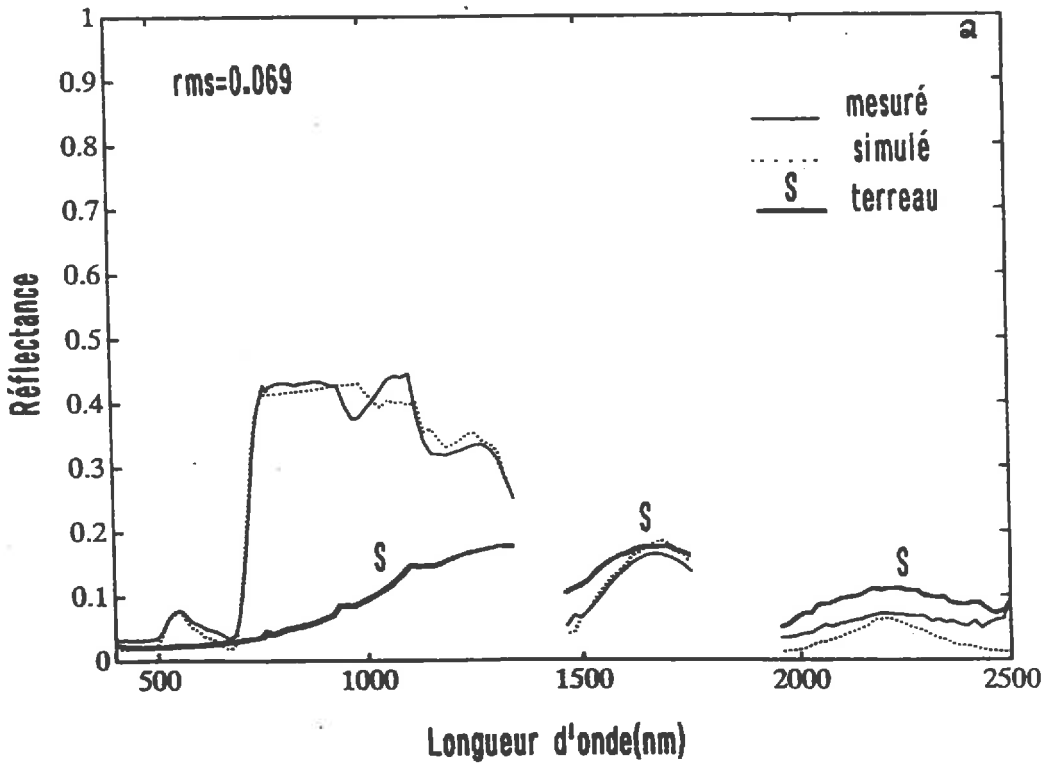
7.3 Conclusion partielle

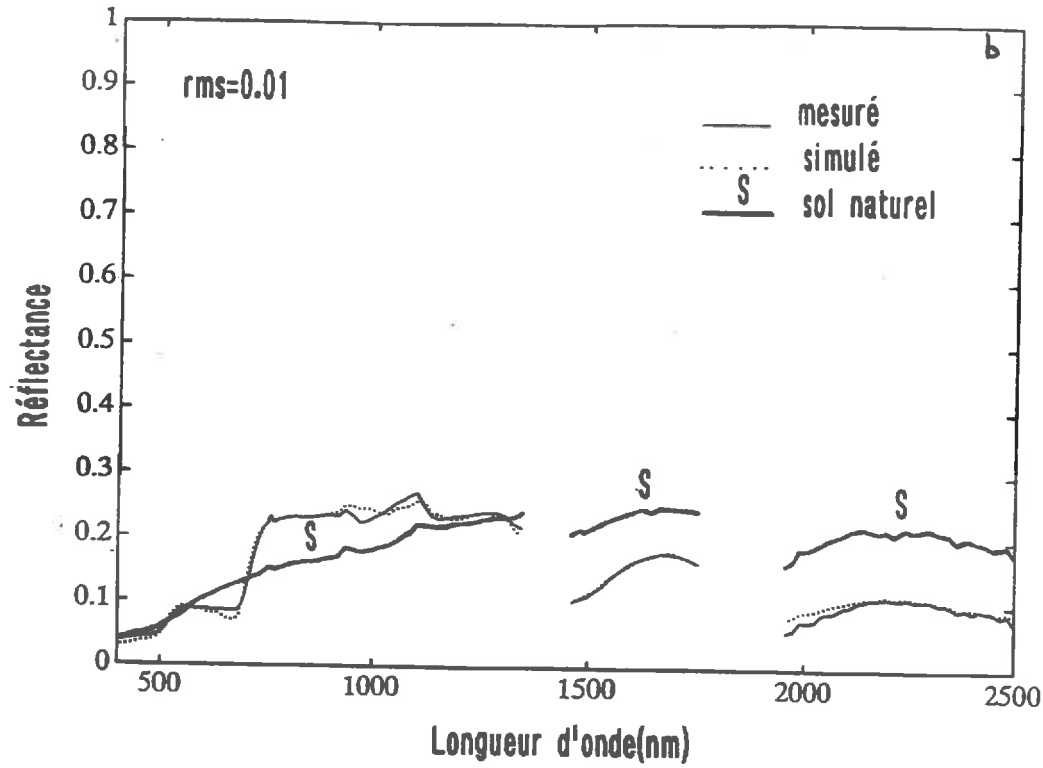
L'inversion d'un modèle physique de réflectance est une méthode très puissante pour extraire des informations quantitatives sur un couvert végétal. Elle a cependant ses limites:

La première est lié au choix du modèle. Notre choix s'est porté sur le modèle SAIL pour les raisons citées au chapitre 5. Si ce modèle est approprié à des surfaces agricoles homogènes, c'est beaucoup moins le cas pour des forêts ou des surfaces complexes. Le modèle SAIL pourrait être remplacé par un autre modèle de transfert radiatif, mieux adapté à tel type de végétation, mais il y a de fortes chances que les principes soient les mêmes, tant que le nouveau modèle ne comporte pas trop de paramètres; en effet, le succès de l'inversion dépend largement du nombre de paramètres. Un modèle avec beaucoup de paramètres permettra de simuler la réflectance de surfaces très variées, mais son inversion risque de poser de sérieux problèmes ...

Une deuxième limitation est liée à la mathématique de l'inversion qu'il ne faut pas sous-estimer; le choix d'un algorithme plutôt qu'un autre dépend du type de problème auquel on est confronté. Par


a
rms=0.062
mesuré
simulé
S
sol naturel
Réflectance
Longueur d'onde(nm)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
500
1000
1500
2000
2500


a
rms=0.069
mesuré
simulé
S
terreau
Réflectance
Longueur d'onde(nm)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
500
1000
1500
2000
2500



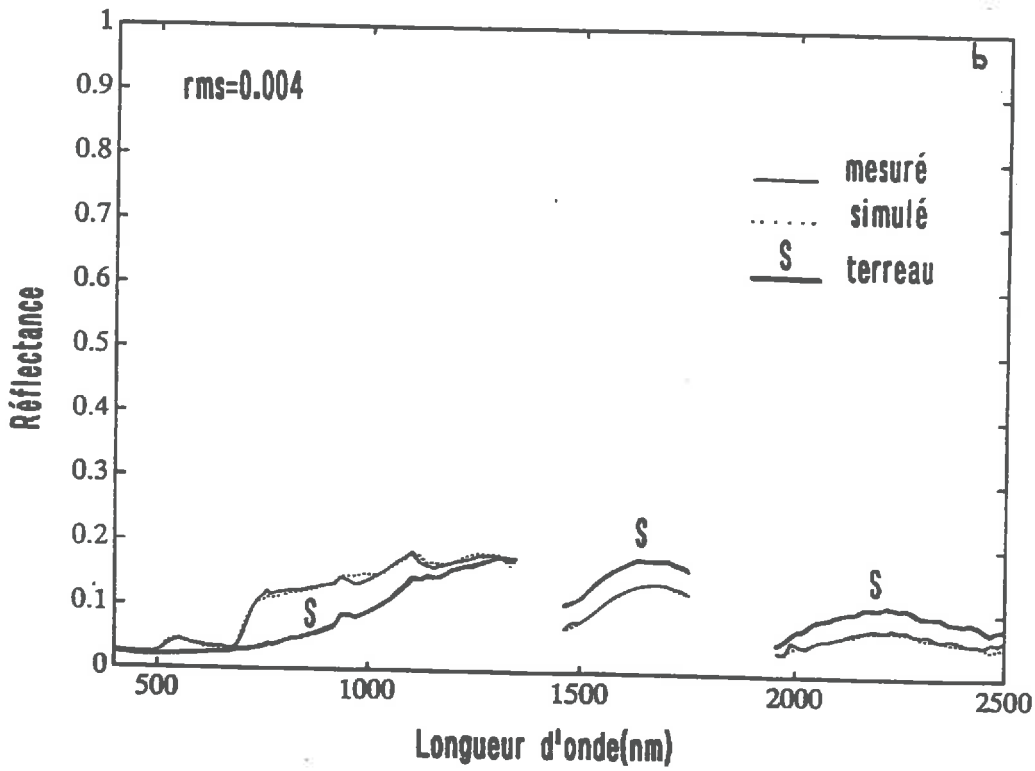


Figure 7.3: Comparaison entre spectres de réflectance de betterave à sucre mesurés et simulés: (a) parcelle #000, (b) parcelle #018. Les valeurs des paramètres du couvert mesurés et estimés par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sont rassemblées dans le Tableau 7.6.

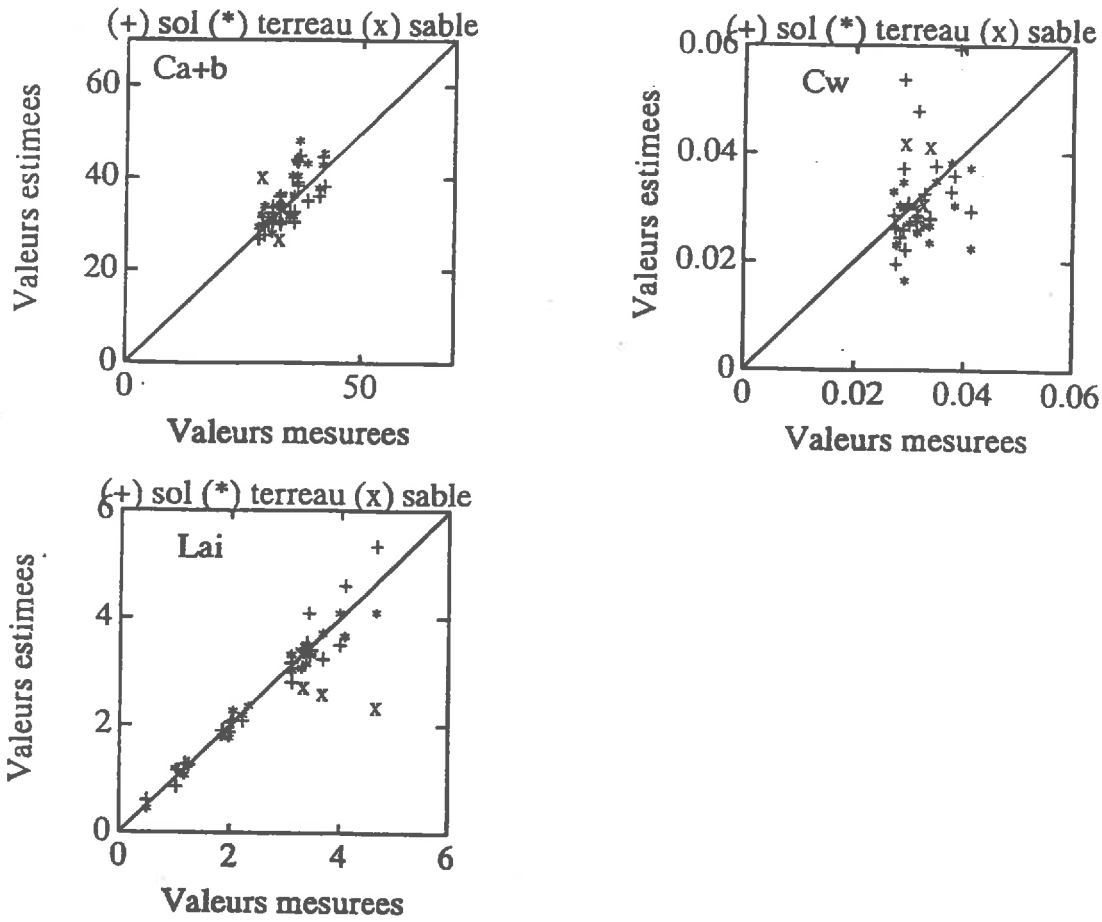


Figure 7.4: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes AVIRIS, et sont rassemblées dans le Tableau 7.6.

