

ORSAY

n° d'ordre : 98

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

THESE

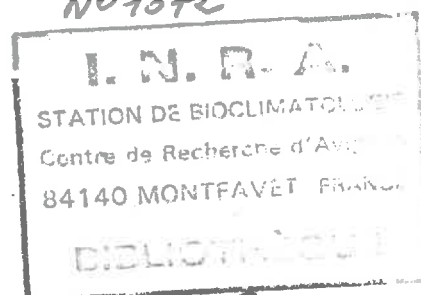
présentée

Pour obtenir

Le grade de DOCTEUR de l'Université

PAR

Frédéric BARET



SUJET: CONTRIBUTION AU SUIVI RADIOMETRIQUE
DE CULTURES DE CEREALES

soutenue le 23 Mai 1986

devant la Commission d'examen

MM. SAUGIER B. Président
RIOU C. Rapporteur
BOURDU R. Rapporteur
GUYOT G.
SAINT G.

II <u>CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT VEGETAL. ESSAI DE MODELISATION</u>	32
2-1 <u>L'EXPERIMENTATION</u>	33
2-1-1 <u>Le milieu et les cultures</u>	33
2-1-1-1 <u>Le milieu</u>	33
2-1-1-1-1 <u>Situation</u>	33
2-1-1-1-2 <u>Le sol</u>	34
2-1-1-1-3 <u>Le climat</u>	34
2-1-1-2 <u>Les cultures</u>	36
2-1-1-2-1 <u>Matériel végétal</u>	36
2-1-1-2-2 <u>Techniques culturales</u>	36
2-1-1-2-3 <u>Stades phénologiques</u>	37
2-1-1-2-4 <u>Rendement et composantes du rendement</u>	37
2-1-2 <u>Méthodes utilisées pour suivre l'évolution des caractéristiques de la structure du couvert</u>	38
2-1-2-1 <u>Mesures des propriétés optiques des éléments du couvert</u>	38
2-1-2-1-1 <u>Estimation globale des propriétés optiques d'organes</u>	38
2-1-2-1-2 <u>Mesure ponctuelle des propriétés optiques d'organes</u>	40
2-1-2-2 <u>Suivi des variables de surface ou de biomasse</u>	40
2-1-2-2-1 <u>Intérêt de ces variables</u>	40
2-1-2-2-2 <u>Problèmes d'échantillonnage</u>	41
2-1-2-2-2-1 <u>Estimation des contributions relatives de chaque organe à la biomasse ou à la surface totale du brin</u>	42
2-1-2-2-2-2 <u>Estimation des variables de surface ou de biomasse rapportées à l'unité de surface de sol</u>	48
2-1-2-2-2-2-1 <u>Passage des contributions relatives aux valeurs rapportées à l'unité de surface de sol</u>	48
2-1-2-2-2-2-2 <u>Estimation du terme d'extension spatiale</u>	49
2-1-2-3 <u>Mesure des angles foliaires</u>	52
2-1-2-3-1 <u>Méthodes de détermination des angles des feuilles</u>	52
2-1-2-3-2 <u>Estimation de la fonction de distribution des angles foliaires</u>	53
2-1-2-3-2-1 <u>Cas des limbes rectilignes</u>	54
2-1-2-3-2-2 <u>Cas des limbes courbes</u>	55
2-1-2-3-2-2-1 <u>Détermination de la courbure du limbe</u>	55
2-1-2-3-2-2-2 <u>Détermination de la forme du limbe</u>	56

Frédéric BARET

CONTRIBUTION TO CEREAL CROPS RADIOMETRIC MONITORING

SUMMARY

Recent works connecting remote sensing data to crop parameters show the importance of monitoring the dynamics of canopy's evolution.

We have used a deterministic way to elaborate a spectral profile shape's model (spectral profile : evolution of the reflectances as function of time).

This model is based on two submodels :

- a submodel describing the shape of the structure evolution of canopies : we have stratified the canopy into 3 horizontal layers differing by the orientation and the optical properties of their elements. We have described the evolution of the area elements of these 3 layers by using classical growth or senescence laws.
- a simple submodel of canopies spectral response : we have used a simple formalism similar to Beer's law. It allowed us to understand the spectral response in terms of amplitude and rate of variation of directional reflectance with LAI. We have tested this simple sub-model by comparison with SUITS's model.

This model is inversible : we can estimate some parameters characteristic of LAI evolution or of leaf orientation, by adjustment to the measured spectral profile. It is also possible to deduce from the measured spectral profile the P.A.R. absorbed by the canopy. This element is important to estimate the dry matter production.

Key Words : reflectance, wheat, structure, spectral profile, evolution, photosynthetically active radiation, short wave length.

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont permis à ce travail d'être réalisé et, plus particulièrement à :

G. GUYOT et B. SEGUIN qui m'ont apporté leur soutien constant et leurs conseils éclairés,

A. CHABREUIL pour la confiance qu'elle m'a accordée, matérialisée par l'octroi d'une bourse C.N.E.S.,

B. SAUGIER qui a accepté de diriger ce travail,

C. RIOU qui fut un "parrain" très attentionné en des moments parfois difficiles,

R. BOURDU qui a accepté d'être rapporteur de cette étude,

A. PODAIRE et G. SAINT pour leur disponibilité à un moment où ils avaient pourtant d'autres chats à fouetter,

M. GUERIF, C. BALDY, Ph. MALET et Marie-Hélène pour leurs remarques et corrections toujours pertinentes,

J.F. HANOCQ pour sa compétence et son efficacité pour la mise en place et le suivi du système automatisé d'acquisition des données radiométriques,

P. MAUREL et A. BEGUE pour la qualité de leur travail de collecte des données biologiques,

F. et M.O. ARIES, E. LARUE et P. MONESTIEZ pour leur aide efficace pour le traitement des données,

Mes parents qui m'ont aidé et soutenu efficacement,

Ariane qui a eu la délicate attention de me maintenir éveillé quand il le fallait et même quand il ne le fallait pas.

introduction

INTRODUCTION

Par sa capacité d'intégration spatiale et la répétitivité de ses observations, la télédétection constitue un puissant moyen de surveillance des surfaces naturelles.

Les informations contenues dans le signal radiométrique varient suivant la longueur d'onde. Le domaine des courtes longueurs d'onde (du visible au moyen infrarouge), renseigne sur les propriétés optiques, l'importance et la disposition spatiale des surfaces élémentaires qui composent la cible et qui sont le lieu des interactions rayonnement-matière. C'est donc un domaine bien adapté à la caractérisation de la végétation.

Avec les premiers satellites d'observation des ressources terrestres, de très nombreuses recherches sur la signification du signal radiométrique ont été engagées. L'objectif le plus souvent affiché est l'estimation, voire la prévision de la production agricole. A ce niveau, les céréales, couvrant des surfaces étendues, ont un poids très important dans l'équilibre des échanges économiques mondiaux et ont été les plus étudiées.

La production d'une culture, à quelque échelle que ce soit, passe par l'estimation de deux termes:

- La surface cultivée: elle est relativement facile à déterminer à partir des données de télédétection. La discrimination et la cartographie des cultures sont, à l'heure actuelle, les principales applications opérationnelles des satellites d'observation de la terre.

- La productivité des cultures: La détermination radiométrique de ce terme est, pour le moment, un des principaux centres d'intérêt des différents laboratoires de télédétection des cultures. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail.

Les relations entre la productivité des cultures et leur réflectance dans les courtes longueurs d'onde, ne sont pas directes. Elles sont le produit de deux sous-relations appartenant à des disciplines différentes mais complémentaires:

- L'une du domaine biologique, entre l'état de la culture et l'évolution de sa structure (indice foliaire, orientation et propriétés optiques des éléments).

- L'autre, du domaine physique, entre la structure du couvert et sa réponse radiométrique.

La télédétection de l'état des cultures se situe donc au carrefour de ces deux disciplines.

Nous nous proposons, au travers de ce travail, d'explicitier la manière d'extraire des informations sur l'évolution de la structure d'un couvert de céréales, à partir des mesures radiométriques dans le domaine des courtes longueurs d'onde. Nous essaierons, le plus possible, d'avoir une démarche de type déterministe, pour analyser la dynamique du couvert.

Il nous a paru important de faire précéder la formulation de nos objectifs et la présentation des résultats obtenus, d'une synthèse bibliographique qui permette de situer ce travail dans le contexte scientifique de ces dix dernières années.

Plan

I	<u>ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES RELATIONS ENTRE L'ETAT D'UN COUVERT VEGETAL ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES</u>	5
1-1	<u>LES INDICES DE VEGETATION</u>	7
1-1-1	rappports de canaux ou de leurs combinaisons linéaires	8
1-1-2	indices basés sur la distinction sol-végétation	9
1-2	<u>RELATION ETABLIES A UN INSTANT DONNE</u>	12
1-2-1	Estimation du rendement final de cultures	12
1-2-2	Estimation de biomasse aérienne	14
1-2-3	Estimation de l'indice foliaire	16
1-3	<u>UTILISATION DE DONNEES MULTITEMPORELLES</u>	18
1-3-1	Utilisation de points singuliers	18
1-3-2	Utilisation des vitesses d'évolution radiométrique	20
1-3-3	Intégration des valeurs radiométriques dans le temps	22
1-3-4	Modélisation des profils spectraux	23
	CONCLUSION PARTIELLE	27
II	<u>CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT VEGETAL. ESSAI DE MODELISATION</u>	32
2-1	<u>L'EXPERIMENTATION</u>	33
2-1-1	<u>Le milieu et les cultures</u>	33
2-1-1-1	Le milieu	33
2-1-1-1-1	Situation	33
2-1-1-1-2	Le sol	34
2-1-1-1-3	Le climat	34
2-1-1-2	Les cultures	36
2-1-1-2-1	Matériel végétal	36
2-1-1-2-2	Techniques culturales	36
2-1-1-2-3	Stades phénologiques	37
2-1-1-2-4	Rendement et composantes du rendement	37
2-1-2	<u>Méthodes utilisées pour suivre l'évolution des caractéristiques de la structure du couvert</u>	38
2-1-2-1	<u>Mesures des propriétés optiques des éléments du couvert</u>	38
2-1-2-1-1	Estimation globale des propriétés optiques d'organes	38
2-1-2-1-2	Mesure ponctuelle des propriétés optiques d'organes	40
2-1-2-2	<u>Suivi des variables de surface ou de biomasse</u>	40
2-1-2-2-1	Intérêt de ces variables	40
2-1-2-2-2	Problèmes d'échantillonnage	41
2-1-2-2-2-1	Estimation des contributions relatives de chaque organe à la biomasse ou à la surface totale du brin	42
2-1-2-2-2-2	Estimation des variables de surface ou de biomasse rapportées à l'unité de surface de sol	48
2-1-2-2-2-2-1	Passage des contributions relatives aux valeurs rapportées à l'unité de surface de sol	48
2-1-2-2-2-2-2	Estimation du terme d'extension spatiale	49

2-1-2-3 <u>Mesure des angles foliaires</u>	52
2-1-2-3-1 Méthodes de détermination des angles des feuilles	52
2-1-2-3-2 Estimation de la fonction de distribution des angles foliaires	53
2-1-2-3-2-1 Cas des limbes rectilignes	54
2-1-2-3-2-2 Cas des limbes courbes	55
2-1-2-3-2-2-1 Détermination de la courbure du limbe	55
2-1-2-3-2-2-2 Détermination de la forme du limbe	56
2-2 <u>ESSAI DE MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT DE BLE</u>	60
2-2-1 <u>Stratification du couvert</u>	60
2-2-1-1 <u>Propriétés optiques des éléments du couvert</u>	60
2-2-1-1-1 Les différents domaines spectraux	80
2-2-1-1-2 Evolution des propriétés optiques d'un organe en fonction de son état	82
2-2-1-1-3 Variabilité de la réflectance des feuilles	83
2-2-1-1-3-1 Variabilité sur une même feuille	83
2-2-1-1-3-2 Variabilité entre étages de feuilles	85
2-2-1-1-4 Propriétés optiques des tiges et des épis	85
2-2-1-2 <u>Répartition verticale des éléments verts et sénescents</u>	67
2-2-1-2-1 Les feuilles	67
2-2-1-2-2 Les tiges et les épis	67
2-2-1-3 <u>Orientation des éléments du couvert</u>	70
2-2-2 <u>Modélisation de l'évolution des surfaces des feuilles, des tiges et des épis</u>	73
2-2-2-1 <u>Modèle d'évolution des surfaces foliaires</u>	73
2-2-2-1-1 Relation entre biomasse sèche et surface des feuilles	74
2-2-2-1-1-1 Les feuilles vertes	74
2-2-2-1-1-2 Les feuilles sénescents	77
2-2-2-1-2 Modélisation de l'évolution des biomasses foliaires	80
2-2-2-1-2-1 Modèles utilisés	80
2-2-2-1-2-1-1 Choix de l'échelle de temps	80
2-2-2-1-2-1-2 Les modèles mathématiques utilisés	80
2-2-2-1-2-2 Evolution de la biomasse foliaire totale	83
2-2-2-1-2-3 Evolution de la biomasse foliaire verte	84
2-2-2-1-2-4 Evolution des biomasses foliaires sénescents et disparues	89
2-2-2-1-3 Passage du modèle d'évolution des biomasses foliaires à celui des surfaces foliaires: simplifications possibles	90
2-2-2-1-3-1 Choix d'une valeur constante pour les surfaces spécifiques	91
2-2-2-1-3-2 Choix d'une valeur constante de durée de vie des feuilles sénescents	91

2-2-2-2 <u>Modèle d'évolution des surfaces des tiges et des épis</u>	94
2-2-2-2-1 Position du problème	94
2-2-2-2-2 <u>Forme du modèle d'évolution des surfaces des tiges et des épis</u>	96
2-2-2-2-3 <u>Relation entre l'évolution des surfaces des feuilles et celle des tiges et des épis</u>	98
2-2-2-2-3-1 Paramètre de calage dans le temps	98
2-2-2-2-3-2 <u>Surfaces maximales des tiges et des épis</u>	98
2-2-2-2-3-3 <u>Taux de croissance relatif</u>	100
2-2-2-2-4 <u>Détermination des constantes du modèle et qualité de l'ajustement</u>	101
CONCLUSION PARTIELLE	105
III <u>RELATION ENTRE LA STRUCTURE DU COUVERT ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES</u>	109
3-1 <u>FACTEURS DONT DEPEND LA REFLECTANCE SPECTRALE D'UN COUVERT</u>	109
3-1-1 <u>Facteurs externes au couvert</u>	109
3-1-1-1 Géométrie de l'éclairement	109
3-1-1-2 Géométrie de la visée	111
3-1-1-3 Propriétés optiques du sol sous la culture	112
3-1-2 <u>Paramètres du couvert: la structure</u>	112
3-1-3 <u>Modèles analytiques de réflectance directionnelle</u>	113
3-1-3-1 Modèles probabilistes	114
3-1-3-2 Modèles de transferts radiatifs	114
3-2 <u>CONSTRUCTION D'UN MODELE SIMPLE DE REFLECTANCE DIRECTIONNELLE</u>	117
3-2-1 <u>Choix de la forme du modèle simplifié</u>	118
3-2-1-1 Choix de la forme du modèle	118
3-2-1-2 Validation du formalisme du modèle simplifié	120
3-2-2 <u>Signification des paramètres des modèles simplifiés</u>	125
3-2-2-1 Influence des propriétés optiques des feuilles	125
3-2-2-2 Influence de l'orientation du soleil et des feuilles	129
3-2-3 <u>Comparaison du modèle simplifié au modèle de Suits</u>	130
CONCLUSION PARTIELLE	134

<u>IV MODELISATION DU PROFIL SPECTRAL: APPLICATION A LA DETERMINATION DU RAYONNEMENT PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIF ABSORBE PAR LA CULTURE</u>	138
<u>4-1 CONSTRUCTION DU MODELE DE FORME DE PROFIL SPECTRAL</u>	138
4-1-1 <u>Position du problème</u>	138
4-1-2 <u>Mesures radiométriques</u>	140
4-1-3 <u>Construction du profil spectral</u>	142
4-1-3-1 Relations entre canaux	142
4-1-3-1-1 Détermination de la droite du sol d'Avignon	143
4-1-3-1-2 Evolution radiométrique d'un couvert dans le plan rouge-proche infrarouge	144
4-1-3-1-3 Détermination de la droite de la sénescence	148
4-1-3-2 Application du modèle de réflectance simplifié à un couvert comportant 2 strates et simplification de la stratification d'une culture de blé	147
4-1-4 <u>Vérification du comportement du modèle de forme de profil spectral</u>	150
4-1-4-1 Détermination de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles	150
4-1-4-2 Détermination de caractéristiques de l'évolution des surfaces de la culture	153
<u>4-2 APPLICATION A LA DETERMINATION DU RAYONNEMENT PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIF ABSORBE PAR LA CULTURE</u>	157
4-2-1 Application des modèles de réflectance et de transmittance au calcul du PAR absorbé par la culture	157
4-2-2 Détermination du PAR absorbé par la culture	158
CONCLUSION PARTIELLE	161
CONCLUSION GENERALE	164
BIBLIOGRAPHIE	164
ANNEXE	167

LISTE des SYMBOLES UTILISES

- r : réflectance dans le rouge
- pir : réflectance dans le proche infrarouge
- R : $\frac{pir}{r}$
- DN : $\frac{pir - r}{pir + r}$
- PVI : perpendicular vegetation index : défini dans le plan rouge - proche infrarouge comme la distance du point végétation à la droite du sol.
- SBI : soil brightness index
- GVI : green vegetation index
- YVI : yellow vegetation index
- NS : non such
- CWSI : crop water stress index : indice calculé à partir de la température radiative du couvert révélant l'intensité du stress hydrique subi par la culture.
- MS : matière sèche
- E_i : efficacité de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif par le couvert.
- E_c : partie photosynthétiquement active du flux solaire incident.
- E_b : efficacité de la transformation en matière sèche du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la culture.
- RG : rayonnement global incident.
- ρ : réflectance des feuilles.
- τ : transmittance des feuilles.
- $\rho_c, \rho_{c1}, \rho_{c2}$: réflectance directionnelle de la culture ou de la strate.
- R_c, R_{c1}, R_{c2} : réflectance hémisphérique de la culture ou de la strate.
- T, T_1, T_2 : transmittance hémisphérique de la culture ou de la strate.
- $\rho_{\infty}, \rho_{\infty 1}, \rho_{\infty 2}$: réflectance infinie directionnelle.
- $R_{\infty}, R_{\infty 1}, R_{\infty 2}$: réflectance infinie hémisphérique.
- ρ_{∞} : réflectance infinie de la culture planophile pour ρ et τ donnés.
- K, K_1, K_2 : coefficient d'extinction pour la réflectance directionnelle.
- K_h, K_{h1}, K_{h2} : coefficient d'extinction pour la réflectance hémisphérique.
- K_t, K_{t1}, K_{t2} : coefficient d'extinction pour la transmittance hémisphérique.
- ρ_s, ρ_s : réflectance hémisphérique du sol ou de la strate senescente.
- PAR_i : flux directionnel incident dans le PAR (400-700 nm)
- PAR_r : flux hémisphérique réfléchi dans le PAR.
- PAR_t : flux hémisphérique transmis dans le PAR.
- PAR_a : énergie radiative absorbée par la culture dans le PAR.
- : indice foliaire ou indice de surface (surface de feuilles ou d'organes développés par la culture par unité de surface de sol).

Partie 1

I	<u>ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES RELATIONS ENTRE L'ETAT D'UN COUVERT VEGETAL ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES</u>	5
1-1	<u>LES INDICES DE VEGETATION</u>	7
1-1-1	rapports de canaux ou de leurs combinaisons linéaires	8
1-1-2	indices basés sur la distinction sol-végétation	9
1-2	<u>RELATION ETABLIES A UN INSTANT DONNE</u>	12
1-2-1	Estimation du rendement final de cultures	12
1-2-2	Estimation de biomasse aérienne	14
1-2-3	Estimation de l'indice foliaire	18
1-3	<u>UTILISATION DE DONNEES MULTITEMPORELLES</u>	18
1-3-1	Utilisation de points singuliers	18
1-3-2	Utilisation des vitesses d'évolution radiométrique	20
1-3-3	Intégration des valeurs radiométriques dans le temps	22
1-3-4	Modélisation des profils spectraux	23
	CONCLUSION PARTIELLE	27

I ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES RELATIONS ENTRE L'ETAT D'UN COUVERT VEGETAL ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES.

Depuis les années 1970 un grand effort a été fourni afin de relier la réflectance spectrale aux paramètres biologiques de couverts végétaux.

Le programme américain LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) fut un de ceux qui permirent le plus d'avancer dans ce domaine, que ce soit à l'échelle des mesures au sol ou à celle de l'exploitation des images des premiers satellites Landsat MSS.

Ces premières approches des relations entre les caractéristiques biologiques d'un couvert et ses caractéristiques radiométriques furent tout d'abord très empiriques. Ces études ont révélé qu'un grand nombre de paramètres difficilement contrôlables tels que les propriétés optiques du sol, l'orientation des rangs ou la géométrie de l'éclairement, pouvaient modifier considérablement la réponse radiométrique. La réflectance spectrale d'un couvert végétal est en effet le résultat d'interactions complexes entre le rayonnement électromagnétique et la culture. Guyot (1984) montre qu'elle dépend tout autant de facteurs externes au couvert que des caractéristiques propres de la culture.

Bon nombre de chercheurs proposèrent de combiner diversement les réflectances multispectrales afin d'éliminer l'influence de ces paramètres externes perturbateurs. Ainsi naquirent les "indices de végétation". Nous allons donc, dans un premier temps, essayer de passer en revue les différents indices de végétation proposés, avant d'examiner, dans un deuxième temps, les relations entre ces indices de végétation et les caractéristiques biologiques du couvert.

1-1 Les indices de végétation

Il existe au moins 50 indices de végétation différents (Bariou et al. 1985). Il est certainement possible de les grouper de multiples manières, selon les bandes spectrales utilisées, leurs objectifs principaux, Nous avons choisi de ne décrire que les plus courants et de les grouper suivant la manière dont ils sont construits:

1-1-1 Rapports de canaux ou de leurs combinaisons linéaires

Faire le rapport entre les réflectances ou même les luminances de différents canaux, permet d'éliminer les perturbations de facteurs affectant de la même manière les radiances de chaque canal (Holben et al. 1981, Gardner et al. 1985).

Les bandes spectrales les plus utilisées dans le calcul de ces indices de végétation sont celles pour lesquelles le contraste entre sol et végétation est le plus important (fig 1.1): le rouge (r) et le proche infra-rouge (pir).

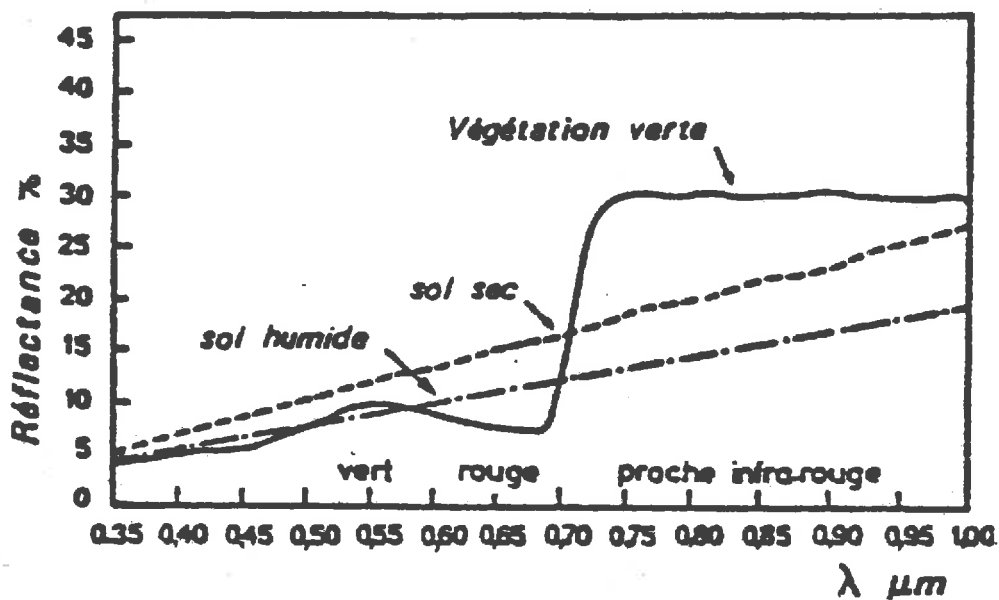


Figure 1.1: spectres de sol et de végétation dans le visible et le proche infrarouge (d'après Tucker et Miller 1977).

Pearson et Miller (1972), Colwell (1973) proposent le simple rapport:

$$R = \frac{\text{pir}}{r}$$

Rouse et al. (1974) proposent la différence normalisée:

$$DN = \frac{\text{pir} - r}{\text{pir} + r}$$

Ces 2 indices sont fonctionnellement équivalents, c'est à dire qu'il existe une bijection permettant de passer de l'un à l'autre (Perry et Lautenschlager, 1984):

$$DN = \frac{R-1}{R+1}$$

Ils sont peu sensibles aux propriétés optiques du sol, lesquelles sont liées à l'état de sa surface (humidité, rugosité). Les points qui correspondent à différents états de surface d'un sol nu donné, s'alignent dans le plan r - pir selon une droite (figure 1.2) que l'on appelle "droite du sol" (Richardson et Wiegand, 1977):

$$pir = a.r + b$$

Elles diffèrent légèrement selon les types de sol (Ezra et al. 1984).

L'ordonnée à l'origine (b) est de valeur faible; en conséquence, pour un sol donné, caractérisé par la pente (a) de la droite des sols, on a, quasi-indépendamment de son état de surface:

$$R = a \quad \text{et} \quad DN = \frac{a-1}{a+1}$$

Ces indices, simples et performants sont les plus employés.

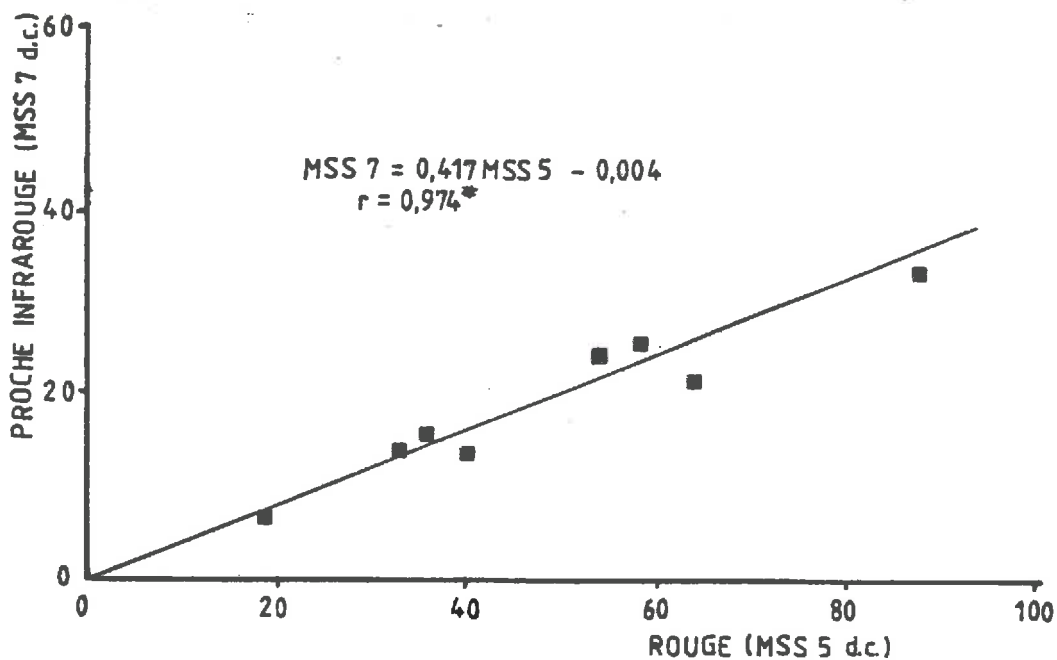


Figure 1.2: droite de sol (d'après Richardson et Wiegand 1977)

1-1-2 Indices basés sur la distinction sol-végétation:

Ces indices ont été construits dans le but de bien séparer, au niveau de la réponse radiométrique, les parts respectives du sol et de la végétation (et éventuellement des divers éléments constitutifs de la végétation).

Un des plus simples et des plus utilisés est le PVI (Perpendicular Vegetation Index) proposé par Richardson et Wiegand (1977). Il représente, dans le plan r-pir, la distance du point "végétation" à la droite du sol (figure 1.3).

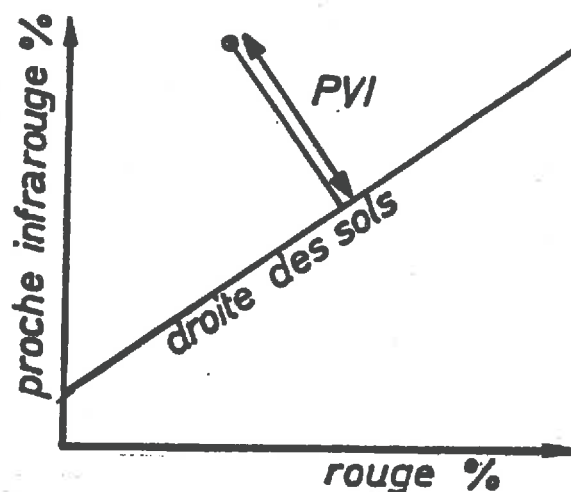


Figure 1.3: construction du PVI

En l'absence de végétation et quel que soit l'état de surface du sol, $PVI=0$, alors que PVI augmente quand la végétation se développe.

Kauth et Thomas (1978) proposent un indice de construction différente, déterminé pour les canaux MSS Landsat, qui est à la fois très sensible à la végétation et indépendant des propriétés optiques du sol: Le GVI (Green Vegetation Index). Comme pour le PVI, mais avec les 2 dimensions supplémentaires R4 (500-600 nm) et R8 (700-800 nm), il s'agit de trouver des axes orthogonaux représentant respectivement:

- le sol (SBI: Soil Brightness Index)
- la végétation verte (GVI: Green Vegetation Index)
- la végétation sénescence (YVI: Yellow Vegetation Index)
- le résidu (NS: Non Such)

Cette transformation est très proche de celle fournie par l'analyse en composantes principales proposée par Wheeler et al. 1976 (Miller et al. 1984).

Jackson (1983) étend ce concept aux 6 canaux de Thematic Mapper.

En réalité, l'augmentation du nombre de canaux entrant dans le calcul des indices n'apporte souvent pas grand chose par rapport à l'utilisation des seuls canaux r et pir (Wiegand et Richardson 1982, Jackson 1983, Perry et Lautenschlager 1984, Elvidge et al. 1985).

Ces indices de végétation sont construits sur un modèle additif, où les interactions sol-végétation ne sont pas prises en compte: Pour un état de la végétation donné, les propriétés optiques du sol peuvent avoir une influence non négligeable sur la valeur du PVI ou du GVI (Ezra 1984, Huete et al. 1984).

Le grand nombre d'indices proposés et leur diversité apparente soulèvent deux remarques importantes:

- La plupart des indices destinés à caractériser la végétation (R, DN, PVI, GVI, ...) sont très étroitement corrélés voire même équivalents (R, DN), ainsi que le montrent Richardson et Wiegand (1977), Wiegand et Richardson (1982), Perry et Lautenschlager (1984).
- Les désaccords relevés entre les différents auteurs concernant les avantages et défauts de tel ou tel indice de végétation sont liés aux conditions expérimentales et donnent ainsi la mesure de leurs limites.

Le critère de choix d'un (ou de plusieurs) indices de végétation devra donc être plutôt fondé sur la valeur du rapport signal/bruit ($S/B = \frac{\text{(sensibilité à l'état de la végétation)}}{\text{(sensibilité aux facteurs externes à la végétation)}}$) comme le proposent Elvidge et al. (1985).

Nous pouvons maintenant analyser comment ces indices de végétation ou les réflectances brutes ont été utilisés ces dernières années, dans le but d'estimer le rendement final de différentes cultures, et en particulier, celui des céréales. Afin de simplifier cette analyse, nous classerons ces relations rendement-radiométrie en:

- relations établies à un instant donné
- relations issues de mesures radiométriques diachroniques.

1-2 Relations établies à un instant donné

L'approche statistique directe du rendement a largement été suscitée par les applications immédiates que l'on pouvait en attendre. Là encore, de très nombreux travaux ont vu le jour principalement sous l'égide des programmes américains LACIE et AGRISTARS. Nous ne citerons que les travaux les plus marquants jalonnant l'évolution des recherches sur ce sujet.

Partant du niveau le plus global, représenté par les liaisons statistiques directes entre rendement et indices de végétation, nous en analyserons les limites et descendrons ainsi au niveau le plus fin: Celui de l'estimation radiométrique des caractéristiques bien définies et précises du couvert végétal les plus liées à la productivité.

1-2-1 Estimation du rendement final de cultures:

Un indice proche du GVI calculé à partir d'images des satellites NOAA et Landsat MSS est utilisé pour estimer, à l'épiaison, le rendement de parcelles de blé (figure 1.4) dans la région des grandes plaines céréalières américaines (Barnett et Thompson 1982 et 1983).

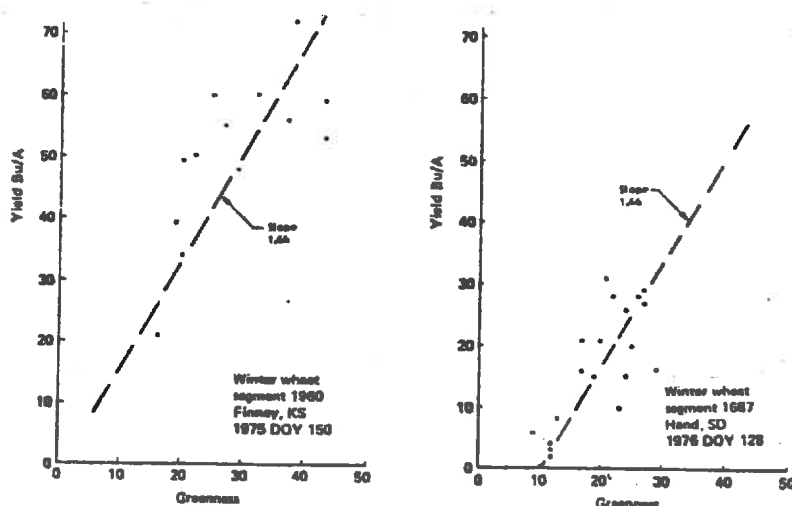


Figure 1.4: Relation entre l'indice de végétation GN et le rendement final de cultures de Blé issues de différentes régions des grandes plaines céréalières Américaines (d'après Barnett et Thompson 1983)

Les prévisions réalisées par cette méthode de télédétection semblent plus intéressantes que celles issues du modèle agrométéorologique statistique de Feyerherm et Paulsen (1981). Remarquons que les niveaux de rendement considérés sont faibles, comparés à ceux couramment rencontrés en Europe.

Différents indices de végétation, calculés à partir d'images du satellite Landsat MSS, sont liés au rendement de cultures de Sorgho au Texas, (Richardson et al., 1982). De très bonnes corrélations sont obtenues avec le PVI ($r=0,943$), à un stade où l'indice foliaire est proche de son maximum. Dans ce cas également, les niveaux de rendements sont extrêmement faibles et les corrélations dépendent très fortement du stade auquel les réflectances spectrales sont mesurées.

A deux échelles différentes (au sol, et à partir d'images Daedalus) les relations entre l'indice de végétation R et le rendement de parcelles de blé de printemps semées à 3 densités différentes sont étudiées (Aase et al. 1984). Là encore, les rendements peu élevés (inférieurs à 30 q/ha) sont bien corrélés à R, mais ces corrélations sont très dépendantes du stade végétatif auquel est faite la mesure .

Des résultats très similaires au niveau du sol, sur des cultures de blé de faible rendement sont obtenus par Sashikumar et al. (1984) et Kamat et al. (1985).

L'analyse de l'évolution dans le temps de ces relations, établies sur des cultures de blé ou de maïs, confirme le fait que les relations sont les meilleures, au stade où l'indice foliaire vert est à son maximum de développement, (figure 1.5) (Tucker et al. 1980, Markham et al. 1981).

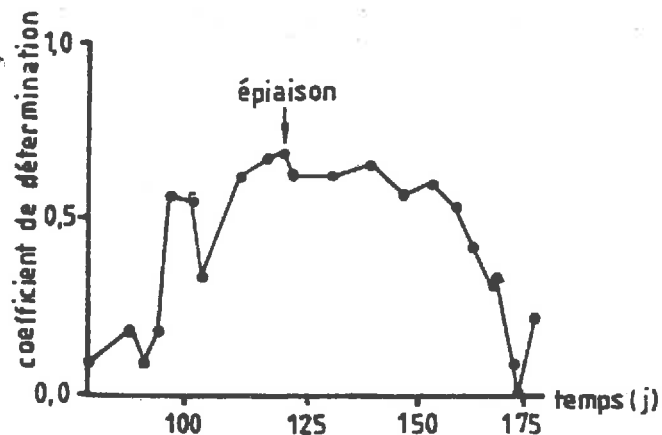


Figure 1.5: Evolution du coefficient de détermination de la régression entre R et rendement (d'après Tucker et al. 1980).Epiaison = indice foliaire maximum

Par contre, pour des Orges soumises à des stress alimentaires variés, mais de potentiels plus élevés, Kleman et Fagerlund (1981) n'obtiennent pas de très bonnes relations avec le rendement final: Contrairement aux cultures de faible rendement, pour des cultures de plus fort développement végétatif, on risque d'avoir, au stade de maximum d'indice foliaire, une saturation de la réponse radiométrique (Hatfield 1981, Chasseray 1984). Ce phénomène risque d'altérer très fortement l'intérêt de ce type de relation.

La variable matière sèche totale finale produite (MSTF) par la culture est bien mieux corrélée aux données radiométriques que la variable rendement (Markham et al. 1981, Kamat et al. 1985)

A partir d'une expérimentation menée dans le cadre du programme AGRESTE sur des cultures de riz en Camargue, Berg et al. (1978) estiment la biomasse sèche finale produite d'après des mesures radiométriques à l'épiaison. Ils se servent alors de l'indice de récolte (Harvest Index) pour passer de la MSTF au rendement. Il est ici relié aux réflectances mesurées à l'épiaison.

Pour une culture de blé, il existe une relation étroite entre la MSTF et les réflectances mesurées avant la floraison, mais l'indice de récolte peut être variable (Singh et Stoskopf 1971, Aase et Siddoway 1981). Il y a tout de même une bonne relation statistique entre la MSTF et la MS des pailles, ce qui laisse supposer que l'indice de récolte est, dans ce cas comme dans le cas des travaux de Berg et al., très lié à la MSTF.

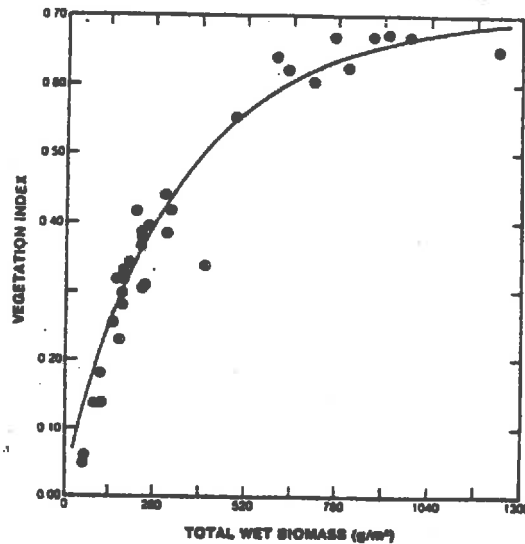
L'indice de récolte de céréales n'est pas toujours lié à la MSTF et il peut être relativement variable (Donald et Hamblin 1978). Assez peu de travaux, en dehors de l'aspect amélioration variétale, portent sur cet indice de récolte. On préfère le plus souvent, décomposer le rendement en ses composantes (nb. grains/m², poids de 1000 grains...). Compte tenu des bonnes relations entre nb. grains/m² et biomasse sèche à la floraison ou à la récolte pour une variété donnée (Triboï et al. 1985), ces deux approches sont quasiment équivalentes.

Il est donc intéressant de substituer à l'étude de la relation réflectance-rendement, celle de la relation réflectance-MSTF, qui nécessite alors une estimation indépendante de l'indice de récolte. Nous allons à présent analyser les relations entre la matière sèche totale produite et les réflectances spectrales.

1-2-2 Estimation de biomasse aérienne

Si, comme nous l'avons vu précédemment, il est possible d'estimer la production finale de biomasse sèche à un stade souvent éloigné de la maturité, de très nombreux travaux montrent que les réflectances spectrales sont évidemment plus directement reliées à la biomasse sur pied au moment de la mesure. De très fortes corrélations pour différents traitements à un stade donné, entre indices de végétation et biomasse sèche sur pied sont observées pour des cultures de graminées fourragères (Tucker et al. 1977, 1978a, 1978b), et pour des cultures de sorgho (Gerberman et al, 1984).

Ces relations ont une allure asymptotique (figure 1.6), (Tucker et al. 1977 et 1979a et Emori et al. 1981, Ripple 1985).