parcelle	sol	C_{ab}	$\hat{C}_{ab}$	C_w	$\hat{C}_w$	LAI	$\hat{LAI}$	$\overline{\theta_l}$	rms
000	S1	40.58	29.31	0.0270	0.0269	3.36	3.77	50.50	0.078
	S2		30.09		0.0266		3.29		0.085
005	S1	35.69	36.04	0.0293	0.0312	3.08	3.38	37.83	0.076
			35.23		0.0304		3.46		0.081
006	S1	35.98	31.22	0.0285	0.0269	4.06	4.94	52.72	0.081
	S2		34.97		0.0304		3.81		0.073
013	S1	32.28	25.66	0.0309	0.0287	3.27	3.59	59.51	0.054
	S2		28.27		0.0326		3.13		0.173
015	S1	30.60	27.37	0.0311	0.0294	3.96	3.70	54.07	0.064
	S2		24.32		0.0268		4.22		0.057
016	S1	28.92	24.43	0.0373	0.0334	1.15	1.32	47.24	0.030
	S2		30.62		0.0385		1.05		0.018
017	S1	35.29	28.54	0.0344	0.0379	1.22	1.28	40.39	0.028
	S2		32.28		0.0353		1.24		0.024
018	S1	27.64	23.39	0.0387	0.0606	0.47	0.57	47.69	0.011
	S2		27.43		0.0696		0.40		0.005
022	S1	41.26	35.77	0.0379	0.0339	3.44	3.69	43.90	0.086
	S2		34.11		0.0308		3.45		0.083
024	S2	34.88	33.77	0.0408	0.0374	2.31	2.45	22.90	0.081
025	S1	38.10	28.41	0.0272	0.0211	2.20	2.22	48.12	0.113
	S2		33.62		0.0250		2.29		0.159
027	S1	36.42	35.64	0.0267	0.0281	3.40	4.63	37.74	0.204
	S2		37.01		0.0314		3.80		0.199
029	S1	21.25		0.0489		0.15			
	S2								
030	S1	23.02		0.0453		0.15			
	S2								
031	S1	35.29	26.12	0.0409	0.0303	1.95	1.98	28.37	0.083
	S2		27.49		0.0243		1.77		0.083
032	S1	29.82	25.51	0.0296	0.0274	3.42	3.54	40.02	0.089
	S2		26.65		0.0275		3.60		0.077
033	S1	34.25	27.85	0.0334	0.0284	3.09	2.99	44.84	0.090
	S2		27.31		0.0243		3.11		0.072
034	S1	32.15	28.92	0.0323	0.0336	3.66	3.43	62.99	0.064
	S2		25.16		0.0273		3.82		0.061
	S3		17.89		0.0195		4.12		0.161
035	S1	28.44	25.28	0.0288	0.0235	4.63	5.64	66.78	0.062
	S2		26.50		0.0174		4.22		0.059
	S3		22.05		0.0218		3.56		0.122
036	S1	32.48	25.97	0.0334	0.0289	3.31	3.60	57.54	0.075
	S2		28.53		0.0272		3.41		0.057
	S3		28.14		0.0323		3.35		0.086
106	S1	35.98	36.08	0.0285	0.0375	2.03	2.19	49.38	0.051
	S2		34.01		0.0348		2.31		0.047
115	S1	30.60	26.44	0.0311	0.0295	1.98	2.14	49.09	0.046
	S2		27.62		0.0292		1.93		0.043
123	S1	41.75	31.75	0.0279	0.0254	1.82	2.07	28.87	0.125
	S2		37.47		0.0308		1.85		0.074
206	S1	35.98	33.19	0.0285	0.0515	1.02	1.20	59.14	0.018
215	S1	30.60	30.20	0.0311	0.0477	0.99	0.85	42.15	0.013
	S2		27.84		0.0269		1.16		0.027

Tableau 7.7: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur les spectres équivalents TM en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

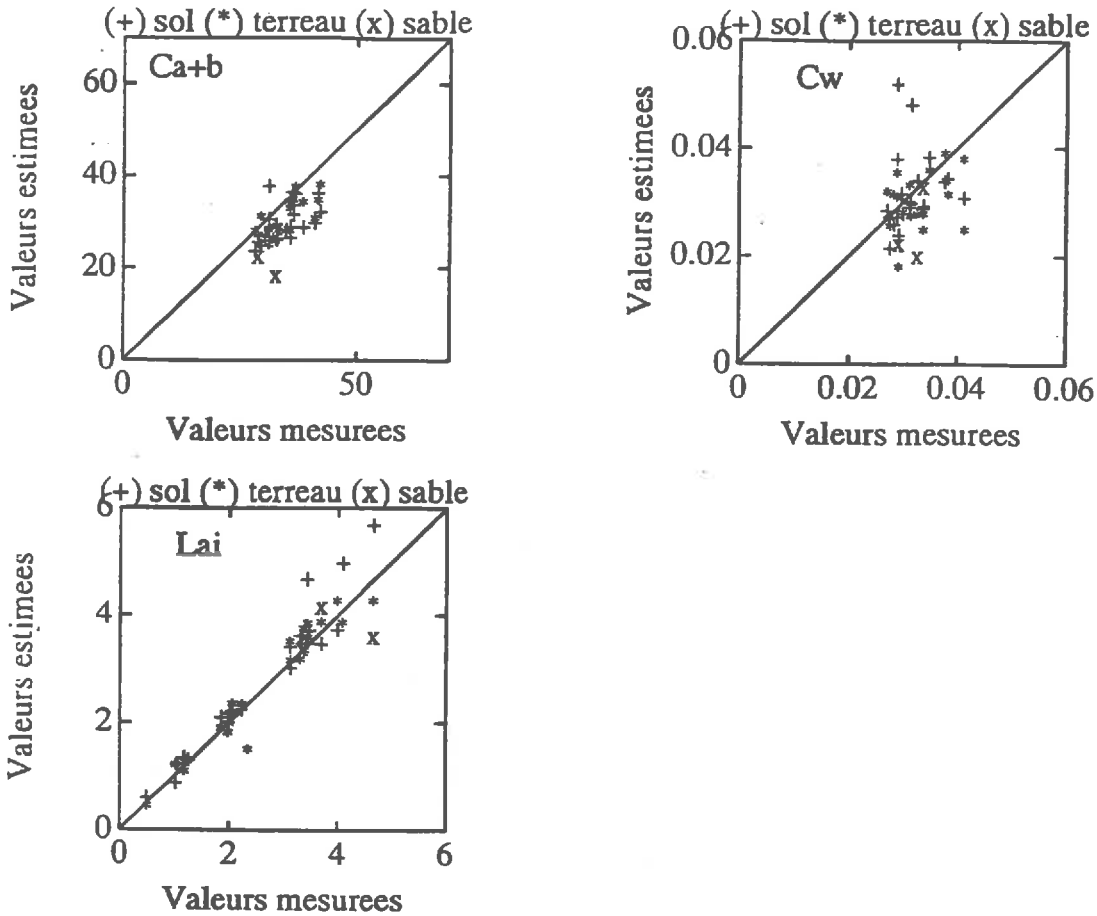


Figure 7.5: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes TM, et sont rassemblées dans le Tableau 7.7.

parcelle	sol	C_{ab}	$\hat{C}_{ab}$	C_w	$\hat{C}_w$	LAI	$\hat{LAI}$	$\overline{\theta_l}$	rms
000	S1	40.58	30.42	0.0270	0.0255	3.36	3.78	50.50	0.076
	S2		31.33		"		3.29		0.083
005	S1	35.69	37.05	0.0293	"	3.08	3.39	37.83	0.091
			36.33		"		3.47		0.090
006	S1	35.98	32.19	0.0285	"	4.06	4.95	52.72	0.078
	S2		36.04		"		3.82		0.080
013	S1	32.28	26.39	0.0309	"	3.27	3.61	59.51	0.055
	S2		29.15		"		3.15		0.177
015	S1	30.60	28.00	0.0311	"	3.96	3.72	54.07	0.068
	S2		24.85		"		4.23		0.055
016	S1	28.92	25.00	0.0373	"	1.15	1.36	47.24	0.040
	S2		31.63		"		1.06		0.035
017	S1	35.29	29.13	0.0344	"	1.22	1.31	40.39	0.056
	S2		33.19		"		1.25		0.039
018	S1	27.64	24.45	0.0387	"	0.47	0.55	47.69	0.066
	S2		28.50		"		0.41		0.034
022	S1	41.26	36.72	0.0379	"	3.44	3.70	43.90	0.121
	S2		35.12		"		3.45		0.092
024	S2	34.88	34.68	0.0408	"	2.31	2.46	22.90	0.135
025	S1	38.10	29.52	0.0272	"	2.20	2.27	48.12	0.135
	S2		35.14		"		2.31		0.159
027	S1	36.42	36.71	0.0267	"	3.40	4.65	37.74	0.209
	S2		38.23		"		3.81		0.223
029	S1	21.25		0.0489	"	0.15			
	S2				"				
030	S1	23.02		0.0453	"	0.15			
	S2				"				
031	S1	35.29	26.98	0.0409	"	1.95	2.02	28.37	0.090
	S2		28.46		"		1.79		0.085
032	S1	29.82	26.23	0.0296	"	3.42	3.55	40.02	0.088
	S2		27.36		"		3.60		0.076
033	S1	34.25	28.64	0.0334	"	3.09	3.02	44.84	0.093
	S2		28.07		"		3.13		0.073
034	S1	32.15	29.78	0.0323	"	3.66	3.45	62.99	0.079
	S2		25.98		"		3.84		0.060
	S3		18.39		"		4.25		0.195
035	S1	28.44	25.94	0.0288	"	4.63	5.66	66.78	0.067
	S2		27.37		"		4.23		0.114
	S3		21.92		"		3.85		0.141
036	S1	32.48	26.76	0.0334	"	3.31	3.64	57.54	0.077
	S2		29.38		"		3.42		0.056
	S3		28.57		"		3.46		0.123
106	S1	35.98	37.10	0.0285	"	2.03	2.21	49.38	0.090
	S2		35.06		"		2.32		0.071
115	S1	30.60	27.11	0.0311	"	1.98	2.17	49.09	0.049
	S2		28.33		"		1.95		0.045
123	S1	41.75	32.71	0.0279	"	1.82	2.12	28.87	0.128
	S2		38.53		"		1.87		0.082
206	S1	35.98	34.14	0.0285	"	1.02	1.22	59.14	0.087
215	S1	30.60	30.43	0.0311	"	0.99	0.88	42.15	0.058
	S2		28.71		"		1.17		0.026

Tableau 7.8: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur les spectres équivalents HRV en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