(g) $r^2 = 0.89$
 $Y = 0.70 - \exp(-0.4207 - 0.0030 \cdot X)$

Figure 1.8: Relation entre indice de végétation et biomasse
 (d'après Tucker 1979a)

Ces relations évoluent avec le stade phénologique de la culture, ainsi que l'ont observé Tucker et al. (1979b) sur maïs et soja, et Alrichs et Bauer (1983) sur blé; Ils séparent en général le cycle de culture en deux parties :

- Une partie correspondant à la phase de croissance de la culture, caractérisée par une forte proportion d'éléments végétaux verts,
- Une partie correspondant à la phase de sénescence de la culture.

Le taux de couverture du sol par la végétation est très bien corrélé avec les données radiométriques, (Richardson et Wiegand 1977, Leamer et al. 1978, Kollenkark et al. 1982 et Steven et al. 1983).

Pour Tucker (1977) et Kamat et al. (1985), la teneur en chlorophylle est liée aux réflectances spectrales, contrairement à ce qu'estiment Curran et Milton (1983) qui préfèrent relier les réflectances à l'indice foliaire au cours du flétrissement d'une culture.

Ces exemples montrent qu'il est possible de relier les caractéristiques radiométriques d'un couvert végétal donné, à un grand nombre de ses caractéristiques biologiques: Celles-ci dépendent étroitement les unes des autres pour un système organisé comme l'est un couvert végétal (Guyot et al. 1984). Aussi faut-il essayer d'extraire, parmi les variables caractérisant la biomasse, celles dont dépend le plus directement et fonctionnellement la réflectance spectrale.

On établit de bien meilleures relations entre les paramètres de biomasse liés aux parties vertes de la culture et les réflectances spectrales (Tucker et al. 1979b, Daughtry et al. 1980, Kimes et al. 1981, et Alrichs et Bauer, 1983).

L'indice foliaire vert, surface des feuilles vertes par unité de surface de sol, est sans doute le paramètre le plus fonctionnellement lié aux propriétés radiométriques du couvert. Il présente aussi l'avantage d'être l'une des variables les plus utilisées par les agronomes et les physiologistes pour expliquer la production finale d'une culture.

De l'étude des paramètres de biomasse (poids), on est passé à l'étude de paramètres de structure (surfaces), ce qui permet de mieux comprendre d'un point de vue fonctionnel, les interactions entre le rayonnement électromagnétique et les couverts végétaux.

1-2-3 Estimation de l'indice foliaire:

Différents indices de végétation, calculés à partir d'images Landsat sont significativement corrélés à l'indice foliaire vert de cultures de blé et de sorgho de faible développement végétatif, (Pollock et Kanemasu, 1979, et Richardson et al, 1982).

Il est possible de détecter une culture de blé en phase d'implantation, à partir d'indices foliaires de l'ordre de 0,06 (Aase et Siddoway 1980).

La plupart des auteurs s'accorde pour trouver une limite asymptotique (saturation) de la réponse radiométrique à l'indice foliaire (figure 1.7) (Tucker 1977, Daughtry et al. 1980, Chance 1981, Alrichs et Bauer 1983, Asrar et al. 1985, Best et Harlan 1985). Les niveaux des indices foliaires saturant varient en fonction de la structure du couvert, de la géométrie de l'éclairement, et surtout suivant les bandes spectrales utilisées. Ils sont compris entre 2 (domaine visible) et 6 (domaine du proche infrarouge).

Les indices de végétation auront généralement tendance à saturer plus rapidement que la réflectance dans le proche infrarouge.

Les relations entre indice foliaire et réflectances spectrales ou indices de végétation dépendent:

- de la structure géométrique du couvert (Chance 1981, Kollenkark et al. 1982, Aase et Siddoway 1984, Best et harlan 1985),
- de l'écartement entre les rangs et des propriétés optiques du sol (Kanemasu 1974, Vandrbilt et al. 1981),
- de la position du soleil au moment de la mesure (Asrar et al. 1985, Brach et al. 1981).

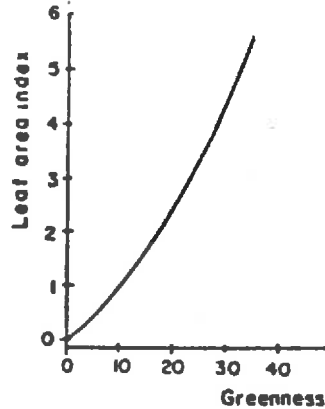


Figure 1.7: Relation entre indice foliaire et l'indice de végétation Greenness (GVI)
(d'après Kollenkark et al. 1982)

Ces relations empiriques souffrent donc de leur dépendance vis à vis de ces nombreux facteurs; il est le plus souvent difficile de les extrapoler à des cultures conduites dans des conditions différentes. D'où l'intérêt d'une approche plus déterministe qui permet de comprendre et de quantifier l'influence de ces nombreux paramètres sur les interactions rayonnement électromagnétique-couvert végétal.

Cette analyse rapide des travaux concernant l'estimation directe du rendement à partir de mesures radiométrique effectuées à un stade donné, nous a conduit progressivement à l'étude des relations entre paramètres de biomasse et réflectances multispectrales, puis à celle des relations entre la structure du couvert et les réflectances multispectrales.

L'estimation du rendement à partir de données de télédétection nécessitera donc la connaissance simultanée de deux types de relations:

- l'une purement physique, entre la réflectance du couvert et sa structure géométrique; de nombreux travaux existent à ce niveau, tant du point de vue expérimental que du point de vue de la modélisation théorique.
- l'autre appartenant au domaine biologique, entre la structure du couvert et l'état physiologique de la culture. Ce type de relation évolue constamment au cours du développement de la culture, rendant ainsi difficile l'explication d'un phénomène isolé hors du contexte "historique" dans lequel il s'est produit.

C'est sans doute pour cette dernière raison que la plupart des travaux s'orientent actuellement vers l'utilisation d'un suivi radiométrique de tout ou partie du cycle de la culture. Il est d'ailleurs assez symptomatique de constater qu'il n'existe pas encore de méthode véritablement opérationnelle et fiable d'estimation du rendement, basée sur une mesure radiométrique instantanée.

Nous allons donc analyser, au cours du chapitre suivant, comment des données multitemporelles permettent de mieux appréhender l'évolution de l'état de la végétation.

1-3 Utilisation de données multitemporelles

L'utilisation de données multitemporelles conduit naturellement à analyser la forme des profils d'évolution des données radiométriques: les profils spectraux.

Il est possible de caractériser une forme quelconque par un certain nombre de paramètres. Nous scinderons ce chapitre en trois parties, suivant que les relations "état de la culture-profil spectral" correspondent aux critères de forme suivants:

- points singuliers : ce sont les dates d'occurrence de valeurs seuil particulières soit du maximum soit encore du point d'inflexion.
- vitesse: dérivée par rapport au temps de la courbe d'évolution des réflectances.
- intégration: cumul des valeurs radiométriques entre deux dates de mesures.
- modélisation complète du profil spectral: Utilisation des paramètres de l'ajustement d'une fonction mathématique aux points expérimentaux du profil spectral.

1-3-1 Utilisation de points singuliers:

Le potentiel de rendement à l'épiaison est défini par la valeur maximale de l'indice de végétation R ($\pi r/r$) (figure 1.8)(Hatfield, 1983).

On détermine alors la réduction de rendement par rapport à ce potentiel, en appliquant l'indice de stress hydrique CWSI calculé à partir des températures de surface (Chasseray 1983). Le calcul de cet indice CWSI est appliqué entre les dates d'occurrence du maximum de R et la date où plus de 90% des réserves ont migré vers le grain, ce qui correspond à un niveau de R de l'ordre de 0,5 (Hatfield 1983).

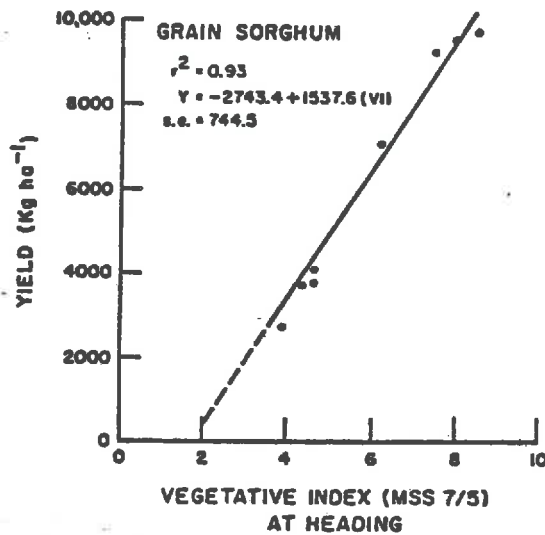


Figure 1.8 :Relation entre indice de végétation à l'épiaison et le rendement potentiel (absence de contraintes hydriques) de cultures de Sorgho (d'après Hatfield 1983)

La date de franchissement d'une certaine position peut être relativement peu précise, lorsque:

- La fréquence des mesures est assez lâche. Les satellites à haute résolution spatiale actuels ont une fréquence de passage théorique comprise entre 5 (SPOT, mais en associant des visées obliques à des visées verticales) et 16 à 26 jours (SPOT en visées verticales ou Landsat TM). Elle peut être énormément réduite du fait de la nébulosité.
- Les mesures sont entachées d'erreurs. En particulier, le trouble atmosphérique ou une résolution spatiale faible posent des problèmes d'interprétation.
- La vitesse d'évolution des valeurs radiométriques est faible.

C'est ce qui a amené Badhwar (1984a et b) à effectuer des interpolations en utilisant une modélisation du profil spectral afin de déterminer les dates d'occurrence des maxima et des points d'inflexion. Nous analyserons plus en détail cette approche au chapitre 1-3-4.

1-3-2 Utilisation des vitesses d'évolution radiométrique.

Les vitesses d'évolution d'un indice proche de R (ρ/r) ont été utilisées pour déterminer le rendement final en grains de cultures de riz soumises à des niveaux de fertilisation azotée variés : Les vitesses d'évolution radiométrique élevées durant la montaison vont de pair avec des niveaux de productivité significativement plus importants, (Berg et al. 1978).

Les pentes de décroissance de l'indice de végétation TVI6 (proche de DN), durant la phase de maturation, ont été corrélées avec les rendements en grains de blés et d'orges semés à différentes densités et plus ou moins bien alimentés en eau, (Idso et al, 1980): Des céréales de forte productivité ont des vitesses de décroissance de TVI6 significativement plus élevées (figure 1.9).

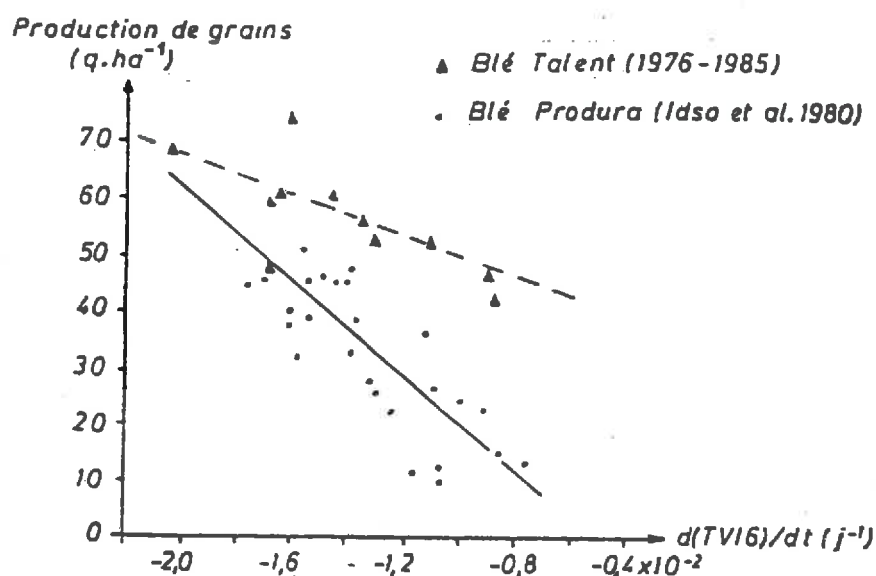


Figure 1.9: relation entre pente de décroissance de l'indice TVI6 et le rendement en grains de cultures de blé (d'après Idso et al. 1980 et Baret et Guyot 1986).

En utilisant la pente de décroissance de l'indice de végétation DN, nous déterminons les grandes étapes du remplissage des grains de cultures de blé (palier hydrique), (Baret et Guyot, 1986) (figures 1.10).

Nous proposons de remplacer l'échelle de temps par une échelle proportionnelle aux sommes de températures positives reçues depuis la floraison: Il est ainsi plus facile de comparer des années climatiques ayant des caractéristiques thermiques variées durant cette période de maturation. Nous confirmons ainsi les résultats d'Idso et al. (1980), tout en proposant une explication basée sur des travaux récents sur la physiologie du remplissage des grains (Triboï 1985).

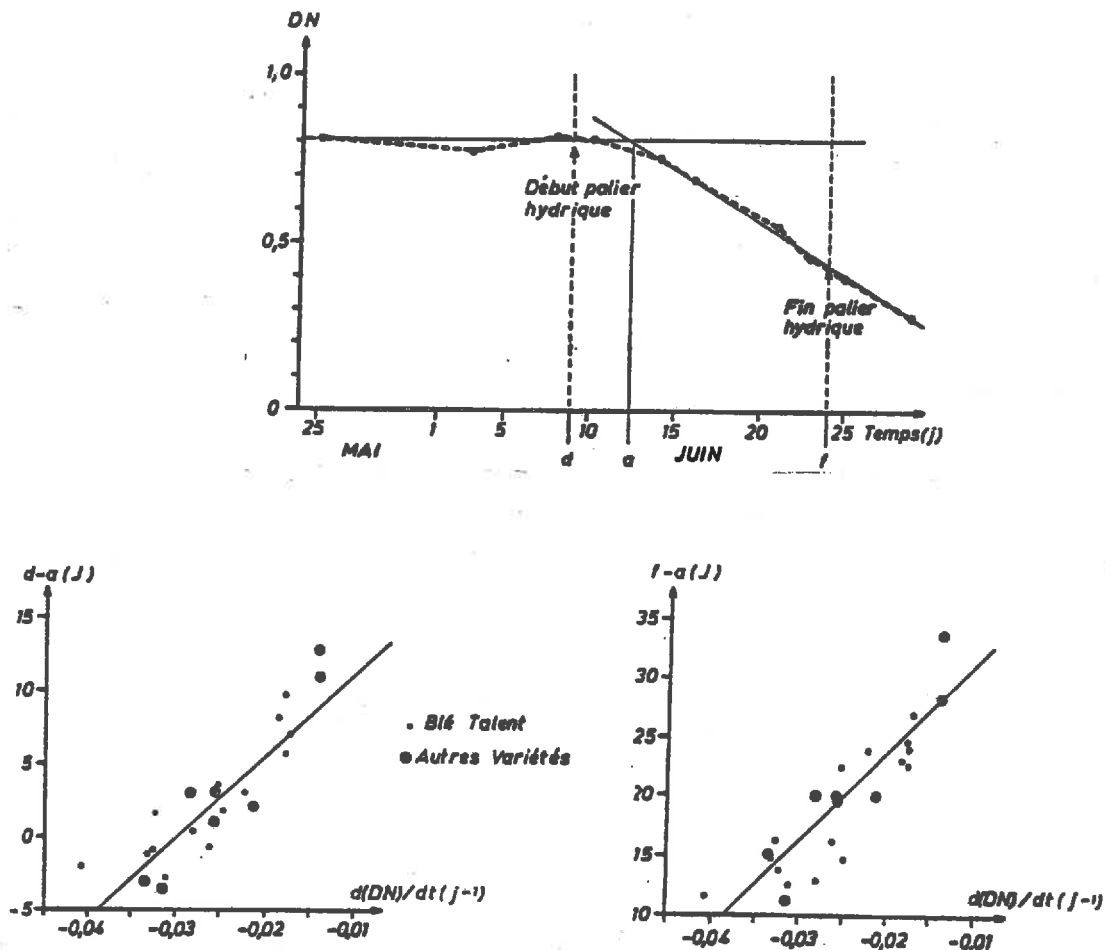


Figure 1.10: Relation entre pente de décroissance de l'indice de végétation DN et les dates de palier hydrique (d'après Baret et Guyot 1988).

La sénescence d'une culture de céréales est certainement la phase la plus intéressante à suivre dans un objectif de prévision du rendement: Aboutissement de l'histoire culturale passée, elle peut nous en faire découvrir quelques éléments. C'est aussi la période la plus proche de la récolte durant laquelle les phénomènes de saturation disparaissent au fur et à mesure que l'indice foliaire vert décroît.

Les vitesses d'évolution des valeurs radiométriques intéressant des périodes de durée relativement courte (de 15 à 30 jours) peuvent être relativement difficiles à déterminer pour les satellites à haute résolution spatiale actuels, ayant une fréquence de passage faible. Il sera donc là aussi très important d'avoir un modèle de forme d'évolution des réflectances en fonction du temps ou de toute autre échelle rendant mieux compte des processus de croissance ou de sénescence.

1-3-3 Intégration des valeurs radiométriques dans le temps.

Le cumul de l'indice de végétation GVI a été utilisé pour déterminer des dates de franchissement de stades phénologiques de cultures de maïs et de soja (Badhwar et Henderson 1984;

La fonction:

$$f(t) = 1 - \frac{\int_t^{t_s} \rho(t) dt}{\int_{t_e}^{t_s} \rho(t) dt}$$

t_e : date de levée

t_s : date de maturité

t : date actuelle

$\rho(t)$: valeur de l'indice de végétation à la date t

permet d'estimer les stades de croissance selon l'échelle définie par Hanway en utilisant la relation $S = a f(t) + b$ dans laquelle a et b ne dépendraient que de l'espèce considérée.

Le cumul des valeurs de réflectance a surtout été utilisé depuis 1980 pour estimer la production de biomasse: Tucker et al. (1980) et (1981), Markham et al. (1981) montrent que l'intégration dans le temps des valeurs de réflectance ou des indices de végétation explique une part plus importante de la variance du rendement final ou de la matière sèche totale produite de cultures de blé que la simple prise en compte des valeurs radiométriques instantanées (figure 1.11).

Ils associent à cette notion d'indice de végétation cumulé, les notions de durée de vie et d'importance des surfaces chlorophylliennes.

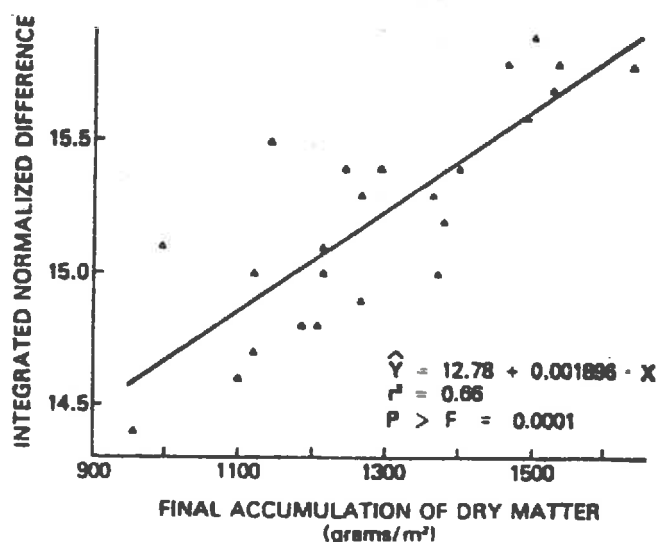


Figure 1.11: Relation entre indice de végétation cumulé et production de matière sèche (d'après Markham et al. 1981)

Appliqué à des images du satellite NOAA dans la partie Sénégalaise du Sahel, ce calcul donne une bonne estimation, mais à large échelle, des productivités des pâturages qui, remarquons le, sont très faibles dans cette région (Tucker et al. 1985).

L'étude de la croissance de prairies, montre que, si les mesures radiométriques permettent d'estimer dans certaines conditions les biomasses sur pied, elles sont aussi de très bons indicateurs de la productivité instantanée (Curran 1981). Cette remarque fondamentale permet de comprendre pourquoi une intégration des valeurs de réflectance dans le temps permet d'estimer la matière sèche totale produite, intégrale des productivités instantanées.

L'utilisation du cumul des valeurs radiométriques pour estimer la matière sèche produite (MS) prend alors une forme analytique claire :

Suivant le formalisme proposé par Varlet-Grancher et al. (1982) à la suite de Monteith (1972) :

$$MS = \int_t \mathcal{E}_c \cdot \mathcal{E}_i \cdot \mathcal{E}_b \text{ RG dt}$$

RG : Flux énergétique incident.

MS : Matière sèche produite.

\mathcal{E}_c : proportion d'énergie lumineuse photosynthétiquement active du flux solaire incident. Varlet-Grancher et al. (1981) montrent que les conditions atmosphériques ou la position du soleil n'ont que peu d'influence sur la valeur de ce rapport qui peut donc être considéré comme une pseudo-constante climatique proche de 50%.

\mathcal{E}_i : Efficience de l'interception par le couvert de l'énergie lumineuse photosynthétiquement active. Ce paramètre dépendra surtout de la structure du couvert comme le montrent les nombreux modèles théoriques de pénétration de la lumière dans un couvert végétal.

\mathcal{E}_b : Efficience de la conversion de l'énergie photosynthétiquement active absorbée en matière sèche. Pour les conditions climatiques Britanniques et des cultures aussi différentes que des pommiers ou des prairies, elle a des valeurs proches de 2,0 g.MJ⁻¹ (Monteith, 1977). \mathcal{E}_b peut varier, en particulier en conditions d'alimentation hydrique limitante, ou suivant les grandes phases de développement de la culture, ou encore suivant la teneur en énergie de la matière sèche produite (Varlet-Grancher et al 1982).

A partir d'une analyse théorique sur modèle de pénétration de la lumière dans un couvert végétal, Kumar et Monteith (1981) proposent d'utiliser l'indice R ($\rho i r / r$) pour estimer l'efficacité ϵ_i de l'absorption de l'énergie lumineuse photosynthétiquement active. Ils vérifient ce calcul sur des cultures de betteraves. Asrar et al. (1984), Ajaï et al. (1984) corrélient des mesures de ϵ_i à des indices de végétation sur d'autres cultures.

L'estimation radiométrique de ϵ_i est souvent indirecte. Ainsi Daughtry et al. (1983), Hatfield et al. (1984), Wiegand et al. (1984) utilisent une estimation radiométrique de l'indice foliaire et une relation préétablie entre ce paramètre et ϵ_i (figure 1.12).

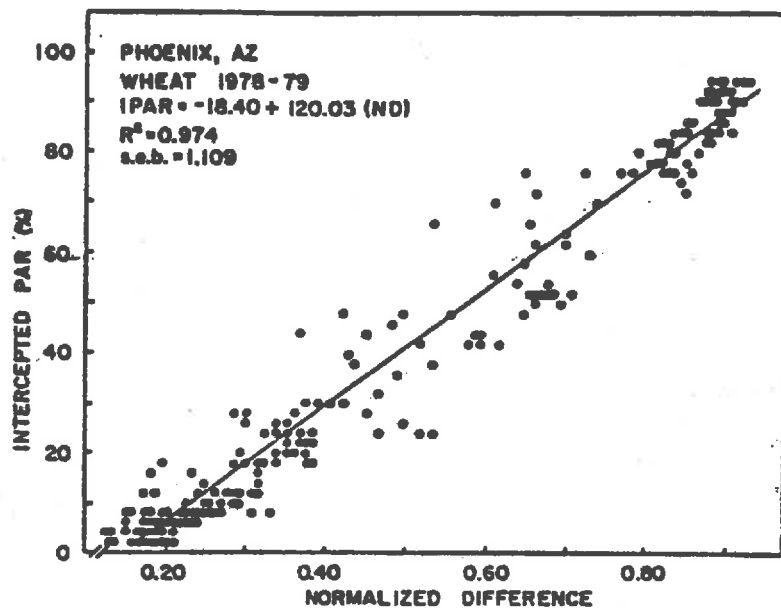


Figure 1.12: Relation entre indice de végétation et ϵ_i (d'après Hatfield 1984).

Ces différentes estimations instantanées de ϵ_i ont pu être intégrées dans des modèles plus ou moins complets et complexes, d'estimation de la production de matière sèche totale:

- Certains corrélient simplement le cumul du PAR absorbé par la culture, estimé par des indices de végétation et la matière sèche finale produite de cultures de maïs (Ajaï et al. 1984, Gallo et al. 1985).

- D'autres intègrent les estimations de ϵ_i dans un modèle de croissance du maïs faisant intervenir des fonctions de régulation du potentiel photosynthétique liées aux facteurs hydriques et thermiques (Daughtry et al. 1983). Asrar et al. (1985b) appliquent cette démarche à des cultures de blé en ne reprenant que le facteur hydrique appréhendé par radiothermométrie (CWSI).

Cette manière d'utiliser les données radiométriques semble donc particulièrement intéressante: Elle permet d'associer dans un schéma général de type déterministe, non seulement des données de télédétection, fournissant une estimation de l'énergie photosynthétiquement utilisable absorbée par la culture, mais encore des données climatiques pouvant fournir des estimateurs des facteurs de régulation de la conversion en matière sèche de l'énergie solaire absorbée. Il faudra alors déterminer la répartition de cette matière sèche produite entre les différents organes de la plante dont ceux qui présentent un intérêt économique: les grains.

La disparité des types de relation entre ϵ_i et les réflectances spectrales ou les indices de végétation rencontrés chez les différents auteurs cités appelle une question importante: Quels sont les domaines de validité de ces différentes relations?

Il semble en particulier que les surfaces sénescentes, absorbant une partie non négligeable de l'énergie photosynthétiquement active incidente (Chance et Lemaster 1978), contribuent beaucoup à faire varier ces relations. La modélisation de la réflectance directionnelle de couverts végétaux est certainement, là encore, un outil privilégié permettant de comprendre et de construire les relations entre l'absorption de l'énergie lumineuse photosynthétiquement active et les réflectances directionnelles dans des bandes spectrales plus étroites.

1-3-4 Modélisation des profils spectraux.

A partir d'un ajustement statistique des profils d'évolution de l'indice GIN (proche du GVI), Badhwar (1984 a,b,c) utilise les paramètres "valeur maximale atteinte" et "dates d'occurrence de ce maximum et des points d'inflexions", pour séparer de la manière la moins ambiguë possible, le maïs du soja et des autres cultures (figure 1.13).

Cette modélisation de profil spectral semble particulièrement intéressante: Elle permet de résumer en un nombre réduit de paramètres, un grand nombre de données acquises au cours du temps. Elle présente en outre l'avantage d'effectuer un certain lissage des profils spectraux: Bien que les données radiométriques puissent présenter des variations brutales, liées à des facteurs externes au couvert, comme les propriétés optiques du sol ou les conditions atmosphériques, la culture, elle, peut tamponner les effets instantanés du climat. En suivant une certaine "logique", elle aura une évolution propre beaucoup plus "lisse".

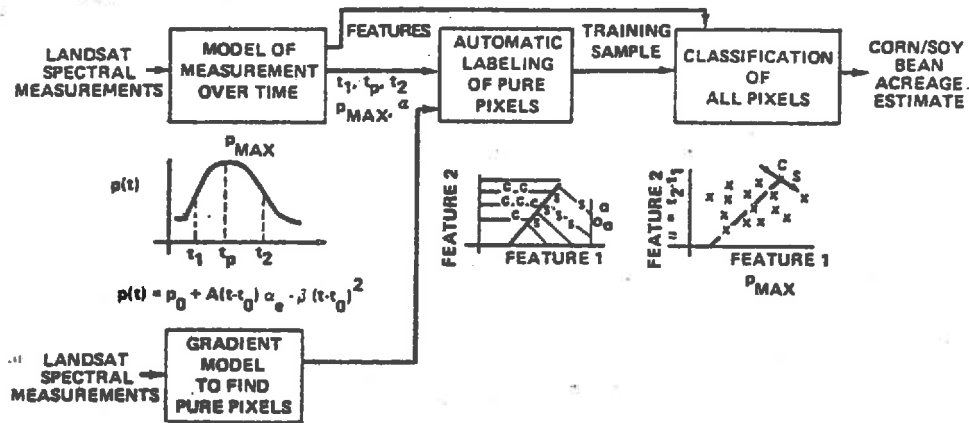


Figure 1.13: Schéma d'utilisation des caractéristiques des profils spectraux pour discriminer le Maïs du Soja et des autres cultures (d'après Badhwar 1984a).

Il est donc important de pouvoir réduire les variations dues aux facteurs externes au couvert en moyennant les données de réflectance sur un échantillon représentant plusieurs dates de mesures. Ce moyennage nécessitera la connaissance de cette "logique" d'évolution du couvert, représentée par le choix du modèle mathématique d'ajustement des données du profil spectral.

Les fonctions mathématiques utilisées pour décrire ces profils spectraux sont assez diverses. Elles dépendent notamment, pour un type de végétation donné, du type d'indice utilisé et de la présence ou non d'un palier de saturation.

Emori et al. (1981) utilisent une fonction de type logistique pour décrire l'évolution de l'indice PVI de cultures de betteraves à sucre: ils déterminent les écarts de productivité par rapport à un rendement potentiel en comparant à chaque date le PVI actuel à un PVI de référence correspondant au rendement potentiel pour ce stade de développement.

Badhwar (1984b) utilise aussi une fonction de type logistique.

Badhwar (1984c) ainsi que Wiegand (1984) utilisent des fonctions complexes de type exponentiel.

Crist (1984), délaissant les fonctions spline cubiques pour leur grande sensibilité aux données manquantes successives, utilise deux fonctions différentes pour décrire l'ensemble du cycle du maïs ou du soja.

Toutes ces fonctions ont été choisies parmi l'infinie bibliothèque de fonctions mathématiques de manière relativement empirique. Il serait intéressant de construire des modèles d'évolution de la réflectance basés sur la logique de l'évolution biologique du couvert. Cette démarche aurait l'avantage de produire des paramètres de calage des profils spectraux ayant une signification biologique réelle. Elle rendrait en outre le choix et l'ajustement du modèle moins dépendants des aléas de la distribution des facteurs externes au couvert, au cours du temps.

CONCLUSION PARTIELLE

Cette analyse bibliographique des relations directes entre les caractéristiques biologiques et radiométriques d'un couvert végétal fait ressortir les limites des résultats à attendre de l'utilisation de mesures ponctuelles dans le temps.

Il apparaît nécessaire de décomposer l'analyse de ces relations directes en celle de deux relations complémentaires:

- relation réflectance - structure du couvert,
- relation structure du couvert - état de la culture.

Mais ces relations et particulièrement la seconde, évoluent constamment au cours du cycle de la culture.

L'étude de la dynamique d'évolution du couvert, appréhendée à partir des moyens de télédétection, semble être une voie particulièrement intéressante. Elle a commencé à n'être explorée que récemment. Elle a l'avantage de pouvoir s'intégrer dans une approche de type agrométéorologique déterministe.

L'analyse multispectrale de couverts végétaux est devenue également multitemporelle. Elle doit traiter une quantité d'informations de plus en plus importante.

La modélisation des "profils spectraux" permettrait de synthétiser ces informations en un nombre réduit de paramètres caractérisant l'évolution des valeurs radiométriques multispectrales.

La construction de tels modèles à partir de l'observation de la dynamique de l'évolution biologique du couvert devrait permettre de produire des paramètres de calage ayant une signification biologique claire.

En introduisant une logique biologique à la modélisation de profil spectral, on se rend aussi moins dépendant des aléas des facteurs perturbateurs externes au couvert, tels que l'état de surface du sol sous culture ou le trouble atmosphérique.

C'est dans cette voie que s'inscrit ce travail.

Pour élaborer cette modélisation de profil spectral, il est nécessaire que soient menées de front deux types d'analyses qui sont:

1 L'analyse de l'évolution des principaux paramètres de structure, au cours du cycle de végétation.

Cette analyse est effectuée principalement à partir d'une expérimentation où des variétés de caractéristiques biologiques très différentes sont suivies. Elle devra déboucher sur un modèle simple de forme d'évolution dans le temps des paramètres de structure du couvert.

Ce sera l'objet de la deuxième partie de ce travail.

2 L'analyse de la relation entre les propriétés radiométriques d'un couvert et ses caractéristiques de structure.

Cette analyse appartient au domaine de la modélisation de la réflectance de couverts végétaux. Notre ambition n'est pas de construire un nouveau modèle plus précis mais probablement plus complexe, mais plutôt, à partir de modèles déjà existants, de trouver une formulation simple et synthétique rendant compte le mieux possible de l'influence des principaux facteurs sur la réponse spectrale. Ce sera l'objet de notre troisième partie.

En plus de son utilisation pour la modélisation du profil spectral, on envisagera d'appliquer ce modèle de réflectance simplifié à la détermination de la partie photosynthétiquement active de l'énergie solaire absorbée par la culture. Ce sera l'objet de la dernière partie de ce travail.

partie 2

II CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT VEGETAL. ESSAI DE MODELISATION.

Nous donnerons au mot "structure" une signification particulière. Ce sera l'ensemble des informations relatives au couvert permettant d'expliquer les interactions de rayonnements électromagnétiques de courte longueur d'onde avec le couvert végétal.

Cette "structure du couvert" regroupe les paramètres décrivant les surfaces, formes, position, orientation et propriétés optiques des éléments qui le composent.

Cette définition peut être assez différente de celle proposée par des écophysiolgistes (Masle-Meynard 1980) ou des phytosociologues (De Wit 1960) qui retiennent les critères relatifs à leurs objectifs particuliers.

Notre objectif est de construire un modèle de forme d'évolution dans le temps de la structure d'un couvert de céréales. Nous allons donc d'abord examiner les travaux qui s'en rapprochent le plus.

Les études du microclimat à l'intérieur de couverts végétaux se sont attachées à mesurer certains de ces paramètres de structure. Mais ces études décrivent le plus souvent la structure à un stade donné, sans suivi réel et continu au cours du cycle de développement (Baldy 1972 et 1973, Varlet Grancher, 1980).
etal.

Ledent (1977,1978) Delécolle et Gurnade (1980), Malet et Gurnade (1981) ont de même cherché les liaisons entre la structure à un stade donné et l'élaboration du rendement de céréales. Mais, là aussi, l'aspect dynamique de l'évolution de la structure n'est pas traité en tant que tel.

Les Modèles agrométéorologiques déterministes tels que CERES (Ritchie et Otter 1985) ou ARCWHEAT (Porter 1984, Weir et al. 1984) simulent l'apparition et la croissance des différents organes. Ils fournissent en particulier des informations relatives aux surfaces foliaires. Mais cette démarche, bien que comportant un aspect dynamique, est assez différente de la notre. Pour eux, la forme d'évolution des surfaces n'est pas supposée connue a priori, mais déterminée par la somme des interactions des facteurs climatiques, édaphiques et des techniques culturales sur un état initial du couvert. Dans un objectif d'estimation ou de prévision du rendement, ces modèles explicatifs peuvent fonctionner en dehors de toute confrontation directe à la réalité qu'ils sont supposés représenter. Ils peuvent ainsi subir des dérives relativement importantes dues en partie à la variabilité spatiale des facteurs climatiques et édaphiques qu'il est difficile d'appréhender. Par contre, l'utilisation de la télédétection présente l'avantage d'être fondée sur l'observation d'une réalité radiométrique qui traduit directement les caractéristiques structurales du couvert.

Les seuls travaux se rapprochant le plus de notre objectif sont ceux de Baret et Huet (1979), Huet (1983). Ils ont été initiés par Guyot et Malet en 1976. Ils analysent les relations entre la structure du couvert, son état physiologique et sa réponse spectrale. Mais ces études ont un caractère descriptif accentué. Elles sont effectuées la plupart du temps uniquement sur la population de brins dominants, ne représentant pas réellement l'ensemble des brins de la culture. Les synchronismes constatés entre le développement de la culture et les modifications de sa structure nous seront néanmoins utiles.

Il n'existe donc à notre connaissance qu'assez peu de travaux essayant de synthétiser l'évolution de la structure de couverts de céréales en un modèle descriptif.

Nous avons donc décidé de suivre l'évolution des caractéristiques de la structure de couverts de blé à partir d'une expérimentation particulière en se situant à l'échelle locale (de l'ordre de 10 à 100 m²).

Nous présenterons dans un premier temps les conditions de notre expérimentation, en insistant sur la méthode et la précision des mesures effectuées.

Les résultats obtenus, nous permettront de construire, dans un deuxième temps, un modèle de forme d'évolution des paramètres de structure du couvert.

2-1 L'EXPERIMENTATION

2-1-1 Le milieu et les cultures

2-1-1-1 Le milieu

2-1-1-1-1 Situation

L'expérimentation s'est déroulée sur le domaine de l'INRA à Avignon-Montfavet qui est situé dans la plaine alluviale de la Basse vallée du Rhône. Le terrain expérimental est bordé au Nord et au Sud par des brise-vent. Les parcelles élémentaires sur lesquelles les mesures ont été entreprises ont 50m de long et 8m de large ce qui nous a permis d'effectuer un nombre important de prélèvements. Les rangs de la culture sont orientés Nord-Sud.

2-1-1-1-2 Le sol

Il s'agit d'un sol argilo-calcaire que l'on rencontre fréquemment dans les plaines alluviales de Provence. La profondeur de sol de la parcelle, supérieure à 1m, donne une réserve utile de l'ordre de 150mm pour une culture de blé d'hiver.

2-1-1-1-3 Le climat

De type méditerranéen, il est caractérisé par une très grande variabilité inter et intra annuelle des précipitations. Les conditions climatiques rencontrées durant la période des mesures sont résumées par les figures 2.1 et 2.2 :

- La pluviométrie (figure 2.1) importante de début Mars 1985 a permis de limiter les effets du déficit hydrique constaté entre la deuxième décade de Mars et la dernière décade d'Avril (de l'ordre de 110mm). Les précipitations abondantes de début Mai ont reconstitué les réserves en eau du sol. Elles ont ainsi contribué à alimenter la culture jusqu'à sa maturité malgré la faible pluviométrie du mois de Juin.

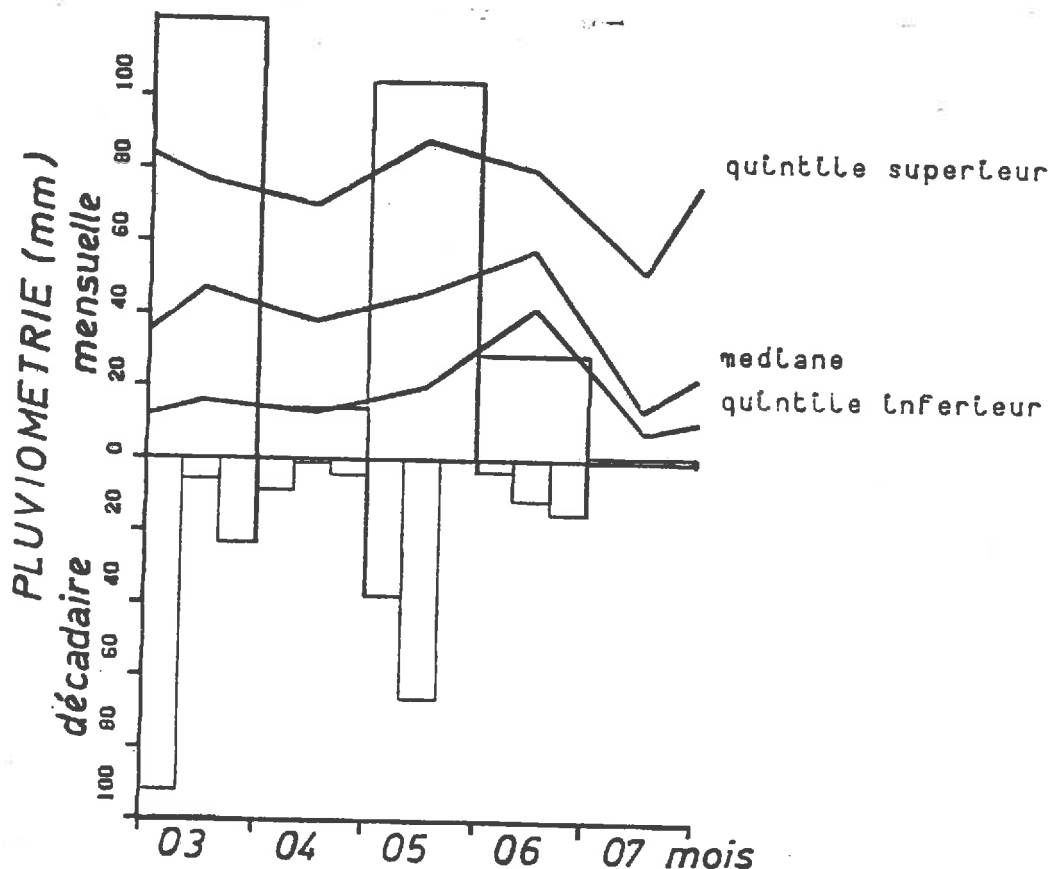
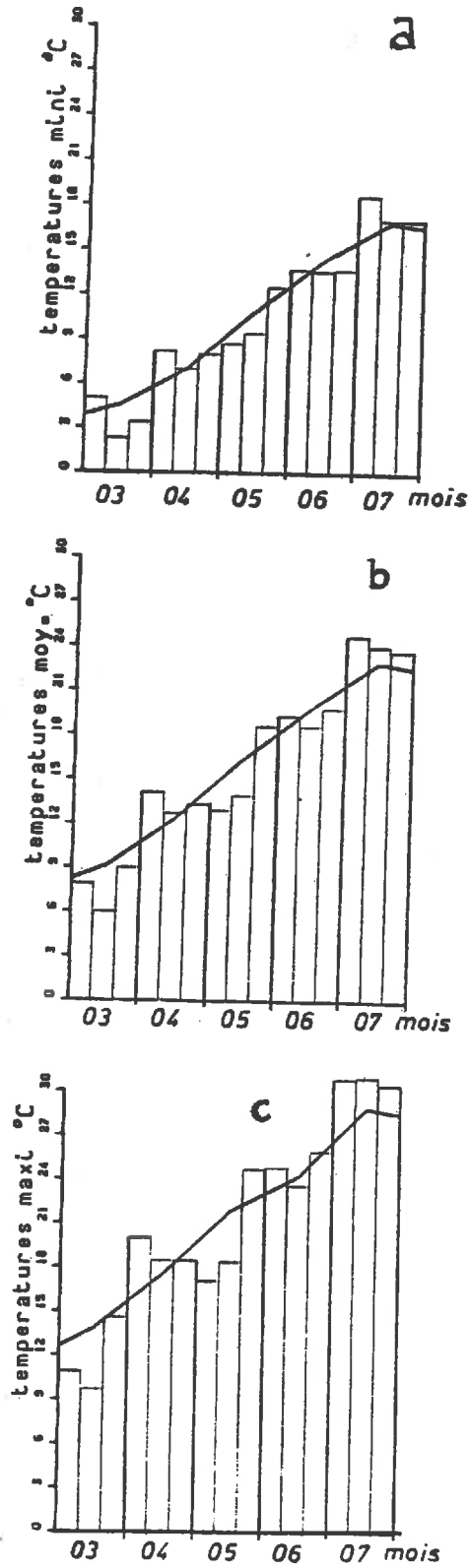


Figure 2.1: pluviométrie décadaire et mensuelle de la station d'Avignon Montfavet; comparaison à la médiane et aux quintiles.



figures 2: Températures minimales (a), moyennes (b) et maximales (c) de la station d'Avignon-Montfavet; Comparaison avec la moyenne (trait plein).