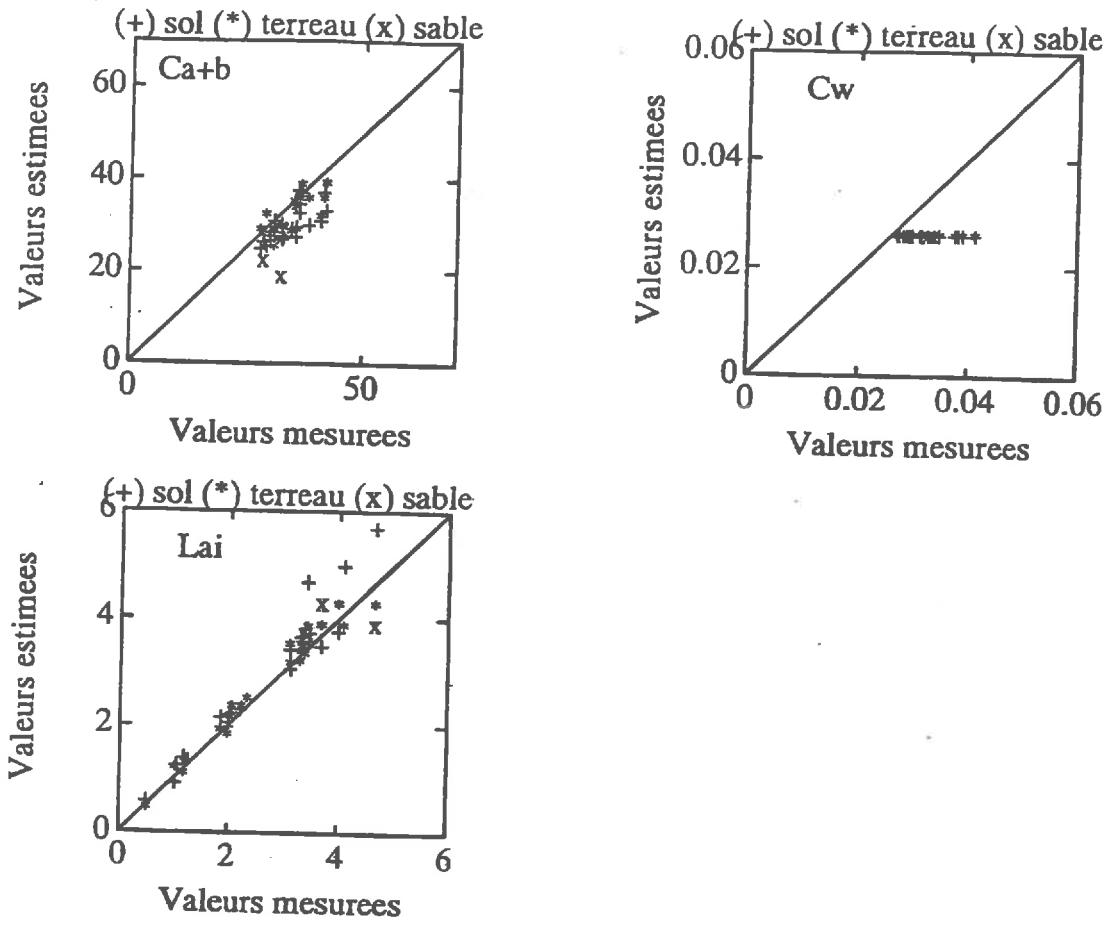


Figure 7.6: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes HRV, et sont rassemblées dans le Tableau 7.8.

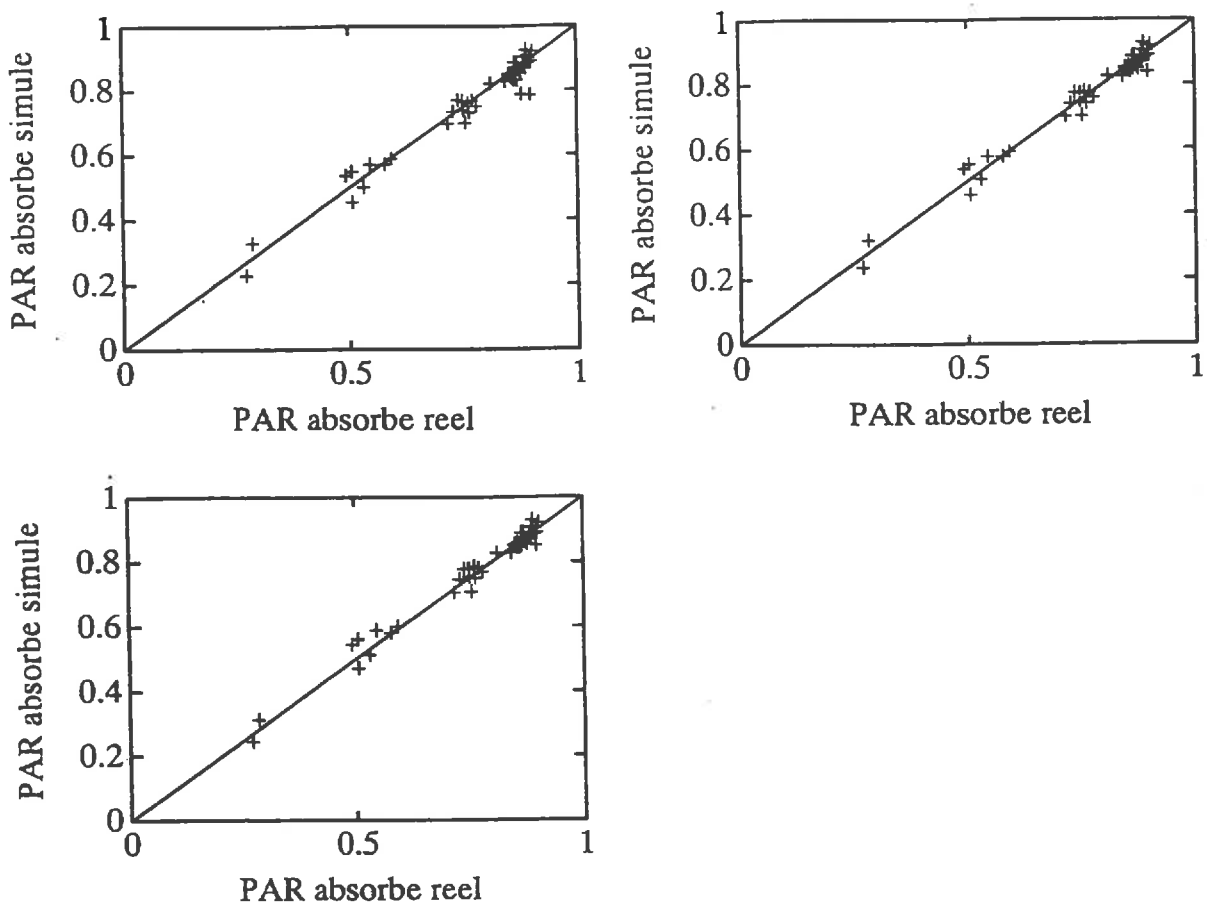


Figure 7.7: Comparaison entre la fraction de PAR absorbé "réel" (calculé à partir des valeurs mesurées des paramètres du couvert) et la fraction estimée à partir des paramètres déterminés par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur: (a) les données équivalentes AVIRIS, (b) les données équivalentes TM, (c) les données équivalentes HRV.

exemple, nos ajustements ont été réalisés avec HAUS59 qui ne permet pas de borner les paramètres ajustés, ce qui serait fort utile en particulier pour estimer le LAI et θ_l.

La mesure directe des variables biophysiques du couvert est, elle aussi, sujette à des erreurs. Ainsi la détermination de la concentration en chlorophylle des feuilles est-elle largement liée à la méthode d'extraction des pigments (emploi d'acétone ou d'alcool comme solvant) et à la représentativité souvent limitée des échantillons prélevés; on observe parfois des écarts de concentrations supérieurs à 5 $\mu g.cm^{-2}$ sur un même échantillon. Le calcul de l'indice folaire ou de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles peut aussi être assez approximatif. Par exemple, dans le cas de la betterave, θ_l varie au cours de la journée en fonction des conditions climatiques. Connaissant la forte sensibilite de la réflectance aux valeurs de ces variables, on comprend mieux les disparités observées entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées.

Dans cette étude, l'analyse s'est limitée au cas particulier où le sol est parfaitement connu. Cette situation est parfaitement envisageable pour des expériences au champ; en revanche, cette information manque le plus souvent lorsqu'on travaille sur des données satellitaires ou aéroportées. Il sera donc nécessaire, dans une prochaine étape, de tenir compte des propriétés optiques du sol et de leur modélisation.

Enfin, les problèmes de reconstruction de spectre à partir de valeurs estimées de N, C_{ab}, C_w, LAI et θ_l sont une application directe de l'inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur des données haute résolution spectrale. Aussi bien à partir des simulations que des données réelles, on constate qu'un spectre de réflectance de couvert peut être globalement décrit par 5 paramètres, ce qui réduit considérablement la dimension des problèmes nécessitant des données spectrales.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'évaluer le potentiel de la haute résolution spectrale pour des applications agronomiques. La démarche adoptée a consisté à élaborer ou tester, puis à coupler, plusieurs modèles d'échanges radiatifs, depuis le niveau de la feuille, du sol ou du couvert, jusqu'à celui du satellite. Deux modèles ont été mis au point:

- le modèle de propriétés optiques des feuilles, PROSPECT, permet de simuler la réflectance et la transmittance de feuilles variées (Monocotylédones, Dicotylédones ou feuilles sénescentes) sur tout le domaine optique (entre 400 nm et 2500 nm) avec seulement 3 paramètres (structure interne de la feuille, concentration en chlorophylle et teneur en eau). Ce modèle est inversible, et il fournit une bonne estimation de la concentration en chlorophylle ou de la teneur en eau des feuilles des végétaux supérieurs. La prise en compte des autres constituants biochimiques tels que la lignine, la cellulose, l'azote...constitue la gageure des années à venir.

- le modèle SOILSPECT simule la réflectance spectrale et directionnelle des sols à partir de paramètres spectraux (albédo de simple diffusion) et d'état de surface (paramètre de rugosité et fonction de phase). Ce modèle assez simple est lui aussi inversible. Sa contrainte majeure réside dans notre incapacité à réduire, dans l'état actuel de nos connaissances, le spectre d'albédo de simple diffusion en quelques paramètres. De plus, ces travaux mériteraient d'être complétés par une description plus géométrique de la rugosité de surface et une prise en compte de l'effet de l'humidité sur l'albédo de simple diffusion.

Ces modèles ont ensuite été couplés au modèle SAIL de réflectance des couverts végétaux et au modèle 5S de transfert atmosphérique afin de simuler la réflectance apparente au niveau du satellite. Les apports de ce travail se situent donc, d'une part, au niveau de la modélisation proprement dite, mais aussi dans la proposition de méthodes originales d'extraction de l'information spectrale des couverts végétaux:

- méthode utilisant des indices spectraux comme λ_i,
- méthode d'inversion de modèle.

La première méthode a pour principaux avantages de "gommer" les effets perturbateurs du sol, et de l'atmosphère si on se place au niveau du satellite. Elle ne permet cependant pas de séparer les effets des autres paramètres du couvert (concentration en chlorophylle, indice foliaire ou angle moyen d'inclinaison des feuilles), et donc de les quantifier individuellement (ce qui n'est pas très étonnant avec un seul indice!).

La seconde méthode semble beaucoup plus intéressante, même si dans l'état actuel de nos travaux, elle s'applique dans le cas où les propriétés optiques du sol sont connues, et où la réflectance apparente a été préalablement corrigée des perturbations atmosphériques. Il parait possible d'estimer la concentration en chlorophylle ou de la teneur en eau d'un couvert végétal à partir d'un seul spectre de réflectance acquis au nadir. Ce résultat très encourageant devra être confirmé sur des données acquises par des instruments aéroportés ou spatiaux. On pourrait envisager une inversion globale sur des spectres non corrigées des effets de l'atmosphère, en couplant un modèle de réflectance de couvert à un modèle de transfert radiatif à travers l'atmosphère, comme nous l'avons fait dans le sens direct. Cette application justifie l'utilisation de plusieurs bandes spectrales étroites dont le nombre et la position restent à définir.

Nous avons cité, en introduction, deux méthodes d'inversion des données de télédétection: sur des valeurs de réflectance directionnelles, ou sur des spectres de réflectance. Une troisième voie pourrait

consister à combiner des données directionnelles et spectrales afin d'accéder à toute l'information concernant le couvert végétal. Nous avons effectivement montré qu'un seul spectre de réflectance acquis au nadir ne permettait pas de séparer l'indice foliaire de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles qui caractérisent à eux deux l'architecture du couvert. Les approches existantes n'utilisent qu'une fraction de l'information radiométrique; les nouveaux capteurs destinés à la plate forme EOS devraient permettre de détecter des modifications dans la structure, la distribution, la biochimie des couverts végétaux ou des écosystèmes, et changer notre perception des processus écologiques.

La complexité de ces capteurs haute résolution spectrale, le nombre très important de données à transmettre, traiter et stoker, le bruit associé à la finesse des bandes spectrales, ainsi que la redondance sans doute importante de l'information spectrale, concourent à étudier minutieusement la configuration optimale nécessaire pour n'enregistrer que l'information pertinente. Le jeu de bandes spectrales optimal devra permettre de reconstruire avec une bonne précision un spectre entier de réflectance. Il est clair que cette configuration varie selon que le domaine d'intérêt est l'atmosphère, la géologie ou l'agriculture. En ce qui concerne les couverts végétaux, ce problème n'a pas encore été élucidé et ne pourra l'être tant que les objectifs (quelle information recherche-t-on?) ne seront pas clairement définis.

Enfin, ce travail mérite donc d'être poursuivi sur des jeux de données précis et complets. Nous avons montré qu'il était possible, sous certaines conditions, de retrouver des variables d'intérêt agronomique et écologique. De nombreux travaux sur la Haute Résolution Spectrale, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, seront encore nécessaires pour interpréter ce nouveau type de données.

LISTE DES PUBLICATIONS

Chapitres d'ouvrages

Guyot G., Baret F., Jacquemoud S. (1989), Imaging spectroscopy for vegetation studies, in *Imaging spectroscopy: Fundamentals and prospective applications* (F. Toselli and J. Bodechtel Eds.), ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxembourg, pages 145-165.

Revues à comité de lecture

Leprieur C., Jacquemoud S. (1992), A polynomial surface model to compute the red edge shift of canopies from space, *Remote Sens. Environ.* (en préparation).

Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J.F. (1992), About the soil line concept in remote sensing, *Adv. Space Res.* (soumis).

Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J.F. (1992), The soil line concept in remote sensing, *Remote Sens. Reviews* (accepté).

Jacquemoud S. (1992), Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra. 1) Theoretical study, *Remote Sens. Environ.* (accepté).

Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieur C. (1992), Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands, *Remote sens. Environ.*, 41:133-142.

Jacquemoud S., Baret F., Hanocq J.F. (1992), Modeling spectral and bidirectional soil reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 41:123-132.

Jacquemoud S., Baret F. (1990), PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra, *Remote Sens. Environ.*, 34:75-91.

Communications à des congrès

Jacquemoud S., Baret F. (1992), Estimation des paramètres biophysiques d'un couvert végétal par inversion d'un modèle de réflectance sur des données Haute Résolution Spectrale, in *Proc. Coll. Structure du couvert végétal et climat lumineux: méthodes de caractérisation et apllications*, Saumane (France), 23-27 Septembre 1991 (à paraitre).

Baret F., Leprieur C., Jacquemoud S., Carrère V., Gu X.F., Steven M.D., Vanderbilt V.C., Hanocq J.F., Ustin S., Rondeaux G., Daughtry C.S.T., Biehl L.L., Pettigrew R.E., Modro D.H., Horoyan H., Sarto T., Despontin C., Razafindraibe H. (1992), The 1991 AVIRIS/POLDER experiment in Camargue, France, in *Proc. 3rd Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Volume 1. AVIRIS Workshop* (R.O. Green, Ed.), Pasadena (CA), 1-5 June 1992, JPL Publication 92-14, pages 75-77.

Baret F., Vanderbilt V.C., Rondeaux G., Pettigrew R.E., Hanocq J.F., Biehl L.L., Sarrouy C., Daughtry C.S.T., Steven M.D., Sarto T., Modro D.H., Guyot G., Jacquemoud S., Horoyan H., Despontin C., Razafindraibe H. (1992), Directional and temporal variability of the APAR/VI relationships. The case of a sunflower canopy, in *Proc. Int. Geosci. and Remote Sens. Symp.* (IGARSS'92), Houston (TX), 26-29 May 1992, pages 1468-1470.

Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieur C. (1991), De la nature des glissements spectraux:

Modélisation et comparaison à l'information contenue dans les bandes larges, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319, May 1991), pages 121-129.

Jacquemoud S., Baret F., Hanocq J.F. (1991), Validation d'un modèle de réflectance spectrale et directionnelle de sol, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319, May 1991), pages 427-430.

Baret F., Jacquemoud S., Leprieur C., Guyot G. (1990), Are the spectral shifts an operational concept? Critical analysis of theoretical and experimental results, in *Proc. 2nd Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) workshop* (R.O. Green, Ed), Pasadena (CA), 4-5 June 1990, JPL publication 90-54, pages 58-71.

Jacquemoud S., Baret F., Guyot G. (1989), Modelization of leaf optical properties for interpreting high spectral resolution reflectance measurements, in *Proc. 9th EARSeL Symposium*, Espoo (Finland), 27 June - 1 July 1989, pages 472-483.

Rapports

Jacquemoud S. (1991), AVIRIS/POLDER campaign - La Crau 1991. Radiometric measurements - Preliminary report (INRA / JPL / LERTS / LOA / NASA), 14 pages.

Jacquemoud S. (1992), Références bibliographiques sur les propriétés optiques des feuilles, note interne INRA Bioclimatologie, Montfavet (France), 18 pages.

BIBLIOGRAPHIE

A.J. Abuel-Haija, P.J. McMarr, A.H. Madjid (1979), Computation of the optical properties of nonideal multilayer structures, *Appl. Opt.*, 18(18):3123-3126.

J.B. Adams, M.O. Smith, P.E. Johnson (1986), Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site, *J. Geophys. Res.*, 91(B8):8098-8112.

J.B. Adams, M.O. Smith, A.R. Gillespie (1991), Imaging spectroscopy: data analysis and interpretation based on spectral mixture analysis, in ***Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*** (Pieters and Englert, Eds.), soumis.

W.A. Allen, A.J. Richardson (1968), Interaction of light with a plant canopy, *J. Opt. Soc. Am.*, 58(8):1023-1028.

W.A. Allen, H.W. Gausman, A.J. Richardson, J.R. Thomas (1969), Interaction of isotropic light with a compact plant leaf, *J. Opt. Soc. Am.*, 59(10):1376-1379.

W.A. Allen, T.V. Gayle, A.J. Richardson (1970), Plant-canopy irradiance specified by the Duntley equations, *J. Opt. Soc. Am.*, 60(3):372-376.

W.A. Allen, H.W. Gausman, A.J. Richardson, R. Cardenas (1971), Water and air changes in grapefruit, corn and cotton leaves with maturation, *Agron. J.*, 63:392-394.

W.A. Allen, H.W. Gausman, A.J. Richardson (1973), Willstäter-Stoll theory of leaf reflectance evaluation by ray tracing, *Appl. Opt.*, 12(10): 2448-2453.

W.A. Allen (1973), Transmission of isotropic light across a dielectric surface in two and three dimensions, *J. Opt. Soc. Am.*, 63(6)664-666.

B. Andrieu, F. Baret, J. Schellberg, U. Rinderle (1988), Estimation de spectres de feuilles à partir de mesures dans les bandes spectrales larges, in *Proc. 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois (FRANCE), 18-22 January 1988 (ESA SP-287), pages 351-356.

B. Andrieu, S. Kiriakos, K.W. Jaggard (1992), Estimation des chloroses foliaires par mesure de la réflectance des feuilles ou par analyse numérique de photographies de feuilles prises en laboratoire, *Agronomie* (soumis).

F. Aries, L. Prévot, P. Monestiez (1992), Geometrical canopy modeling in radiation simulation studies, in *Comptes rendus du Colloque "structure du couvert végétal et climat lumineux: méthodes de caractérisation et applications"*, Saumane (France), 23-27 septembre 1991 (sous presse).

F. Baret, I. Champion, G. Guyot, A. Podaire (1987), Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer, *Remote Sens. Environ.*, 22:367-378.

F. Baret, B. Andrieu, G. Guyot (1988), A simple model for leaf optical properties in visible and near infrared : application to the analysis of spectral shifts determinism, In *Applications of chlorophyll fluorescence* (H.K. Lichtenthaler, Ed), Kluwer Academic publishers, pages 345-351.

F. Baret (1988), Un modèle simplifié de réflectance et d'absorptance d'un couvert végétal, in *Proc. 4^{ieme} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Aussois (France), 18-22 janvier 1988

(ESA SP-287), pages 113-120.

F. Baret, A. Olioso (1989), Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé, *Agronomie*, 9:885-895.

F. Baret, G. Guyot (1991), Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sens. Environ.*, 35:161-173.

M.F. Baumgardner, L.F. Silva, L.L. Biehl, E.R. Stoner (1985), Reflectance properties of soils, *Adv. Agron.*, 38:1-44.

F. Becker, P. Ramanantsizehena, M.P. Stoll (1985), Angular variation of the bidirectional reflectance of bare soils in the thermal infrared band, *Appl. Opt.*, 24(3):365-375.

A. Bedidi, B. Cervelle, J. Madeira, M. Pouget (1992), Moisture effects on spectral characteristics (visible) of lateritic soils, *Soil Sci.* (soumis).

A. Bégué (1991), Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques (Cas d'un couvert discontinu: le mil), Thèse Université Paris VII.

M.J. Belanger (1990), *A seasonal Perspective of several leaf developmental characteristics as related to the red edge of plant leaf reflectance*, Phd. thesis, York University, Ontario (Canada), 110 pages.

D.F. Berard, D.P. Rainey, C.C. Lin (1978), Absorption, translocation and metabolism of fluridone in selected crop species, *Weed Science*, 26(3): 252-254.

P. Bertuzzi, J.M. Caussignac (1988), Measuring in-situ soil surface roughness using a laser profilometer, in *Proc. 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois (FRANCE), 18-22 January 1988 (ESA SP-287), pages 19-24.

R.A. Bone, D.W. Lee, J.M. Norman (1985), Epidermal cells functioning as lenses in leaves of tropical rain forest shade plants, *Appl. Opt.*, 24(10):1408-1414

G.F. Bonham-Carter (1988), Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance data, *Comput. Geosci.*, 14(3):339-356.

C.C. Borel, S.A.W. Gerstl, B.J. Powers (1991), The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces, *Remote Sens. Environ.*, 36:13-44.

W.D. Bowman (1989), The relationships between leaf waterstatus, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves, *Remote Sens. Environ.*, 30:249-255.

S.A. Bowers, R.J. Hanks (1965), Reflection of radiant energy from soils, *Soil Sci.*, 100:130-138.

M. Boyer, J. Miller, M. Belanger, E. Hare, J. Wu (1988), Senescence and spectral reflectance in leaves in Northen Pin Oak (*Quercus palustris* Muenchh.), *Remote Sens. Environ.*, 25:71-87.

T.W. Brakke, J.A. Smith (1987), A ray tracing model for leaf bidirectional scattering studies, in *Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'87)*, Ann Arbor (MI), 18-21 May 1987, pages 643-648.

T.W. Brakke, J.A. Smith, J.M. Harnden (1989), Bidirectional scattering of light from tree leaves,

Remote Sens. Environ., 29:175-183.

H.T. Breece, R.A. Holmes (1971), Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn leaves in vivo, *Appl. Opt.*, 10(1):119-127.

N.J.J. Bunnik (1978), Spectral reflectance and transmittance of single leaves, in *The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties* (H. Veenman and B.U. Zonen, Eds), Wageningen (Pays Bas), pages 10-22.

T.W. Cadman, D. Sadowski (1978), Generalized equations for the calculation of absorptance, reflectance, and transmittance of a number of parallel surfaces, *Appl. Opt.*, 17(4):531-537.

H. Camefort (1972), Morphologie des végétaux vasculaires (Cytologie, anatomie, adaptation), Doin (Paris), 407 pages.

H. Camefort, H. Boué (1969), Reproduction et biologie des principaux groupes végétaux (Les Cormophytes ou Archégoniates), Doin (Paris), 422 pages.

J.E. Chance, E.W. LeMaster (1978), Plant canopy light absorption model with application to wheat, *Appl. Opt.*, 17(16):2629-2636.

S. Chandrasekhar (1960), *Radiative Transfer*, Dover Publications, New York.

S.H. Chang, W. Collins (1983), Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods, *Econ. Geol.*, 78:723-736.

E.W. Chappelle, M.S. Kim, J.E. McMurtrey III (1992), Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves, *Remote Sens. Environ.*, 39:239-247.

J. Cierniewski (1987), A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range, *Remote Sens. Environ.*, 23:98-115.

J. Cierniewski (1989), The influence of the viewing geometry of bare soil surfaces on their spectral response in the visible and near infrared, *Remote Sens. Environ.*, 27:135-142.

J.G.P.W. Clevers, C. Büker (1991), Feasibility of the red edge index for the detection of nitrogen deficiency, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319), pages 165-168.