- Les températures (figure 2.2) sont en général légèrement plus basses que la normale bien que le mois d'Avril (montaison du blé) et la période fin Mai début Juin (épiaison-floraison) aient été un peu plus chauds.

2-1-1-2 Les cultures

2-1-1-2-1 Matériel végétal

3 variétés de caractéristiques très différentes sont étudiées:

Talent variété bien adaptée à la région, à fort tallage et petits grains. Elle a un port foliaire relativement étalé et des feuilles plutôt petites.

Arcane variété fourragère, caractérisée par une productivité importante mais de faible qualité. D'une précocité et d'une alternativité proches de celles de Talent, elle se caractérise par un tallage épi plus faible et par une fertilité de l'épi importante, avec beaucoup d'épillets par épi. Elle possède un port très dressé et des feuilles assez grandes.

Armina variété de type "anglais", très hiver et très tardive. Elle est a priori très mal adaptée à notre région. Le tallage est modéré. Mais elle possède une importante fertilité de l'épi avec beaucoup de grains par épillet. Son port est très dressé avec des feuilles particulièrement larges.

2-1-1-2-2 Techniques culturales.

Les 3 variétés ont été semées le 28 novembre 1984 à la densité de 400 grains/m².

Les rangs sont écartés de 0,175 m.

La pluviométrie régulière ayant suivi le semis a favorisé une bonne levée.

Les apports d'azote ont été réalisés au stade début tallage (le 05/02: 50 unités/ha) et début montaison (le 04/04: 100 unités/ha).

L'enherbement et les maladies cryptogamiques n'ont pas justifié d'intervention particulière. Par contre, une pullulation de pucerons aurait dû être jugulée au stade floraison. Malheureusement aucun traitement n'a pu être effectué.

2-1-1-2-3 Stades phénologiques.

Les principaux stades phénologiques sont reportés dans le tableau 2.1. La détermination des dates de certains stades est basée sur une estimation visuelle globale de la culture. Il faut alors leur accorder un intervalle de confiance de l'ordre de 2 à 3 jours.

Les dates du palier hydrique ont été déterminées sur un échantillonnage conforme à celui préconisé par Malet et Gurnade (1981). Nous avons utilisé le critère "date de franchissement des seuils d'humidité relative du grain" de 86% (début du palier) et 44% (fin du palier) comme le suggèrent Miguet (1983) et Baret et Guyot (1986) pour définir les dates de palier hydrique.

STADES PHENOLOGIQUES	TALENT		ARCANE		ARMINDA	
	date	quant.	date	quant.	date	quant.
SEMIS	28/11		28/11		28/11	
LEVEE	14/12		14/12		14/12	
DEBUT TALLAGE	11/02	42	11/02	42	11/02	42
DEBUT MONTAISON	23/03	82	23/03	82	01/04	82
GONFLEMENT	07/05	127	07/05	127	18/05	138
EPIAISON	14/05	134	13/05	133	24/05	144
FLORAISON	20/05	140	20/05	140	27/05	147
DEBUT PALIER HYDRIQUE	03/08	154	04/08	155	10/08	161
FIN PALIER HYDRIQUE	25/08	178	24/08	175	25/08	176
RECOLTE	10/07	191	10/07	191	10/07	191

Tableau 2.1: stades phénologiques. Ils sont exprimés soit en date calendaire (date), soit en quantième (quant.)

2-1-1-2-4 Rendement et composantes du rendement:

Ces mesures ont été réalisées à partir de prélèvements de 6 placettes de 0,35 m² (2 rangs adjacents de 1 m linéaire de longueur) prélevées au hasard (ITCF 1984). Les résultats sont présentés au tableau 2.2.

Les niveaux de rendements atteints par Talent et Arcane correspondent bien à ceux qui ont été observés cette année dans la région, en bonnes conditions de culture. Par contre, la variété Arminda est caractérisée par un indice de récolte et un poids de 1000 grains particulièrement faibles. C'est la conséquence de la mauvaise adaptation de ce cultivar à nos conditions climatiques mais aussi dans une certaine mesure de l'action des pucerons particulièrement attirés par cette variété tardive.

RENDEMENT OU COMPOSANTE	TALENT	ARCANE	ARMINDA
DENSITE DE PLANTES (plt.m ⁻²)	294	260	309
COEFFICIENT DE TALLAGE EPI	2,40	1,93	2,18
DENSITE D'EPIS (epi.m ⁻²)	700	500	670
FERTILITE DE L'EPI (grain/epi)	28,3	31,7	30,3
DENSITE DE GRAINS (grain.m ⁻²)	20000	18000	20200
POIDS DE 1000 GRAINS (g.)	30,4	36,0	20,5
RENDEMENT EN GRAIN (q/ha)	60,7	57,5	41,4
MATIERE SECHE TOTALE PRODUITE (q/ha)	146	134	153
COEFFICIENT DE RECOLTE (%)	41,8	42,8	27,1

Tableau 2.2: Rendement et composantes du rendement
(Les poids reportés correspondent aux poids secs).

**2-1-2 METHODES UTILISEES POUR SUIVRE L'EVOLUTION DES
CARACTERISTIQUES DE LA STRUCTURE DU COUVERT.**

**2-1-2-1 Mesures des propriétés optiques des éléments du
couvert.**

Notre objectif est de définir les propriétés optiques de l'ensemble des éléments du couvert. Nous les déterminerons à deux échelles complémentaires:

- à l'échelle globale de l'organe (feuilles, tiges, épis)
- à l'échelle très ponctuelle d'une partie d'organe

**2-1-2-1-1 estimation globale des propriétés optiques
d'organes**

L'activité chlorophyllienne étant responsable directement ou indirectement des propriétés optiques des éléments végétaux, nous avons voulu quantifier la "verdeur" de chaque organe. Nous appellerons verdeur d'un organe la proportion verte de sa surface totale. Pour chaque organe analysé, nous l'estimons visuellement en utilisant un système de notation discret en 10 classes de verdeur:

- 0: organe entièrement sénescent (0% de surface verte)
- 10: organe entièrement vert (100% de surface verte)

Cette notation sera utilisée pour séparer les surfaces foliaires en deux grands groupes suivant leurs propriétés optiques. Pour ce faire, nous avons défini la valeur seuil de 80% de verdeur. Elle constitue la limite entre les surfaces dites vertes et les surfaces sénescentes. La figure 2.3

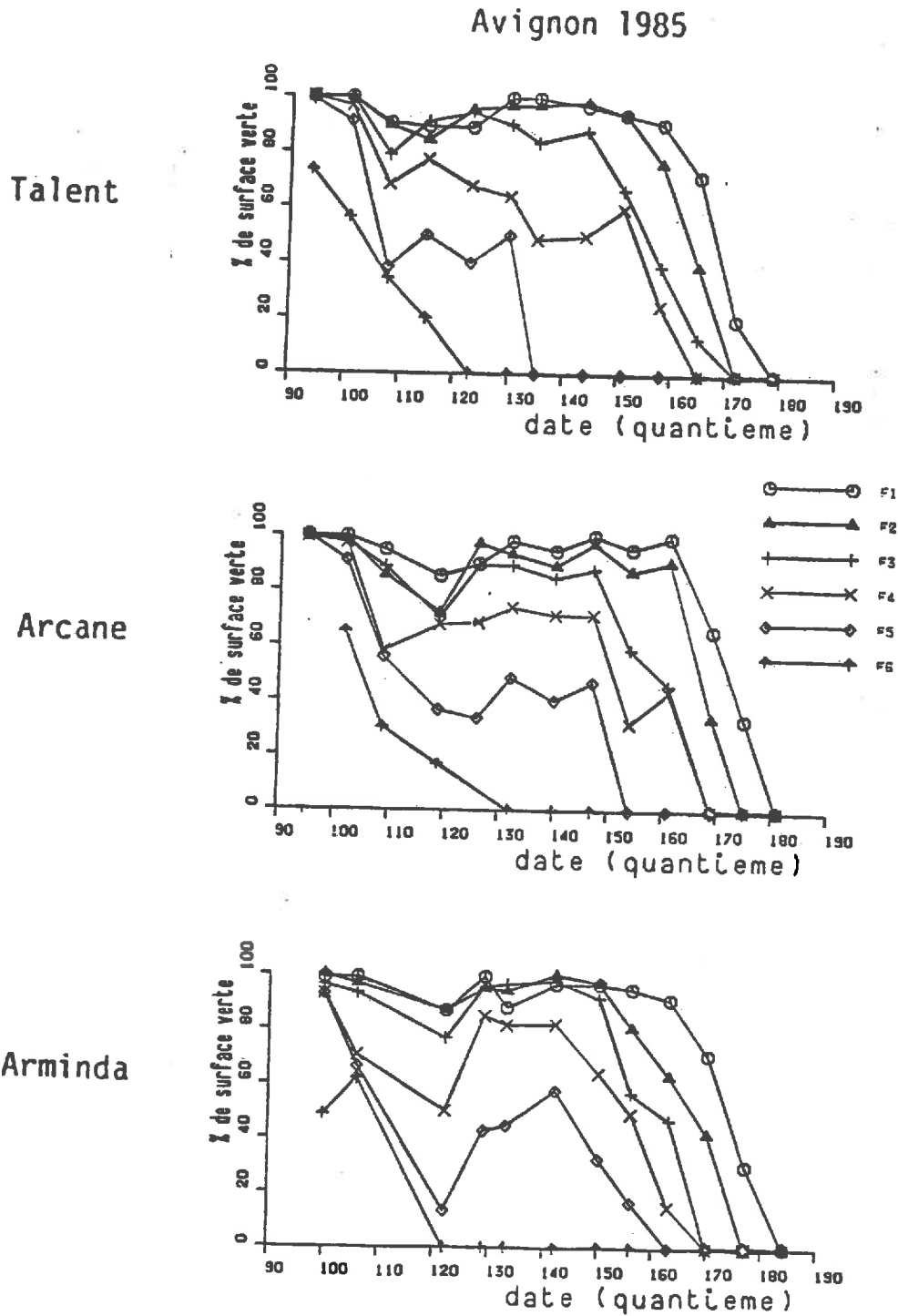


Figure 2.3: Evolution de la proportion de surface verte des différents étages foliaires (F1, F2, ... désignent les différents étages foliaires en commençant par le haut)

montre qu'en dessous de 80% de surface verte, la sénescence progresse rapidement et irréversiblement. La spectrophotométrie nous permettra de préciser les niveaux de réflectance de ces deux états contrastés.

2-1-2-1-2 mesure ponctuelle des propriétés optiques d'organe

Un spectrophotomètre Beckman Cary DI a été utilisé pour mesurer en laboratoire, les niveaux de réflectance moyens des différents organes de la culture, dans différentes bandes spectrales.

Cet appareil permet de mesurer la réflectance directionnelle hémisphérique: Un rayon incident colimaté arrive perpendiculairement à la surface de l'échantillon. Le rayonnement réfléchi est analysé au niveau d'une sphère intégrante.

Un étalonnage préalable sur une surface de référence est nécessaire (surface de sulfate de baryum qui permet de fixer le niveau 100).

La résolution spectrale a été fixée à 5nm.

Ces mesures sont très ponctuelles (25 à 30 mm²) et doivent être répétées plusieurs fois.

2-1-2-2 Suivi des variables de surface et de biomasse:

2-1-2-2-1 intérêt de ces variables

L'objectif de l'ensemble de ces mesures est double:

- suivre l'évolution des contributions de chaque organe (tiges, feuilles, épis) à la surface totale développée par le couvert par unité de surface de sol (indice foliaire total).

- suivre organe par organe, la répartition verticale de sa surface et de son état (verdeur). Les hauteurs d'insertion des feuilles et des épis seront mesurées pour connaître cette répartition verticale.

Bien que les variables de biomasse n'entrent pas directement dans notre définition de la structure du couvert, nous les utiliserons

- pour réaliser notre échantillonnage

- comme variables intermédiaires pour construire un modèle d'évolution des surfaces foliaires.

Nous les considérerons donc dans ce paragraphe de la même manière que les variables de surface.

Pour que l'estimation des variables caractéristiques de la structure soient précises et représentatives de l'état des plantes à l'échelle de la parcelle, il nous faut résoudre les problèmes d'échantillonnage.

2-1-2-2-2 Les problèmes d'échantillonnage

Huet (1983) propose des normes d'échantillonnage pour un certain nombre de variables de structure ou de biomasse de couverts de blé qui sont regroupées au tableau 2.3.

VARIABLES	STADES		PHENOLOGIQUES	
	F1 sortie	Gonflement épiaison floraison	Palier Hydrique Début	Récolte Fin
Hauteurs	←-----10----->			
Angle d'insertion F1	←-----15----->		←-----60----->	
Angle d'insertion des autres feuilles	←-----10----->			
Surface F1	←-40-→	←-----20----->		←-----70----->
Surface des autres feuilles	←-----70----->			
Surface foliaire totale du brin	←-----10----->		←-----50----->	
Poids sec F1	←-35-→	←-----25----->		←-40-→
Poids sec des autres feuilles	←-----25----->			
Poids sec de l'épi	←-----20----->		←-40-→	
Poids sec total du maitre brin	←-----10----->			

Tableau 2.3: normes d'échantillonnage (exprimées en nombre de brins) proposées par Huet (1983) pour une précision de 10% et un niveau de risque de 5% pour la population des brins dominants.

Ces normes dépendent non seulement du type de mesure et des organes considérés, mais également du stade phénologique de la culture. Elles ont été établies uniquement pour une population relativement homogène constituée par des brins dominants. Ces variables sont exprimées en valeur moyenne par brin.

Cette méthodologie ne nous permet pas d'atteindre nos objectifs car nous voulons:

- être représentatif de l'ensemble des brins d'une parcelle, et pas uniquement des ses brins dominants.

- exprimer nos mesures

* soit sous forme d'une contribution relative à la biomasse ou à la surface totale de l'unité élémentaire, représentée par le brin.

* soit en valeur rapportée à l'unité de surface de sol.

Ces deux derniers points posent des problèmes spécifiques qui seront abordés dans deux paragraphes distincts.

2-1-2-2-2-1 Estimation des contributions relatives de chaque organe à la biomasse ou à la surface totale du brin:

Le facteur le plus limitant au niveau de l'échantillonnage étant évidemment le nombre d'unités travailleurs-temps disponibles, nos mesures sont limitées à un échantillon de 10 plantes entières. Cette taille d'échantillon représente environ une journée de travail pour deux personnes.

Ces mesures sont réalisées à une fréquence hebdomadaire pour chaque variété.

Les 10 plantes sont arrachées du champ le matin. On coupe alors les racines pour ne conserver que les parties aériennes. On sépare les brins de chaque plante. Sur chacun des brins, on détermine le poids frais, le poids sec, la surface et la verdeur de chaque organe:

- Les feuilles sont séparées et mesurées individuellement. On note alors leur ordre en commençant par la dernière feuille apparue (celle du haut) et leur hauteur d'insertion. La notion de feuille s'applique ici uniquement aux limbes.

- Les tiges. Elles incluent les gaines des différentes feuilles.

- les épis. Ils sont séparés des tiges à la base du premier épillet visible, même si celui-ci est stérile.

Les poids sont mesurés avec une balance au centième de gramme. Les poids secs sont déterminés après passage dans une étuve ventilée, à 105°C, pendant au moins 24 heures.

Les surfaces sont mesurées au planimètre optique (LI-COR 3000). Quand les organes sont trop volumineux pour passer au planimètre, ils sont photocopiés. On planimètre alors leur silhouette après découpage. La surface des tiges et des épis correspond en fait à leur projection sur un plan vertical.

Au cours de la montaison (à partir du 115^{ème} jour de l'année), à cause des phénomènes de régression des talles, nous avons scindé la population des brins en deux:

- Les talles régressées, considérées comme complètement sénescentes. Les biomasses et surfaces sont alors mesurées globalement sans distinction d'organes. Ces talles régressées représentent dans nos conditions une faible proportion de la plante (figure 2.4) si l'on raisonne en biomasse sèche. Par contre, en fin de cycle, ces talles régressées représentent une surface relativement importante: de l'ordre de 20% de la surface totale du brin. Ces talles, situées à la base de la culture, sont d'organisation quasi aléatoire (feuilles tordues et recroquevillées; pas de tige dressées). Leurs propriétés optiques sont proches de celles du sol comme nous le verrons ultérieurement. Ces deux remarques nous autorisent à penser que la contribution de ces talles à la réponse radiométrique du couvert doit être très faible. Nous ne les prendrons donc pas directement en considération pour construire notre modèle d'évolution de la structure.

- Les talles restantes, sur lesquelles l'ensemble des mesures décrites précédemment sont réalisées sur chaque organe. Elles constitueront la population de référence sur laquelle sera établie notre modélisation de l'évolution de la structure.

Les figures 5, 6 et 7 montrent les niveaux moyens et la précision calculée pour un niveau de risque égal à 5% des contributions des 4 types d'organes définis ci dessous à la biomasse ou à la surface totale de la population des talles non régressées:

- feuilles vertes: Conformément au chapitre 2-1-2-1-1, ce sont les feuilles dont plus de 80% de la surface est verte.

- feuilles sénescentes: Feuilles qui ont moins de 80% de leur surface verte.

- tiges

- épis

Avignon 1985

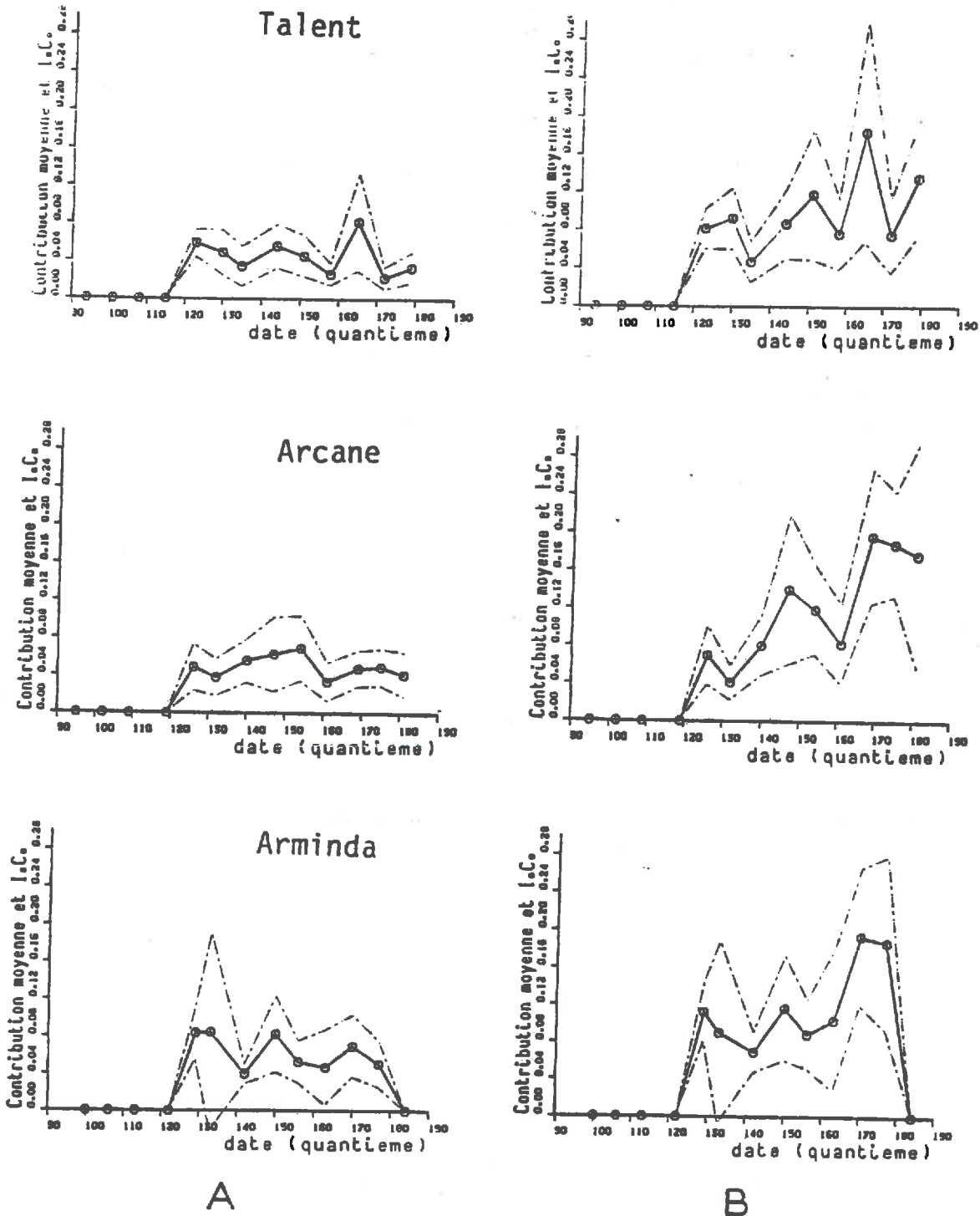
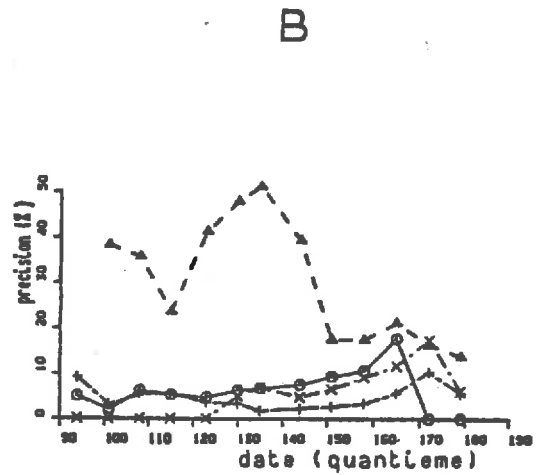
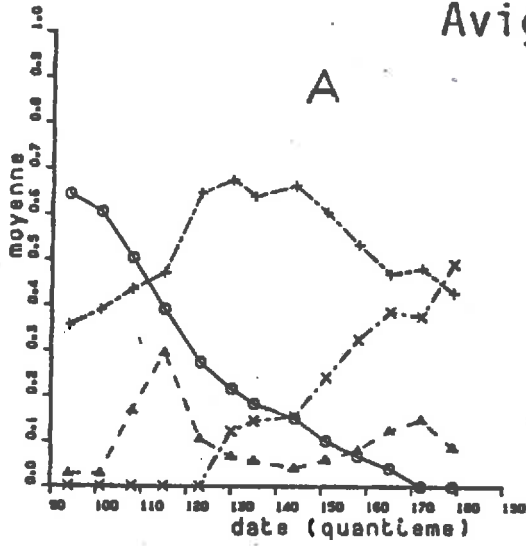


Figure 2.4: Evolution au cours du temps des valeurs moyennes (trait plein) et de l'intervalle de confiance à 95% (trait pointillé) de:

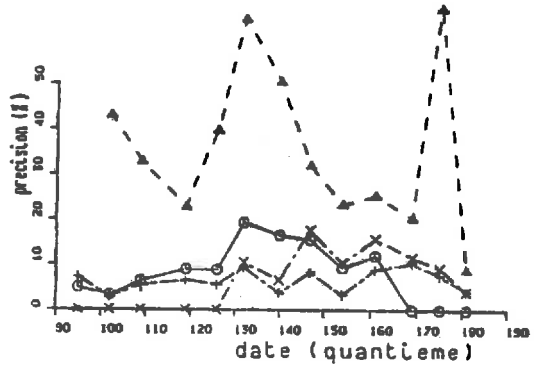
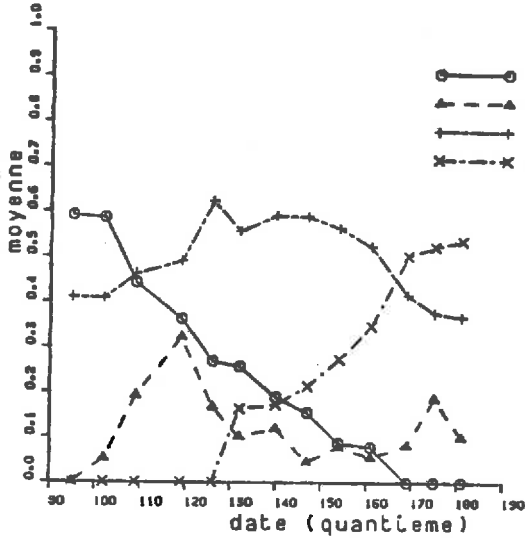
- A : rapport entre la matière sèche des talles régressées et celle des plantes entières
- B : rapport entre la surface des talles régressées et la surface totale de la plante entière.

Avignon 1985

Talent



Arcane



Arminda

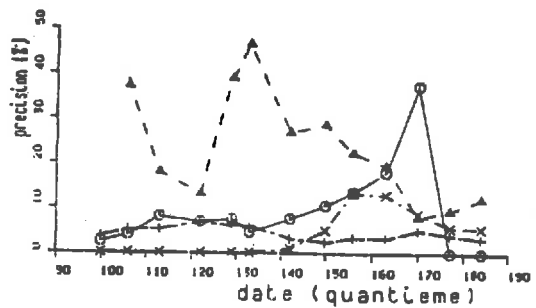
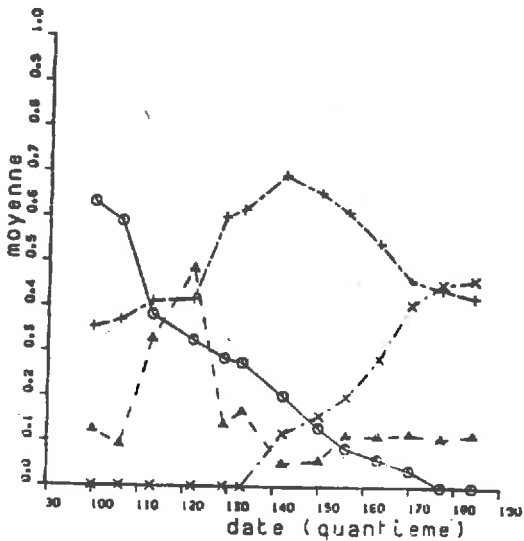
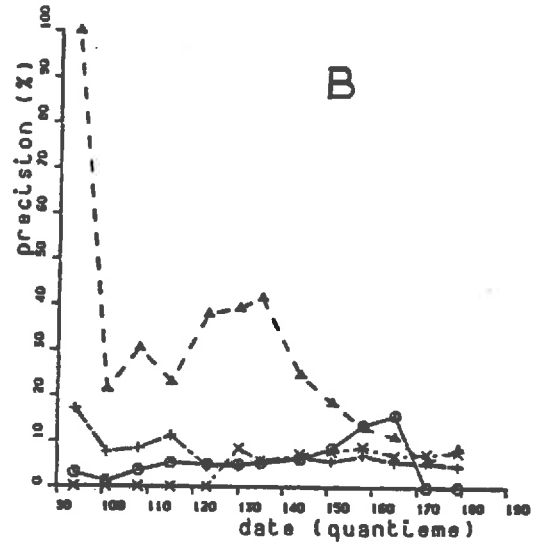
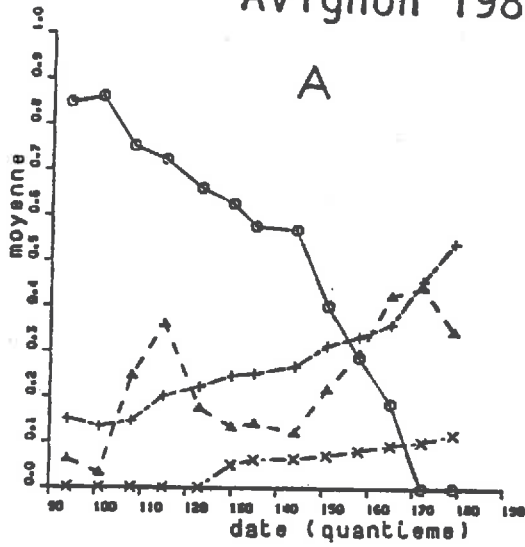


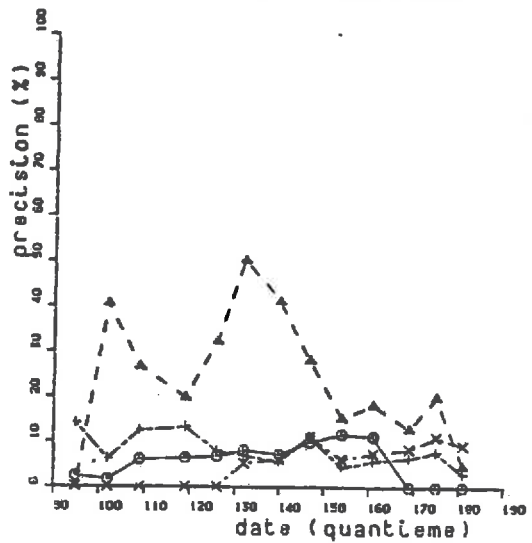
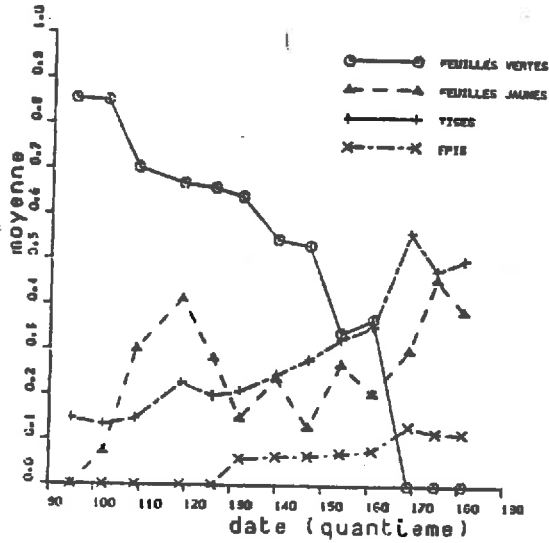
Figure 2.5: Evolution au cours du temps des valeurs moyennes (A) et de la précision à 95% (B) du rapport entre la biomasse sèche de différents types d'organes et celle du brin entier.

Avignon 1985

Talent



Arcane



Arminda

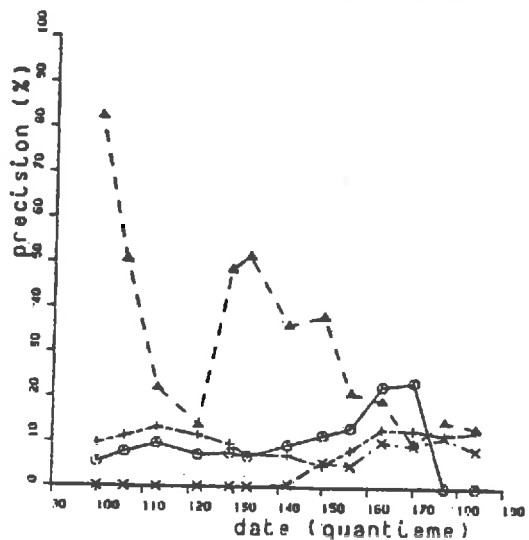
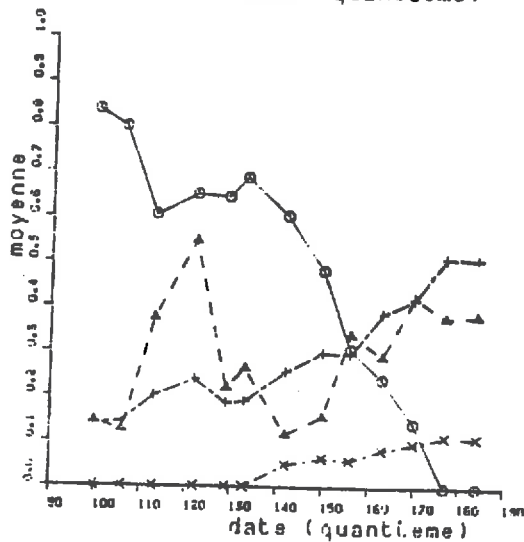
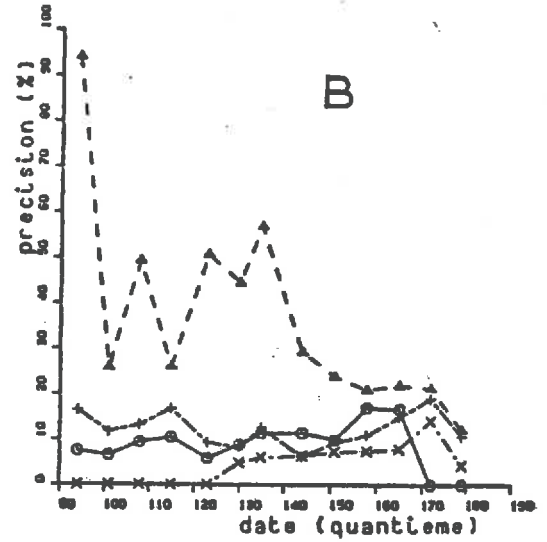
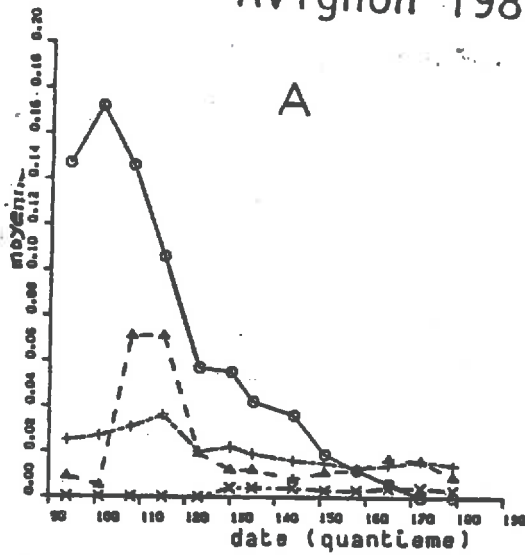


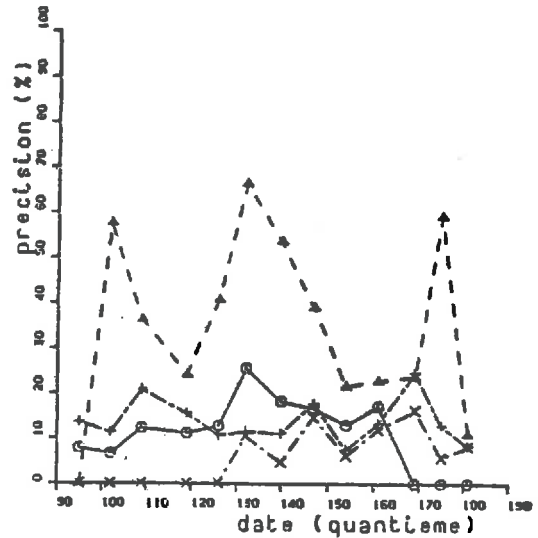
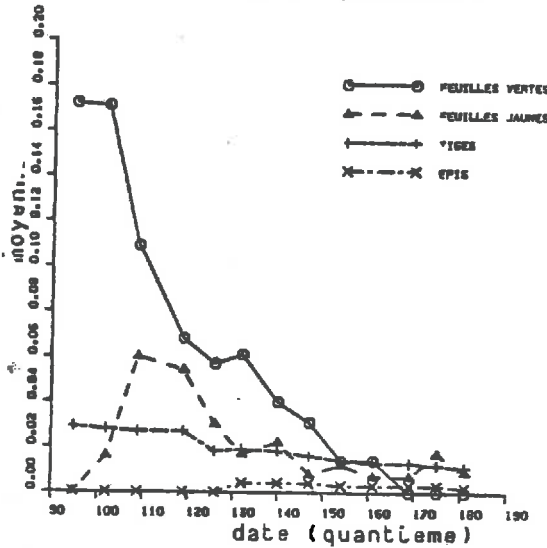
Figure 2.6: Evolution au cours du temps des valeurs moyennes (A) et de la précision à 95% (B) du rapport entre la surface de différents types d'organes et celle du brin entier.

Avignon 1985

Talent



Arcane



Arminda

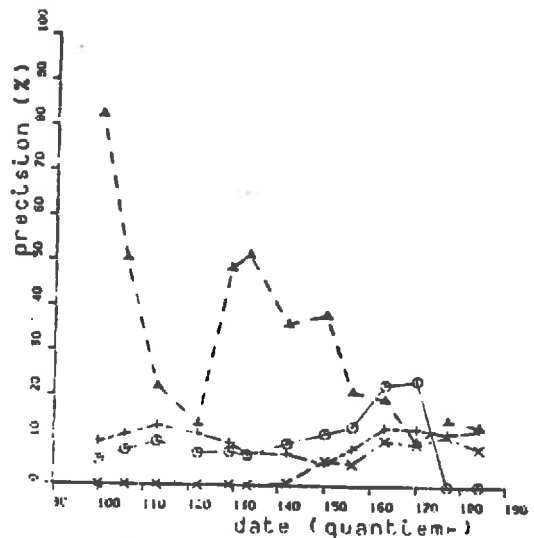
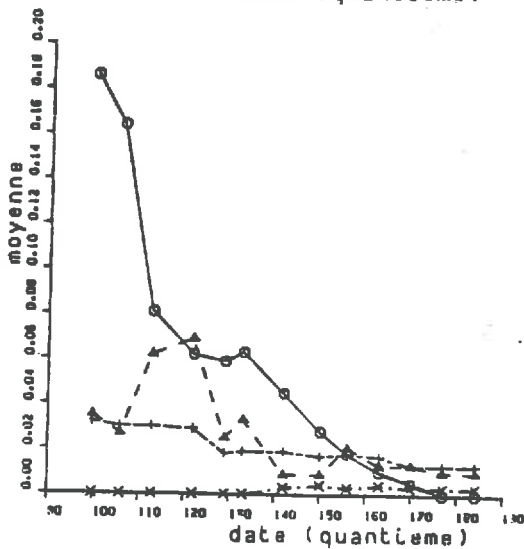


Figure 2.7: Evolution au cours du temps des valeurs moyennes (A) et de la précision à 95% (B) du rapport entre la surface de différents types d'organes et la biomasse sèche du brin entier.

La précision atteinte avec notre échantillon de 10 plantes (de 20 à 60 brins suivant la variété et l'importance des talles régressées) se situe entre 5 et 15% pour les feuilles vertes jusqu'au début du palier hydrique, ainsi que pour les tiges et les épis. Par contre, la précision obtenue sur les feuilles sénescentes et les feuilles vertes en fin de cycle est assez médiocre. Ceci s'explique par les faibles niveaux de contribution de ce type d'organe à la biomasse ou à la surface totale du brin. Cette faible précision perturbera donc assez peu notre interprétation.

2-1-2-2-2-2 Estimation des valeurs des variables de surface ou de biomasse rapportées à l'unité de surface de sol.

2-1-2-2-2-2-1 Passage des contributions relatives aux valeurs rapportées à l'unité de surface

Il est possible d'estimer les valeurs de biomasse ou de surface d'organes par unité de surface de sol en utilisant l'équation suivante:

$$X = MS \cdot r \cdot x/ms$$

- X = biomasse ou surface moyenne d'organe exprimée par unité de surface de sol
- MS = matière sèche estimée par unité de surface de sol.
- r = valeur moyenne du quotient de la biomasse des talles non régressées par la biomasse totale de la plante.
- x/ms = valeur moyenne du quotient de la variable de biomasse ou de surface par organe (x) par la matière sèche (ms) du brin dont il est issu. Ce terme correspond aux contributions relatives du chapitre 2-1-2-2-2-1.

La précision sur la variable X sera la somme des précisions relatives de chaque terme du produit, en considérant qu'ils sont indépendants.