J.G.P.W. Clevers, W. Verhoef (1991), Modelling and synergetic use of optical and microwave remote sensing. Report 2: LAI estimation from canopy reflectance and NDVI: a sensitivity analysis with the SAIL model, BCRS report 90-39, 70 pages.

W. Collins, S.H. Chang, G. Raines, F. Canney, R. Ashley (1983), Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits, *Econ. Geol.*, 78:737-749.

J.E. Conel, S. Adams, R.E. Alley, G. Hoover, S. Schultz (1988), AIS radiometry and the problem of contamination from mixed spectral orders, *Remote Sens. Environ.*, 24:179-200.

H.R. Condit (1972), Application of characteristic vector analysis to the spectral energy distribution of daylight and the spectral reflectance of american soils, *Appl. Opt.*, 11(1):74-86.

J.A. Curcio, C.C. Petty (1951), The near infrared absorption spectrum of liquid water, *J. Opt. Soc. Am.*, 41(5):302-304.

P.J. Curran (1989), Remote sensing of foliar chemistry, *Remote Sens. Environ.*, 30:271-278.

P.J. Curran, J.L. Dungan, B.A. Macler, S.E. Plummer, D.L. Peterson (1992), Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration, *Remote Sens. Environ.*, 39:153-166.

F.M. Danson, M.D. Steven, T.J. Malthus,, J.A. Clark (1992), High-spectral resolution data for determining leaf water content, *Int. J. Remote Sens.*, 13(3):461-470.

J. Dauzat, O. Hautecoeur (1991), Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319), pages 415-418.

D.W. Deering, T.F. Eck, J. Otterman (1990), Bidirectional reflectance of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization, *Remote Sens. Environ.*, 27:135-142.

R. Delecolle, F. Baret, M. Guérif, S.J. Maas (1991), L'utilisation conjointe de la télédétection et des modèles d'estimation des productions agricoles: tendances actuelles, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319), pages 529-534.

T.H. Demetriades-Shah, M.D. Steven (1988), High spectral resolution indices for monitoring crop growth and chlorosis, in *Proc. of the 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois (France), 18-22 January 1988 (ESA SP-287), pages 299-302.

T.H. Demetriades-Shah, M.D. Steven, J.A. Clark (1990), High resolution derivative spectra in remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 33:55-64.

C.D. Elvidge (1990), Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials, *Int. J. Remote Sens.*, 11(10):1775-1795.

R. Escadafal (1989), *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie)*, Editions de l'ORSTOM, Etudes et Thèses

D.C. Ferns, S.J. Zara, J. Barber (1984), Application of high resolution spectroradiometry to vegetation, *Photogramm. Eng. and Remote Sens.*, 50(12):1725-1735.

B.C. Gao, A.F.H. Goetz (1990), Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from Airborne Imaging Spectrometer data, *J. Geophys. Res.*, 95(D4):3549-3564.

B.C. Gao, A.F.H. Goetz (1990), Determination of total column water vapor in the atmosphere at high spatial resolution from AVIRIS data using spectral curve fitting and band ratioing techniques, in *Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment*, SPIE Vol. 1298, pages 138-148.

D.M. Gates, H.J. Keegan, V.R. Schleter, V.R. Weidner (1965), Spectral properties of plants, *Appl. Opt.*, 4(1):11-20.

H.W. Gausman, W.A. Allen, R. Cardenas, A.J. Richardson (1970), Relation of light reflectance to histological and physical evaluation of cotton leaf, *Appl. Opt.*, 9(3):545-552.

H.W. Gausman, W.A. Allen, D.E. Escobar (1974), Refractive index of plant cell walls, *Appl. Opt.*, 13(1):109-111.

R.P. Gauthier, R.A. Neville (1985), Narrow-band multispectral imagery of the vegetation red reflectance edge for use in geobotanical remote sensing, in *Proc. 3rd Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arcs (France), 16-20 December 1985 (ESA SP-247), 233-236.

S.A.W. Gerstl, A. Zardecki (1985), Coupled atmosphere/canopy model for remote sensing of plant reflectance features, *Appl. Opt.*, 24(1):94-102.

N.S. Goel, R.L. Thompson (1984), Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. III. Estimation using only canopy reflectance data as illustrated by the SUIT model, *Remote Sens. Environ.*, 15:223-236.

N.S. Goel, R.L. Thompson (1984a), Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. IV. Total inversion of the SAIL model, *Remote Sens. Environ.*, 15:237-253.

N.S. Goel, R.L. Thompson (1984b), Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. Estimation of Leaf Area Index and Average Leaf Angle using measured canopy reflectances, *Remote Sens. Environ.*, 16:69-85.

N.S. Goel (1987), Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data, *Remote Sens. Reviews*, 1-221.

N.S. Goel (1989), Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data, in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed), Wiley Interscience, pages 205-251.

N.S. Goel, I. Rozehnal, R.L. Thompson (1991), A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region, *Remote Sens. Environ.*, 36:73-104.

A.F.H. Goetz, B.C. Gao, C.A. Wessman, W.D. Bowman (1990), Estimation of biochemical constituents from fresh, green leaves by spectrum matching techniques, in *Proc. Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'90)*, Washington DC, 20-24 May 1990, pages 971-974.

S.N. Goward, K.F. Huemmrich (1992), Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegatation index: an assessment using the SAIL model, *Remote Sens. Environ.*, 39:119-140.

L. Grant (1987), Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 22:309-322.

L. Grant, C.S.T. Daughtry, V.C. Vanderbilt (1987), Variations in the polarized leaf reflectance of sorghum bicolor, *Remote Sens. Environ.*, 21:333-339.

L. Grant, C.S.T. Daughtry, V.C. Vanderbilt (1992), Polarized and specular reflectance variation with leaf surface features, *Physiol. Plant.* (soumis).

R.O. Green, J.E. Conel, C.J. Bruegge, J.S. Margolis, V. Carrère, G. Vane, G. Hoover (1992), In flight calibration of the spectral and radiometric characterization of AVIRIS in 1991, in *Proc. 3rd*

Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Vol. 1: AVIRIS workshop (R.O. Green, Ed), JPL Publication 92-14, 1:4.

F. Grum, G.W. Luckey (1968), Optical sphere paint and a working standart of reflectance, *Appl. Opt.*, 7(11):2289-2294.

G. Guyot, F. Baret (1988), Utilisation de la haute résolution spectrale pour suivre l'état des couverts végétaux, in *Proc. 4th Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois (France), 18-22 January 1988 (ESA SP-287), pages 279-286.

G. Guyot (1989), *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Paradigme, Caen.

G. Guyot, F. Baret (1989), La haute résolution spectrale. Déterminisme des déformations spectrales entre le rouge et le proche infrarouge, in *Télédétection et Gestion des Ressources* (Bernier, Bonn et Gagnon, Eds), Vol VI:197-209.

G. Guyot (1991), Optical properties of vegetation canopies, in *Application of Remote Sensing in Agriculture* (M.D. Steven and J.A. Clark, Eds), Butterworths, London, pages 19-43.

F.G. Hall, K.F. Huemmrich, S.N. Goward (1990), Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation, *Remote Sens. Environ.*, 33:47-54.

B. Hapke (1963), A theorical Photometric function for the lunar surface, *J. Geophys. Res.*, 68:4571-4586.

B. Hapke (1966), An improved theoretical lunar photometric function, *Astron. J.*, 71(5):333-339.

B. Hapke (1968), On the particle size distribution of lunar soil, *Planet. Space Sci.*, 16:101-110.

B. Hapke (1977), Interpretation of optical observations of Mercury and the Moon, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 15:264-274.

B. Hapke (1981), Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 86:3039-3054.

B. Hapke, E. Wells (1981), Bidirectional reflectance spectroscopy. 2. Experiments and observations, *J. Geophys. Res.*, 86:3055-3060.

B. Hapke (1984), Bidirectional reflectance spectroscopy. 3. Correction for macroscopic roughness, *Icarus*, 59:41-59.

B. Hapke (1986), Bidirectional reflectance spectroscopy. 4. The extinction coefficient and the opposition effect, *Icarus*, 67:264-280.

A.K. Hardacre, N.F. Nicholson, M.L.P. Boyce (1984), A portable photometer for the measurement of chlorophyll in intact leaves, *New Zealand J. Exp. Agric.*, 12:357-362.

K. Hardwick, N.R. Baker (1973), *in vivo* measurement of chlorophyll content of leaves, *New Phytol.*, 72:51-54.

L.G. Henyey, J.L. Greenstein (1941), Diffuse radiation in the galaxy, *Astrophys. J.*, 93:70-83.

D. Hodanova (1972), Structure and development of sugar beet canopy. I. Leaf area - leaf angle relations, *Photosynthetica*, 6(4):401-409.

D.N.H. Horler, M. Dockray, J. Barber, A.R Barringer (1983a), Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content, *Adv. Space Res.*, 3(2):273-277.

D.N.H. Horler, M. Dockray, J. Barber (1983b), The red edge of plant leaf reflectance, *Int. J. Remote Sens.*, 4(2):273-288.

S. Huet (1990), Régression non linéaire: modélisation, estimation, validation, in Télédétection spatiale: aspects physiques et modélisation, Cepadues Editions, Toulouse, pages 367-411.

A.R. Huete (1986), Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis, *Remote Sens. Environ.*, 19:237-251.

E.R. Hunt, B.N. Rock, P.S. Nobel (1987), Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 22:429-435.

E.R. Hunt, B.N. Rock (1989), Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances, *Remote Sens. Environ.*, 30:43-54.

S.B. Idso, R.D. Jackson, R.J. Reginato, B.A. Kimball, F.S. Nakayama (1975), The dependence of bare soil albedo on soil water content, *J. Appl. Meteor.*, 14:109-113.

J.R. Irons, K.J. Ranson, C.S.T. Daughtry (1988), Estimating big bluestem albedo from directional reflectance measurements, *Remote Sens. Environ.*, 25:185-199.

J.R. Irons, R.A. Weismiller, G.W. Petersen (1989), Soil reflectance, in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), Wiley Interscience, pages 66-106.

T. Ishida, H. Ando, M. Fukuhara (1991), Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties, *Remote Sens. Environ.*, 38:173-182.

R.D. Jackson, M.S. Moran, P.N. Slater, S.F. Biggar (1987), Field calibration of reference reflection panels, *Remote Sens. Environ.*, 22:145-158.

D.S. Kimes, J.A. Kirchner (1982), Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes, *Appl. Opt.*, 21(22):4119-4129.

P. Kubelka (1954), New contributions of the optics of intensely light- scattering materials. Part II: nonhomogeneous layers, *J. Opt. Soc. Am.*, 44(4):330-335.

R. Kumar, L. Silva (1973), Light ray tracing through a leaf cross section, *Appl. Opt.*, 12(12):2950-2954.

A. Kuusk (1991), Determination of vegetation canopy parameters from optical measurements, *Remote Sens. Environ.*, 37:207-218.

H.K. Lichtenthaler, A.R. Wellburn (1983), Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in differents solvents, *Biochemical Society Transactions*, 603:591-592.

H.K. Lichtenthaler (1987), Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes, *Methods Enzymol.*, 148:350-382.

Q. Ma, A. Ishimaru, P. Phu, Y. Kuga (1990), Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 28(5):865-872.

S.J. Maas, J.R. Dunlap (1989), Reflectance, transmittance, and absorptance of light by normal, etiolated, and albino corn leaves, *Agron. J.*, 81:105-110.

P.K. Macnicol, M.L. Dudzinski, B.N. Condon (1976), Estimation of chlorophyll in tobacco leaves by direct photometry, *Ann. Bot.*, 40:143-152.

S. Maggion (1991), Inversion de modèles physiques appliquée à la télédétection: cas des méthodes de Quasi-Newton, DEA Mathématiques Appliquées, Université Paul Sabatier, Toulouse (France), 36 pages.

T.J. Malthus et al. (1989), Anglo-French collaborative reflectance experiment, Brooms Barn Experimental Station, July 1989, Report-data.

A.R. Marjoram, P.J. Vickery, D.C. McKenzie (1990), A polytetrafluoroethylene coating for field reference reflection panels, *Int. J. Remote Sens.*, 11(6):1047-1053.

D.W. Marquardt (1963), An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, 11(2):431-441.

G.C. Marten, J.S. Shenk, F.E. Barton II (eds) (1985), Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): analysis of forage quality, U.S. Dept. of Agric. Handbook, 643:1-96.

G. Martin, S.A. Josserand, J.F. Bornman, T.C. Volgemann (1989), Epidermal focussing and the light microenvironment within leaves of Medicago sativa, *Physiol. Plant.*, 76:485-492.

S.J. Mathew, H.A. Parpia (1971), Food browning as a polyphenol reaction, *Adv. Food Res.*, 19:74-145.

J.M. Melillo, J.D. Aber, J.F. Muratore (1982), Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics, *Ecology*, 63(3):621-630.

J.R. Miller, E.W. Hare, R.A. Neville, R.P. Gauthier, D. McColl, S.M. Till (1985), Correlation of metal concentration with anomalies in narrow band multispectral imagery of the vegetation red reflectance edge, in *Proc.* 4th *Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*, San Fransisco (CA), April 1-4 1985, pages 143-153.

J.R. Miller, J.R. Freemantle, M.J. Belanger, C.D. Elvidge, M.G. Boyer (1990), Potential for determination of leaf chlorophyll content using AVIRIS, in *Proc.* 2nd *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) workshop* (R.O. Green, Ed), 4-5 June 1990, JPL Publication 90-54, pages 72-77.

N.M. Milton, D.A. Mouat (1989), Remote sensing of vegetation responses to natural and cultural environmental conditions, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55(8):1167-1173.

R.B. Myneni, G. Asrar, R.B. Burnett, E.T. Kanemasu (1987), Radiative transfer in an anisotropically scattering vegetative medium, *Agric. For. Meteorol.*, 41:97-121.

R.B. Myneni, A.L. Marshak, Y.V. Knyazikhin (1991), Transport theory for a leaf canopy of finite-dimensional scattering centers, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 46(4):259-280.

J.A. Nelder, R.A. Mead (1965), A simplex method for function optimization, *Computation Journal*, 7:308-313.

J. Otterman (1981), Reflection from soil with sparse vegetation, *Adv. Space Res.*, 1:115-119.

J. Otterman (1984), Albedo of a forest modeled as a plane dense protusions, *J. Climate Appl. Meteorol.*, 23:297-307.

J. Otterman, G.H. Weiss (1984), Reflection from a field of randomly located vertical protusions, *Appl. Opt.*, 23(12):1931-1936.

K.F. Palmer, D. Williams (1974), Optical properties of water in the near infrared, *J. Opt. Soc. Am.*, 64(8):1107-1110.

J.K. Park, D.W. Deering (1982), Simple radiative transfer model for relationships between canopy biomass and reflectance, *Appl. Opt.*, 21(2):303-309.

D.L. Peterson, J.D. Aber, P.A. Matson, D.H. Card, N. Swanberg, C. Wessman, M. Spanner (1988), Remote Sensing of Forest canopy and leaf biochemical contents, *Remote Sens. Environ.*, 24:85-108.

D.L. Peterson (1992), Report on the workshop Remote sensing of plant biochemical content: theoretical and empirical studies, Marshall (CA), March 18-20 1991, 50 pages.

B. Pinty, D. Ramond (1986), A simple bidirectional reflectance model for terrestrial surfaces, *J. Geophys. Res.*, 91(D7):7803-7808.

B. Pinty, M.M. Verstraete, R.E. Dickinson (1989), A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soils, *Remote Sens. Environ.*, 27:273-288.

B. Pinty, M.M. Verstraete, R.E. Dickinson (1990), A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 2. Inversion and validation, *J. Geophys. Res.*, 95(D8):11767-11775.

B. Pinty, M.M. Verstraete (1991), Extracting information on surface properties from bidirectional reflectance measurements, *J. Geophys. Res.*, 96(D2):2865-2874.

J.C. Price (1991), On the value of high spectral resolution measurements in the visible and near infrared, in *Proc. 5th Int. Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel (France), 14-18 January 1991 (ESA SP-319), pages 131-136.

P. Ravel (1989), Modélisation du comportement optique des feuilles dans le domaine 0.4-2.5 μm, Mémoire LERTS/ESE.

H.M. Rawson, P.A. Gardner, M.J. Long (1987), Sources of variation in specific leaf area in wheat grown at high temperature, *Aust. J. Plant Physiol.*, 14:287-298.

J.M. Renders, S.P. Flasse (1992), Genetic algorithms and classical optimization methods for the retrieval of quantitative information from satellite data: comparison and improvement, *SIAM Optimization* (soumis).

A.J. Richardson, C.L. Wiegand (1977), Distinguishing vegetation from soil- background information, *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 43:1541-1542.

A.J. Richardson, J.H. Everitt (1992), Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity, *Geocarto International*, 1:63-69.

B.N. Rock, T. Hoshizaki, J.R. Miller (1988), Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline, *Remote Sens. Environ.*, 24:109-127.

B.N. Rock, J.R. Miller, D.M. Moss, J.R. Freemantle, M.J. Boyer (1990), Spectral characterization of forest damage occuring on Whiteface Mountain, NY - studies with the Fluorescence Line Imager (FLI) and ground-based spectrometers, in *Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment*, SPIE 1298, pages 190-201.

J.L. Roujean, M. Leroy, P.Y. Deschamps (1992), A bidirectional reflectance model of the Earth surface for the correction of remote sensing data, *J. Geophys. Res.*, sousmis.

C. Roux, R. Tomassone (1973), Moindres carrés non linéaires (HAUS59), Note interne 73/20, INRA Département de Biométrie, Jouy-en-Josas (France).

J.E. Sanger (1971), Quantitative investigation of leaf pigments from their inception in buds through autumn coloration to decomposition in falling leaves, *Ecology*, 52(6):1075-1089.

Z. Sestak (1985), Chlorophylls and carotenoids during leaf ontogeny (Z. Sestak, ed), Academia Praha.

M. Shibayama, T. Akiyama (1989), Seasonal visible, near-infrared and mid- infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass, *Remote Sens. Environ.*, 27:119-127.

M. Shibayama, T. Akiyama (1991), Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements, *Remote Sens. Environ.*, 36:45-53.

T.R. Sinclair, R.M. Hoffer, M.M. Schreiber (1971), Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season, *Agron. J.*, 63:864-867.

T.R. Sinclair, M.M. Schreiber, R.M. Hoffer (1973), Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of solar radiation through leaves, *Agron. J.*, 65:276-283.

J.A. Smith, R.E. Oliver (1974), Effects of changing canopy directional reflectance on feature selection, *Appl. Opt.*, 13(7):1599-1604.

L.A. Spomer, M.A.L. Smith M.A.L., J.S. Sawwan (1988), Rapid nondestructive measurement of chlorophyll content in leaves with nonuniform chlorophyll distribution, *Photosynth. Res.*, 16:277-284.

F. Stern (1964), Transmission of isotropic radiation across an interface between two dielectrics, *Appl. Opt.*, 3(1):111-113.

M.D. Steven, T.J. Malthus, T.H. Demetriades-Shah, F.M. Danson, J.A. Clark (1991), High spectral resolution indices for crop stress, in *Application of Remote Sensing in Agriculture* (M.D. Steven and J.A. Clark, Eds), Butterworths, London, pages 209-227.

G.G. Stokes (1862), On the intensity of the light reflected from or transmitted through a pile of plates, in *Proc. Roy. Soc. Lond.*, 11:545-556.

E.R. Stoner, M.F. Baumgardner (1981), Characteristic variations in reflectance of surface soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1161-1165.

A.H. Strahler, C.E. Woodcock, J.A. Smith (1986), On the nature of models in remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 20:121-139.

D. Tanré, C. Deroo, P. Dahaut, M. Herman, J.J. Mocrette, J. Perbos, P.Y. Deschamps (1985), Effets atmosphériques en télédétection - Logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire, in *Proc. 3rd Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arc (France), 16-20 Décembre 1985 (ESA SP-247), pages 315-319.

D. Tanré, C. Deroo, P. Dahaut, M. Herman, J.J. Mocrette, J. Perbos, P.Y. Deschamps (1990), Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code, *Int. J. Remote Sens.*, 11(4):659-668.

R. Thom (1983), *Paraboles et catastrophes*, Flammarion, Paris.

J.R. Thomas, L.N. Namken, G.F. Oerther, R.G. Brown (1971), Estimating leaf water content by reflectance measurements, *Agron. J.* 63:845-847.

J.R. Thomas, H.W. Gausman (1977), Leaf reflectance versus leaf chlorophyll and carotenoids concentration for eight crops, *Agron. J.*, 63:845-847.

A. Trigui, C. Baldy (1983), Evolution des propriétés optiques des feuilles d'olivier sénescentes ou malades, in 2^{ieme} *Coll. Int. Signatures d'objets en télédétection*, Bordeaux (France), 12-16 septembre 1983, Les Colloques de l'INRA 23:353-363.

C.J. Tucker, M.W. Garratt (1977), Leaf optical system modeled as a stochastic process, *Appl. Opt.*, 16(3):635-642.

C.J. Tucker (1980), Remote sensing of leaf water content in the near infrared, *Remote Sen. Environ.*, 10:23-32.

S.L. Ustin, M.O. Smith, J.B. Adams (1992), Remote sensing of ecological processes: A strategy for developing and testing ecological models using spectral mixture analysis, in *Scaling Ecological Processes from Leaf to Landscape* (J. Ehlinger and C. Field, Eds), Academic Press (sous presse).

H.C. Van de Hulst (1957), *Light scattering by small particles*, London, 470 pages.

V.C. Vanderbilt, S.L. Ustin, J. Clark (1988), Canopy geometry changes due to wind cause red edge spectral shift, in *Proc. of IEEE Geosci. and Remote Sensing Symp. (IGARSS'88)*, Edinburgh (Scotland), 13-16 September (ESA SP-284), page 835.

G. Vane, A.F.H. Goetz (1988), Terrestrial imaging spectroscopy, *Remote Sens. Environ.*, 24:1-29.

W. Verhoef (1984), Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model, *Remote. Sens. Environ.*, 16:125-141.

W. Verhoef (1985), Earth observation modeling based on layer scattering matrices, *Remote Sens.*

Environ., 17:165-178.

M.M. Verstraete (1988), Radiation transfer in plant canopies: scattering of solar radiation and canopy reflectance, *J. Geophys. Res.*, 93(D8):9483-9494.

M.M. Verstraete, B. Pinty, R.E. Dickinson (1990), A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 95(D8):11755-11765.

R.K. Vincent, G.R. Hunt (1968), Infrared reflectance from mat surfaces, *Appl. Opt.*, 7(1):53-59.

T.C. Vogelmann, L.O. Bjorn (1986), Plants as light traps, *Physiol. Plant.*, 68:704-708.

T.C. Vogelmann, J.F. Bornman, S. Josserand (1989), Photosynthetic gradients and spectral regime within leaves of Medicago sativa, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 323:411-421.

E.A. Walter-Shea, J.M. Norman, B.L. Blad (1989), Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean, *Remote Sens. Environ.*, 29:161-174.

C.A. Wessman, J.D. Aber, D.L. Peterson, J.M. Melillo (1988), Foliar analysis using near infrared reflectance spectroscopy, *Can. J. For. Res.*, 18:6-11.

C.A. Wessman, J.D. Aber, D.L. Peterson (1989), An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry, *Int. J. Remote Sens.*, 10(8):1293-1316.

P. Woessner, B. Hapke (1987), Polarization of light scattered by clovers, *Remote Sens. Environ.*, 21:243-261.

J.T. Woolley (1975), Refractive index of soybean leaf cell walls, *Plant Physiol.*, 55:172-174.

V.L. Yadava (1986), A rapid nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves, *Hort. Science*, 21(6):1449-1450.

N. Yamada, S. Fujimura (1988), A mathematical model of reflectance and transmittance of plant leaves as a function of chlorophyll pigment content, In *Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'88)*, Edinburgh (Scotland), 13-16 Sept 1988, pages 833-834.

N. Yamada, S. Fujimura (1992), Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three-color reflectance and transmittance, *Appl. Opt.*, submitted.

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1: Bandes spectrales des capteurs Landsat MSS et TM, Spot HRV, et AVHRR de NOAA superposées à un spectre de sol et un spectre de végétation (d'après Guyot, 1989).