Cette hypothèse d'indépendance est raisonnable pour les termes MS et x/ms, et pour r et MS car ils sont issus d'échantillons disjoints, mais ce n'est pas le cas de r et x/ms.

La précision sur le rapport x/ms a été discutée au chapitre 2-1-2-2-2-1. On peut la considérer comme étant proche de 10% sauf pour les feuilles jaunes.

La précision sur le rapport r est de l'ordre de 2 à 3% (figure 2.4)

IL ne reste donc qu'à étudier le terme "d'extension spatiale" MS.

2-1-2-2-2-2 Estimation du terme d'extension spatiale, MS

Ce terme a été estimé à partir de prélèvements de l'ensemble des plantes de 3 placettes situées au hasard dans la parcelle et constituées de 2 rangs adjacents d'un mètre de longueur. Elles sont prélevées en même temps que les 10 plantes du chapitre 2-1-2-2-2-1. On détermine globalement par passage à l'étuve la biomasse sèche totale de ces 3 placettes correspondant à une surface totale de $1,05m^2$ de sol.

Cette mesure ne nous permet pas d'estimer directement la précision liée à la moyenne de MS car, elle évolue constamment au cours du temps. Nous ne disposons donc pas de véritables répétitions.

L'utilisation d'un modèle d'évolution dans le temps de la matière sèche produite peut par contre nous donner des indications sur ces niveaux de précision. Nous avons ajusté nos mesures expérimentales de biomasse sèche totale des parties aériennes, par unité de surface de sol, à un modèle de type logistique:

$$MS = A / (1 + e^{-b(T-T_x)})$$

A= maximum asymptotique de la biomasse sèche totale des parties aériennes (en g./m²).

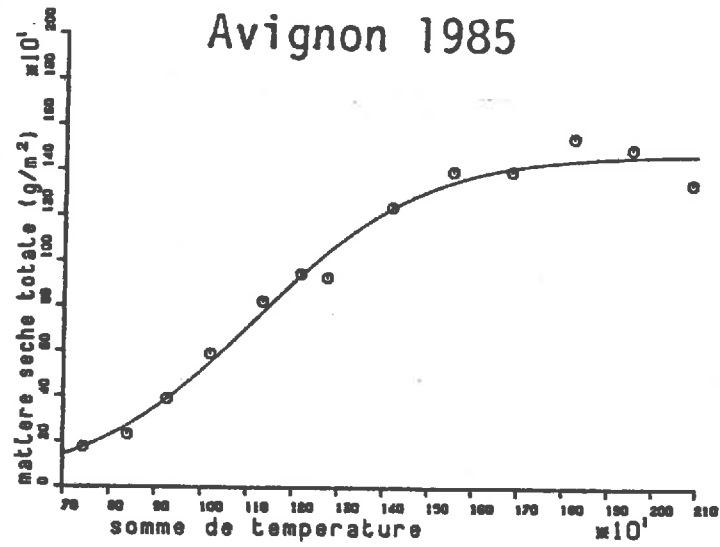
b= taux de croissance relatif (d(MS)/(MS.d(T)) au point d'inflexion(en °C⁻¹.j⁻¹)

T_x= position du point d'inflexion (en °C.j)

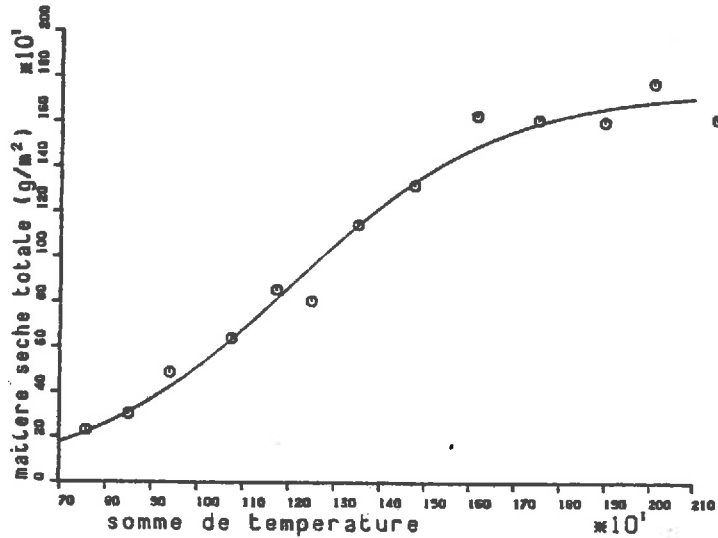
A la suite de Durand (1967) et Russelle et al. (1984), nous avons choisi d'utiliser une échelle de temps proportionnelle aux sommes de températures, plutôt que la simple échelle calendaire. Nous précisons certains aspects relatifs à ce type de modèle de croissance, au chapitre 2-2-1-2-1 qui va suivre.

La figure 2.8 et le tableau 2.4 montrent que ce modèle permet d'avoir une bonne représentation de la croissance de la biomasse sèche des parties aériennes de nos cultures qui, rappelons le, n'ont pas subi de contraintes hydriques ou de déficiences minérales très sévères.

Talent



Arcane



Arminda

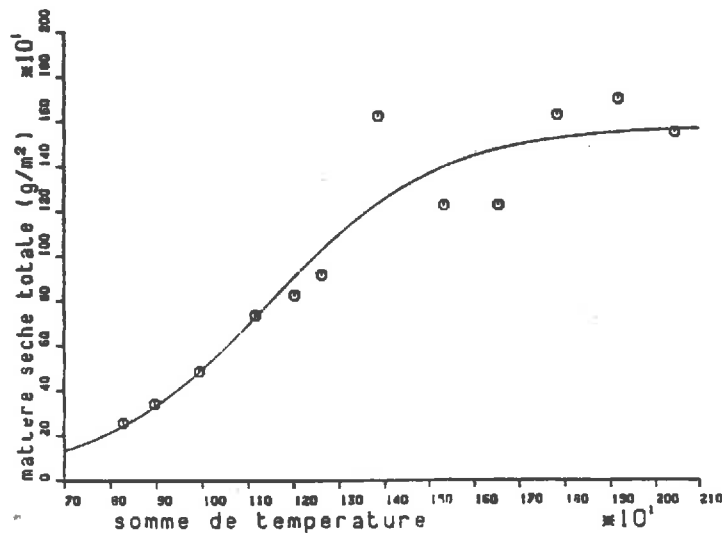


Figure 2.8: Evolution de la biomasse aeriene seche des 3 variétés testées: Comparaisons des valeurs expérimentales (points) au modèle d'ajustement (trait plein).

VARIETES		TALENT	ARCANE	ARMINDA(*)
Biomasse totale maximale produite (A)	moy.	1478	1742	1871
	s.	40	81	80
Taux de croissance au point d'inflexion (b)	moy.	0.0054	0.0043	0.0040
	s.	0.0008	0.0005	0.0008
Position du point d'inflexion (Tx)	moy.	1118	1203	1212
	s.	21	29	45
Coeff.de corrélation (r ²)		0.984	0.981	0.989
Ecart type résiduel (en g./m ² .)		88	83	100

Tableau 2.4: Ajustement des biomasses aériennes à un modèle logistique.

(*) : une donnée aberrante a été éliminée.
 moy.: valeur estimée du paramètre
 s. : écart type de l'estimation du paramètre

Cette modélisation de la croissance de la biomasse des parties aériennes offre deux avantages:

* Elle permet de " lisser " la courbe d'évolution et ainsi, de pondérer les erreurs d'échantillonnage correspondant à des prélèvements effectués à des dates données. Nous préférons donc utiliser les valeurs de biomasse estimées à chaque date de prélèvement à partir de ce type d'ajustement, plutôt que les résultats réellement observés.

* Elle permet aussi d'avoir une approximation de la précision avec laquelle on estime la biomasse à chaque date de prélèvement. L'intervalle de confiance asymptotique pour un niveau de risque de première espèce de 5%, donné par le programme d'ajustement non linéaire utilisé (Bachacou et al. 1981), est pratiquement constant au cours du cycle de végétation. Il est de l'ordre de 50 à 80 g.m⁻². La précision de l'estimation de la biomasse par unité de surface dépendra donc du niveau de production atteint: de 30% environ, au début de notre période mesure, elle tend vers une valeur inférieure à 5% à partir de la floraison.

On peut ainsi recalculer les précisions de l'estimation des valeurs, rapportées à l'unité de surface de sol, des paramètres relatifs aux différents organes (surface ou biomasse). Assez médiocre en début de cycle, elle devient très rapidement satisfaisante.

2-1-2-3 Mesures des angles foliaires

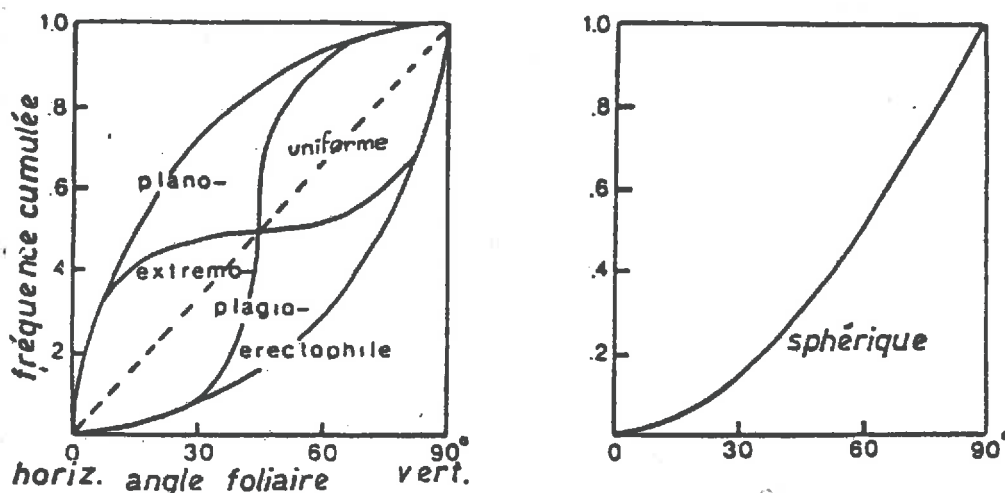


Figure 2.9: fonctions de distribution des angles foliaires (d'après De Wit (1965)).

Il est plus intéressant de prendre en compte les fonctions de distribution des angles foliaires plutôt que l'angle foliaire moyen pour modéliser la réflectance de couverts végétaux (Badhwar et al. 1984). Nous allons donc les calculer en nous référant aux types de distribution définies par De Wit (1965) (figure 2.9).

2-1-2-3-1 Méthodes de détermination des angles des feuilles

La détermination des angles des feuilles présente une difficulté importante à laquelle on se heurte toujours pour caractériser la structure du couvert. A notre connaissance, il n'existe pas de méthode simple et rapide permettant une mesure objective et précise des fonctions de distribution des angles foliaires au sein d'un couvert de blé:

- La méthode des silhouettes proposée utilisée par Bonhomme et Varlet-Grancher (1978) et Prévot (1985) s'applique à des cultures peu denses dont les feuilles sont situées dans un même plan, ce qui n'est pas le cas du blé. Elle nécessite d'autre part un échantillonnage très important.

- La méthode développée par Smith et al. (1977), basée sur l'analyse des figures de diffraction de photos de la culture prises dans différents plans ne convient qu'aux couverts peu denses.

- Les méthodes basées sur l'analyse des probabilités d'interception d'un rayon incident de direction donnée par les éléments du couvert (points quadrats, photos hémisphériques), utilisées par Warren-Wilson (1963), Bonhome (1974) et Dauzat (1985) sont lourdes et demandent un nombre de répétitions important car elles sont très ponctuelles. Elles posent aussi des problèmes de sensibilité dans les couverts denses.

Il a donc fallu nous munir d'un rapporteur et de patience pour mesurer directement les angles foliaires.

2-1-2-3-2 Estimation de la fonction de distribution des angles foliaires

Les feuilles de blé sont composées principalement de 2 éléments:

- la gaine foliaire est orientée verticalement.
- le limbe foliaire dont l'orientation peut être très variable et nécessite une mesure précise.

Ce paragraphe se rapportera donc uniquement à la détermination de l'orientation des limbes foliaires qui peut être caractérisée de la manière suivante:

* orientation générale du limbe: (figure 2.10)

Cette orientation générale est caractérisée par l'orientation de l'axe longitudinal. Nous pouvons déterminer:

- L'angle azimutal (Ψ): Comme la plupart des auteurs considèrent que la distribution azimutale des feuilles est aléatoire, nous n'avons pas caractérisé ce type d'angle. Néanmoins, Kimes et Kirchner (1983) montrent que cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée.

Dans notre cas, nous considérerons que ces variations font partie des effets de rang que nous ne chercherons pas à expliciter.

- L'angle déterminé par l'axe longitudinal de la feuille en chacun de ses points et la verticale: ces angles caractérisent la courbure de la feuille (ensemble des angles α_x) et son insertion sur la tige (α_0).

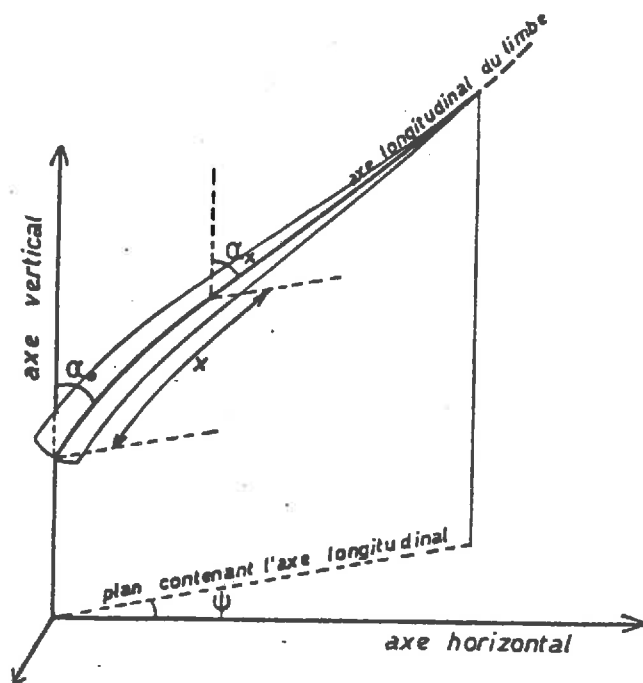


Figure 2.10: Caractérisation de l'orientation générale du limbe:

α_0 = angle d'insertion de la feuille

α_x = angle d'inclinaison de la feuille à la distance x de la base du limbe.

ψ = azimut du limbe.

* Variations locales de l'orientation des surfaces foliaires.

Ces variations déterminent l'enroulement, la crispation ou le recroquevillement du limbe. La réalisation pratique de cette mesure étant difficile, nous avons été amenés à négliger ce phénomène. Néanmoins, la prise en compte de ces variations locales doit sensiblement modifier les distributions des angles foliaires.

Nous avons calculé les fonctions de distribution des angles foliaires de deux manières différentes selon que l'axe longitudinal du limbe est rectiligne ou qu'il présente une courbure marquée.

2-1-2-3-2-1 Cas des limbes rectilignes:

Seule la mesure de l'angle d'insertion du limbe est nécessaire pour déterminer la fonction de distribution des angles foliaires: Il suffit de cumuler les surfaces des limbes en fonction des classes d'angles d'insertion auxquels ils appartiennent.

Les mesures d'angles d'insertion des feuilles sont réalisées sur chacune des feuilles de l'ensemble des brins des 10 plantes prélevées. Elles sont effectuées au laboratoire et suffisamment rapidement (au maximum 3 heures) pour que des variations éventuelles de la turgescence des tissus n'affectent pas trop le port foliaire. Les brins isolés sont maintenus verticaux au moment de la mesure pour reproduire aussi fidèlement que possible les conditions au champ.

Nous avons utilisé une notation discrète en dix classes d'angles:

- 1: feuilles horizontales
- 10: feuilles verticales

2-1-2-3-2-2 Cas des limbes courbes:

Ce cas est plus complexe. Il nous faut caractériser, en plus de l'insertion, à la fois:

- la courbure du limbe afin de le découper en portions définies par leur appartenance à une classe d'angle donnée. Nous utiliserons un modèle simple de courbure de feuille.
- la surface de limbe devant être affectée à chacune de ses portions qui appartiennent à une classe d'angle donnée. Nous utiliserons pour cela un modèle de forme de limbe.

2-1-2-3-2-2-1 détermination de la courbure du limbe

La courbure des feuilles ne présentant pas forcément de symétrie particulière, il nous a fallu trouver la fonction mathématique la plus simple possible répondant à cette contrainte.

La figure 2.11 montre comment deux paraboles se coupant en leur maximum peuvent représenter raisonnablement la courbure des feuilles:

A partir des mesures des quatre paramètres ($X', Y', \alpha_0, \alpha_x$) et du modèle de courbure, nous découpons l'axe longitudinal de la feuille en portions caractérisées par leur appartenance à l'une des 10 classes d'angle définies. Pour chacune de ces portions, nous calculons la position et la longueur d'arc correspondant. Ces deux paramètres seront utilisés pour estimer la surface de limbe correspondante.

parabole 1: $y = a x^2 + b x + c$
 parabole 2: $y = a'x^2 + b'x + c'$

contraintes:

pentés aux extrémités:

$$b = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_0}$$

$$2a'x' + b' = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_x'}$$

passent par (0;0) et (x';y'):

$$c = 0$$

$$y' = a'x'^2 + b'x' + c'$$

continuité au maximum (x ; y)

$$a x^2 + b x + c = a'x'^2 + b'x' + c'$$

$$2 a x + b = 0$$

$$2 a'x' + b' = 0$$

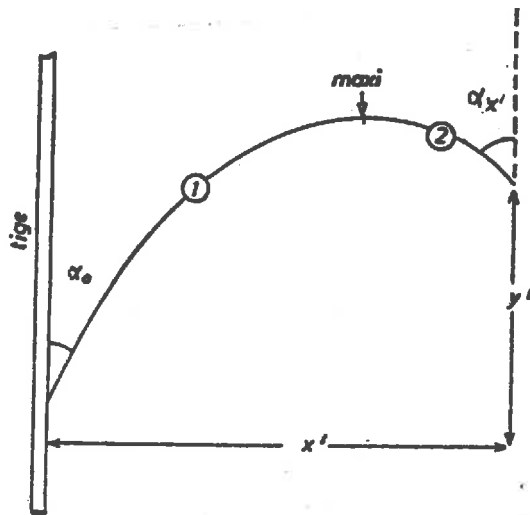


Figure 2.11: modèle simple de courbure de feuille:

- X' = distance horizontale du point d'insertion à l'extrémité distale de la feuille.
- Y' = distance verticale du point d'insertion à l'extrémité distale de la feuille.
- α_0 = angle d'insertion de la feuille sur la tige.
- α_x = angle déterminé par l'horizontale et la tangente à la feuille, au niveau de son extrémité distale.

2-1-2-3-2-2 Détermination de la forme du limbe

Varlet-Grancher (1980) et Prévot (1985) proposent de caractériser la forme de limbes de canne à sucre et de maïs par une relation parabolique entre la longueur et la largeur du limbe (figure 2.12).

Nous avons vérifié et calé ce modèle à partir de mesures effectuées en 1984 sur des essais variétaux de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages à Gréoux les bains. Trente feuilles terminales ont été prélevées au stade floraison. Sur chacune d'elles, nous avons mesuré la largeur tout les 2cm. Les résultats de l'ajustement au modèle sont présentés sur la figure 2.13.

Le coefficient de corrélation élevé de la régression ($r=0.985$ $n=308$) prouve que ce modèle représente assez fidèlement la forme des limbes de blé.

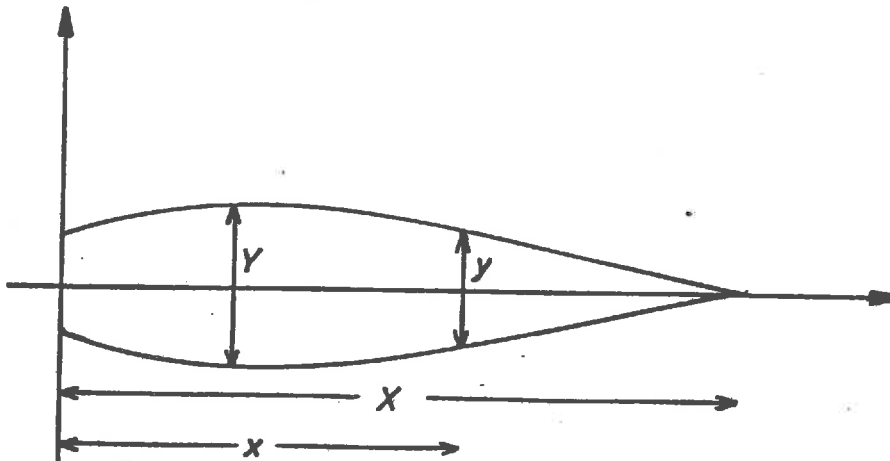


Figure 2.12: modèle de forme de limbe

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

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

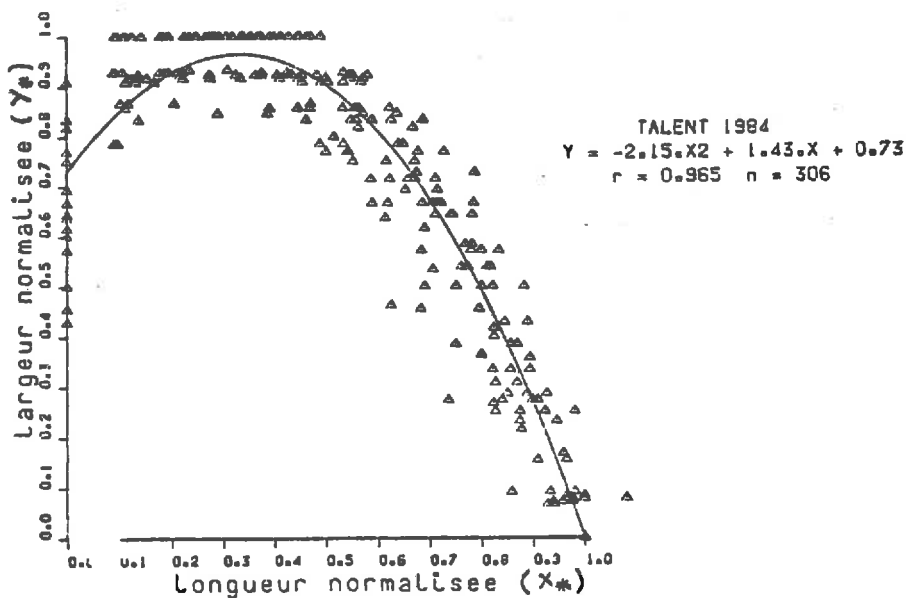


Figure 2.13: ajustement des données expérimentales à un modèle de forme parabolique.

Ce modèle utilise des grandeurs normalisées:

$$X_x = x/X = \text{longueur normalisée}$$

$$Y_x = y/Y = \text{largeur normalisée}$$

La surface totale étant la seule caractéristique du limbe à avoir été mesurée en 1985, il nous a fallu estimer pour chacune des feuilles les valeurs X et Y des longueurs et largeurs maximales du limbe. A partir du même jeu de données de 1984, nous avons établi les corrélations entre la surface totale du limbe, S, et ses longueurs et largeurs maximales (figure 2.14).

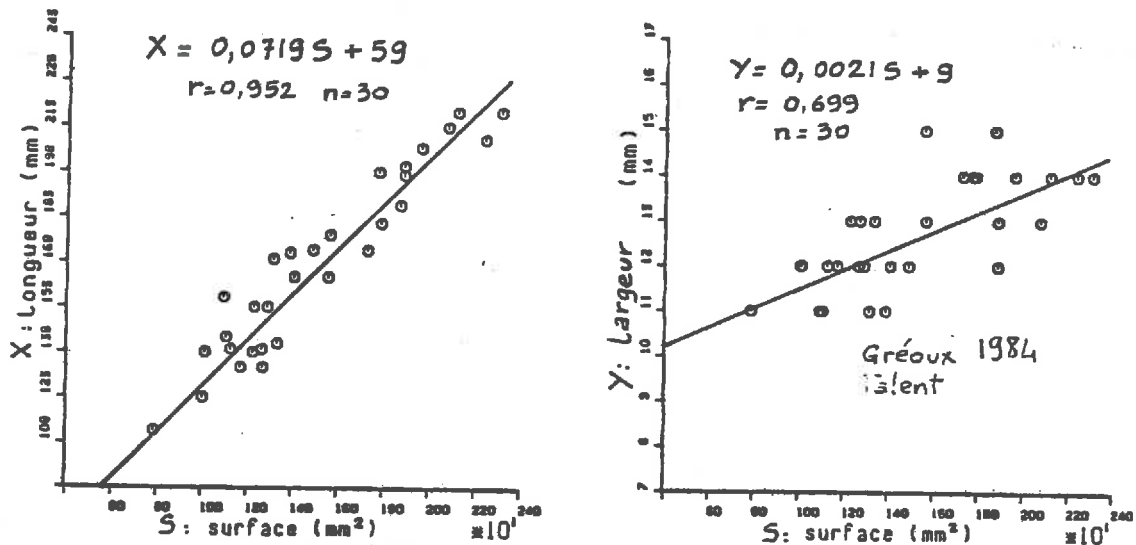


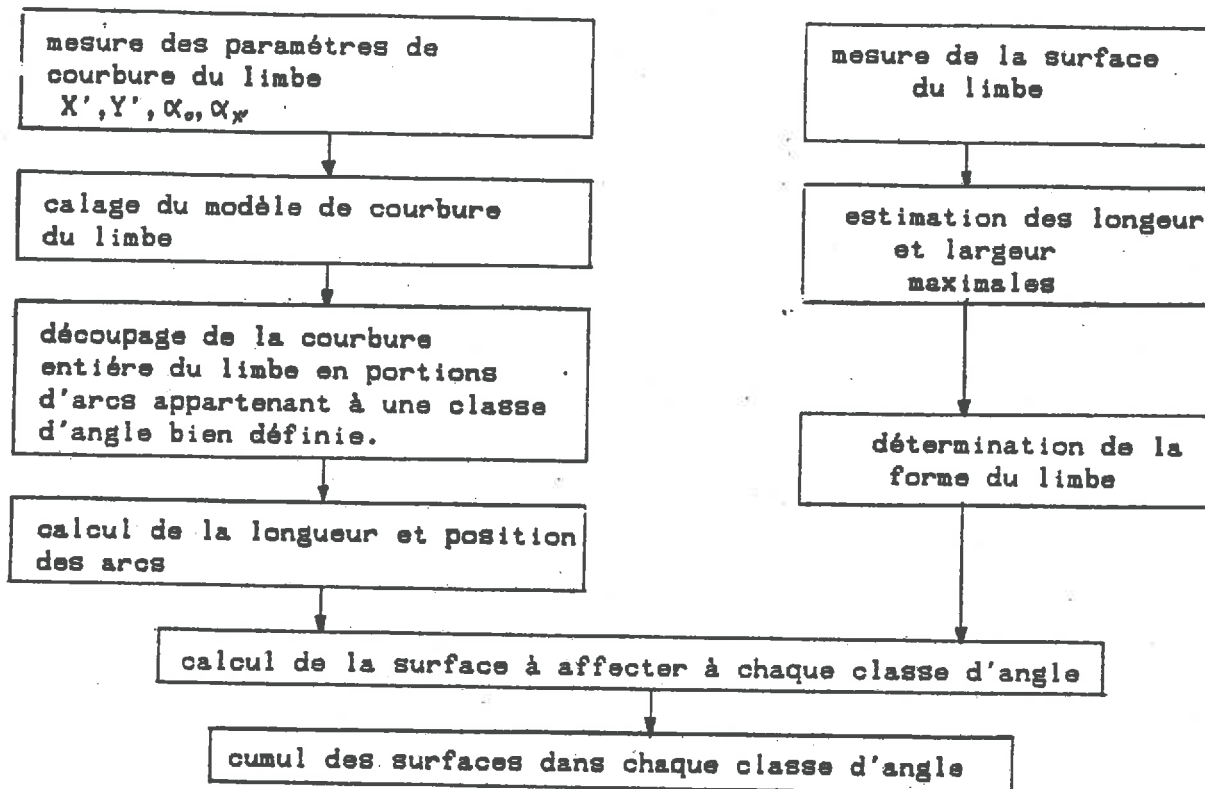
Figure 2.14: relations entre longueur ou largeur maximale du limbe et sa surface totale.

Ces différentes étapes, résumées dans l'organigramme ci-contre, nous permettent finalement de construire la fonction de distribution des angles foliaires dans le cas de limbes courbes.

La mesure des quatre paramètres $X', Y', \alpha_0, \alpha_x'$, et le calcul des courbures représentent une dépense en énergie assez importante.

Cette méthode très indirecte de reconstruction des angles foliaires est certainement très imprécise. Les distributions auxquelles on aboutit se rapprochent plus de données de type qualitatif que de véritables références quantitatives. Elles ont tout de même le mérite d'être déterminées objectivement.

Ces mesures nous autoriseront à comparer des variétés ou à détecter les grands changements de port foliaire au cours du cycle de développement de la culture.



Au terme de cette partie méthodologique, impliquant le plus souvent un travail très lourd pour une précision parfois médiocre, il est possible de décrire l'évolution des paramètres de structure des couverts de Blé étudiés.

La partie qui suit présentera ces résultats en essayant de les synthétiser en un modèle de forme d'évolution de la structure.

2-2 ESSAI DE MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT DE BLE

La plupart des modèles de réflectance de couverts végétaux utilisent une décomposition en strates horizontales à l'intérieur desquelles, les propriétés optiques et l'orientation des éléments sont parfaitement définis et considérés comme homogènes . Nous allons donc, dans un premier temps, déterminer les critères qui nous permettront de découper le couvert en strates. Nous essaierons ensuite de modéliser la forme de l'évolution des surfaces des éléments de chacune de ces strates.

2-2-1 Stratification du couvert

Nous nous intéresserons d'abord aux propriétés optiques des différents éléments du couvert en étudiant leur variabilité en fonction du type ou de la partie d'organe concernée, de son état et de sa position à l'intérieur du couvert. Nous essaierons de regrouper ces éléments en classes de propriétés optiques. Nous en déterminerons alors la répartition verticale. Nous intégrerons enfin le critère "orientation des éléments du couvert" pour parfaire cette stratification.

2-2-1-1 Propriétés optiques des éléments du couvert

Nous rappellerons dans un premier temps quelques caractéristiques générales des propriétés optiques des organes végétaux.

2-2-1-1-1 Les différents domaines spectraux

Trois domaines spectraux bien distincts permettent de comprendre l'influence de divers facteurs sur les propriétés optiques d'éléments végétaux (figure 2.15):

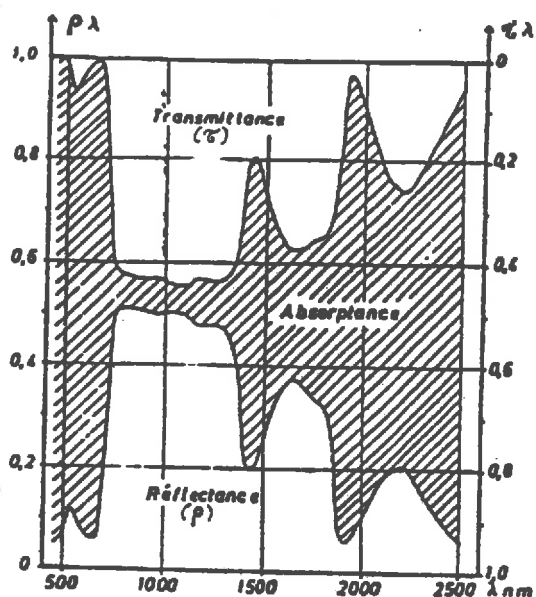


Figure 2.15: spectre typique de feuille verte
(d'après Guyot 1984)

- Le visible (400-700 nm): C'est le domaine de forte absorption par les différents pigments de l'appareil photosynthétique des plantes comme le montre la figure 2.15 (Gates 1970, Gausman et al. 1976):

* de 400 à 500 nm absorption par les carotènes, les xanthophylles et les chlorophylles

* de 600 à 700 nm absorption par les chlorophylles

Pour les organes en activité chlorophyllienne, la réflectance et la transmittance sont très faibles dans ce domaine, avec un maximum relatif dans le jaune vert (550 nm) dû à une moindre absorption par les pigments.

- Le proche infrarouge (700-1300 nm): C'est le plateau proche infrarouge caractérisé par une réflectance et une transmittance élevées et quasi constantes en fonction de la longueur d'onde. Il n'y a pratiquement pas d'absorption par les pigments ni par l'eau. Les discontinuités d'indice de réfraction au niveau des parois cellulaires engendrent des réflexions multiples à l'intérieur de la feuille et expliquent ainsi les hauts niveaux de réflectance et de transmittance. La structure interne du mésophylle et particulièrement l'importance des vides d'air (Sinclair 1973), l'épaisseur de la feuille (Gausman 1974) détermineront les propriétés optiques de la feuille dans ce domaine.

- Le moyen infrarouge (1300-2500 nm): l'absorption par l'eau est très forte dans ce domaine et conditionne les niveaux de réflectance et de transmittance de l'organe.

2-2-1-1-2 Evolution des propriétés optiques d'un organe en fonction de son état

Tout organe maintenant une activité chlorophyllienne est caractérisé par:

- la présence de pigments dans le domaine visible
- une teneur en eau relative à peu près constante lui permettant de conserver un niveau de turgescence suffisant pour que la structure interne de la feuille ne soit pas trop perturbée,

ses propriétés optiques ne varieront donc qu'assez peu au cours du temps.

Par contre, dès que la sénescence apparaît, la réflectance et la transmittance évoluent très rapidement selon un schéma décrit par Baret et Huet (1979), à partir de mesures sur la partie médiane de la face supérieure de la dernière feuille de la variété de blé Talent (figure 2.16).

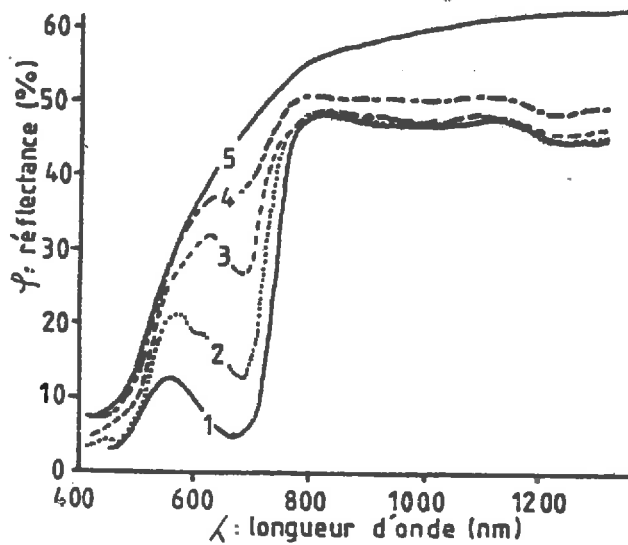


Figure 2.16: évolution des propriétés optiques du limbe de blé au cours de sa sénescence (d'après Baret et Huet 1979). Les chiffres portés sur les différents spectres correspondent à des états de sénescence croissants
 1: culture encore verte
 5: culture entièrement sénescente

La sénescence progresse de la manière suivante:

- Augmentation progressive de la réflectance dans le visible, débutant dans le rouge (désorganisation de la chlorophylle), puis se propageant au jaune-bleu (désorganisation des autres pigments).

- Augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge et le moyen infrarouge liée à la modification de la structure interne du mésophylle et au dessèchement de l'organe.

On peut remarquer que la réflectance des organes sénescents est très proche de celle du sol sec (figure 2.17).

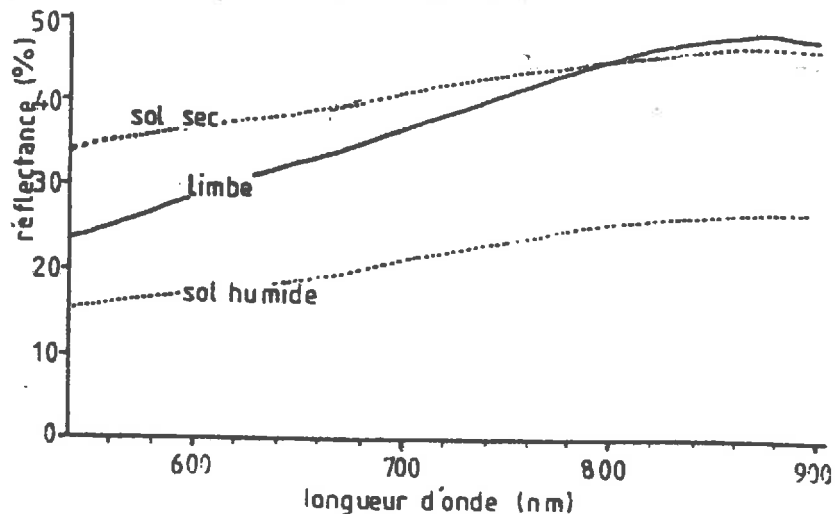


Figure 2.17: Réflectance d'organes entièrement sénescents et du sol nu de la parcelle expérimentale d'Avignon Montfavet.

2-2-1-1-3 Variabilité de la réflectance des feuilles

Nous nous intéresserons surtout à la réflectance des parties vertes qui représente le facteur le plus déterminant de la réponse spectrale des couverts végétaux.

2-2-1-1-3-1 Variabilité de la réflectance sur une même feuille

Nous avons comparé les niveaux de réflectance mesurés sur les deux faces et en différents points de pénultièmes feuilles entièrement vertes de chaque variété. Le plan d'expérience adopté nous a permis de réaliser une analyse

de variance à deux facteurs explicatifs et trois répétitions:

- La face de la feuille avec deux modalités:
face supérieure et face inférieure
- La position sur la feuille avec trois modalités:
pointe, milieu ou base.

Le tableau 2.5 montre les résultats de cette analyse:

Pour les trois variétés testées, la réflectance mesurée à la base de la feuille est supérieure à celle mesurée en son milieu ou à sa pointe. Ces différences, faibles en valeur absolue, ne sont pas toujours significatives. Elles peuvent être dues à des variations d'épaisseur ou de structure interne du mésophylle le long de l'axe longitudinal de la feuille.

VARIETE		TALENT			ARCANE			ARMINDA		
BANDE SPECTRALE		XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
POSITION	pointe	10.2	7.2	40.9	12.8	8.9	49.8	14.4	10.4	48.6
	milieu	10.8	7.3	44.8	13.2	8.8	51.0	14.7	10.9	48.6
	base	11.3	7.5	46.1	15.1	11.2	53.4	17.1	13.1	50.5
FACE	supérieure	10.8	7.5	44.1	12.4	8.3	51.4	13.2	9.5	49.3
	inférieure	10.7	7.3	43.8	15.0	10.9	51.5	17.6	13.5	44.2

Tableau 2.5: Variabilité de la réflectance pour la pénultième feuille; résultats de l'analyse de variance pratiquée sur les trois variétés. les traits verticaux relient les valeurs significativement différentes au seuil de 5%. XS1(500-590nm), XS2(620-680nm), XS3(790-890nm) correspondent aux bandes spectrales du satellite SPOT;

Les faces inférieures des feuilles des deux variétés à port dressé (Arcane et Arminda) sont significativement plus réfléchissantes que leurs faces supérieures dans le domaine visible. Ce phénomène habituel pour les dicotylédones, a rarement été noté pour les céréales. Il peut être dû à des différences de pigmentation entre faces. Ces différences, parfois importantes comme pour la variété Arminda, peuvent contribuer à modifier la réponse spectrale du couvert quand l'orientation de la visée, du soleil ou des feuilles varie.

2-2-1-1-3-2 Variabilité entre étages de feuilles.

Nous comparerons (tableau 2.6) les réflectances des 3 dernières feuilles sur 3 brins de la variété Talent. Les mesures sont réalisées au milieu de la face supérieure du limbe.

Les feuilles F2 et F3 ont des réflectances supérieures à celle des feuilles F1.

Les différences sont relativement faibles mais significatives dans le proche infrarouge. Elles sont liées à l'âge des feuilles et peuvent être dûes à des variations d'épaisseur ou de structure du mésophylle.

BANDES SPECTRALES	XS1	XS2	XS3
F1	10.8	6.9	44.0
F2	10.8	7.4	45.0
F3	10.8	7.6	46.1

Tableau 2.6: comparaison des réflectances des 3 derniers étages de feuilles. Les traits verticaux relient les valeurs significativement différentes au risque de 5%.

2-2-1-1-3 propriétés optiques des tiges et des épis

Des raisons pratiques liées à la dimension et la géométrie des tiges et des épis ne nous ont pas permis de mesurer leurs propriétés optiques. Nous utiliserons les résultats de Lemaster et Chance (1980).

Les tiges ont des niveaux de réflectance supérieurs à ceux des feuilles et des épis. Les épis ont des réflectances équivalentes à celles des feuilles dans le visible. Par contre, dans le proche infrarouge, ils sont plus réfléchissants que les limbes (figure 2.18).

Mais la particularité la plus importante des tiges et des épis est leur transmittance nulle du fait de leur épaisseur importante.

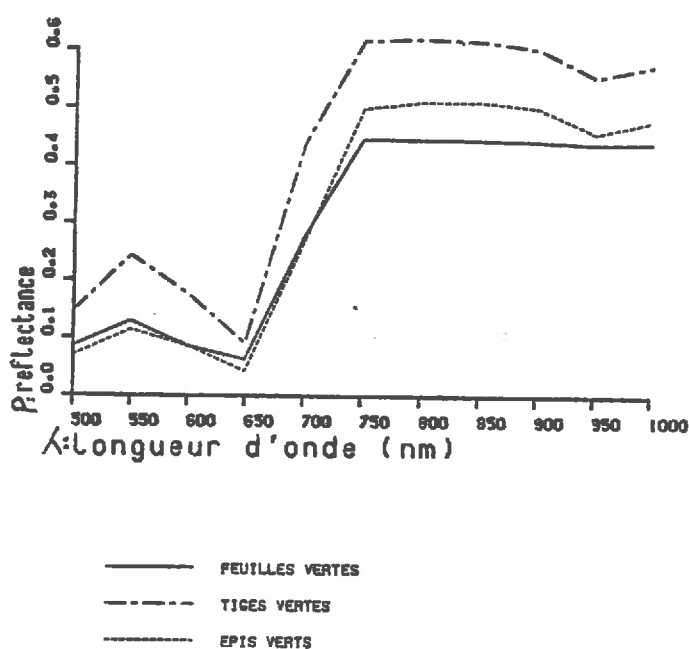


Figure 2.18: Comparaison des réflectances des feuilles, des tiges et des épis à l'état vert (d'après Chance et Lemaster 1980)

Ce paragraphe montre qu'il existe des variations de propriétés optiques entre feuilles ou sur une même feuille, en fonction de la position de la mesure, pour un état de verdure donné. Elles sont malgré tout relativement faibles comparées à celles observées lors des processus de sénescence surtout dans le domaine visible.

Il existe par contre des différences importantes entre organes, essentiellement au niveau de la transmittance.

IL est donc possible de regrouper l'ensemble des organes d'une culture en trois grandes catégories:

- Les feuilles vertes. Nous négligerons les différences constatées entre les deux faces du limbe.
- les tiges et les épis verts caractérisés par une transmittance nulle
- Les organes sénescents dont les propriétés optiques sont assez proches de celles du sol (dans le visible et le proche infrarouge).

Nous allons à présent rechercher comment sont répartis les éléments verts et sénescents à l'intérieur du couvert.

2-2-1-2 Répartition verticale des éléments verts et sénescents

Nous étudierons séparément les feuilles et les épis.

2-2-1-2-1 Les feuilles

Nos mesures de hauteur d'insertion, d'ordre et de verdeur des feuilles nous permettent de situer verticalement les différents étages foliaires. En utilisant comme au chapitre 2-1-2-1-1 le seuil de 80% de surface verte pour distinguer les étages foliaires verts des étages sénescents (figure 2.19), nous pouvons suivre la progression de la sénescence à l'intérieur du couvert:

Les étages de feuilles sénescents sont toujours situés à la base de la culture.

La sénescence monte avec une allure exponentielle jusqu'aux derniers étages foliaires.

Nous effectuerons donc une première stratification en distinguant:

- les feuilles sénescents à la base du couvert
- les feuilles vertes au sommet

L'épaisseur respective de chacune de ces strates évoluera au cours du développement de la culture.

2-2-1-2-2 Les tiges et les épis

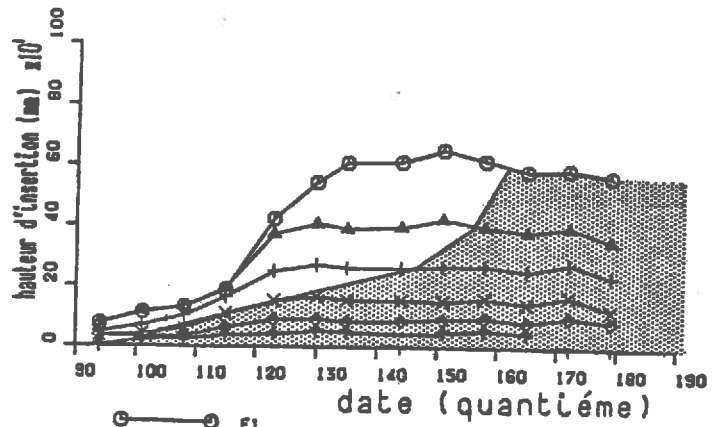
La sénescence des tiges progresse aussi de façon basifuge. Il est intéressant de comparer la progression de la sénescence de ces organes à celle des feuilles.

Nous avons calculé la hauteur théorique correspondant à la limite entre la partie sénescente, à la base de la tige, et la partie verte, au dessus. Ce calcul a été effectué en assimilant les tiges à des cylindres et en utilisant nos mesures de hauteur de tige et de proportion de surface verte.

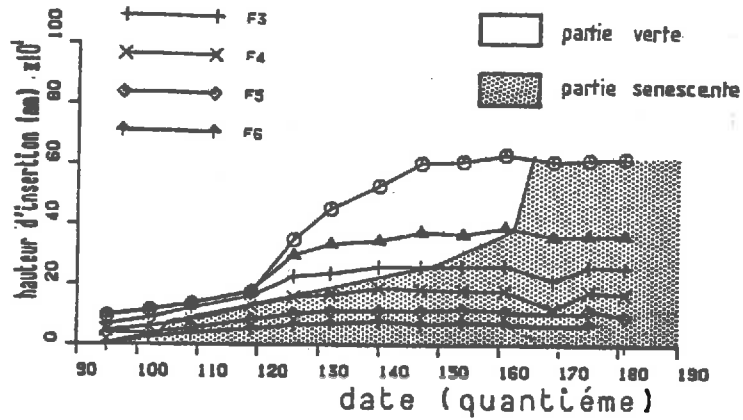
La figure 2.20 montre que la limite entre partie verte et partie sénescente des tiges est très proche de celle des feuilles jusqu'au stade mi-montaison. Passé ce stade, les différences sont au maximum de l'ordre de 30 à 40 cm. L'hypothèse simplificatrice de cylindricité des tiges sous-estime cette différence. Les tiges sont plus proches du tronc de cône dont le petit diamètre se situe au sommet, que du cylindre. De plus, la transition sur une tige entre partie verte et partie sénescente est très progressive. Il est probable qu'en appliquant ici le critère "plus de 80% de surface verte", cette différence devrait augmenter.

Avignon 1985

Talent



Arcane



Arminda

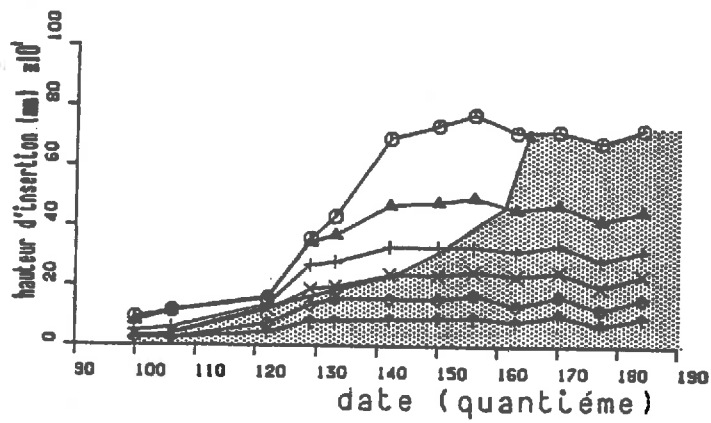
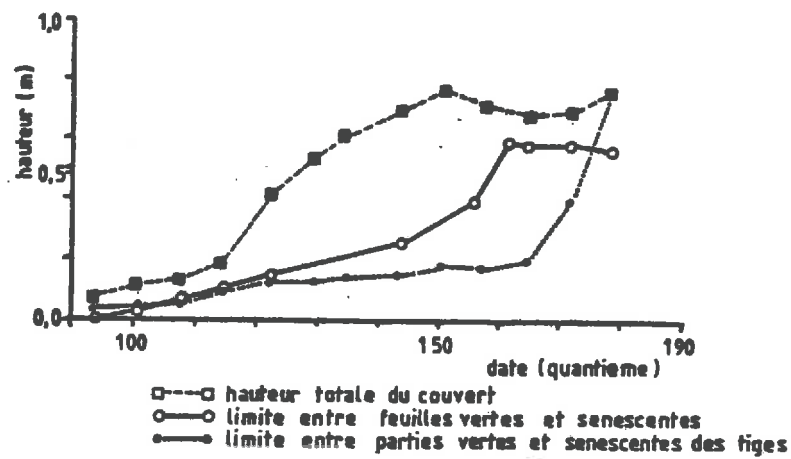


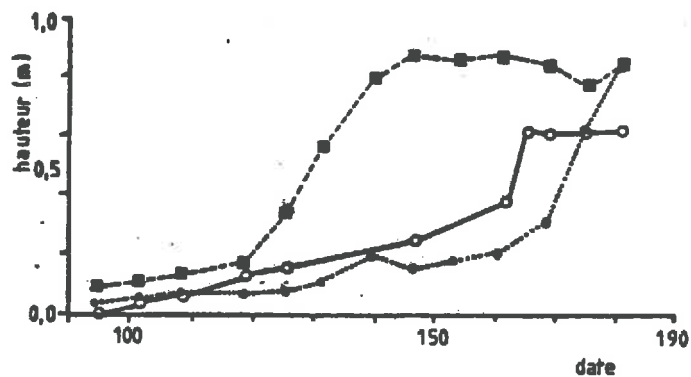
Figure 2.19: Evolution des hauteurs d'insertion des différents étages foliaires et de leur état de verdeur.

Avignon 1985

Talent



Arcane



Arminda

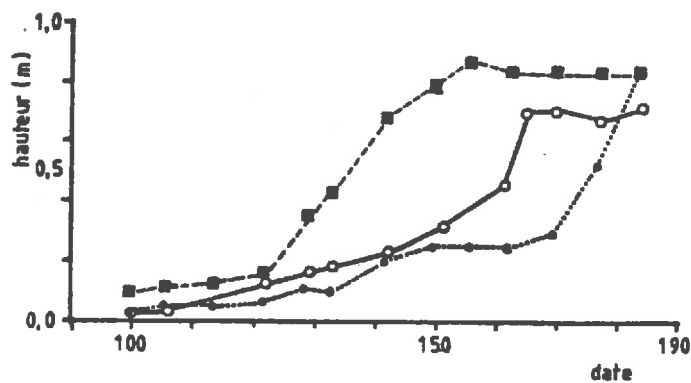


Figure 2.20: Evolution de la hauteur limite entre parties vertes et parties sènescentes des tiges et de cette hauteur limite pour les feuilles

Il existe donc un décalage réel entre la sénescence des tiges et celle des limbes de feuille. Il traduit la progression de la sénescence au niveau d'une feuille isolée qui débute à l'extrémité distale du limbe et se termine à la base de la gaine.

Par souci de simplification, nous considérerons tout de même la culture comme étant constituée de deux strates distinctes:

- Une strate d'éléments sénescents à la base de la culture. Elle comprendrait alors une fraction de tige encore verte représentant au maximum une surface de $0,7\text{m}^2$ par m^2 de sol. Nous intégrerons pourtant cette surface verte de tiges à la strate supérieure. Cette réaffectation ne devrait pas beaucoup perturber la réponse spectrale du couvert compte tenu de l'orientation verticale de ces éléments et du fait qu'ils sont surmontés par une strate verte.

- Une strate verte au sommet de la culture. Elle comprendra en particulier les tiges et les épis.

Après avoir stratifié le couvert à partir du critère "propriétés optiques", nous allons maintenant faire intervenir l'orientation des éléments du couvert.

2-2-1-3 Orientation des éléments du couvert

Les 3 dernières feuilles s'écartent progressivement de la tige au cours du développement de la culture (figure 2.21). On note des comportements différents suivant la variété, mais aussi suivant l'étage de feuille considéré. En particulier la dernière feuille a une amplitude de débattement plus importante.

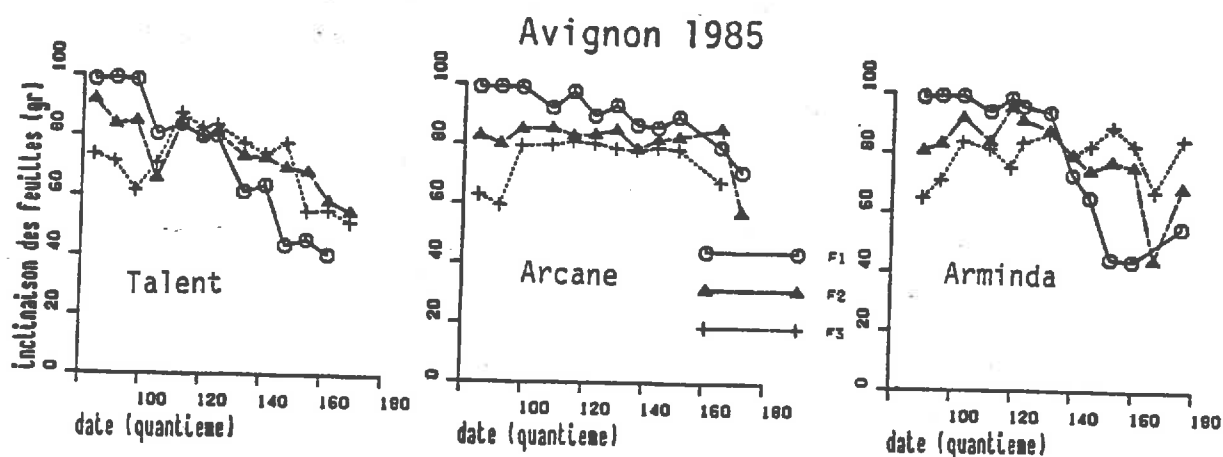


Figure 2.21: Evolution des angles d'insertion des trois dernières feuilles; 0: feuille horizontale; 100: feuille verticale

L'angle d'insertion des feuilles ne semble pas en relation directe avec leur état de verdure ou leur teneur en eau. Ces observations confirment celles faites par Baret et Huet (1979) et Huet (1983).

L'angle d'insertion, facile à déterminer, ne définit qu'une partie de l'orientation des éléments, particulièrement dans le cas des feuilles courbes. Badwhar et al. (1984) montrent qu'il est préférable d'utiliser la fonction de distribution des angles foliaires. Nous les avons calculées en séparant les feuilles vertes des feuilles sénescentes, mais en regroupant les différents étages foliaires et dates de prélèvement. Ce regroupement a été réalisé en affectant des poids identiques aux différents étages et dates de prélèvement. Bien qu'il existe sans doute des différences significatives d'orientation des feuilles entre dates ou entre étages foliaires comme en attestent les angles d'insertion des feuilles, ce regroupement est nécessaire du fait de l'imprécision de la méthode de détermination de ces fonctions de distribution.

La figure 2.22 montre que dans ces conditions, les fonctions de distribution des feuilles vertes sont très proches de celles des feuilles sénescentes. La variabilité d'orientation des limbes entre étages de feuilles et entre dates de mesures, pour un état donné, compense l'éventuelle différence entre état vert et état sénescent.

Les différences variétales notées au niveau de l'angle d'insertion se retrouvent ici :

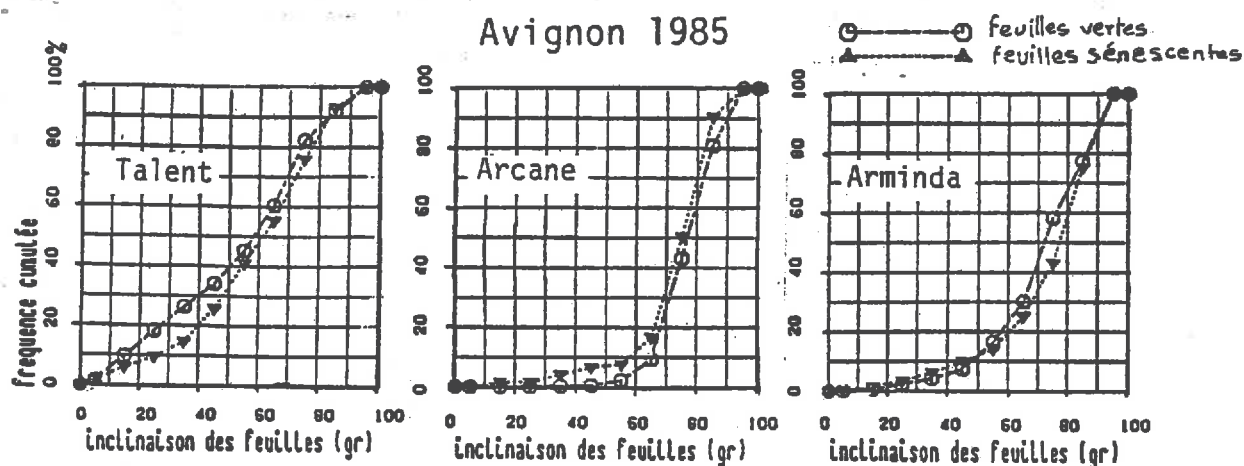


Figure 2.22: fonction de distribution des angles des feuilles.
 0: feuilles horizontales; 100 feuilles verticales

- Talent dont les feuilles présentent une courbure marquée possède une distribution des angles foliaires intermédiaire entre la distribution uniforme et la distribution plagiophile. Les feuilles sénescentes ont tendance à être légèrement plus érectophiles que les feuilles vertes bien que l'angle d'insertion diminue: La sénescence du limbe accroît sa courbure et fait pendre son extrémité distale vers le sol. Il faut rappeler que le mode de calcul de la fonction de distribution des angles foliaires de cette variété est différent de celui utilisé pour les deux autres. L'angle moyen d'inclinaison des feuilles vertes est de 51°.

- Arcane est la variété la plus érectophile. Ses feuilles sénescentes ont tendance à être légèrement plus planophiles, ce que confirme l'évolution des angles d'insertion. L'angle d'inclinaison moyen des feuilles vertes est de 71°.
- Arminda possède une distribution de type sphérique. Les distributions des angles des feuilles sénescentes sont globalement très proches de celles des feuilles vertes. L'angle d'inclinaison moyen des feuilles vertes est de 67°.

Les fonctions de distribution des angles des éléments du couvert doivent aussi tenir compte des tiges et des épis ainsi que des talles régressées non analysées mais supposées présenter une distribution uniforme.

Nous avons observé comme Baret et Huet (1979) et Huet (1983) que les épis ont tendance à se courber pendant la phase de maturation de la culture.

La contribution croissante des tiges et des épis à la surface totale de la culture (figure 2.6) compense une partie de l'abaissement progressif des feuilles vers le sol en maintenant ainsi une fonction de distribution à tendance érectophile pour la strate verte.

L'ensemble de ces observations nous autorise à découper le couvert en trois couches horizontales de caractéristiques bien différentes:

- une strate d'épis et de cols d'épis verts au sommet de la culture d'orientation verticale et de transmittance nulle.
- une strate de feuilles et de tiges vertes. L'orientation des éléments de cette strate est en grande partie déterminée par celle des feuilles
- une strate d'éléments sénescents à sa base.

Les fonctions de distribution des angles des éléments de ces trois strates seront globalement supposées constantes au cours du temps. Cette hypothèse n'est valable qu'en première approximation et à partir du stade début montaison.

Les épaisseurs et les surfaces des éléments de ces strates évoluent au cours du développement de la culture. Il nous reste donc à décrire l'évolution des surfaces développées par la culture dans chacune de ces strates, pour achever notre modélisation de la forme de l'évolution de la structure d'un couvert de blé.

2-2-2 MODELISATION DE L'EVOLUTION DES SURFACES DES FEUILLES, DES TIGES ET DE DES EPIS

Par leur importance et leur orientation, les surfaces foliaires contribuent beaucoup plus à la réponse radiométrique que l'ensemble "tiges + épis". Nous établirons notre modèle en essayant de décrire en premier lieu l'évolution de ces surfaces foliaires. A partir des paramètres de cette évolution, nous tenterons ensuite de déduire ceux relatifs aux tiges et aux épis. Pour cela, nous analyserons les synchronismes et les similitudes entre la croissance ou la sénescence de ces deux types d'organes.

2-2-2-1 Modèle d'évolution des surfaces foliaires.

Nous cherchons à décrire, le plus fidèlement possible, la forme de l'évolution des surfaces foliaires et de leur état. Nous distinguerons, comme le chapitre précédent en a montré la nécessité:

- les surfaces foliaires vertes
- les surfaces foliaires sénescentes.

Cette dualité de l'état des surfaces foliaires n'est qu'une caricature de la réalité: en effet, le passage de l'état vert à l'état sénescence étant continu, on peut trouver une infinité d'états intermédiaires. Mais la vitesse de passage d'un état à l'autre pour un organe donné, étant assez rapide, nous verrons qu'il est possible de négliger ces états transitoires.

Notre modélisation s'appuiera sur la dynamique d'évolution de l'état des surfaces: Nous pouvons écrire en particulier l'équation de conservation de la biomasse sèche des feuilles produite à tout instant (figure 2.23):

$$MS_t = MS_v + MS_s + MS_d$$

MS_t = biomasse sèche totale de l'ensemble des feuilles

MS_v = biomasse sèche des feuilles vertes

MS_s = biomasse sèche des feuilles sénescentes (non vertes)

MS_d = différence de biomasse sèche due à des chutes d'organes (feuilles) ou des transferts entre organes.

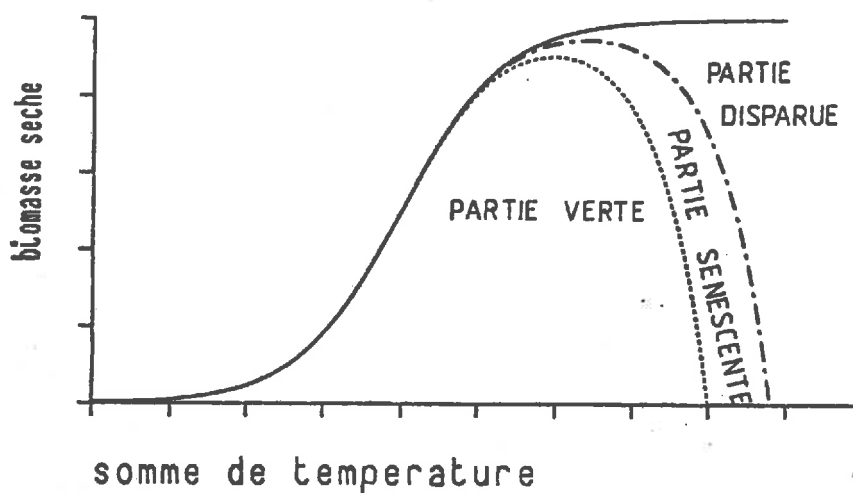


Figure 2.23: Schéma d'évolution des biomasses foliaires et de leurs différents états

Ce type de relation ne peut raisonnablement s'appliquer qu'à la biomasse sèche. Il n'y a en effet pas conservation de la surface "produite", car nous verrons qu'au cours de la sénescence, la feuille rétrécit. Il nous faudra donc estimer la surface correspondant aux biomasses sèches des limbes verts et sénescents:

2-2-2-1-1 Relation entre biomasse sèche et surface des feuilles.

Aase (1978), Kimes et al. (1981), Daughtry et Hollinger (1984) et Chanda et al. (1985) montrent que la biomasse sèche et la surface des feuilles vertes de différentes céréales sont linéairement corrélées. Ces relations servent en général, à estimer indirectement l'indice foliaire des cultures. Notre expérimentation nous a permis de vérifier et de caler ces relations sur nos cultures. Nous traiterons successivement le cas des feuilles vertes puis celui des feuilles sénescents.

2-2-2-1-1-1 Les feuilles vertes.

Nous les avons définies précédemment comme étant celles dont la partie verte est supérieure à 80% de la surface totale. Nos mesures reportées à la figure 2.24 montre qu'il existe une bonne relation entre la biomasse sèche et la surface des limbes. Leur allure globale nous oriente vers un modèle linéaire. On remarque malgré tout que, dans la zone des petites feuilles, le nuage des points expérimentaux se courbe pour passer par l'origine.

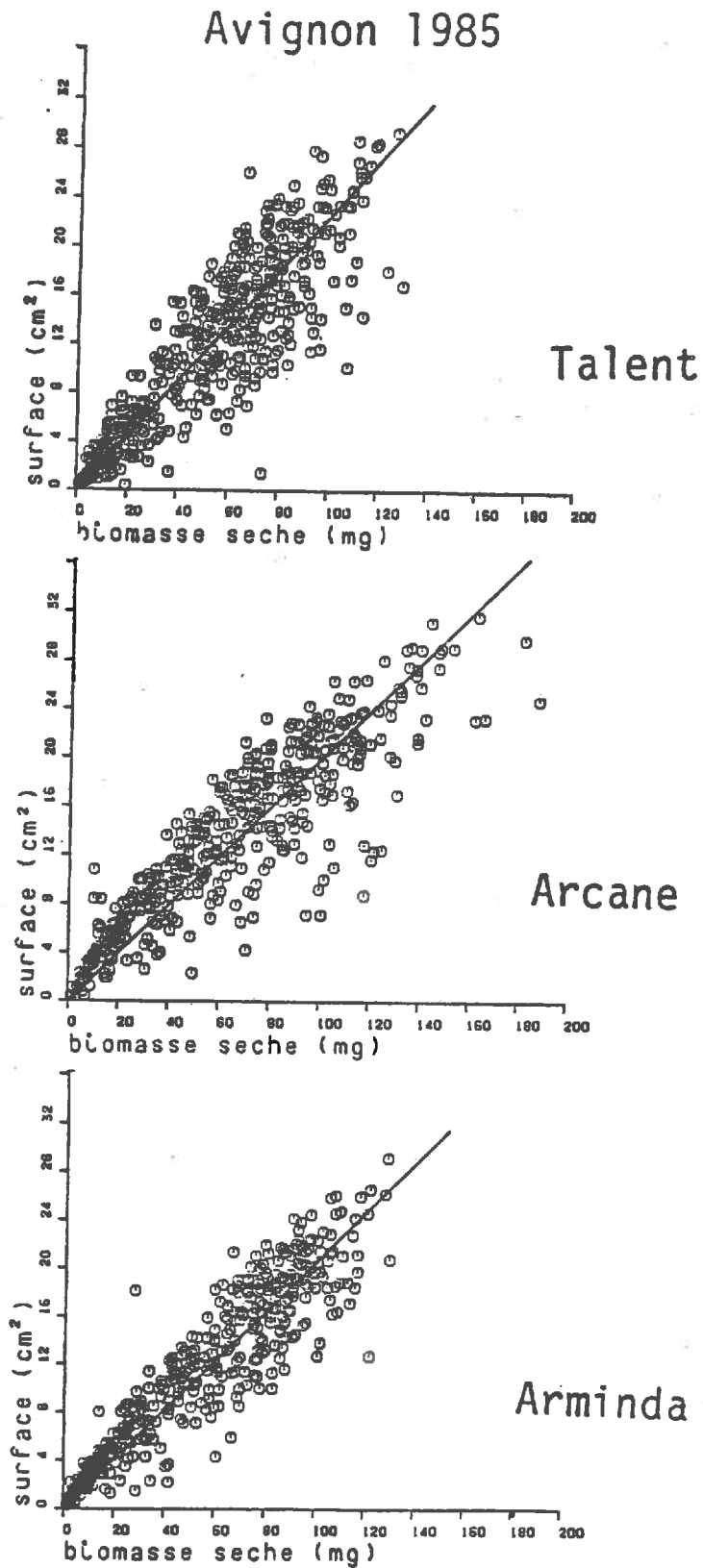


Figure 2.24: Relation entre la surface et la biomasse sèche des feuilles vertes.

Pour simplifier, nous n'approfondirons pas cette question, et nous nous contenterons du modèle linéaire passant par l'origine:

$$S = k \cdot MS$$

S = surface du limbe
MS = matière sèche du limbe
k = surface spécifique

Nous appellerons la constante k, surface spécifique du limbe (Evans 1972). Nous avons estimé (tableau.2.7) les valeurs de k, en utilisant la régression passant par l'origine:

	TALENT	ARCANE	ARMINDA
surface spécifique estimée (k en $\text{cm}^2.\text{mg}^{-1}$)	0.219	0.197	0.208
écart type de k	0.002	0.002	0.001
Coeff.corrélation	0.983	0.972	0.980
Nb. d'individus	1080	999	984

Tableau 2.7: Valeurs de la surface spécifique des limbes verts en utilisant la régression linéaire passant par l'origine.

Les surfaces spécifiques de ces trois variétés, bien que significativement différentes (au risque de 5%) sont relativement proches. Leur valeur moyenne est d'ailleurs très voisine de celle obtenue par Aase (1978):

$$0,202 \text{ cm}^2.\text{mg}^{-1}.$$

Pour un niveau de biomasse sèche donné, le nuage de points expérimentaux est plus dense et semble borné vers les fortes valeurs de surface. Cette observation permettrait de définir une enveloppe supérieure du nuage de points: Elle correspondrait à une surface spécifique potentielle.

L'état hydrique du limbe semble être un des principaux responsables des variations de la surface spécifique par rapport à son potentiel: La comparaison statistique des surfaces spécifiques moyennes des limbes verts des 2 dernières feuilles de nos trois variétés montre une différence significative (tableau 2.8) entre des conditions hydriques limitantes et non limitantes.

VARIETES	TALENT		ARCANE		ARMINDA	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
surface spécifique k	0.194	0.237	0.173	0.188	0.177	0.191
écart type de k	0.006	0.005	0.005	0.004	0.004	0.007
nombre d'observations	74	84	109	74	140	52
date de la mesure (quantième)	123	130	119	128	122	129

Tableau 2.8: Effet de l'état hydrique des plantes sur la surface spécifique moyenne des limbes verts des deux derniers étages de feuilles.

- (1) conditions hydriques limitantes
(avant la période pluvieuse débutant le 128)
(2) état hydrique non limitant (après le 128)

Cette "contraction" apparente de la surface de feuilles soumises à une contrainte hydrique est due à une réaction au potentiel hydrique ou à la turgescence du limbe dont l'effet sans doute le plus important est de provoquer l'enroulement des feuilles. Ce phénomène rend le planimétrage délicat. Il nous arrive ainsi de sous-estimer la surface réelle en planimétrant un limbe en partie plié, comme cela a été noté par Huet (1983).

2-2-2-1-1-2 Les feuilles sénescentes

Ce sont les feuilles dont la proportion de surface verte est inférieure à 80% (chapitre 2-1-2-1-1). L'influence de la turgescence de la feuille sur sa surface spécifique, nous a amené à limiter notre étude aux feuilles à surface entièrement sénescentes, et dont la teneur en eau est inférieure à 50%. Le tableau 2.9 montre des différences très importantes de surface spécifique des limbes suivant la définition de la sénescence retenue.

Les états intermédiaires entre feuilles vertes et feuilles entièrement sénescentes, ne représentent que 15% de l'ensemble des feuilles analysées sur tout le cycle de la végétation (tableau 2.9).

Avignon 1985

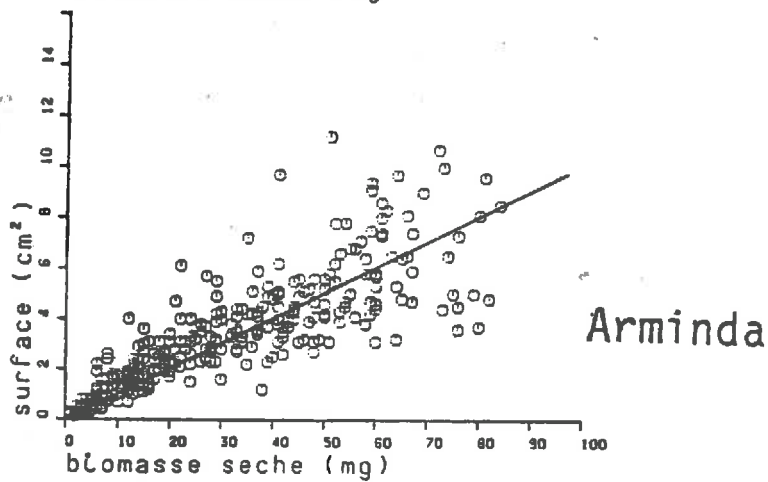
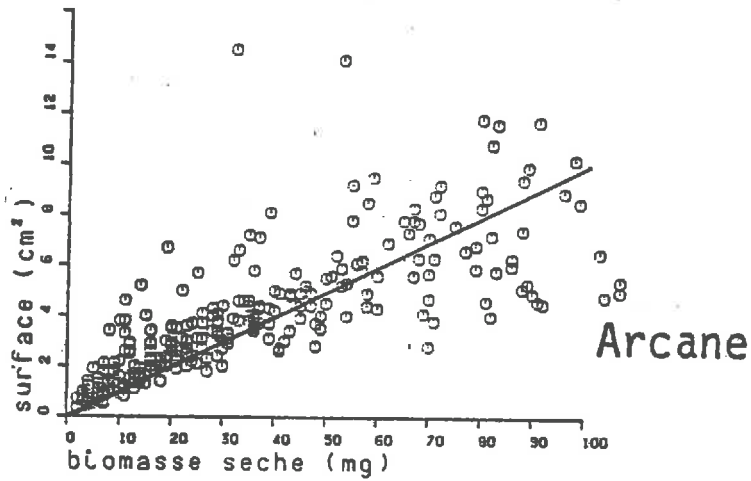
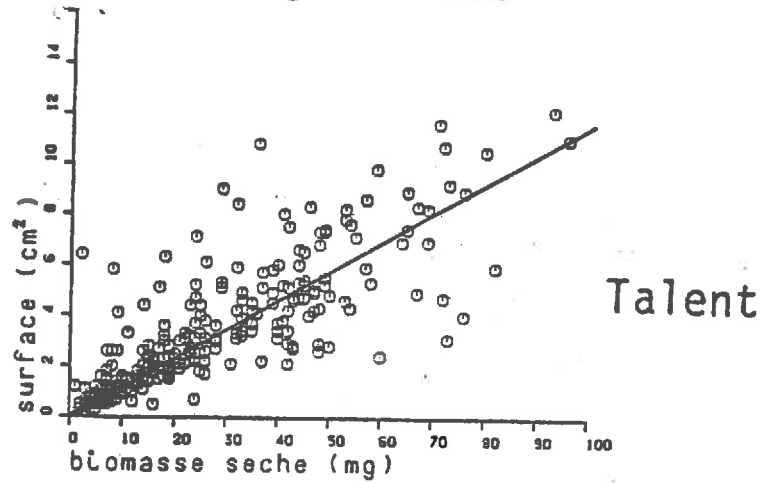


Figure 2.25: Relation entre la surface et la biomasse sèche des feuilles entièrement sénescentes.

VARIETES	TALENT		ARCANE		ARMINDA	
	F.S.	F.E.S.	F.S.	F.E.S.	F.S.	F.E.S.
DEFINITION DE LA SENESCENCE (*)						
surface spécifique moyenne (k)	0.153	0.115	0.128	0.098	0.138	0.102
écart type de k	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
coefficient de corrélation	0.901	0.823	0.878	0.871	0.915	0.948
nombre d'individus	902	832	871	597	1188	880
% du nombre total d'individus	46	32	47	32	55	40
% d'états intermédiaires	14		15		15	

Tableau 2.3: Valeurs de la surface spécifique des limbes sénescents
(utilisation de la régression linéaire passant par l'origine)

- (*) F.S. : feuilles ayant une surface verte inférieure à 80% de leur surface totale.
F.E.S. : feuilles n'ayant plus de surface verte et d'humidité relative inférieure à 50%.

La surface spécifique des feuilles complètement sénescentes est beaucoup plus faible que celle des feuilles vertes (tableau 2.7): elle diminue d'environ la moitié ! Il n'y a donc pas conservation de la surface produite.

Les différences variétales de surface spécifique des feuilles (tableau 2.9 et figure 2.25) sont ici encore significatives. La hiérarchie notée pour les limbes verts est conservée: Ces différences variétales sont liées à des particularités de la structure anatomique des feuilles ou de leur épaisseur moyenne.

Il est donc possible de décrire les surfaces foliaires:

- en différenciant deux états contrastés: les feuilles vertes et les feuilles complètement sénescentes.

- en utilisant la notion de surface spécifique du limbe, de valeur relativement peu variable suivant les variétés et pour un état donné.

Il est ainsi possible d'estimer simplement l'évolution des surfaces foliaires, à partir de celle des biomasses foliaires. Au cours de la partie qui va suivre, nous essaierons donc de modéliser la forme de l'évolution des biomasses foliaires.

2-2-2-1-2 Modélisation de l'évolution des biomasses foliaires.

Nous rappelons que notre objectif est d'obtenir un modèle de forme de l'évolution des surfaces foliaires donc des biomasses foliaires. Nous utiliserons des modèles déterministes classiques pour décrire ces phénomènes de croissance, de sénescence et de mort d'organes. Nous nous intéresserons d'abord au problèmes de choix et d'utilisation de tels modèles.

2-2-2-1-2-1 Modèles utilisés

Avant d'entrer dans la description des types de modèles que nous utiliserons, il est nécessaire d'aborder le problème du choix de l'échelle de temps.

2-2-2-1-2-1-1 Choix de l'échelle de temps.

Durand (1987), Russelle et al. (1984) montrent que la vitesse de croissance du blé est très dépendante de la température. En particulier, à partir d'un certain seuil de température, on peut considérer que la vitesse de croissance est sensiblement proportionnelle aux températures moyennes journalières. Il semble que ce seuil, température en dessous de laquelle la croissance devient négligeable, dépende du stade de développement et de l'organe considéré (Weir et al. 1984). Ainsi que Ritchie et Otter (1985) pour le modèle CERES, nous adopterons une échelle de temps proportionnelle aux sommes de températures moyennes journalières positives (seuil ou base: 0°C). Cette échelle doit dans nos conditions aboutir à des résultats relativement proches de ceux du modèle ARCWHEAT (Weir et al. 1984) qui utilisent la base 1°C jusqu'à la floraison et 9°C ensuite. Passée la floraison, les températures moyennes journalières inférieures à 9°C sont en effet exceptionnelles.

2-2-2-1-2-1-2 Les modèles mathématiques utilisés.

Nous voulons décrire les différents phénomènes de croissance, sénescence ou mort d'organes observés, de telle manière que les paramètres de l'ajustement aux données expérimentales aient une signification biologique précise. Nous préférons utiliser des modèles déterministes plutôt que de simples ajustements polynomiaux, nécessitant de surcroît un nombre de paramètres plus important, et dont le domaine de validité est plus réduit.

Ces modèles sont basés sur une équation différentielle traduisant l'évolution de la vitesse de croissance (dy/dT) en fonction de la taille actuelle (y) de l'organe considéré (Lebreton et Miller 1982):

$$\frac{dy}{dT} = f(y)$$

On peut décomposer l'équation différentielle en deux termes:

- une fonction de croissance stricte correspondant à la phase où les phénomènes de compétition ou de limitation par l'environnement sont faibles. C'est la phase de multiplication cellulaire ou d'élongation intense aboutissant le plus souvent à une croissance exponentielle.

- une fonction de freinage de la croissance correspondant à un état de développement suffisant pour que la limitation par le milieu soit importante. La croissance tend alors vers une valeur asymptotique que l'on peut considérer comme un potentiel de croissance fixé principalement par l'environnement.

L'intégration de la fonction différentielle et les conditions aux limites fournissent le modèle complet:

$$y = f(T)$$

Le tableau 2.10 donne les caractéristiques des principaux modèles que nous utiliserons.

Modèle	Equation y =	Equation différentielle $\frac{dy}{dT}$		Origine y (0)	Asymptote y (+∞)	Point d'inflexion			Nombre de paramètres
		Fonction de croissance	Fonction de freinage			T	y (T)	$\frac{dy}{dT}$	
Exponentiel	$y_0 e^{aT}$	ay	0	y_0	+ -	-	-	-	2
Monomoléculaire	$K - (K - y_0) e^{-aT}$	aK	ay	y_0	K	-	-	-	3
Logistique	$\frac{K}{1 + e^{-\frac{a}{K}(T - T_i)}}$	ay	$\frac{a y^2}{K}$	$\frac{K}{1 + e^{aT_i}}$	K	T_i	$\frac{K}{2}$	$\frac{aK}{4}$	3
Gompertz	$K e^{-\frac{K}{a} e^{-aT}}$	ay log K	ay lg y	0	K	$\frac{1}{a} \lg \left(\frac{K}{a} \right)$	$\frac{K}{e}$	$\frac{aK}{e}$	3
Logistique généralisée	$\frac{K}{(1 + ne^{-\frac{a}{b}(T - T_i)})^n}$	$\frac{1}{nb} y$	$\frac{1}{nb} \left(\frac{y}{K} \right)^n$	$\frac{K}{(1 + ne^{-\frac{a}{b} T_i})^n}$	K	T_i	$\frac{K}{(1+n)^{1/n}}$	$\frac{K}{b} \frac{1}{(1+n)^{1/n}}$	4

Tableau 2. 10: Principaux modèles déterministes de croissance basés sur des équations différentielles (d'après Debouche 1979).

Le modèle logistique généralisé est intéressant car, suivant la valeur de son paramètre supplémentaire (n) fixant la position du point d'inflexion, il permet de simuler les quatre premiers modèles. Il pose néanmoins de délicats problèmes d'ajustement quand les données sont peu nombreuses ou entourées d'un intervalle de confiance important (Lebreton et Millier 1982). Nous éviterons donc d'utiliser ce modèle compte tenu de nos données expérimentales.

Les modèles de type exponentiel, monomoléculaire ou de Gompertz sont intéressants car ils sont facilement linéarisables. Les ajustements peuvent alors être réalisés avec la simple régression linéaire.