Figure 0.2: Concept d'un système spectro-imageur (d'après Vane et Goetz, 1988).

Figure 1.1: Géométrie de mesure de la réflectance bidirectionnelle: θ_s=angle zénithal solaire, θ_o=angle zénithal de visée, ψ_o=angle azimutal de visée (d'après Irons et al., 1988).

Figure 1.2: Variation angulaire de la réflectance d'une parcelle de trèfle (*Trifolium repens*): (+) illumination à 0°, (o) illumination à 60° (d'après Woessner et Hapke, 1987).

Figure 1.3: Variation de la réflectance d'un couvert végétal en fonction du *LAI* (d'après Guyot, 1991).

Figure 1.4: Spectres de réflectance de cinq sols différents: (a) sol à forte teneur en matière organique, (b) sol peu altéré, (c) sol à faible teneur en fer, (d) sol à faible teneur en matière organique, (e) sol à forte teneur en fer (d'après Baumgardner et al., 1985).

Figure 1.5: Variation directionnelle d'un sol argileux rugueux dans le plan principal de visée.

Figure 2.1: Structure anatomique de quelques feuilles: (a) une Monocotylédone, (b) une Dicotylédone, (c) une feuille isolatérale.

Figure 2.2: Propriétés optiques des feuilles dans le visible (400-700 nm), le proche infrarouge (700-1300 nm), et le moyen infrarouge (1300-2500 nm).

Figure 2.3: Indicatrices de réflectance et de transmittance de feuilles de soja pour 3 longueurs d'onde et 3 angles d'incidence indiqués par la flèche. La figure représente la variations relatives de l'intensité énergétique par unité d'angle solide (sr^{-1}) (d'après Breece et Holmes, 1971).

Figure 2.4: Réflectance totale, polarisée et non polarisée de 3 feuilles de *Coleus blumei* de couleur différente: feuille verte, rouge et blanche (d'après Grant et al., 1987).

Figure 2.5: Lancer de rayon sur l'épiderme supérieur d'une feuille d'*Oxalis stricta* (d'après Poulson et Vogelmann, 1990).

Figure 2.6: Schéma décrivant le trajet optique de la lumière à travers une feuille de Dicotylédone.

Figure 2.7: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de maïs (*Zea mays*) verte.

Figure 2.8: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de tournesol (*Helianthus annuus*) verte.

Figure 2.9: Distribution de lumière transmise (a) et diffusée (b) à travers une feuille de luzerne (*Medicago sativa*). Les courbes représentent l'atténuation de la lumière par absorption et diffusion (d'après Vogelmann et al., 1989).

Figure 2.10: "Void Area Index" d'une feuille de coton (*Gossypium hirsutum* en cours de maturation (d'après Gausman et al., 1970).

Figure 3.1 Réflexion et réfraction d'un rayon lumineux: (a) polarisation perpendiculaire (b) polarisation parallèle.

Figure 3.2: Division de l'hémisphère en angles solides Ω (demi-angle α) dans lesquels sont inscrits les rayons lumineux incidents.

Figure 3.3: Transmissivité moyenne $t_{av}(\alpha, n)$ en fonction de l'indice de réfraction n et de l'angle d'incidence α.

Figure 3.4: Réflexions multiples produites par une lame à bords paralèlles.

Figure 3.5: Nomenclature pour un modèle de propriétés optiques des feuilles à N couches (N-1 couches homogènes + 1 couche).

Figure 3.6: Schéma optique du spectrophotomètre Varian Cary 17DI.

Figure 3.7 Réflectance d'une référence de sulfate de Baryum ($BaSO_4$) mesurée relativement à une référence d'oxyde de magnésium (MgO) fraichement préparée.

Figure 3.8: Relations entre concentrations en pigments: (a) chlorophylle a et chlorophylle b, (b) chlorophylle a et caroténoïdes, (c) chlorophylle b et caroténoïdes.

Figure 3.9: Indices de réfraction des matériaux foliaires (—) et de l'eau (···) (d'après Palmer et Williams, 1974), et coefficient d'absorption k_e d'une feuille de maïs albinos et sèche (- - -).

Figure 3.10: Variations de la réflectance totale R_N, de la transmittance T_N, et de l'absorptance A_N pour différentes valeurs de N.

Figure 3.11: Comparaison entre les valeurs de réflectance (x) et de transmittance (o) simulées et mesurées.

Figure 3.12: Relation entre le nombre de couches élémentaires N et la surface specifique des feuilles (SLA="Specific Leaf Area").

Figure 3.13: Spectres de réflectance et de transmittance d'une feuille de: (a) maïs vert (b) tournesol vert. Les traits pleins représentent le feuille entière, les pointillés la couche élémentaire.

Figure 3.14: Coefficient spécifique d'absorption de l'eau des feuilles *in vivo* K_w (—) comparé au coefficient d'absorption de l'eau liquide pure (···) à 20°C (d'après Curcio et Petty, 1951).

Figure 3.15: Coefficient spécifique d'absorption des caroténoïdes *in vivo* K_{x+c} (échelle de droite) (···) et de la chlorophylle a+b *in vivo* K_{ab} (échelle de gauche) (—).

Figure 3.16 Comparaison entre valeurs mesurées et simulées de réflectance (a) et de transmittance(b). Les données correspondent à plusieurs expériences: la notre, celle de Andrieu et al. (1988), et celle de Malthus et al. (1989).

Figure 3.17: Comparaison entre la réflectance et la transmittance spectrales mesurées (—) et modélisées (···) pour: (a) une feuille de maïs albinos, (b) une feuille de maïs jaunissante, (c) une feuille de soja verte, (d) une feuille de tournesol verte.

Figure 3.18: Réflectance (a) et transmittance (b) pour différentes valeurs de N et C (concentration en chlorophylle ou épaisseur équivalente en eau) à différentes longueurs d'onde.

Figure 3.19: Relation entre la réflectance à 550 nm et la concentration en chlorophylle a+b pour six espèces de feuilles caduques (d'après Belanger, 1990).

Figure 3.20: Variation de la réflectance et de la transmittance d'une feuille en fonction de la concentration en chlorophylle a+b: (a) à 548 nm, (b) à 672 nm, pour différents indices de structure N.

Figure 3.21: Estimation de la concentration en chlorophylle a+b pour différents jeux de données.

Figure 3.22: Estimation de l'épaisseur équivalente en eau pour différents jeux de données.

Figure 4.1: Isocontours de l'angle de phase pour trois angles d'incidence: (a) i=0°, (b) i=30°, (c) i=60°. Isocontours de l'angle d'anti- phase pour: (d) i=60°.

Figure 4.2: fonction de phase $P(g) = 1 + b\cos g + c\frac{3\cos^2 g - 1}{2}$ pour les paramètres suivants: (a) b=0.82 et c=0.67, (b) b=-0.82 et c=0.67 (d'après les valeurs déterminées par Pinty et al., 1989).

Figure 4.3: Fonction de phase $P(g, g') = 1 + b\cos g + c\frac{3\cos^2 g - 1}{2} + b'\cos g' + c'\frac{3\cos^2 g' - 1}{2}$ pour trois types de réflexion: (a) rétrodiffusion (b,c,b',c')=(2,1,0,0), (b) réflexion spéculaire (b,c,b',c')= (0,0,2,1), (c) diffusion mixte (b,c,b',c')=(0,2,0,2).

Figure 4.4: Réflectance bidirectionnelle calculée dans le plan principal (les valeurs négatives indiquent une visée dans la direction d'éclairement) pour 2 angles d'incidence du soleil (0° et 60°), et 4 valeurs du paramètre de rugosité h (0.0025, 0.025, 0.25, et 2.5). Les autres paramètres du modèle sont fixes: $\omega = 0.25, b = 0.82, c = 0.67, b' = 0$ et $c' = 0$ (valeurs adaptées de Pinty et al., 1989).

Figure 4.5: Variation directionnelle de la réflectance de deux sols: (a) un sol argileux très rugueux, (b) le même sol argileux très lisse. Les mesures ont été acquises dans 4 configurations différentes (2 positions d'éclairement dans le plan perpendiculaire et, 2 dans le plan principal), à une longueur d'onde donnée ($\lambda_1 = 538$ nm).

Figure 4.6: Comparaison entre la réflectance bidirectionnelle mesurée et estimée pour 6 sols: (a) sol argileux très rugueux, (b) sol argileux moyennement rugueux, (c) terreau très rugueux, (d) terreau moyennement rugueux, (e) sol argileux lisse, (f) terreau lisse, (g) sable rugueux, (i) sable lisse.

Figure 4.7: Comparaison entre la réflectance spectrale mesurée et estimée (5000 données par type de sol): (+) sol argileux, (o) terreau, (*) sable.

Figure 4.8: Variation spectrale de l'albédo de simple diffusion ω de trois sols: (—) sol argileux, (···) terreau, (- - -) sable.

Figure 4.9: Effets du désèchement sur l'albédo de simple diffusion pour 3 sols (sol argileux, terreau, sable) à différents niveau d'humidité: (a) sol très humide, (b) sol moyennement humide, (c) sol sec.

Figure 5.1: Variations de la réflectance spectrale du couvert en fonction de: (a) le paramètre de structure des feuilles N, (b) la concentration en chlorophylle a+b, C_{ab} exprimée en $\mu g.cm^{-2}$, (c) l'épaisseur équivalente en eau, C_w exprimée en cm, (d) l'indice foliaire, LAI, (e) l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, θ_l. Le jeu moyen de paramètres est: $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255\ cm, LAI =$

$3, \theta_l = 58^o, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$, et $skyl = 0.2$.

Figure 5.2: Relation entre le NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") et la fraction de PAR absorbé ε_i. Les symboles • représentent des classes particulières: (a) $10 < C_{ab} < 15 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (b) $30 < C_{ab} < 35 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (c) $0.5 < LAI < 1.0$ et $N < 1.2$; (d) $2.5 < LAI < 3.0$ et $N < 1.2$.

Figure 5.3: Exemple de deux couverts végétaux très différents ayant un NDVI identique mais des valeurs d'ε_i différentes. Le couvert (a) correspond à: $N = 1.05, C_{ab} = 20.77\ \mu.cm^{-2}, LAI = 0.41$ et $\theta_l = 29^o2$. Le couvert (b) correspond à: $N = 2.11, C_{ab} = 3.96\ \mu g.cm^{-2}, LAI = 8.2$ et $\theta_l = 52^o5$. Les autres paramètres du couvert sont: $\theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$ et $skyl = 0.2$.

Figure 5.4: Réflectance spectrale d'un couvert végétal au niveau du sol (traits pleins) et au niveau du satellite (pointillés) pour deux visibilités: (a) V=5 km, (b) V=23 km. Les paramètres du modèle sont: $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.01\ cm, LAI = 5, \theta_l = 58^o, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o$ et $\psi_o = 0^o$.

Figure 6.1: Ajustement de portions du coefficient spécifique d'absorption de la chlorophylle a+b (Figures a et b) et de l'eau (Figures c et d) à des logistiques généralisées, et détermination analytique du point d'inflexion correspondant.

Figure 6.2: Sensibilité de la position du point d'inflexion du "red edge" λ_i à la concentration en chlorophylle (C_{ab}) et à la structure interne du mésophylle (N): (a) réflectance, (b) transmittance.

Figure 6.3: Dérive des points d'inflexion de différentes portions de réflectance dans le visible (Figures a et b) et le moyen infrarouge (Figures c et d), en fonction de la concentration en chlorophylle et de l'épaisseur équivalente en eau.

Figure 6.4: Sensibilité de λ_i à l'indice foliaire à: (a) la concentration en chlorophylle (C_{ab}, (b) la structure interne du mésophylle (N), (c) l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l), (d) la réflectance du sol ($\rho_s(672)$). Le jeu moyen de paramètres est: $N = 2.0, C_{ab} = 40\ \mu g.cm^{-2}, \theta_l = 58^o, \rho_s(672) = 0.15, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$, et $skyl = 0.2$.

Figure 6.5: Relation entre la position du point d'inflexion du "red edge" λ_i et la fraction de PAR absorbé ε_i: Les symboles • représentent des classes particulières: (a) $10 < C_{ab} < 15 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (b) $30 < C_{ab} < 35 \mu g.cm^{-2}$ et $N < 1.2$; (c) $0.5 < LAI < 1.0$ et $N < 1.2$; (d) $2.5 < LAI < 3.0$ et $N < 1.2$.