Le modèle logistique nécessite par contre d'utiliser un algorithme d'ajustement non linéaire. Nous nous sommes alors servi de programmes issus de la bibliothèque statistique Amance (Bachacou et al. 1981). Ils calculent les estimées asymptotiques des écarts types des paramètres de l'ajustement ainsi que des intervalles de confiance de chaque valeur estimée (Tomassone et al. 1982). Ils donnent aussi la matrice de corrélation des paramètres de l'ajustement et la distribution des résidus. Ces deux derniers éléments sont très utiles pour juger du bon choix de la forme d'un modèle. Mais dans le cas où l'on ne dispose que de peu de points et que ces points sont associés à des intervalles de confiance importants, on peut obtenir des coefficients de corrélation élevés entre les paramètres d'ajustement du modèle. Dans un tel cas, la forme du modèle devra être connue à priori, sinon nous choisirons le modèle le plus simple utilisant le moins de paramètres.

Ces remarques préliminaires étant faites, nous allons essayer de décrire l'évolution des surfaces foliaires avec ce type de modèle.

Nous décomposerons cette étude en reprenant les termes de l'équation de conservation de la biomasse sèche des feuilles:

$$MS_t = MS_v + MS_g + MS_d \quad (1)$$

2-2-2-1-2-2 Evolution de la biomasse foliaire totale.

Nous définirons la biomasse foliaire totale sèche, MS_t à un instant T comme étant la valeur maximale de matière sèche totale des feuilles, atteinte entre l'instant 0 (le semis) et l'instant T. Cette définition est conforme à l'équation de conservation de la biomasse foliaire produite et justifie le terme MS_d .

Nos mesures ayant commencé vers le stade début montaison, il existait déjà une quantité de biomasse importante. Il nous a été difficile de choisir le modèle à la simple vue de l'évolution des biomasses foliaires mesurées. Nous nous sommes servi des résultats expérimentaux de Porter et al. (1984) pour choisir la forme du modèle. La figure 2.26 montre que la croissance des surfaces foliaires donc des biomasses démarre avec une allure exponentielle qui s'amortit vers le stade double ride. Elle atteint finalement un maximum vers la floraison. Ces courbes d'allure sigmoïde ont un point d'inflexion situé plutôt à mi-croissance. Nous utiliserons donc le modèle logistique.

$$MS_t = \frac{K}{1 + e^{-b \cdot (T - T_i)}} \quad (2)$$

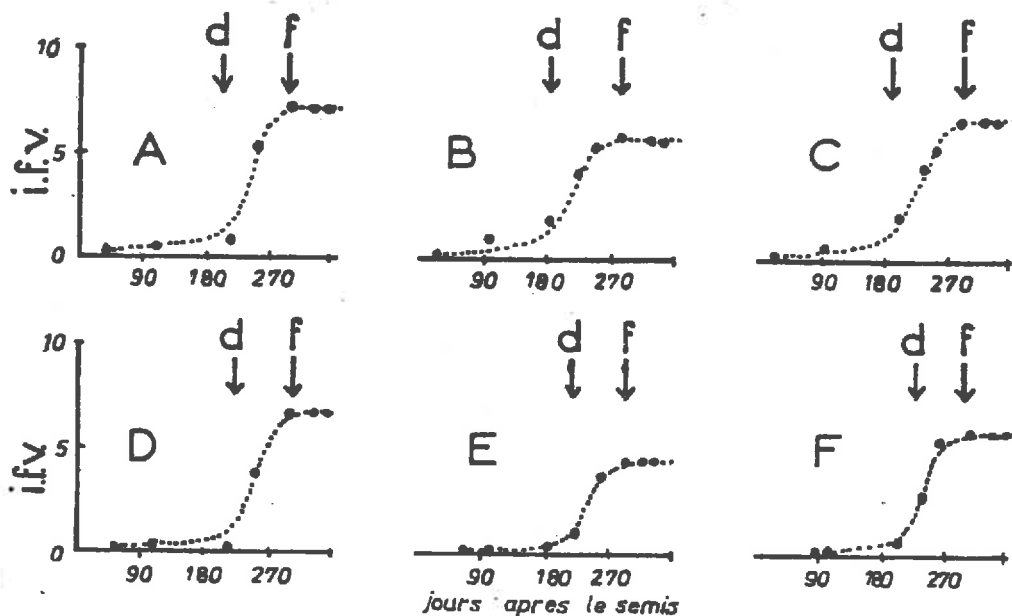


Figure 2.26: Evolution de l'indice foliaire vert maximum produit (i.f.v.) (d'après Porter 1984)

A, B, C, D, E, F correspondent à des dates de semis et des années climatiques différentes.

d: stade double ride

f: floraison

Le tableau 2.11 montre les résultats de l'ajustement logistique à nos données expérimentales.

VARIETES		TALENT	ARCANE	ARMINDA
Asymptote haute (K) (en g.m ⁻²)	est.	267	294	330
	s.	2	3	3
Position du point d'inflexion (T _i) (en °c.j ⁻¹)	est.	759	768	784
	s.	8	11	12
Taux d'accroissement relatif au point d'inflexion (b) (en °c ⁻¹ .j ⁻¹)	est.	0.0102	0.0084	0.0085
	s.	0.0009	0.0010	0.0010
Nombre de degrés de liberté		11	11	11
Coefficient de corrélation		0.997	0.998	0.997
Ecart type résiduel (en g.m ⁻²)		6	8	7

Tableau 2.11: ajustement des biomasses foliaires sèches totales des feuilles au modèle logistique.

est.: valeur estimée

s. : écart type de la valeur estimée

La distribution des résidus est aléatoire et les corrélations observées entre les paramètres de l'ajustement sont faibles: Le modèle logistique simple représente donc correctement la réalité expérimentale. L'ajustement à un modèle logistique généralisé confirme ce choix par rapport au modèle de Gompertz: L'ordonnée au point d'inflexion est très proche de $K/2$.

Du fait de notre définition de MS_t , nous affectons un poids beaucoup trop important à la valeur maximale de MS expérimentalement atteinte. Nous verrons comment il est possible de contourner cette difficulté.

2-2-2-1-2-3 Evolution de la biomasse foliaire verte MS.

La biomasse foliaire sèche verte résulte du bilan des processus de formation et de dégradation (la sénescence ou la destruction) de la biomasse foliaire formée:

$$MS_v = MS_t - (MS_s + MS_d) \quad (3)$$

Il nous faut donc décrire l'évolution du terme de dégradation de la surface foliaire formée ($MS_g + MS_d$) comme le montre la figure 2.27

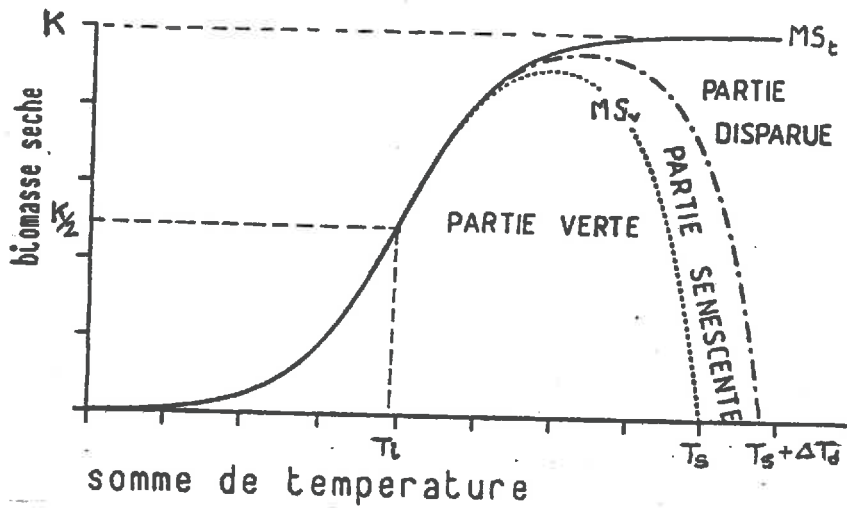


Figure 2.27: Schéma d'évolution des biomasses foliaires. estimation de la surface foliaire verte.

Ritchie et Otter (1985) et Porter (1984) (figure 2. 28) ont obtenu expérimentalement des sénescences ayant une allure exponentielle. La vitesse de dégradation de la surface foliaire verte formée ne cesse d'augmenter au cours du cycle de la culture.

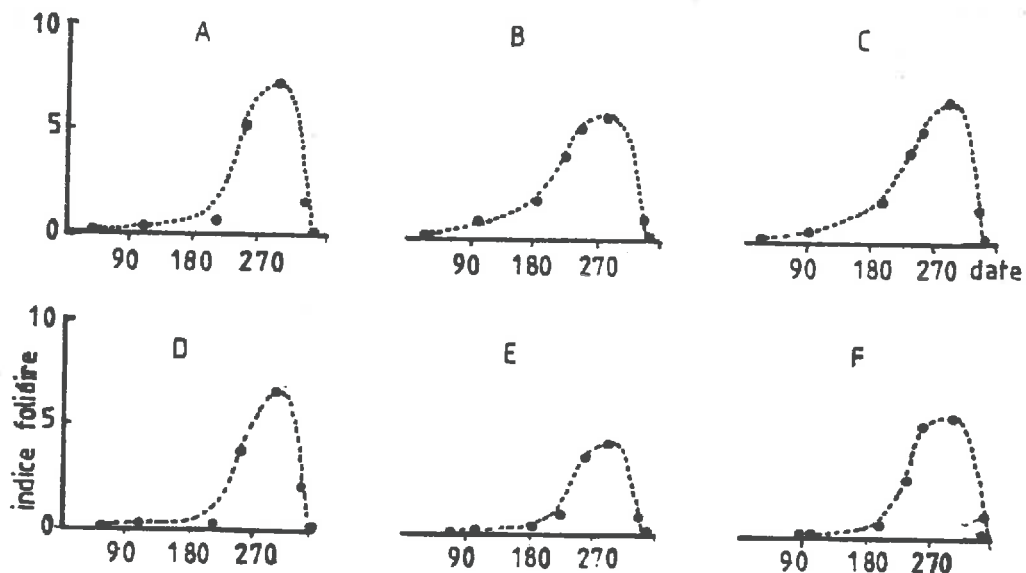


Figure 2.28: Evolution de l'indice foliaire vert d'une culture de blé (d'après Porter 1984)

A,B,C,D,E,F correspondent à des dates de semis et des années climatiques différentes.

Nous ajusterons donc nos données expérimentales à un modèle du type:

$$(MS_g + MS_d) = K \cdot e^{a \cdot (T - T_s)} \quad (4)$$

K : asymptote de l'ajustement logistique de MS_t

a : taux de croissance relatif

T_s : somme de température correspondant à la disparition de MS_v

Plutôt que d'ajuster séparément ($MS_g + MS_d$) au modèle (4) et MS_t au modèle (1), nous préférons réaliser l'ajustement global de MS_v au modèle (5):

$$\begin{aligned} MS_v &= MS_t - (MS_g + MS_d) \\ &= \frac{K}{1 + e^{-b \cdot (T - T_1)}} - K \cdot e^{a \cdot (T - T_s)} \\ &= K \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-b \cdot (T - T_1)}} - e^{a \cdot (T - T_s)} \right) \quad (5) \end{aligned}$$

Cette procédure permet d'éviter l'inconvénient soulevé au chapitre précédent, lié au poids trop important accordé à la valeur de biomasse sèche totale maximale. Le tableau 2.8 présente les résultats de l'ajustement du modèle (5) à nos valeurs expérimentales.

Le modèle (5) représente correctement la phase de décroissance de la biomasse foliaire verte (après le stade épiaison). Le sous modèle exponentiel (4) est donc satisfaisant pour cette période. Les écarts types autour des valeurs des paramètres T_s et a sont relativement faibles et les résidus assez bien répartis.

Par contre, pour la phase de croissance de la biomasse foliaire verte (avant épiaison), les discordances constatées entre les paramètres K , T_1 et b du sous modèle (2), du modèle (5), et ces mêmes paramètres issus de l'ajustement des MS_t au modèle (2) (tableau 2.12) sont peu importantes pour Talent, relativement plus importantes pour la variété Arcane, et deviennent très importantes pour la variété Arminda (résultats non présentés).

VARIETES		TALENT	ARCANE	ARMINDA *
K	est.	264	296	330
	s.	12	68	-
T _i	est.	720	700	655
	s.	7	27	58
b	est.	0.0097	0.0058	0.0049
	s.	0.0011	0.0022	0.0027
T _s	est.	1960	2003	2035
	s.	7	17	28
a	est.	0.0022	0.0021	0.0017
	s.	0.0002	0.0008	0.0002
nombre de degrés de liberté		8	8	9
coefficient de corrélation		0.999	0.994	0.984
écart type résiduel (g.m ⁻²)		4	11	18

Tableau 2.12: ajustement des biomasses foliaires vertes sèches MS_v au modèle (3).

* Correspond au modèle (3) pour lequel on a fixé K à 330.

est. : valeur estimée

s. : écart type de la valeur estimée

Les écarts types autour de ces paramètres confirment ce problème. Deux raisons principales expliquent cette difficulté:

- Nous n'avons que très peu de points expérimentaux durant la phase de croissance de MS_v. Mais ce faible nombre de points nous a quand même permis de bien ajuster MS_t au modèle (2).

Il faut donc surtout invoquer la deuxième raison:

- Au cours de la montaison, la régression des talles peut être très importante et produire un "pic" de dégradation de la biomasse verte formée. Ce phénomène est surtout important chez les variétés à tallage épi modéré: Arcane et Arminda. Dans le cas d'Arminda, il nous a fallu fixer le paramètre K à la valeur maximale de biomasse foliaire totale observée sinon l'ajustement de MS_v au modèle (5) donnait des valeurs des paramètres K, T_i et b aberrantes.

Ces régressions de talles nécessiteraient un sous modèle particulier. Ce sous-modèle devrait tenir compte de l'état de développement de la culture au stade début montaison (Masle-Meynard 1980) mais aussi des caractéristiques de tallage épi des variétés concernées. Nous ne disposons malheureusement pas de suffisamment de données expérimentales pour nous engager dans la construction d'un tel sous-modèle. Il nécessiterait d'autre part un minimum de paramètres pour lui permettre de s'ajuster à la réalité observée, réduisant d'autant le nombre de degrés de liberté disponibles.

Ces régressions sont en grande partie dues à une compétition des talles pour la lumière (Baldy 1973, Masle-Meynard 1980). Elles interviennent donc à des niveaux d'indice foliaire relativement élevés. Les réflectances spectrales n'y seront donc pas très sensibles. Par rapport à notre objectif, nous pourrions donc, en première approximation, négliger ces phénomènes. Cette approximation ne sera possible qu'à condition de disposer de mesures suffisamment précoces. Les paramètres K , T_i et b issus alors de l'ajustement (5) ne représenteront alors pas strictement l'évolution de MS_t . La figure 2.29 montre qu'effectivement, la qualité des ajustements est globalement satisfaisante.

Les talles régressées représentent moins de 10% de la biomasse foliaire totale (chapitre 2-1-2-2-2-1), et pendant une période somme toute assez courte (environ 20 jours).

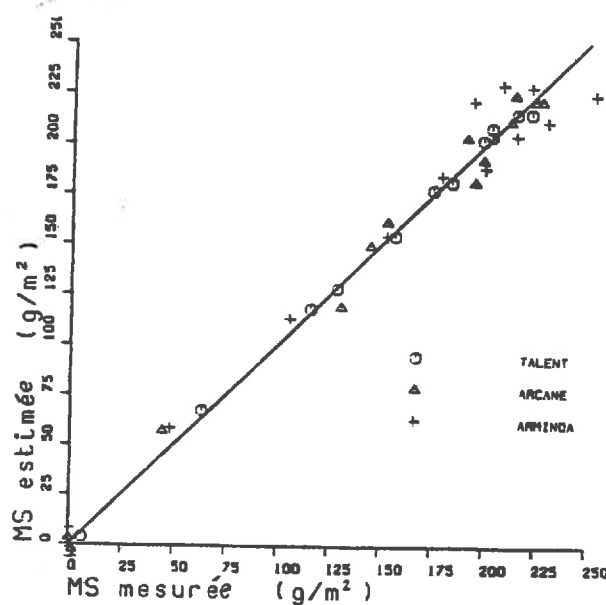


Figure 2.29: Qualité des ajustements des biomasses foliaires vertes au modèle (5).

2-2-2-1-2-4 Evolution des biomasses foliaires sénescentes, MS_s ,
et disparues, MS_d

Le paragraphe précédent montre qu'en négligeant les phénomènes de régression de talles, il est possible de représenter globalement la matière sèche dégradée ($MS_s + MS_d$) avec le modèle (4) de type exponentiel. Il nous reste donc à définir comment représenter séparément MS_s et MS_d . Le modèle CERES et le modèle ARCWHEAT utilisent la notion de durée de vie des feuilles. Mais ces modèles ne concernent que les feuilles vertes et non pas les feuilles sénescentes qui jouent un rôle non négligeable au niveau de la pénétration de la lumière dans le couvert. Nous reprendrons cette notion de durée de vie des feuilles, mais nous l'appliquerons aux feuilles sénescentes. Ceci revient concrètement à chercher un paramètre ΔT_j tel que MS_d s'ajuste au modèle (6):

$$MS_d = K \cdot e^{a \cdot (T - (T_j + \Delta T_j))} \quad (6)$$

K , a , T_j sont les paramètres issus de l'ajustement (5)
 ΔT_j représente la durée de vie des feuilles sénescentes

Le tableau 2.13 montre que ce type de modèle représente assez fidèlement la réalité expérimentale. Nous rappellerons que MS_d est estimé à partir de l'équation (7).

$$MS_d = MS_t - (MS_s + MS_v) \quad (7)$$

Ce terme MS_d , calculé avec les valeurs expérimentales de MS_s , est donc estimé avec une précision médiocre.

VARIETES		TALENT	ARCANE	ARMINDA
ΔT_j en °C.j	est.	490	438	539
	s.	33	57	51
Nombre de degrés de liberté		9	9	9
Coefficient de corrélation		0.949	0.836	0.889
Ecart type résiduel (en g.m ⁻²)		13	28	25

Tableau 2.13: Détermination de la durée de vie moyenne des
feuilles sénescentes.

est. : valeur estimée

s. : écart type de la valeur estimée

2-2-2-1-3 Passage du modèle d'évolution des biomasses foliaires à celui des surfaces foliaires: simplifications possibles.

Le modèle d'évolution des biomasses foliaires permet de construire un modèle d'évolution des surfaces foliaires en utilisant les relations décrites au paragraphe 2-2-2-1-1 entre biomasse sèche et surface des feuilles. Le modèle d'évolution des surfaces foliaires peut donc s'écrire sous la forme:

$$\begin{aligned}
 S_v &= k_v \cdot MS_v \\
 &= k_v \cdot K \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-b \cdot (T - T_i)}} - e^{a \cdot (T - T_s)} \right) \text{ si } T < T_s \\
 &= 0 \text{ si } T \geq T_s
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 S_s &= k_s \cdot MS_s \\
 &= k_s \cdot K \cdot (e^{a \cdot (T - (T_s + \Delta T_d))} \cdot (e^{a \cdot \Delta T_d} - 1)) \text{ si } T < T_s \\
 &= k_s \cdot K \cdot (1 - e^{a \cdot (T - (T_s + \Delta T_d))}) \text{ si } T_s \leq T < T_s + \Delta T_d \\
 &= 0 \text{ si } T \geq T_s + \Delta T_d
 \end{aligned} \quad (9)$$

S_v surface foliaires vertes

k_v surface spécifique des feuilles vertes

MS_v biomasse sèche des feuilles vertes

S_s surface foliaire des feuilles sénescentes

k_s surface spécifique des feuilles sénescentes

MS_s biomasse sèche des feuilles sénescentes

Les corrélations entre les surfaces observées et estimées à partir de ce modèle en utilisant les valeurs des paramètres d'ajustement aux modèles (5) et (8) déterminés pour chaque variété (k_v , k_s , K , b , T_i , a , T_s , ΔT_d) sont fortes:

$$r = 0.953 \text{ pour les surfaces vertes } (n=39)$$

$$r = 0.792 \text{ pour les surfaces sénescentes } (n=39)$$

Ce modèle nécessite 8 paramètres de calage. Nous voulons limiter au maximum ce nombre afin de conserver le plus de degrés de liberté pour l'ajustement, sans pour autant "figer" complètement la forme du modèle. En particulier, il nous faudra conserver les paramètres relatifs à l'évolution des surfaces vertes (K , b , T_i , a , T_s) qui contribuent le plus à la réponse spectrale du couvert et expliquent une grande part de la productivité.

Il semble par contre possible de fixer les valeurs des surfaces spécifiques des feuilles et la valeur de la durée de vie des feuilles sénescentes:

2-2-2-1-3-1 choix d'une valeur constante pour les surfaces spécifiques

Le chapitre 2-2-2-1-1 a montré que les différences variétales de surface spécifique sont relativement faibles et du même ordre de grandeur que les variations liées aux facteurs du milieu comme l'alimentation hydrique de la culture. En supposant la surface spécifique constante et indépendante de la variété, on obtient encore une très bonne adéquation du modèle à la réalité:

$$r = 0.950 \text{ pour les surfaces vertes } (n=39)$$

$$r = 0.782 \text{ pour les surfaces sénescentes } (n=39)$$

Les valeurs des surfaces spécifiques ont été obtenues par minimisation des carrés des écarts entre surface mesurée et surface estimée en fixant les autres paramètres aux valeurs précédemment trouvées. Nous obtenons alors:

$$k_v = 0.21 \text{ mg.cm}^{-2}$$

$$k_s = 0.12 \text{ mg.cm}^{-2}$$

La valeur de k_s , légèrement supérieure à la moyenne des surfaces spécifiques des feuilles complètement sénescentes de chaque variété (tableau 2.9) montre qu'on intègre ainsi les feuilles d'état intermédiaire dont nous avons parlé au chapitre 2-2-2-1-1-2.

2-2-2-1-3-2 Choix d'une valeur constante de durée de vie des feuilles sénescentes

En appliquant ce même principe à la recherche de la meilleure estimation d'une valeur constante de la durée de vie des feuilles sénescentes, nous obtenons:

$$\Delta T_d = 480 \text{ } ^\circ\text{C.j}$$

Les ajustements sont encore très satisfaisants pour les surfaces sénescentes: $r = 0.782$, $(n=39)$
 Bien que cette notion de durée de vie des feuilles sénescentes corresponde à un phénomène relativement passif pour la plante car les feuilles peuvent être considérées comme mortes, il faudrait vérifier si la valeur de ΔT_d proposée est réellement constante. En particulier il serait intéressant de tester cette hypothèse sur des cultures semées à des dates très différentes.

Mis à part le phénomène de régression de tiges dont nous avons discuté au chapitre 2-2-2-1-2-3, les figures 2.30 et 2.31 montrent, qu'après avoir introduit les simplifications proposées, le modèle décrit de manière assez fidèle la forme de l'évolution des surfaces foliaires et de leur état pour les trois variétés très typées expérimentées. Nous pouvons donc passer à l'étape suivante de notre modélisation: décrire l'évolution des surfaces des tiges et des épis et de leur état.

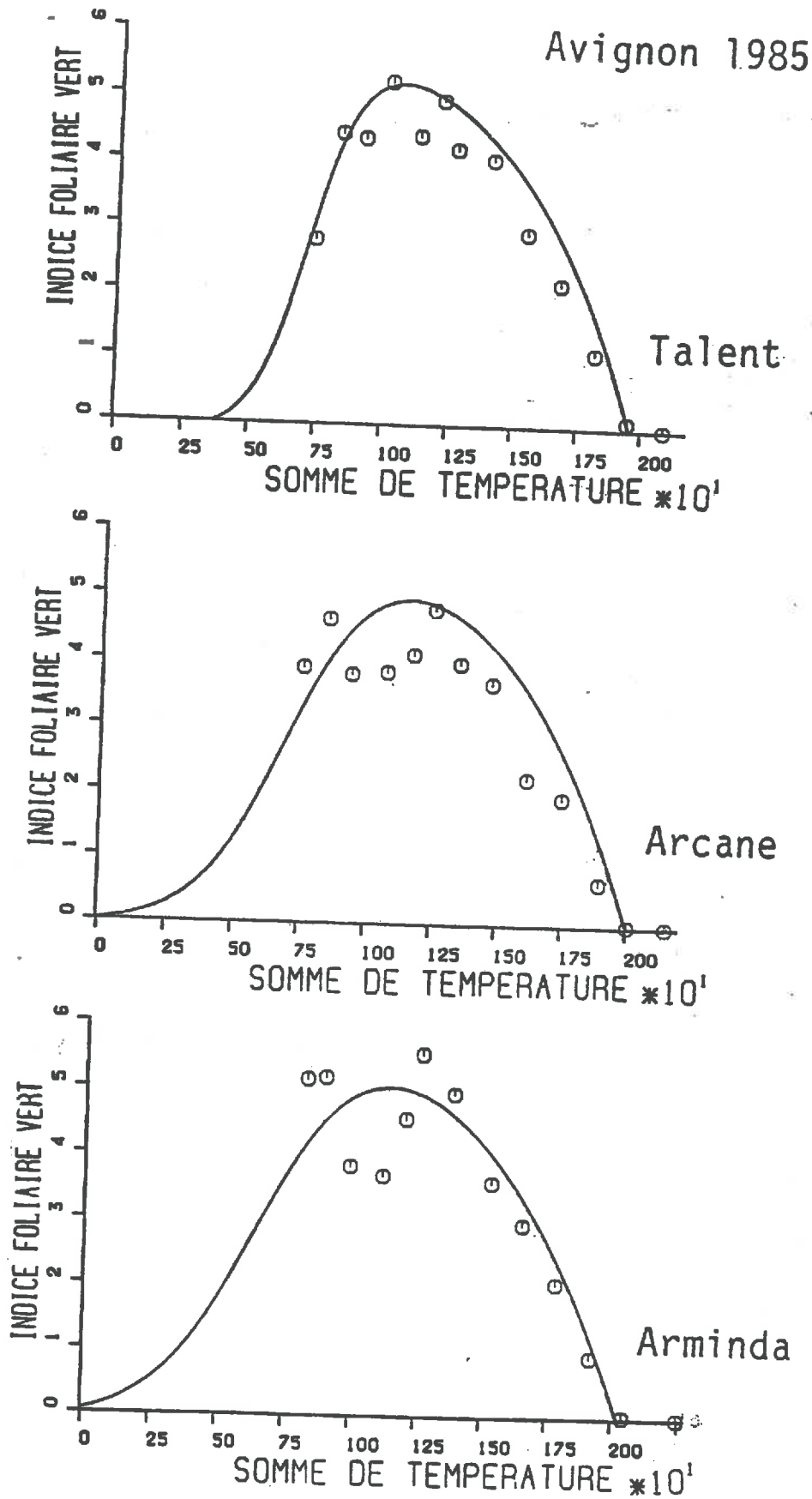


Figure 2.30: Comparaison des données expérimentales de surface foliaire verte au modèle d'évolution (8)

Avignon 1985

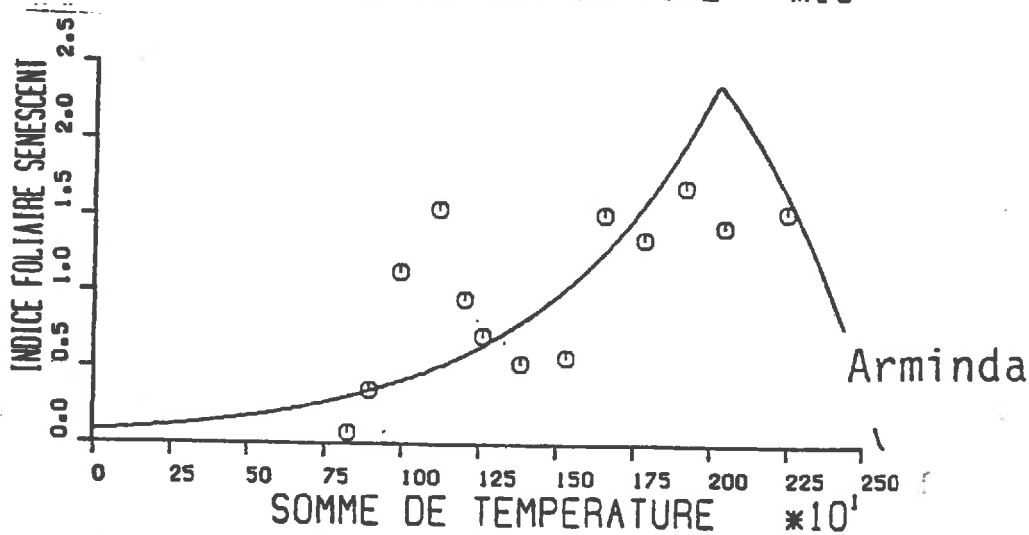
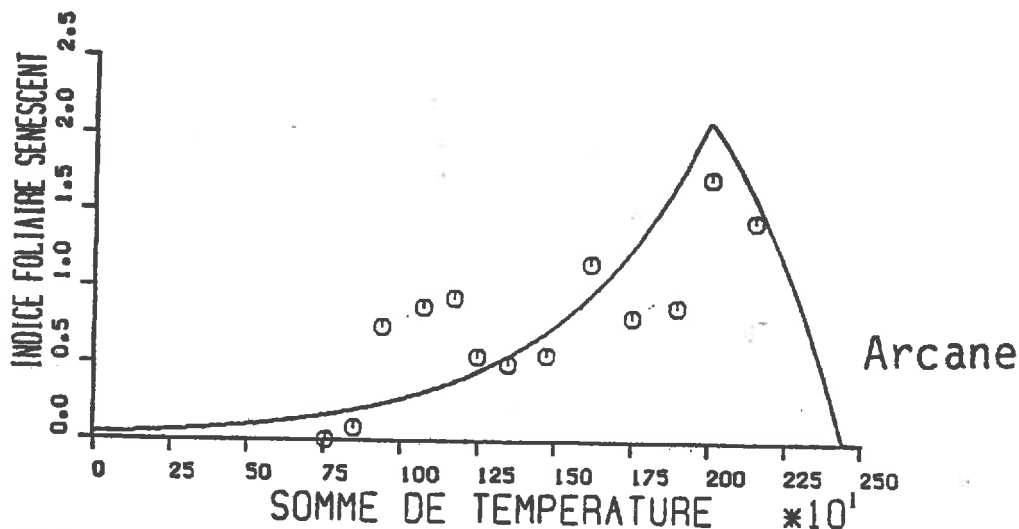
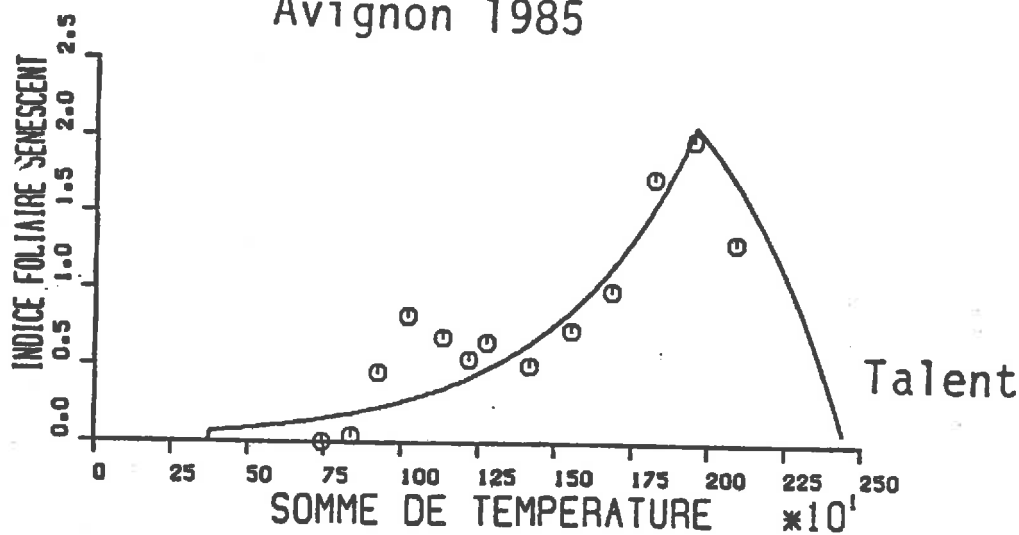


Figure 2.31: Comparaison des données expérimentales de surface foliaire sénescence au modèle d'évolution (9)

2-2-2-2 Modèle d'évolution des surfaces des tiges et des épis

2-2-2-2-1 Position du problème

Les surfaces des tiges et des épis sont rarement prises en considération dans les études de pénétration de la lumière dans les couverts végétaux qui se limitent généralement strictement à l'indice foliaire vert. Il semble pourtant difficile de négliger ce type d'organe. Ils représentent en effet de 10% à 60% de la surface totale développée par la culture comme le montre la figure 2.5 du chapitre 2-1. Il nous a donc paru nécessaire d'intégrer ce type d'organe dans notre modélisation de l'évolution de la structure du couvert.

Nous rappelons que nos mesures de surface de tiges ou d'épis correspondent à la surface de leur projection sur un plan vertical.

Les épis représentent une surface d'environ 22% de la surface totale des tiges et des épis. La sénescence des épis suit de très près celle des tiges comme le montre la figure 2.32. Ces deux remarques nous autorisent à confondre au sein d'un même ensemble les tiges et les épis. Nous chercherons donc à décrire globalement l'évolution de la surface des tiges et des épis.

Deux raisons principales, très différentes, nous ont amené à rattacher l'évolution des surfaces des tiges et des épis à celle des surfaces foliaires:

- Au niveau du fonctionnement du couvert: Il existe des liaisons très étroites entre le développement ou la sénescence de ces deux types d'organes. La tige est protégée en totalité jusqu'à l'épiaison par les gaines foliaires. Nous avons d'ailleurs considéré les gaines foliaires comme faisant partie de la tige, le compartiment feuilles ne concernant que les limbes foliaires. Nos mesures de croissance et de sénescence de tiges (gainnes) sont donc directement liées à l'évolution foliaire (limbes) jusqu'à ce stade. Passé l'épiaison, Delécolle et Gurnade (1980), Gurnade et Malet (1981) montrent qu'il existe une véritable coordination du développement du col de l'épi et de l'épi avec celui des feuilles.

- Au niveau de la modélisation: Il est nécessaire de ne pas multiplier les paramètres d'ajustement du modèle. Nous retiendrons ceux qui correspondent aux facteurs les plus déterminants de la réponse spectrale du couvert: les surfaces foliaires.

Après avoir proposé une forme de modèle d'évolution des surfaces des tiges et des épis, nous essaierons donc de relier ces paramètres avec ceux de l'évolution des feuilles.

Avignon 1985

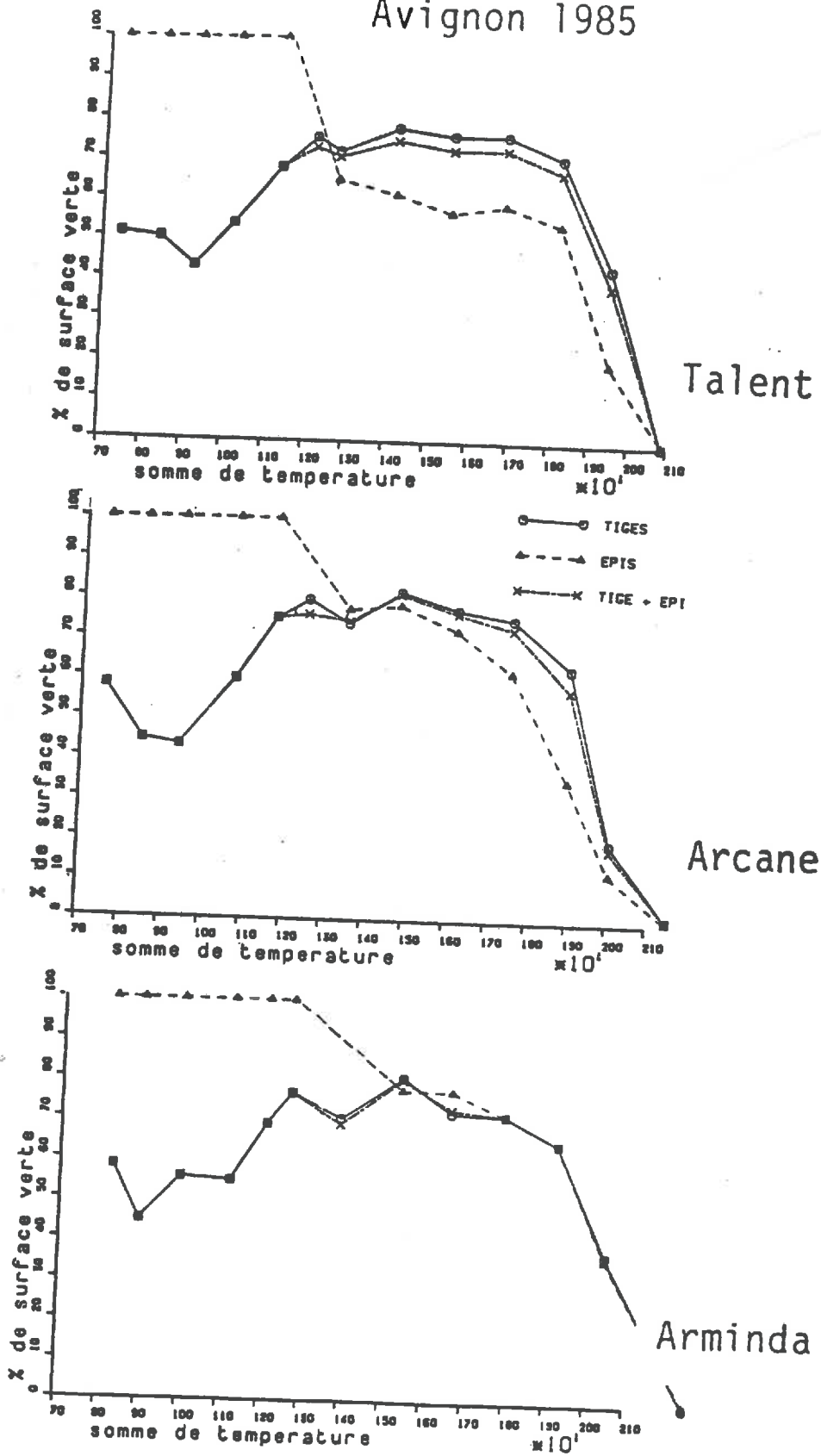


Figure 2.32: Synchronisme entre la sénescence des épis et celle des tiges

2-2-2-2-2 Forme du modèle d'évolution des surfaces des tiges et des épis

Nous reprendrons le schéma adopté pour l'évolution des biomasses foliaires. Nous pouvons écrire par analogie l'équation de conservation de la surface, S_t , des tiges et des épis produite:

$$S_t = S_v + S_s \quad (10)$$

S_t : Surface totale produite des tiges et des épis
 S_v : Surface verte des tiges et des épis
 S_s : Surface sénescente des tiges et des épis.

Cette équation concerne directement les surfaces et non les biomasses sèches comme dans le cas des feuilles. En particulier, la figure 2.33 montre que la surface totale produite ne varie pas significativement suivant l'état de sénescence. Compte tenu des transferts importants entre les tiges et les épis (Triboï 1985) sans changement apparent de volume ou de surface, il sera difficile d'estimer les biomasses sèches de ces organes à partir de leurs surfaces.

Nous pourrions donc décrire S_t et S_s avec la panoplie de modèles mathématiques présentée au chapitre 2-2-2-1-2-1-2. L'allure de l'évolution des surfaces totales des tiges et des épis (figure 2.33) et de leur sénescence (figure 2.32) nous oriente vers le même type de modèle que celui utilisé pour décrire l'évolution des surfaces foliaires:

$$S_t = \frac{K'}{1 + e^{-b'(T-T'_t)}} \quad (11)$$

$$S_s = K' \cdot e^{a'(T-T'_s)} \quad (12)$$

$$S_v = S_t - MS_s \quad (13)$$

$$= \frac{K'}{1 + e^{-b'(T-T'_t)}} - K' \cdot e^{a'(T-T'_s)}$$

$$= K' \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-b'(T-T'_t)}} - e^{a'(T-T'_s)} \right)$$

Avignon 1985

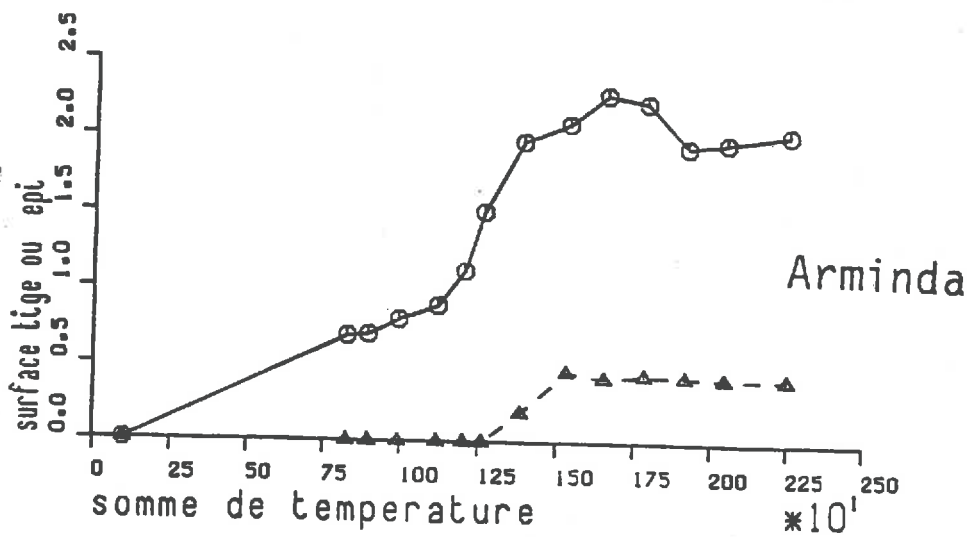
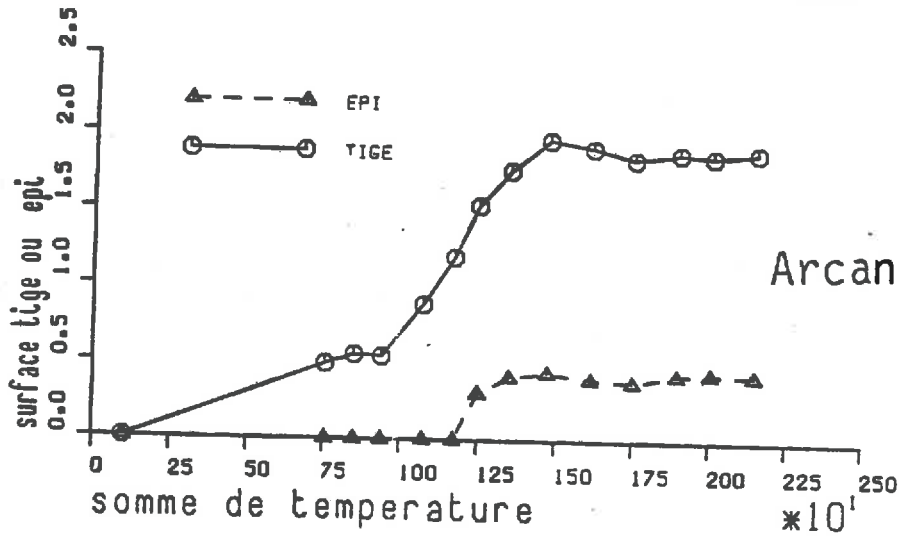
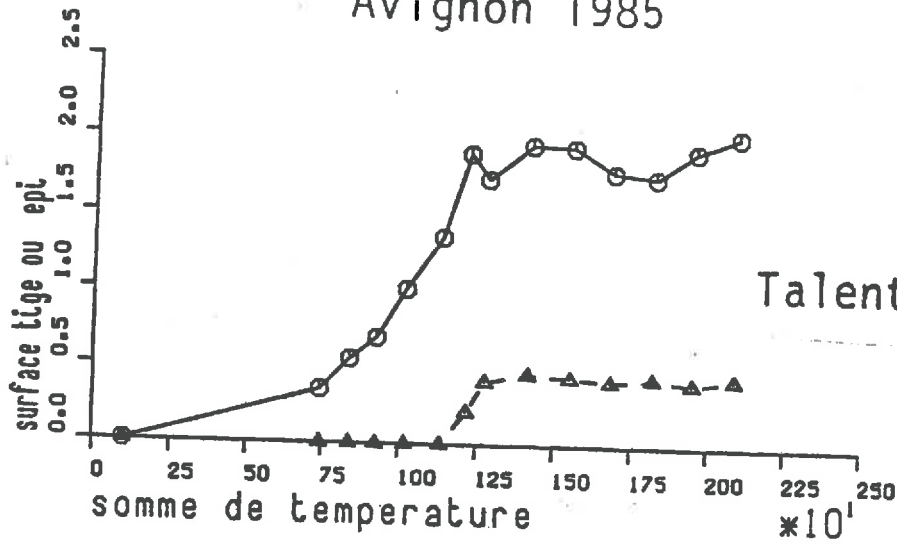


Figure 2.39: Evolution des surfaces totales des tiges et des épis

2-2-2-2-3 Relation entre l'évolution des surfaces des feuilles et celle des tiges et des épis

Nous voulons relier les différents paramètres K' , b' , T'_i , a' , T'_s aux caractéristiques de l'évolution des surfaces ou des biomasses foliaires. Nous chercherons donc à exprimer les valeurs de ces 5 paramètres en fonction des caractéristiques des événements foliaires les plus proches ou les plus analogues.

2-2-2-2-3-1 Paramètres de calage dans le temps

Il s'agit des paramètres T'_i et T'_s du modèle (13). Le point d'inflexion T'_i de l'évolution des surfaces totales des tiges et des épis se situe à un moment où la culture a presque atteint la moitié de sa hauteur finale. Ce moment survient juste avant l'épiaison, quand l'indice foliaire vert atteint sa valeur maximale (Huet 1983). Nous calerons donc T'_i par rapport à la date T_m du maximum d'indice foliaire vert en posant:

$$T'_i = T_m + \Delta T_i \quad (14)$$

La sénescence des tiges et des épis suit de très près celle des feuilles (figure 2.34). Nous poserons donc:

$$T'_s = T_s + \Delta T_s \quad (15)$$

Nous déterminerons les constantes ΔT_i et ΔT_s au chapitre 2-2-2-2-4.

2-2-2-2-3-2 Surface maximale atteinte par les tiges et les épis

Il semble raisonnable d'exprimer la surface développée par les tiges et les épis d'une culture donnée par rapport à la surface ou à la biomasse foliaire totale. Ces deux paramètres extériorisent la "vigueur" de la culture. La figure 2.35 montre que le rapport entre la surface des tiges et des épis et la biomasse totale foliaire produite évolue de façon très similaire pour nos trois variétés pourtant très différentes. Ce rapport tend vers une valeur asymptotique à partir de la floraison. Cette valeur est de:

$$\frac{\text{surface tige+épi}}{\text{biomasse foliaire}} = 0,0081 \pm 0,0004$$

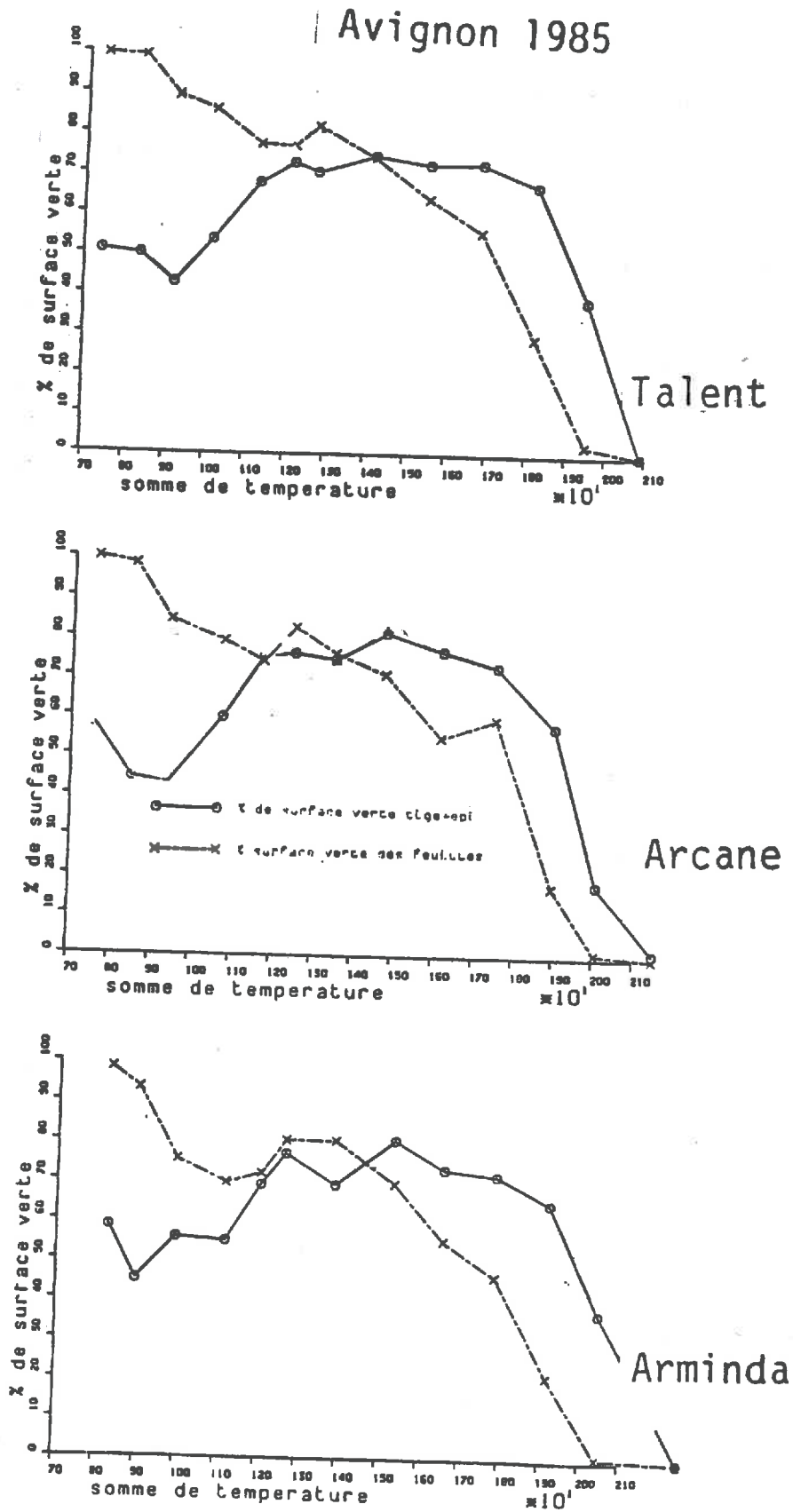


Figure 2.34: Synchronisme entre la sénescence des tiges et des épis et celle des feuilles

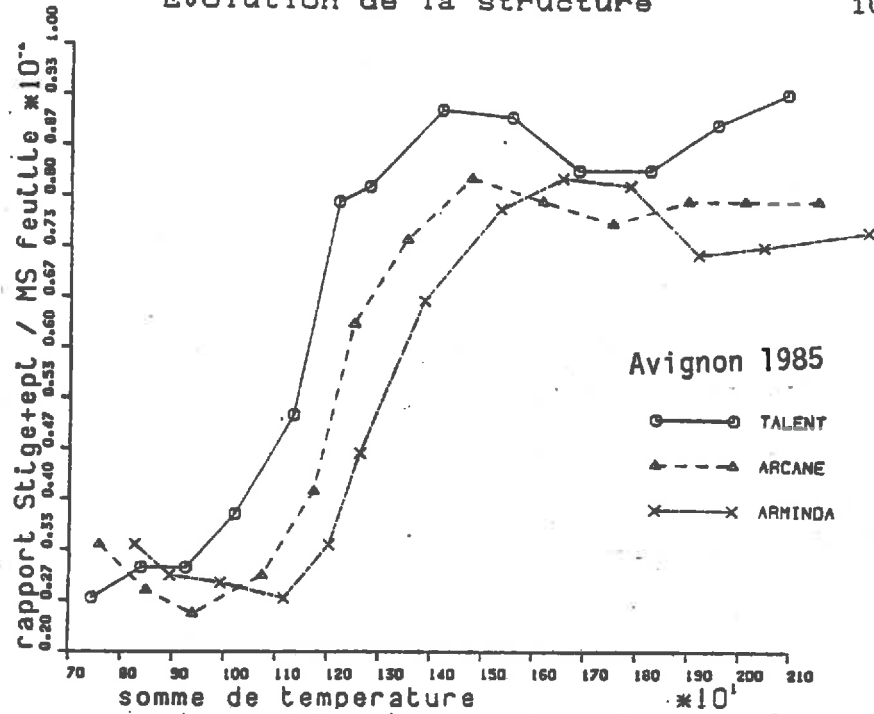


Figure 2.35: Evolution du rapport entre la surface des tiges et des épis et la matière sèche totale des feuilles.

2-2-2-2-3-3 Taux de croissance relatif

N'ayant pas de références précises concernant les relations entre la vitesse de croissance ou de sénescence des tiges et celle des feuilles, nous supposons que les vitesses d'évolution de ces deux types d'organes sont proportionnelles:

$$b' = b \cdot c_b \quad (16)$$

$$a' = a \cdot c_a \quad (17)$$

b' : taux de croissance relatif au point d'inflexion T_i' pour les surfaces des tiges et des épis

b : taux de croissance relatif au point d'inflexion T_i pour les biomasses foliaires

a' : taux de sénescence relatif au point T_s' pour les surfaces des tiges et des épis

a : taux de sénescence relatif au point T_s pour les biomasses foliaires

c_b et c_a constantes de proportionnalité qui seront déterminées au paragraphe 2-2-2-2-3-4

Le modèle initial (12 et 13) d'évolution des surfaces des tiges et des épis est donc transformé en un modèle où seuls les paramètres de l'évolution des biomasses foliaires et des constantes apparaissent:

$$S_v = K \cdot 0.0081 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-b \cdot c_b \cdot (T - (T_m + \Delta T_i))}} \right) e^{a \cdot c_a \cdot (T - (T_s + \Delta T_s))} \quad \text{si } T < T_s + \Delta T_s \quad (18)$$

$$S_v = 0 \quad \text{si } T > T_s + \Delta T_s$$

$$S_s = K \cdot 0.0081 \cdot e^{a \cdot c_a \cdot (T - (T_s + \Delta T_s))} \quad \text{si } T < T_s + \Delta T_s \quad (19)$$

$$S_s = K \cdot 0.0081 \quad \text{si } T > T_s + \Delta T_s$$

Il nous reste donc à déterminer les constantes ΔT_i , ΔT_s , c_b , c_a

2-2-2-3-4 Détermination des constantes du modèle et qualité de l'ajustement

Le tableau 2.14 montre les caractéristiques de l'ajustement du modèle (18) aux surfaces vertes des tiges et des épis mesurées de l'ensemble des trois variétés.

	valeur estimée	écart type
ΔT_i	80	17
ΔT_s	122	29
c_b	1.07	0.10
c_a	1.78	0.25
coefficient de corrélation	0.985	
nombre de degrés de liberté	34	
écart type résiduel	0.18	

Tableau 2.14: Ajustement du modèle (18) aux données expérimentales de surface verte des tiges et des épis des trois variétés confondues.

Les coefficients de corrélations entre les quatre paramètres d'ajustements sont peu élevés. Les résidus ont par contre tendance à être plutôt positifs pour les faibles valeurs de surface. Ce phénomène est encore beaucoup plus marqué quand nous appliquons les valeurs de ΔT_i et c_b au modèle (19) d'évolution des surfaces sénescences comme en témoigne la figure 2.38.

La figure 2.36 situe ce biais avant la montaison pour les surfaces vertes. Mais il se prolonge jusqu'à la floraison pour les surfaces sénescences (figure 2.37). Il serait possible de corriger ce biais en utilisant un autre type de modèle pour cette première partie du développement des surfaces des tiges et des feuilles.

Avignon 1985

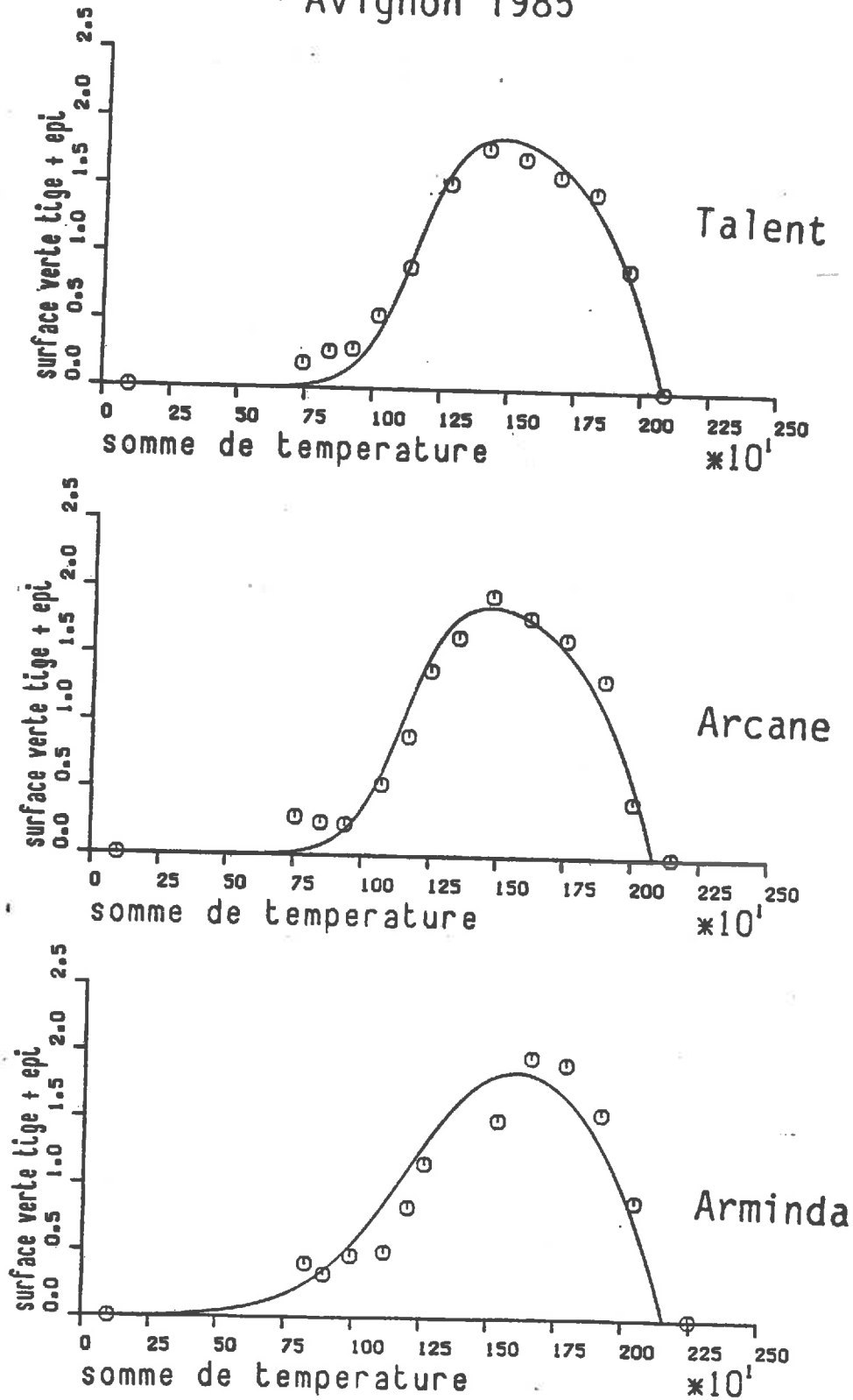


Figure 2.36: Comparaison des valeurs expérimentales de surface verte des tiges et des épis au modèle (18)

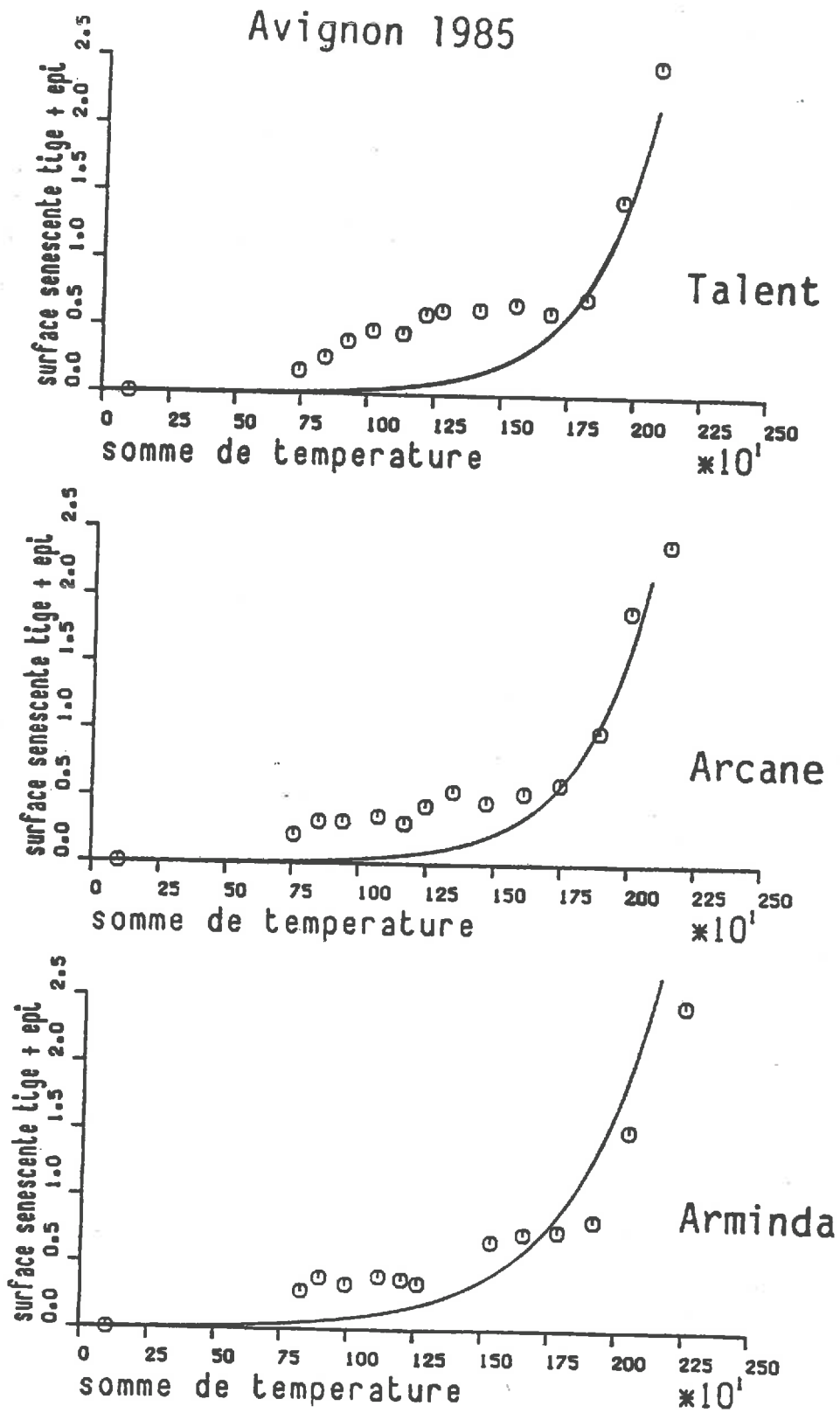


Figure 2.37: Comparaison des valeurs expérimentales de surface sénescentes des tiges et des épis au modèle (19)

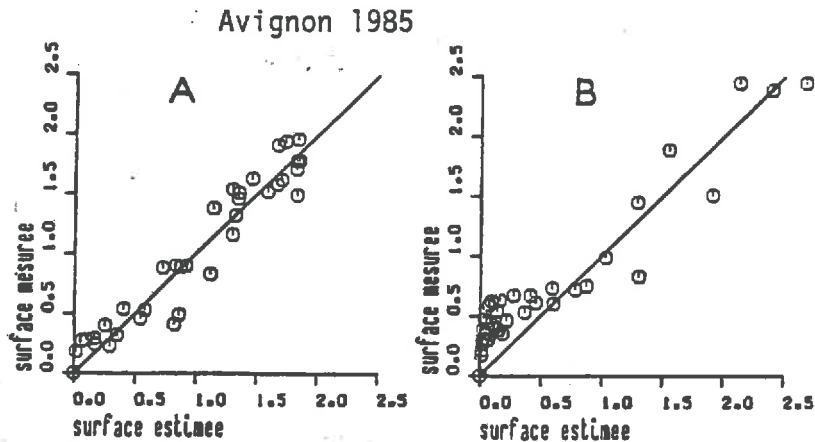


Figure 2.38: Comparaison entre surface estimée et surface mesurée des tiges et des épis; la bissectrice est figurée en trait plein

A : Surfaces vertes

B : Surfaces sénescentes

Nous pourrions fixer une valeur constante pour le rapport entre la surface totale des tiges et des épis et la biomasse foliaire totale produite jusqu'au stade début montaison (figure 2.35): Le critère des moindres carrés fournit la valeur:

$$0.0030 \pm 0.0005$$

La proportion de surface verte serait supposée constante et comprise entre 50% et 60% comme en atteste la figure 2.11. Les modèles (18) et (19) proposés ne prendraient le relais qu'après ce stade début montaison. Ce procédé rendrait compte du changement important de rythme de développement lié à la montaison.

Pour des questions de simplicité et d'absence de mesures précoces, nous ne chercherons pas à appliquer ce correctif. En outre, on pourrait remarquer que comme pour les talles régressées, l'influence de ce biais sur la réponse radiométrique doit être très faible.

Quoiqu'il en soit, les coefficients de corrélation entre valeurs observées et valeurs estimées sont élevés:

$$r = 0.971 \text{ pour la partie verte } (n=41)$$

$$r = 0.953 \text{ pour la partie sénescente } (n=41)$$

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre montre qu'il est possible de décomposer le couvert de blé étudié en 3 strates différentes:

- une strate d'épis et de cols d'épis verts
- une strate de tiges et de feuilles vertes
- une strate sénescente

Pour chacune de ces strates,

- Les propriétés optiques des éléments les composant sont relativement peu variables pour un état donné (vert ou sénescent). Il est donc possible de leur attribuer à priori une valeur de réflectance et transmittance.
- L'orientation des différents éléments, peu variable, est supposée constante.

Les surfaces développées par chaque élément dans chacune de ces strates évoluent constamment au cours du temps. Nous proposons un modèle permettant de décrire la forme de leur évolution au cours du développement de la culture. Ce modèle est caractérisé par:

- variable d'entrée: somme de températures positives comptées depuis le semis (T).
- variables de sortie: à chaque instant T:
 - * surface foliaire verte
 - * surface foliaire sénescente
 - * surface des tiges et des épis verts
 - * surface des tiges et des épis sénescents
- 5 paramètres

Il est construit à partir de modèles mathématiques "déterministes" utilisés classiquement en analyse de croissance. Il ne prend donc en compte que les évolutions de grande amplitude, en "lissant" les éventuels accidents locaux. Ce n'est pas très gênant car:

- Les effets de brutales variations du milieu sont en général tamponnés au niveau de la croissance de la plante.
- La mise en évidence de ces éventuels accidents locaux nécessite une précision de mesure difficilement réalisable en conditions naturelles compte tenu de l'aspect destructif des mesures et de la variabilité importante constatée entre plantes ou entre brins

La détermination précise des 5 paramètres, obtenue par calage du modèle aux données expérimentales, demande un suivi complet du cycle de la culture. Néanmoins, il est possible de déterminer précisément certains d'entre eux, en ne disposant que d'une partie du cycle de la culture.

Ce modèle nous permet de relier et d'estimer à chaque instant les surfaces développées dans chacune des trois strates précédemment définies.

Il représente correctement notre réalité expérimentale, en particulier pour les organes verts. Mais ce modèle n'a pas été confronté à d'autres conditions, ni d'ailleurs pour des stades de développement précoces.

Les 5 paramètres du modèle ont une signification précise au niveau de la dynamique des surfaces foliaires vertes. Il serait intéressant de les utiliser pour estimer des caractéristiques de la culture plus couramment employées comme, par exemple, des stades phénologiques. En particulier, les stades tels que début montaison, gonflement, épiaison et maturation, étant plus l'expression de phénomènes de croissance que de développement, pourraient être facilement déduits de l'évolution des surfaces des différents organes.

De par sa conception, ce modèle peut être étendu à d'autres céréales que le blé, voire à d'autres cultures annuelles.

Nous pouvons donc, à présent, aborder la deuxième étape de la construction du modèle de forme de profil spectral: Celle de l'élaboration d'un modèle simple de réponse radiométrique de courtes longueur d'onde de couverts végétaux.

Partie 3

III	<u>RELATION ENTRE LA STRUCTURE DU COUVERT ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES</u>	109
3-1	<u>FACTEURS DONT DEPEND LA REFLECTANCE SPECTRALE D'UN COUVERT</u>	109
3-1-1	<u>Facteurs externes au couvert</u>	109
3-1-1-1	Géométrie de l'éclairement	109
3-1-1-2	Géométrie de la visée	111
3-1-1-3	Propriétés optiques du sol sous la culture	112
3-1-2	<u>Paramètres du couvert: la structure</u>	112
3-1-3	<u>Modèles analytiques de réflectance directionnelle</u>	113
3-1-3-1	Modèles probabilistes	114
3-1-3-2	Modèles de transferts radiatifs	114
3-2	<u>CONSTRUCTION D'UN MODELE SIMPLE DE REFLECTANCE DIRECTIONNELLE</u>	117
3-2-1	<u>Choix de la forme du modèle simplifié</u>	118
3-2-1-1	Choix de la forme du modèle	118
3-2-1-2	Validation du formalisme du modèle simplifié	120
3-2-2	<u>Signification des paramètres des modèles simplifiés</u>	125
3-2-2-1	Influence des propriétés optiques des feuilles	125
3-2-2-2	Influence de l'orientation du soleil et des feuilles	129
3-2-3	<u>Comparaison du modèle simplifié au modèle de Suits</u>	130
	CONCLUSION PARTIELLE	134

III RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE DU COUVERT ET SES CARACTERISTIQUES RADIOMETRIQUES

L'indice foliaire constitue le paramètre de structure du couvert le plus intéressant à "télédétecter" pour estimer le rendement de cultures de céréales. Mais, comme l'a montré notre analyse bibliographique du chapitre 1, les relations établies expérimentalement entre indice foliaire et réflectance spectrale n'ont pas de portée générale. Elles dépendent trop de facteurs externes à la culture comme la géométrie de la visée, la position du soleil, les propriétés optiques du sol, ou de caractéristiques propres à la culture comme l'orientation de ses éléments ou la présence de rangs. Nous allons donc, dans un premier temps, analyser les travaux qui mettent en évidence les effets de ces différents facteurs sur la réponse spectrale du couvert.

3-1 FACTEURS DONT DEPEND LA REFLECTANCE SPECTRALE D'UN COUVERT

Nous distinguerons les facteurs externes au couvert des facteurs qui lui sont liés, regroupés sous le terme de structure,

3-1-1 Facteurs externes au couvert.

3-1-1-1 Géométrie de l'éclairement.

Le soleil constitue la source lumineuse principale. Sa position doit être prise en considération pour le suivi radiométrique des cultures. En effet, même si les mesures sont acquises à heure fixe comme c'est le cas pour les satellites héliosynchrones de ressources terrestres actuels, la hauteur du soleil peut varier significativement d'une saison à l'autre.

Sa position est déterminée par son angle zénithal et son azimut, généralement pris comme référence pour définir l'azimut du plan de visée (figure 3.1)

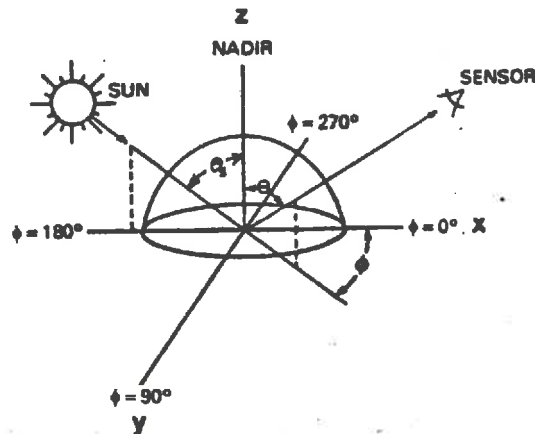


Figure 3.1: Géométrie de l'éclairage et de la visée.

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de la position du soleil sur la réflectance spectrale (Baret et Huet 1979, Kimes et al. 1981, Brach et al. 1981, Ranson et al. 1985). Les comportements observés diffèrent suivant les domaines spectraux (figure 3.2):

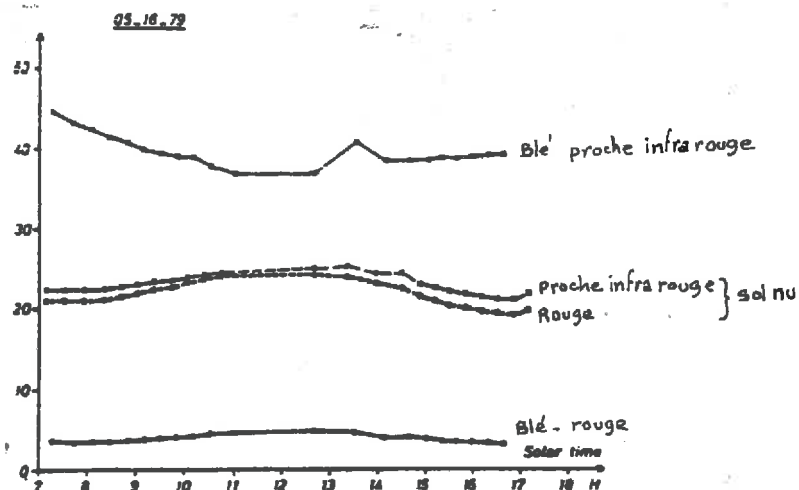


Figure 3.2: Evolution de la réflectance d'une culture de blé au cours de la journée dans le visible et le proche infrarouge (d'après Baret et Huet 1979)

- Dans le visible, la réflectance augmente généralement avec la hauteur du soleil.
- Dans le proche infrarouge, la réflectance diminue avec la hauteur du soleil.

L'amplitude du phénomène dépend de l'orientation des rangs (Jackson et al. 1979), de la structure du couvert (Shibayama et al. 1985) et des propriétés optiques du sol nu (Vanderbilt 1981). Elle dépend aussi très fortement de la géométrie de l'observation.

La nébulosité modifie les valeurs de réflectance que l'on peut mesurer au niveau satellitaire de deux manières:

- La luminance du trajet optique sol-radiomètre augmente. Cet effet est négligeable dans le visible et le proche infrarouge pour des mesures effectuées au sol.
- Elle modifie la géométrie de l'éclairement.

Ces deux facteurs conjugués font que la réflectance apparente augmente dans de telles conditions (Baret et Huet 1979, Jackson 1983, Guyot 1984).

3-1-1-2 Géométrie de la visée

Les couverts végétaux ne sont pas des corps lambertiens: La réflectance directionnelle n'est pas isotrope. Ce facteur est souvent peu considéré au niveau des applications satellitaires. Mais, l'utilisation croissante des satellites couvrant une large zone géographique (NOAA, METEOSAT) ou du satellite SPOT ayant la possibilité de faire des visées obliques nécessite d'intégrer ce facteur pour interpréter correctement les données.

La réflectance directionnelle dépend de la géométrie de l'éclairement. Les variations de réflectance liées à l'orientation de la visée sont d'autant plus faibles que le soleil est proche de son zénith (Kimes et al. 1984). Elles sont plus importantes dans le plan du soleil que dans le plan qui lui est perpendiculaire (figure 3.3) (Guyot 1983, Baret et Huet 1979, Kimes et al. 1984)

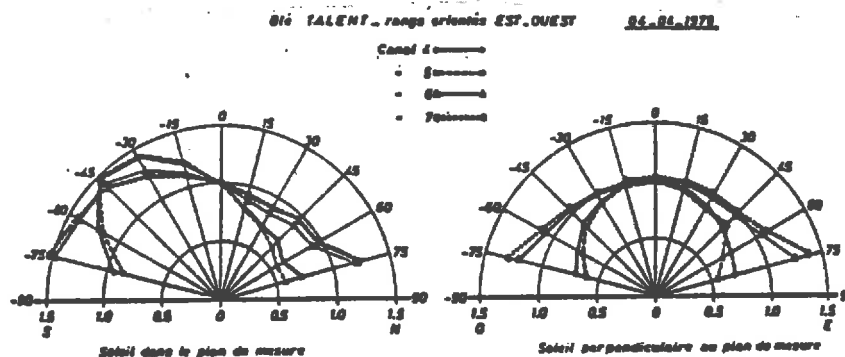


Figure 3.3: Influence de l'angle de visée sur la réflectance. Le cercle de rayon 1 correspond au comportement d'un corps lambertien (d'après Guyot 1983).

Mais les variations de réflectance directionnelle liées à la géométrie de la visée dépendent aussi de la structure du couvert. En particulier l'influence de l'angle de visée est important quand la végétation est peu couvrante (Ranson et al. 1985, Kimes et Selers 1985). Les propriétés optiques du sol jouent dans ce cas un rôle très important.

3-1-1-3 Propriétés optiques du sol sous culture

Ce facteur est surtout important quand la culture est peu couvrante (cas des cultures en rang, avec un port foliaire dressé, avec un indice foliaire faible), et quand la visée ou le soleil sont proches de la verticale.

Le contraste de propriétés optiques entre le sol et la végétation joue évidemment un rôle prépondérant (Vanderbilt 1981, Baret et al. 1986).

Il a été particulièrement étudié pour déterminer la sensibilité des différents indices de végétation à des variations de propriétés optiques du sol (Ezra et al; 1984, Huete et al. 1985, Elvidge et al. 1985).

3-1-2 Paramètres du couvert: La structure.

Nous avons vu que la structure regroupait trois notions différentes:

- La surface développée par la culture
- L'orientation des différents éléments et leur aggrégation éventuelle (effets de rang)
- Les propriétés optiques de ces différents éléments.

La difficulté de mesurer ou de contrôler ces différents paramètres, évoquée au chapitre 2, explique le fait qu'il n'existe que peu de travaux expérimentaux analysant de manière fine leur influence sur la réponse radiométrique de la culture.

La plupart des études s'en tiennent à des paramètres très globaux ou ne retiennent que l'indice foliaire vert. Nous les avons abordé au chapitre 1. Elles correspondent à des observations sur une même culture, à différents stades de développement, ou à des comparaisons de cultures dans des états différents. Dans ces deux cas les paramètres de structure évoluent simultanément si bien qu'il est très difficile d'appréhender leur influence respective ou leur interaction sur la réponse radiométrique du couvert (Guyot et al. 1984).

Une analyse qualitative des phénomènes permet pourtant de comprendre la majorité des variations de réflectance liées à un facteur isolé. Dans le cas simple d'une culture pouvant être représentée par une seule strate d'éléments verts, la réponse radiométrique dépendra de la composition de quatre facteurs principaux:

- l'importance et le sens de la différence entre les propriétés optiques du sol sous jacent et les éléments du couvert. Ce facteur explique les comportements le plus souvent opposés du domaine visible, où le sol est généralement plus réfléchissant que la végétation, et du domaine du proche infrarouge, où la végétation est plus réfléchissante que le sol (figure 1.1)
- La proportion, vue par le radiomètre, de surfaces éclairées directement par le soleil et de surfaces à l'ombre. Ce facteur explique une grande part des variations de réflectance occasionnées par des changements de position relative du radiomètre par rapport au soleil. Il est très important pour les cultures en rang ou à port dressé notamment dans le domaine du visible. La transmittance importante des feuilles dans le proche infrarouge atténue les effets de ce facteur.
- L'importance des phénomènes de réflexion spéculaire (Vanderbilt 1983).
- des effets de piégeage du rayonnement incident particulièrement important quand la culture possède un port dressé, que le soleil est proche du zénith et dans le domaine visible où la réflectance du sol et des feuilles sont faibles.

Mais cette analyse grossière de l'interaction du rayonnement de courte longueur d'onde avec le couvert ne nous autorise pas à quantifier leur réponse radiométrique. Seule, la construction de modèles déterministes de réflectance, basés sur une analyse physique des processus mis en jeu nous permet de reproduire les différents comportements observés. Ils constituent l'outil idéal pour simuler tous les cas qu'il serait difficile ou très laborieux de réaliser expérimentalement.

C'est donc à eux que nous ferons appel pour passer du profil spectral aux caractéristiques de l'évolution de la structure du couvert ou inversement. Nous allons donc commencer par en faire une très rapide revue.

3-1-3 Modèles analytiques de réflectance directionnelle

Dauzat (1985) et Prévot (1985) distinguent au moins deux catégories de modèles:

- les modèles basés sur les probabilités d'interception du rayonnement
- les modèles utilisant les lois de transfert radiatif en milieu diffusant.

3-1-3-1 Modèles probabilistes

A la suite des travaux de Monsi et Saeki (1953), des modèles basés sur les probabilités d'interception ou de non interception du rayonnement de courte longueur d'onde à l'intérieur du couvert ont été proposés.

Oliver et Smith (1974) utilisent la technique Monte Carlo pour simuler la réflectance directionnelle. Cette technique a l'inconvénient majeur de nécessiter des temps de calcul très importants.

Kimes (1984), Dauzat (1985) et Prévot (1985) calculent directement les probabilités d'interception du rayonnement en discrétisant la culture en strates successives et les directions de l'espace en secteurs. Ces modèles reposent sur la notion de "fréquence de trous" (probabilité de non interception du rayonnement) qui nécessite des mesures particulières (points quadrat, photos hémisphériques)

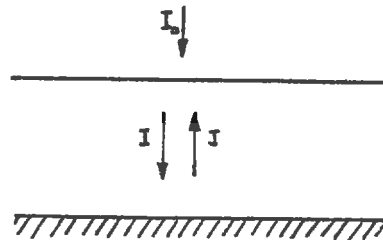
Ils ont été peu utilisés jusqu'à présent. Ils présentent pourtant l'avantage de pouvoir être étendus au domaine de l'infrarouge thermique en considérant les différents éléments du couvert non plus comme de simples réflecteurs ou transmetteurs, mais comme des émetteurs (Prévot 1985).