Figure 6.6: Spectres simulés de quatre types de couverts ayant des λ_i différents, mais des niveaux de réflectance rouge et proche infrarouge identiques. 1: X=(8.8, 2.43, 1.58, 54.5, 163.3, 66.6, 72, 0.22); 2:X=(46.5, 2.5, 1.2, 31, 27.8, 67, 45, 0.25); 3: X=(35.5, 2.27, 1.02, 48, 1.8, 69.3, 74.6, 0.18); 4: X=(17.9, 1.78, 1.9, 37.6, 106.8, 60.1, 44.9, 0.20).

Figure 6.7: Relations entre λ_i calculé de façon analytique et: (a) λ_i estimé par ajustement polynomial des réflectances ($\rho(672), \rho(710), \rho(780)$), (b) λ_i estimé par inversion du modèle gaussien, (c) λ_i estimé par le modèle linéaire.

Figure 6.8: Simulation de l'erreur relative sur λ_i (calculé par trois méthodes différentes: modèle linéaire, modèle gaussien, et modèle polynômial) et NDVI en fonction de: (a) la concentration en chlorophylle a+b (LAI=3), (b) l'indice foliaire ($C_{ab} = 40\ \mu g.cm^{-2}$). L'erreur sur la réflectance est $\Delta\rho$=0.01, et on suppose que l'erreur sur la position en longueur d'onde $\Delta\lambda$ est nulle. L'erreur relative est calculée pour le jeu de paramètres suivant: $N = 1.2, \theta_l = 58^o, \rho_s = 0.15, \theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$ et $skyl$=0.2.

Figure 6.9: Variation spectrale des paramètres u et v calculés à partir du modèle 5S, pour une visibilité de 5 km et une atmosphère continentale de latitude moyenne. Les deux puits principaux à 730 nm et 760 nm correspondent à l'absorption gazeuse.

Figure 6.10: Relation entre les valeurs au sol et au niveau du satellite, des indices λ_i et $NDVI$.

Figure 6.11: Relation entre la position du point d'inflexion du "red edge" calculée au niveau du sol et le même point calculé au niveau du satellite par le modèle polynômial pour différentes visibilités: (a) V=5 km, (b) V=20 km, (c) V=35 km, (d) V=50 km, (e) V=65 km.

Figure 7.1: Réflectance spectrale du sol utilisée pour les simulations. ρ_s est calculé à partir du modèle SOILSPECT et de l'albédo de simple diffusion ω_s du terreau. ρ'_s et ρ''_s correspondent à $\omega_s + 0.075$ et $\omega_s + 0.15$.

Figure 7.2: Ecarts entre le spectre de réflectance de couvert calculé avec le jeu de paramètres $(N, C_{ab}, C_w, LAI, \theta_l)$=(1.5, 32, 0.0255, 3, 45) et les spectres calculés avec les autres jeux de paramètres du Tableau 7.x correspondants à: (o) $LAI = 2.10$, (+) $LAI = 2.55$, (o) $LAI = 3.45$, (x) $LAI = 3.90$.

Figure 7.3: Comparaison entre spectres de réflectance de betterave à sucre mesurés et simulés: (a) parcelle #000, (b) parcelle #018. Les valeurs des paramètres du couvert mesurés et estimés par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sont rassemblées dans le Tableau 7.6.

Figure 7.4: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes AVIRIS, et sont rassemblées dans le Tableau 7.6.

Figure 7.5: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes TM, et sont rassemblées dans le Tableau 7.7.

Figure 7.6: Comparaison entre valeurs mesurées et estimées de: (a) concentration en chlorophylle (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), (b) épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), (c) indice foliaire (LAI). Les valeurs estimées ont été déterminées par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur les données équivalentes HRV, et sont rassemblées dans le Tableau 7.8.

Figure 7.7: Comparaison entre la fraction de PAR absorbé "réel" (calculé à partir des valeurs mesurées des paramètres du couvert) et la fraction estimée à partir des paramètres déterminés par inversion du modèle PROSPECT + SAIL sur: (a) les données équivalentes AVIRIS, (b) les données équivalentes TM, (c) les données équivalentes HRV.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Quelques valeurs d'indice de réfraction de matériaux foliaires.

Tableau 2.2: Principales bandes d'absorption des constituants biochimiques de la feuille (d'après Curran, 1989).

Tableau 3.1: Quelques caractéristiques biophysiques des feuilles: concentrations en chlorophylle a (C_a), chlorophylle b (C_b), carotènes + xanthophylles (C_{x+c}) exprimées en $\mu g.cm^{-2}$. Epaisseur équivalente en eau (C_w) exprimée en cm. Paramètre de structure des feuilles $\hat{N}$ estimé par le modèle PROSPECT à la longueur d'onde du minimum d'absorption (proche infrarouge). Le signe $*$ signifie que la surface de la feuille a été nettoyée de la couche de cire qui la recouvrait.

Tableau 4.1: Quelques fonctions de phase extraites de la littérature.

Tableau 4.2: Description des 26 échantillons de sol mesurés durant l'expérience. Les paramètres ω_1 et ω_2 sont les coefficients de la régression linéaire: $\omega = \omega_1.\lambda + \omega_2$, pour 672 nm $< \lambda <$ 780 nm. R est le coefficient de corrélation de la régression.

Tableau 4.3: Géométries de mesure des données directionnelles et spectrales (valeurs soulignées).

Tableau 4.4: Inversion du modèle SOILSPECT sur le sol argileux rugueux, à trois humidités différentes, sous couvert de trois hypothèses différentes.

Tableau 4.5: Variabilité des différents paramètres estimés par le modèle pour les deux premiers cas du Tableau 4.4.

Tableau 5.1: Effets du paramètre de structure des feuilles N sur la réflectance ρ_l, la transmittance τ_l et l'absorptance $1 - (\rho_l + \tau_l)$ des feuilles (modèle PROSPECT). Idem pour la réflectance du couvert $\mathcal{R}$ (modèle SAIL). Simulations à 804 nm. δ représente la différence entre les valeurs calculées pour $N = 2.0$, et celles calculées pour $N = 1.0$.

Tableau 5.2: Quelques caractéristiques biophysiques du couvert végétal: concentration en chlorophylle a+b (C_{ab} exprimé en $\mu g.cm^{-2}$), épaisseur équivalente en eau (C_w exprimé en cm), indice foliaire (LAI), et angle moyen d'inclinaison des feuilles $\hat{\theta}_l$ calé à partir des spectres de réflectance IRIS et des autres paramètres. N est fixé à une valeur moyenne (N=1.266) estimée par le modèle PROSPECT à partir des spectres de réflectance des feuilles.

Tableau 6.1: Valeurs des coefficients α de la logistique généralisée (Equation 6.2) et de l'indice de réfraction n pour 4 domaines spectraux. λ_i est la longueur d'onde du point d'inflexion de la courbe $K(\lambda)$ exprimée en $cm^2.\mu g^{-1}$.

Tableau 7.1: Paramètres du couvert utilisés pour simuler les spectres synthétiques. Le jeu de paramètre moyen est le vecteur initial. $\theta_s = 40^o, \theta_o = 0^o, \psi_o = 0^o$ et $skyl = 0.2$. Le spectre de sol $\rho_s(\lambda)$ est présenté sur la Figure 7.1.

Tableau 7.2: Inversion de spectres synthétiques définis par $N = 1.5, C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255\ cm, LAI = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 6$ et $\theta_l = 45^o$. Dans chaque cas, LAI est maintenu fixe à une valeur proche de celles mentionnées plus haut. La dernière colonne présente la fraction journalière de PAR absorbée ε_i correspondante.

Tableau 7.3: Inversion de 100 spectres bruités pour les jeux de paramètres X et Y. Si $\overline{p_i}$ est la valeur moyenne estimée du paramètre i, l'intervalle de confiance à 95% est donné par: $\overline{p_i} - \epsilon < \overline{p_i} < \overline{p_i} + \epsilon$.

Tableau 7.4: Inversion de spectres bruités calculés à partir des paramètres du Tableau 7.1. Le nombre d'inversions ayant abouti est de 237 pour $\sigma = 0.01$ et 215 pour $\sigma = 0.05$.

Tableau 7.5: Inversion du modèle sur les spectres synthétiques, avec les spectres de réflectance de sol ρ_s, ρ'_s et ρ''_s presentés sur la Figure 7.1. Les albedos de simple diffusion sont respectivement ω_s, $\omega_s + 0.075$, et $\omega_s + 0.15$. La dernière colonne présente la fraction journalière de PAR absorbé ε_i correspondante.

Tableau 7.6: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur des sepctres équivalents AVIRIS en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

Tableau 7.7: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur les spectres équivalents TM en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

Tableau 7.8: Inversion du modèle PROSPECT+SAIL sur les spectres équivalents HRV en fixant le paramètre de structure des feuilles ($N = 1.266$) et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (θ_l). Paramètres initiaux: $C_{ab} = 32\ \mu g.cm^{-2}, C_w = 0.0255$ cm et LAI=3.

Titre: Utilisation de la haute résolution spectrale pour l'étude des couverts végétaux

Résumé:

Le récent développement des spectro-imageurs mobilise l'attention d'une partie de la communauté scientifique (agronomes, géologues, océanographes, physiciens...) sur l'étude des propriétés spectrales des surfaces naturelles. La bibliographie montre que les méthodes d'étude de la végétation sont assez empiriques, ce qui limite l'interprétation des spectres de réflectance acquis au niveau local de la parcelle ou au niveau satellitaire (images AVIRIS).

Cette thèse se propose d'évaluer l'intérêt de la haute résolution spectrale par l'intermédiaire de modèles. Deux modèles ont été mis au point: le modèle de propriétés optiques des feuilles, *PROSPECT*, permet de simuler la réflectance et la transmittance de feuilles variées entre 400 nm et 2500 nm, avec seulement 3 paramètres (structure interne de la feuille, concentration en chlorophylle et teneur en eau). Le modèle *SOILSPECT* permet de simuler la réflectance spectrale et directionnelle des sols à partir de paramètres spectraux (albédo de simple diffusion) et de paramètres caractérisant leur état de surface (paramètres de rugosité et de fonction de phase).

Ces modèles, couplés au modèle *SAIL* de réflectance des couverts végétaux et au modèle *5S* de transfert atmosphérique, ont d'abord été validés sur des mesures expérimentales acquises au laboratoire et au champ. Ils ont ensuite été utilisés pour étudier les glissements spectraux du "red edge" en fonction des variables biophysiques du couvert. Les glissements spectraux sont indépendants des effets du sol et de l'atmosphère. La dernière partie consiste à inverser ces modèles sur des spectres de réflectance de couverts afin d'estimer directement les variables biophysiques de la végétation.

Title: Use of high spectral resolution for vegetation canopy studies

Summary:

The recent development of imaging spectrometers has mobilized scientists (agronomists, geologists, oceanographers, physicians...) on the study of the spectral signatures of terrestrial surfaces. The literature shows that methods to study vegetation are rather empirical, which limits the interpretation of reflectance spectra acquired at field or satellite level (AVIRIS images).

This work investigates the interest of high spectral resolution capabilities through models. Two models have been developed: the leaf optical properties model, *PROSPECT*, allows to simulate the reflectance and transmittance of various leaves from 400 nm to 2500 nm, with only 3 parameters (leaf mesophyll structure, chlorophyll concentration and water content). The *SOILSPECT* model allows to simulate the soil spectral and directional reflectance spectrale from spectral (single scattering albedo) and surface parameters (roughness parameter and phase function).

These models, coupled with the *SAIL* model (canopy reflectance) and the *5S* model (atmospheric transfer), have been first validated on experimental measurements acquired in the laboratory and in the field. They have been then used to study the spectral shifts of the red edge as a function of canopy biophysical variables in order to define new indices characterizing the vegetation. The interest of these indices is that they are little dependent on soil and atmospheric effects. The last part consists in inverting these models on canopy reflectance spectra to evaluate directly the canopy biophysical variables

BIBLIOTHEQUE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I. N. R. A.
Station de Bioclimatologie
B.P. 91 - Domaine Saint-Paul
84143 MONTFAVET CEDEX
FRANCE