3-1-3-2 Modèles de transferts radiatifs

Ces modèles sont basés sur les équations différentielles établies par Kubelka et Munk (1931) pour décrire les transferts radiatifs dans un milieu homogène (de la peinture). Il s'agit d'un modèle unidimensionnel où seuls les flux diffus ascendants et descendants sont pris en considération. L'atténuation des différents flux y est traitée conformément à la loi de Beer.

$$\frac{d I}{d n} = a I - b J$$

$$\frac{d J}{d n} = -a J + b I$$



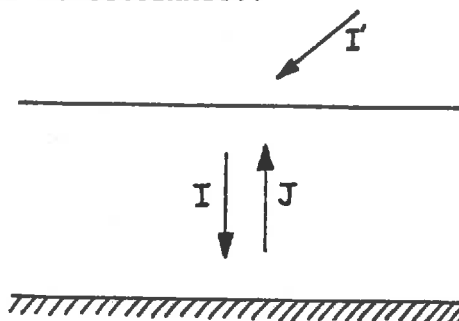
- I : flux diffus descendant
- J : flux diffus ascendant
- n : indice foliaire
- a : coefficient d'atténuation diffuse
- b : coefficient de diffusion

Duntley (1942) introduit une troisième équation différentielle pour décrire la pénétration d'un flux directionnel.:

$$\frac{d I}{d n} = a I - b J - s I'$$

$$\frac{d J}{d n} = -a J + b I + s' I'$$

$$\frac{d I'}{d n} = k I'$$



I' : flux solaire direct

s : coefficient de diffusion pour le flux solaire direct

s' : coefficient de retrodiffusion pour le flux solaire direct

k : coefficient d'extinction pour le flux solaire direct

Ces équations ont été utilisées par Allen et al. (1970) pour simuler la réflectance hémisphérique de couverts végétaux. Mais les coefficients des équations différentielles n'ont pas été explicités en fonction de la structure du couvert. Ils doivent être déterminés par l'expérience.

Suits (1972) relie les paramètres des équations de Duntley aux caractéristiques de la structure du couvert. Il schématise les éléments végétaux par leurs projections sur les plans verticaux et horizontaux (figure 3.4).

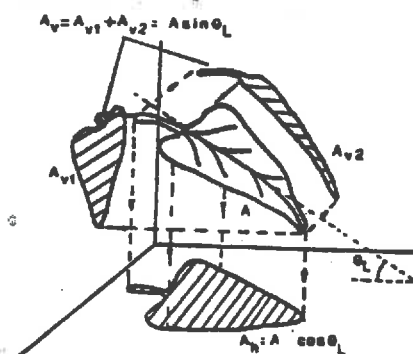


Figure 3.4: Projections des surfaces foliaires utilisées par Suits.

Il est ainsi possible de calculer l'éclairement reçu par chaque feuille, considérée alors comme une source répondant à la loi de Lambert. Suits utilise alors la notion de "probabilité de trous" pour définir la contribution (quand il n'y a pas d'interception) de chacune de ces sources au flux ascendant, dans la direction de la visée. La luminance du couvert dans cette direction est la somme des contributions de chacun des éléments du couvert. C'est le premier modèle de réflectance directionnelle.

Il autorise la décomposition de la culture en plusieurs strates homogènes, chacune d'elles pouvant être, elle-même, composée d'éléments d'orientation et de propriétés optiques différentes.

Ce modèle a été validé à plusieurs reprises (Colwell 1974, Chance et Lemaster 1977, Bunnik 1978, Lemaster et Chance 1980).

Il a fait l'objet de plusieurs améliorations dont les plus importantes sont son extension au cas des cultures en rang (Verhoef et Bunnik 1976, Suits 1983) et la prise en compte des fonctions de distribution des angles des feuilles (Verhoef 1984, Badwhar 1984). Ces perfectionnements entraînent toujours une complexité croissante, peu compatible avec une utilisation opérationnelle.

Connaissant les caractéristiques structurales des couverts, l'orientation de la visée et celle du soleil, ces modèles permettent de simuler la réflectance directionnelle (Bunnik et Verhoef 1981).

Par contre, l'inversion de ces modèles, extraction d'informations sur la structure du couvert à partir de réflectances spectrales, n'est pas aisée. Goel (1983) montre que les modèles de transferts radiatifs sont théoriquement inversibles. Mais cette procédure n'est possible qu'à partir d'un jeu important de données de réflectances spectrales. Dans le cas simple d'un couvert à une couche, la détermination de l'indice foliaire et de la fonction de distribution des angles foliaires n'est réellement envisageable, en ne demandant qu'un nombre plus réduit de mesures spectrales, que si les autres paramètres sont connus a priori (Goel 1983).

Il semble donc difficile d'utiliser les modèles de réflectance directionnelle dans leur forme initiale.

Notre ambition est de proposer un modèle simplifié de réflectance directionnelle :

- En simplifiant le formalisme mathématique du modèle.
- en restreignant le domaine de validité au domaine défini dans le cadre du suivi de cultures de céréales par mesures satellitaires.

Le modèle résultant devra être capable de produire directement ou indirectement d'autres variables que des paramètres de structure: En particulier on se ménagera la possibilité de déterminer la réflectance hémisphérique ainsi que la transmittance diffuse du couvert. Ces variables nous permettront d'estimer l'albedo et le PAR absorbé par la culture.

3-2 CONSTRUCTION D'UN MODELE SIMPLE DE REFLECTANCE DIRECTIONNELLE

L'analyse des courbes de réponse de la réflectance à différents facteurs, ainsi que des justifications théoriques restreintes au domaine du visible et à la réflectance hémisphérique va nous permettre de proposer un formalisme simple. Nous testerons alors l'application de ce formalisme à la réflectance directionnelle et au domaine du proche infrarouge. La vérification de la validité du modèle simple proposé utilisera les résultats de simulations du modèle de réflectance directionnelle de Suits.

3-2-1 Choix de la forme du modèle simplifié

3-2-1-1 Choix de la forme du modèle

Différentes simulations réalisées avec les modèles décrits précédemment montrent que la réponse spectrale d'un couvert varie de façon exponentielle avec son indice foliaire (figure 3.5). Ceci confirme les résultats des expérimentations dont nous avons parlé au chapitre 1.

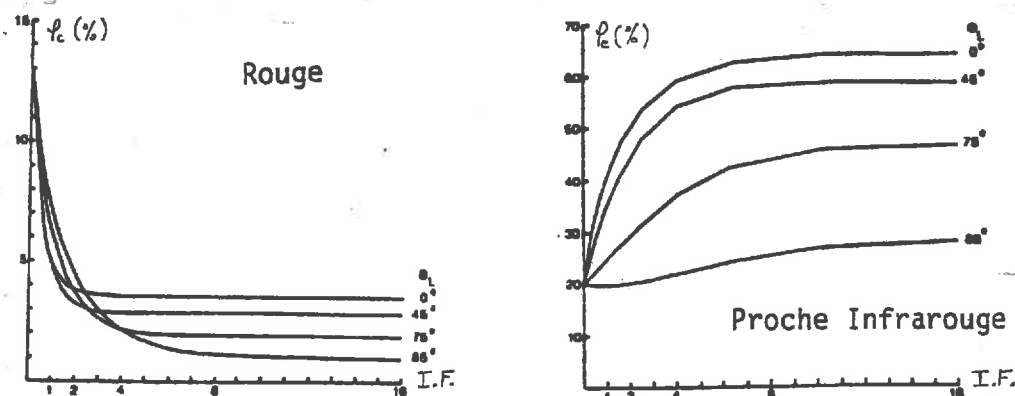


Figure 3.5: simulation de l'évolution de la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire pour plusieurs angles d'inclinaison des feuilles ($\alpha=0$: feuilles horizontales) (d'après Bunnik 1978)

L'influence de la réflectance du sol sous culture n'est importante que pour de faibles indices foliaires (figure 3.6).

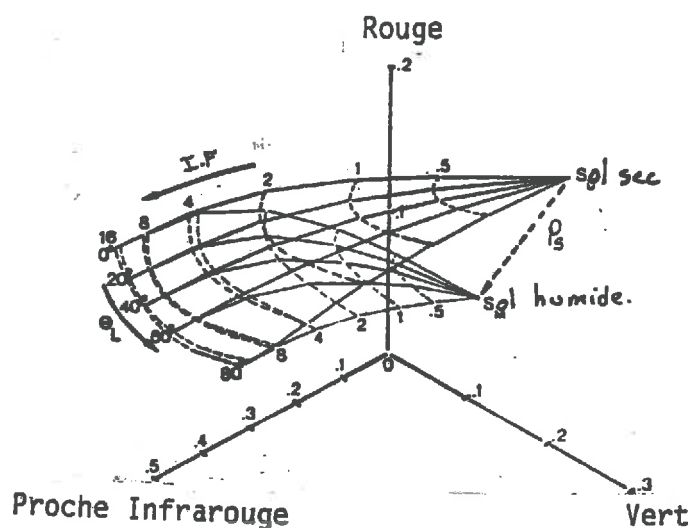


Figure 3.6: Influence de la réflectance du sol nu sur la réponse spectrale du couvert (d'après Bunnik 1978).

L'orientation des éléments du couvert, la géométrie de la visée ou de l'éclairement se traduiront par des variations de l'amplitude de la réponse radiométrique en fonction de l'indice foliaire.

L'ensemble de ces observations nous oriente vers un modèle du type "cinétique monomoléculaire" (cf. 2-2-2-1-2-1-2) que l'on peut écrire sous la forme:

$$p_c = p_s + (p_\infty - p_s) \cdot e^{-K \cdot IF} \quad (3.1)$$

p_c : réflectance directionnelle de la culture

p_∞ : réflectance directionnelle infinie de la culture;
elle correspond à la réflectance asymptotiquement atteinte
quand l'indice foliaire tend vers l'infini

p_s : réflectance du sol

K : coefficient d'extinction pour la réflectance directionnelle.

IF : indice foliaire

Ce formalisme simple a été proposé par Allen et Richardson (1968) dans le cas du modèle de réflectance ne prenant en compte que les flux diffus. La résolution des équations différentielles de Kubelka et Munk aboutit dans ce cas à l'expression:

$$IF = \frac{1}{K} \log \left[\frac{(1 - \rho_C \cdot \rho_\infty) (\rho_\infty - \rho_S)}{(1 - \rho_S \cdot \rho_\infty) (\rho_\infty - \rho_C)} \right] \quad (3.2)$$

Dans le cas où $\rho_s \cdot \rho_\infty \ll 1$ et $\rho_s \cdot \rho_\infty \ll 1$ (dans le domaine du visible) on obtient l'équation simple (3.1).

Kumar et Monteith (1981) et Park et Deering (1982) aboutissent à la même conclusion.

Bunnik (1978), à partir du modèle de Suits, donne l'expression analytique des coefficients K et ρ_∞ dans le domaine visible.

Chance (1981) détermine l'indice foliaire de différentes cultures en appliquant l'expression simplifiée (3.1) à des mesures radiométriques dans les canaux visible et proche infrarouge de Landsat.

L'extension du modèle simplifié (3.1) au domaine proche infrarouge ne semble pas poser de problèmes particuliers hormis la difficulté d'obtenir une expression analytique des paramètres K et ρ_∞ .

Dauzat (1985) propose une formule semi-empirique équivalente à (3.1) pour simplifier son modèle de réflectance. Il fournit une interprétation des différents paramètres dans le cas de la réflectance hémisphérique.

Le modèle (3.1) semble donc capable de bien décrire la réflectance hémisphérique dans le domaine visible. Par contre, l'extension de cette simplification au domaine proche infrarouge et à la réflectance directionnelle ne nous semble pas être très claire.

Nous allons donc tester l'adéquation du modèle (3.1) à la réflectance directionnelle du domaine visible au domaine proche infrarouge. Nous utiliserons pour cela des simulations issues du modèle de Suits. Ce modèle a en effet l'avantage d'avoir été testé à de nombreuses reprises. Nous utiliserons la version initiale de ce modèle, pour laquelle, les effets de rangs, la fonction de distribution des angles foliaires et les différences éventuelles de propriétés optiques entre faces des feuilles, ne sont pas prises en compte. Nous rappellerons brièvement les principales hypothèses de ce modèle:

- Les éléments du couvert sont lambertiens
- Les feuilles n'ont pas d'azimut privilégié
- Pas de superposition privilégiée de feuilles
- L'inclinaison des feuilles est caractérisée par un angle moyen. Elles sont représentées par leurs projections sur les plans horizontaux et verticaux.

3-2-1-2 Validation du formalisme du modèle simplifié

Nous restreindrons notre validation au cas des visées verticales et ne considérerons que la fraction directe du rayonnement solaire. Ce cas particulier d'application du modèle évite de prendre en considération l'azimut relatif du plan de visée par rapport à celui du soleil. Nous nous trouvons malgré tout assez près des conditions dans lesquelles la majorité des données satellitaires est acquise.

Nos simulations ont été réalisées en utilisant le formalisme matriciel décrit par Saint (1979), appliqué au cas d'une culture à une seule strate, n'ayant qu'un seul type de composant: les feuilles.

Les valeurs des autres variables ont été choisies de manière à reproduire toute l'étendue des variations pour des cultures de céréales:

- indice foliaire variant de 0,25 à 16,0 en progression géométrique (0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16).
- angle des feuilles variant de 0° (feuilles horizontales) à 90° (feuilles verticales) par pas de 15°.
- propriétés optiques des feuilles vertes et sénescentes dans les trois canaux SPOT HRV (tableau 3.1).

	reflectance (ρ)			transmittance (τ)		
	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
Feuilles vertes	.13	.07	.45	.10	.007	.41
Feuilles sénescentes	.25	.40	.57	.25	.40	.40

Tableau 3.1: valeurs des propriétés optiques des feuilles utilisées pour nos simulations.

- propriétés optiques de sol humide et de sol sec dans le visible (5%, 20%, 35%) et le proche infrarouge (7%, 31%, 64%).

- angle du soleil variant de 30° à 75° par pas de 15°.

Le modèle de Suits, par construction, permet de calculer la réflectance hémisphérique ainsi que la part d'énergie incidente transmise au niveau du sol. Le calcul de ces deux grandeurs est nécessaire si l'on veut pouvoir estimer l'énergie photosynthétiquement active absorbée par la culture. Nous ne l'effectuerons que dans ce domaine spectral particulier. Nous utiliserons l'équation (3.2) pour décrire la réflectance diffuse.

$$R_c = R_{\infty} + (R_s - R_{\infty}) \cdot e^{-K_h \cdot IF} \quad (3.2)$$

R_c : réflectance hémisphérique de la culture
 R_{∞} : réflectance hémisphérique infinie de la culture
 R_s : réflectance du sol
 K_h : coefficient d'extinction pour la réflectance hémisphérique.
 IF : indice foliaire

Par contre, nous chercherons à décrire la transmittance du couvert par une simple loi de Beer:

$$T = e^{-K_t \cdot IF} \quad (3.3)$$

T : transmittance du couvert
 K_t : coefficient d'extinction du rayonnement transmis
 IF : indice foliaire

Nous avons déterminé les valeurs des paramètres p_{∞} , R_{∞} , K , K_h , K_t , par ajustement non linéaire aux données de simulation pour chaque combinaison d'angle zénithal solaire, d'angle des feuilles et de propriétés optiques de celles-ci. Seuls l'indice foliaire et la réflectance du sol nu sont les variables explicatives pour chacune de ces combinaisons.

Les écarts types résiduels des réflectances directionnelles, issus des ajustements non linéaires, sont relativement faibles (figure 3.7). On remarque qu'ils ont tendance à croître légèrement quand les réflectance et transmittance des feuilles augmentent, quand les feuilles se rapprochent de la verticale ou lorsque le soleil est bas.

Le modèle de réflectance simplifié (3.1) ne s'écarte donc que très peu des simulations du modèle de Suits, tant que la réflectance des feuilles ne dépasse pas 50% (cas des feuilles senescentes dans le proche infrarouge).

Les modèles simplifiés de réflectance hémisphérique (3.2) (figure 3.8) et de transmittance (3.3) (figure 3.9) sont particulièrement performants dans le visible pour les feuilles vertes comme le laissait supposer l'analyse bibliographique précédente.

Les paramètres p_{∞} , R_{∞} , K , K_h , K_t , des équations (3.1), (3.2) et (3.3) ne dépendent que de l'orientation des feuilles, de l'angle du soleil et des propriétés optiques des feuilles, fonction de la longueur d'onde et de leur état. Il existe donc des relations étroites entre ces 5 paramètres du visible au proche infrarouge que nous allons expliciter à présent:

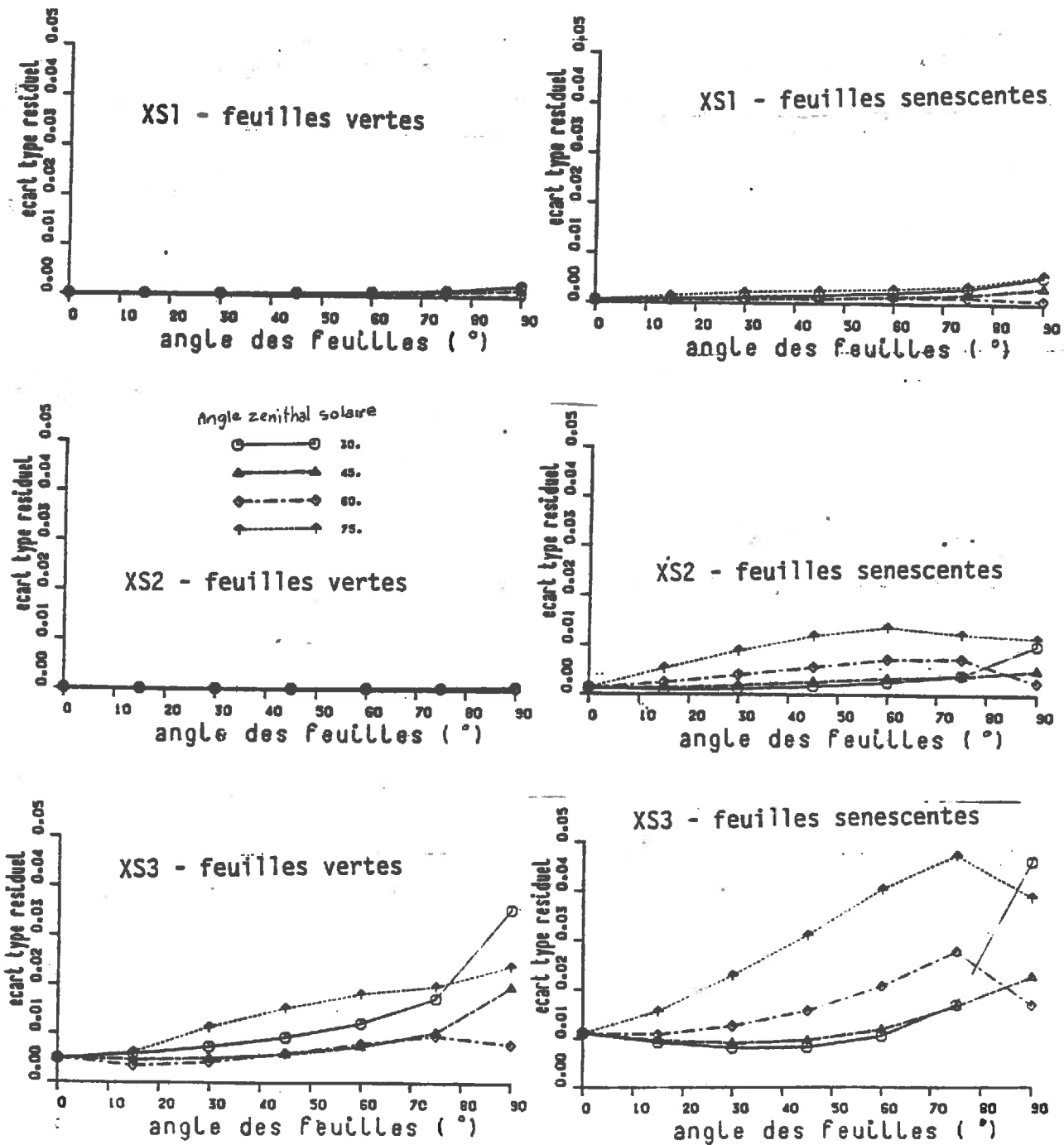


Figure 3.7: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.1) et celle issue du modèle de Suits.

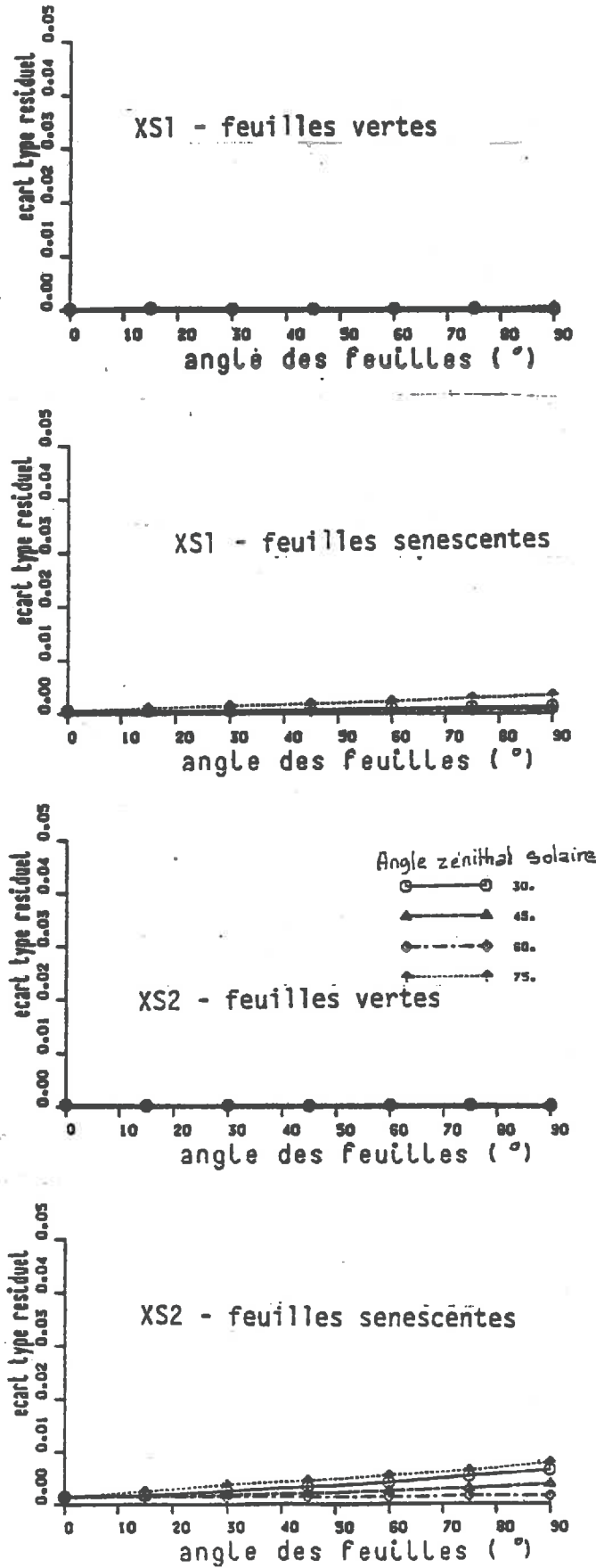


Figure 3.8: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.2) et celle issue du modèle de Suits.

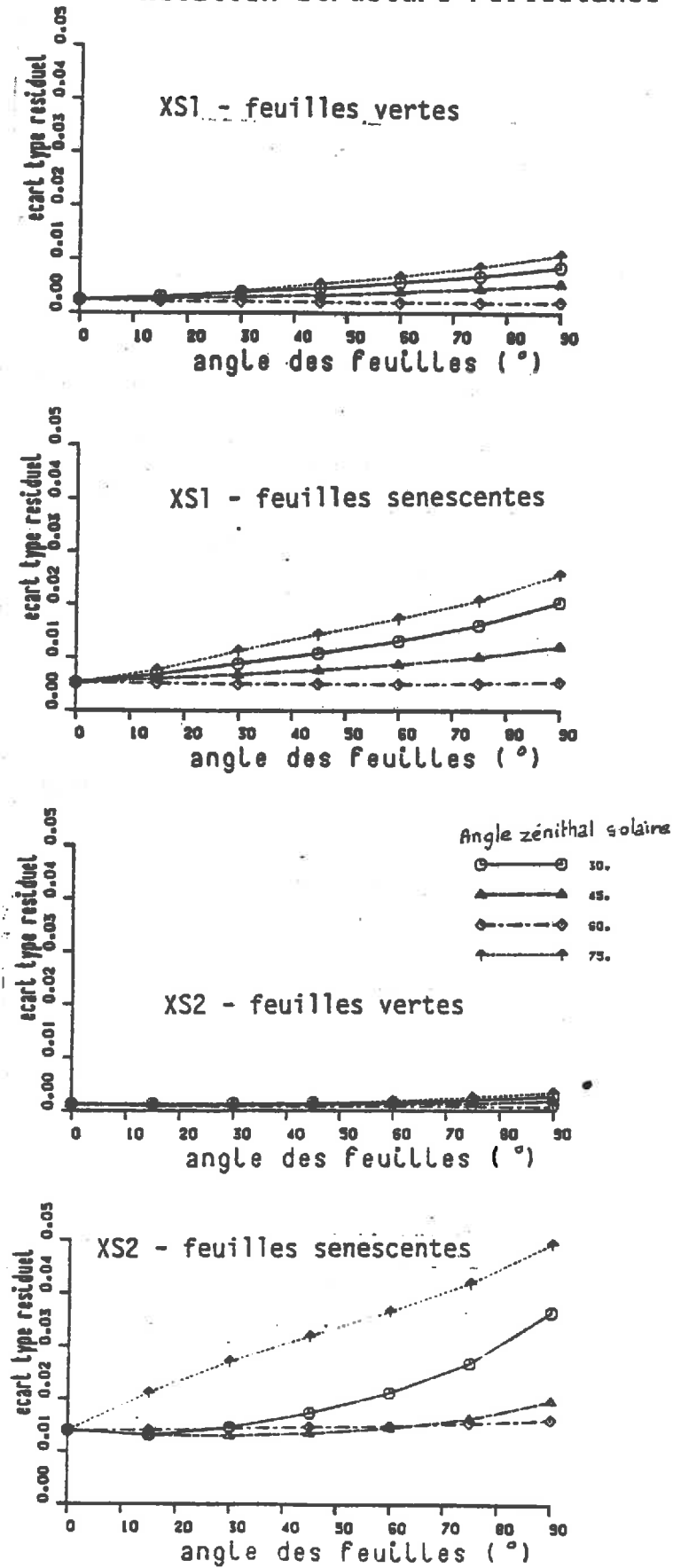


Figure 3.9: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.3) et celle issue du modèle de Suits.

3-2-2 Signification des paramètres des modèles simplifiés.

Notre objectif principal étant la simplicité du modèle, nous n'hésiterons pas à utiliser de simples ajustements polynomiaux pour décrire les relations existant entre les 5 paramètres et les propriétés optiques des feuilles, la position du soleil ou l'orientation des feuilles. L'absence de signification physique précise de ces ajustements ne nuit pas à une bonne description du phénomène, si on les réalise sur une gamme suffisamment large de variables d'entrée. Nous nous appuyons sur des "observations", résultats des simulations du modèle de Suits, qui sont certaines, reproductibles, et que nous pouvons parfaitement contrôler. Whalthal et al. (1984) utilisent une démarche équivalente dans le même domaine.

Nous analyserons d'abord l'influence des propriétés optiques des éléments du couvert sur ces 5 paramètres, pour une orientation des feuilles et du soleil fixée.

Nous analyserons ensuite l'influence de l'angle zénithal solaire et celle du port foliaire sur ces paramètres, pour des propriétés optiques des feuilles données.

3-2-2-1 Influence de propriétés optiques des feuilles sur les paramètres ρ_a , K , R_a , K_h , K_t

Il s'agit de caractériser l'évolution de chacun des 5 paramètres avec les propriétés optiques des feuilles, pour une orientation des feuilles et du soleil données.

Nous exprimerons les valeurs des paramètres correspondant à des réflectances et des transmittances des feuilles données en les rapportant à des propriétés optiques que nous prendrons comme référence. Nous avons ainsi choisi le cas des feuilles vertes dans la bande spectrale XS1 (vert). Cette référence correspond aux éléments photosynthétiquement actifs, dans une bande spectrale de comportement intermédiaire entre le domaine rouge (XS2) et proche infrarouge (XS3).

La figure 3.10 montre que les points correspondant à différentes orientations des feuilles et du soleil s'organisent autour de courbes dont l'allure dépend des propriétés optiques des feuilles.

On constate que les différentes courbes semblent toutes converger vers l'origine:

- pour la réflectance directionnelle infinie mesurée verticalement, ce cas correspond à une culture n'ayant que des feuilles verticales. Le couvert constitue alors un piège lumineux parfait.

- pour les autres paramètres, il est difficile, en visée verticale de trouver une justification théorique sinon que de considérer le cas de feuilles transparentes!

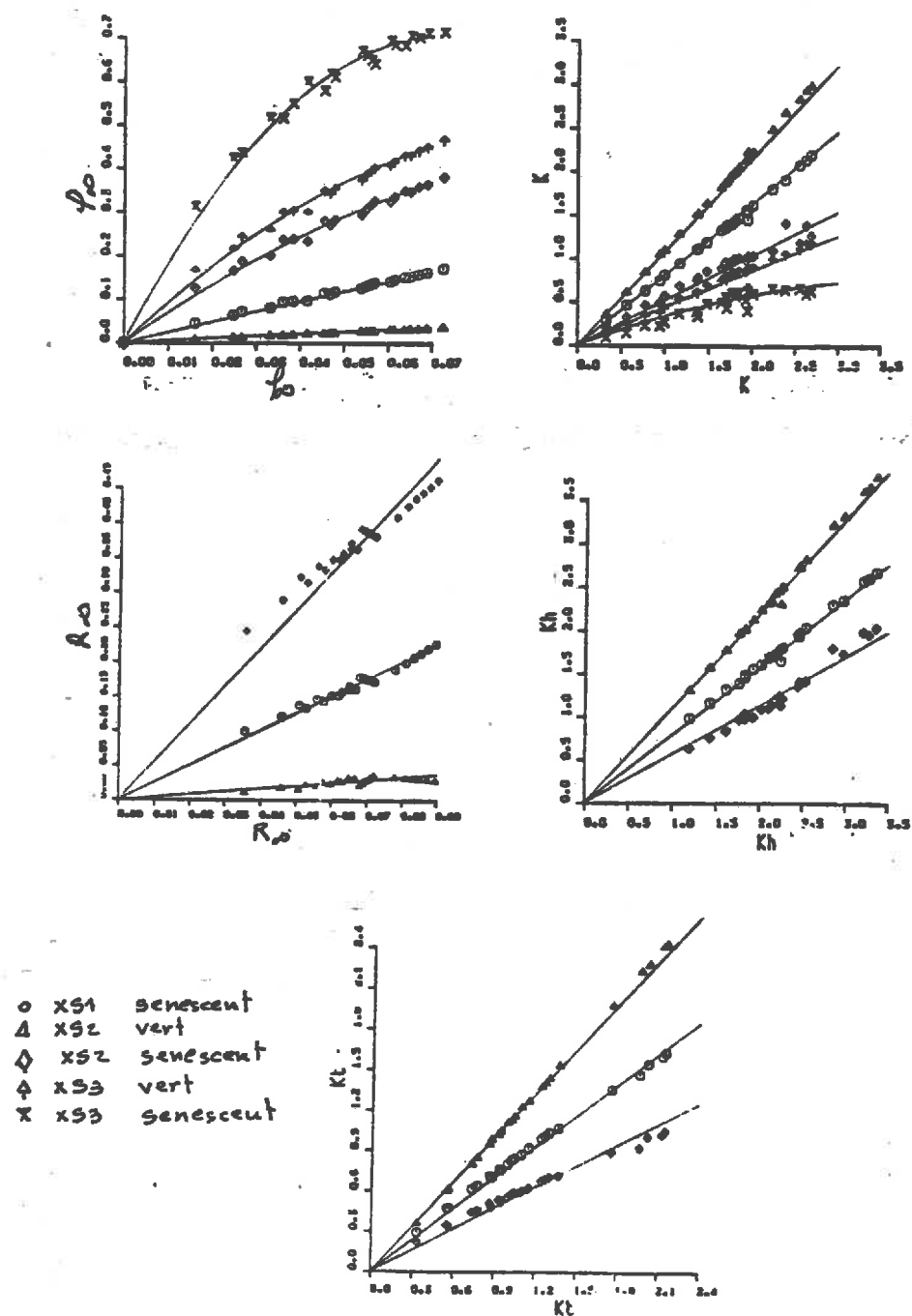


Figure 3.10: influence des propriétés optiques des feuilles sur les 5 paramètres des modèles simplifiés. L'abscisse correspond à la valeur du paramètre pour notre référence de propriétés optiques. ($\rho=0.13; \tau=0.10$). Les points correspondent aux valeurs estimées à partir du modèle de Suits. Les courbes sont issues des ajustements polynomiaux.

On constate que la réflectance infinie directionnelle ou hémisphérique augmente avec la réflectance et la transmittance des éléments du couvert. Par contre, les coefficients d'extinction diminuent quand la réflectance et la transmittance des feuilles augmentent.

Ces deux remarques expliquent les différences importantes entre le domaine du visible et celui du proche infrarouge.

Nous avons ajusté chacune des courbes caractérisées par des propriétés optiques de feuilles données à des polynômes de degré 2 pour ρ_∞ et K , et de degré 1 pour les autres paramètres. Nous avons de plus contraint les fonctions polynomiales à passer par l'origine.

Les coefficients de ces ajustements polynomiaux sont dépendants de la réflectance et de la transmittance des feuilles. Ces propriétés optiques peuvent être synthétisées en une seule variable: la réflectance infinie de la culture planophile correspondante. Elle s'exprime simplement selon l'équation (Bunnik 1978):

$$\rho_*(\rho, \tau) = \frac{1 - \tau - \sqrt{(1 - \tau)^2 - \rho^2}}{\rho} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{réflectance de la feuille} \\ \tau = \text{transmittance de la feuille} \end{array}$$

Nous normaliserons la valeur de ρ_* par la valeur correspondant à notre référence ($\rho = .13$; $\tau = .10$) en posant:

$$\rho_n = \frac{\rho_*(\rho, \tau)}{\rho_*(.13, .10)}$$

Les relations existant entre les coefficients des ajustements polynomiaux et la réflectance infinie normalisée ont été ajustées à des fonctions polynomiales de degré inférieur à 3, en leur imposant de passer par le point 1:1 ou 1:0 correspondant à notre référence. Les coefficients sont reportés dans le programme présenté en annexe.

Il est donc ainsi possible de relier entre domaines spectraux caractérisés par leur réflectance infinie normalisée, les valeurs de chacun des paramètres ρ_∞ , K , R_∞ , K_h , K_t

Il nous reste donc à relier, à l'intérieur d'un domaine spectral particulier les paramètres ρ_∞ , K , R_∞ , K_h , K_t à l'orientation des feuilles et à la position du soleil.

3-2-2-2 Influence de l'orientation des feuilles et de la position du soleil sur les paramètres ρ , K , R_{∞} , K_h , K_z

Nous étudierons ces relations en nous plaçant dans le cas particulier de couverts composés de feuilles vertes et dans le canal XS1 correspondant à notre référence de propriétés optiques.

La figure 3.11 montre que la valeur des paramètres des modèles simplifiés est le résultat de l'interaction de l'angle solaire avec le port foliaire.

Les courbes caractérisées par un angle zénithal solaire donné convergent en un point unique correspondant au cas planophile: Un couvert composé uniquement de feuilles horizontales lambertiennes (hypothèse du modèle de Suits) a lui même un comportement lambertien (Bunnik 1978, Saint 1979).

La réflectance infinie directionnelle tend progressivement vers 0 quand les feuilles se rapprochent de la verticale (effet de piège lumineux). Elle augmente quand le soleil se rapproche de l'horizon.

La réflectance hémisphérique infinie évolue de façon beaucoup plus modérée avec le port foliaire mais aussi avec la position du soleil.

Les coefficients d'extinction K , K_h , K_z ont des comportements assez semblables: pour une hauteur du soleil donnée, ils passent par un maximum pour des angles foliaires dépendant de la hauteur du soleil. Ils augmentent quand le soleil se rapproche de l'horizon. La vitesse de saturation de la réponse radiométrique, qui dépend uniquement de ce coefficient d'extinction, sera donc plus faible pour des visées verticales réalisées à une heure proche du midi solaire.

On remarque d'autre part que, à port foliaire et angle zénithal solaire équivalents, la saturation sera atteinte d'abord par la réflectance hémisphérique, puis par la réflectance directionnelle et en dernier lieu par la transmittance.

La mise en équation de ces relations a été réalisée en deux temps:

- pour chaque angle zénithal solaire, ajustement des courbes à des fonctions polynômiales de degré inférieur à 3. Nous avons contraint ces polynômes à passer par le point particulier correspondant aux feuilles horizontales.

- Détermination des relations entre les coefficients des polynômes précédents avec l'angle zénithal solaire. Ces relations ont été établies par ajustement à des fonctions polynômiales de degré inférieur à 3.

Les coefficients de ces ajustements sont reportés dans le programme donné en annexe.

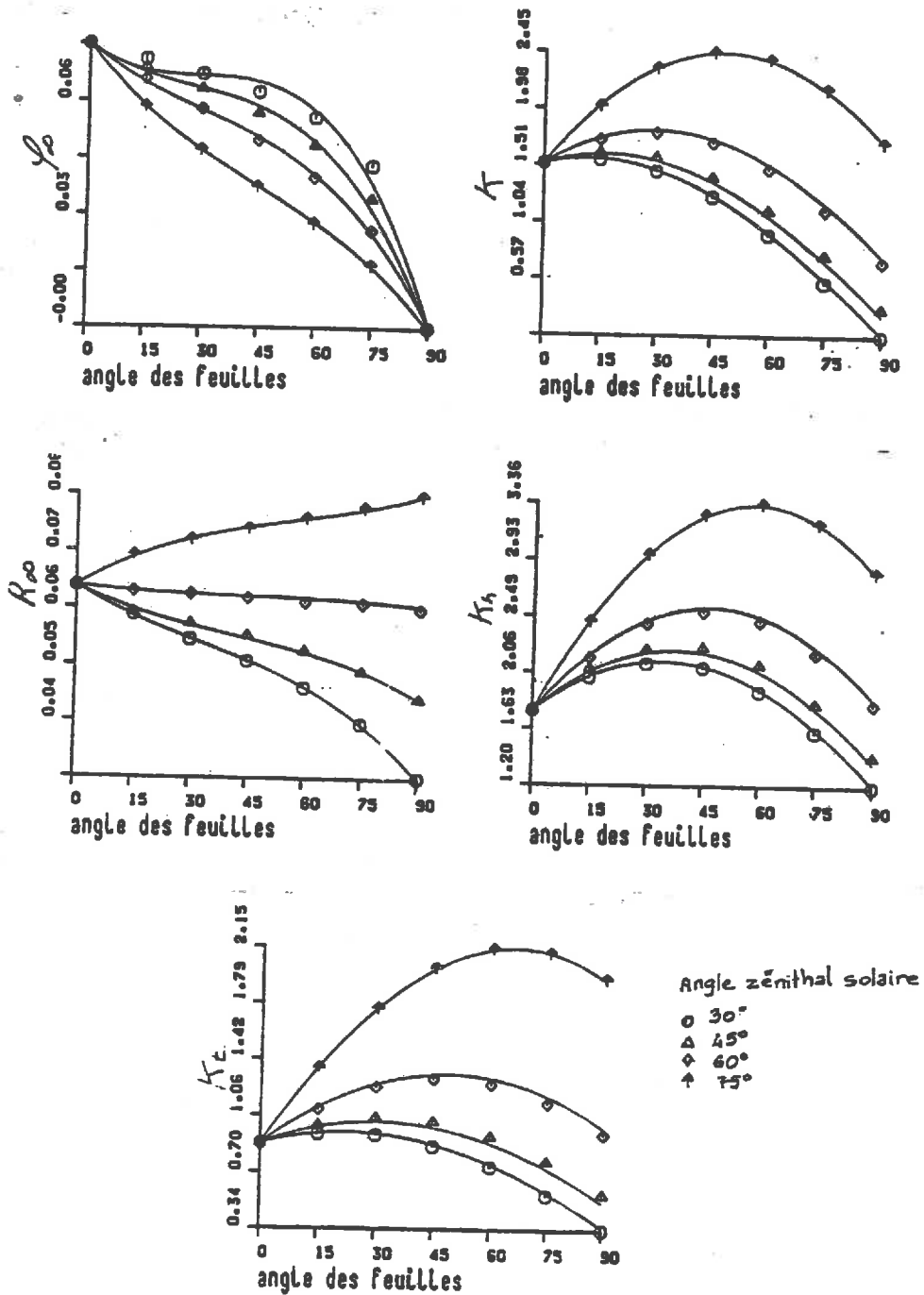


Figure 3.11: Influence du port foliaire et de l'angle zénithal solaire sur les 5 paramètres du modèle simplifié. Les points correspondent aux valeurs estimées à partir du modèle de Suits. Les courbes sont issues des ajustements polynômiaux.

La simple connaissance de la position du soleil et de l'orientation des feuilles du couvert permet d'estimer simplement les 5 paramètres des relations (3.1), (3.2) et (3.3). Il est ainsi possible de relier aisément la réflectance directionnelle à la réflectance hémisphérique ou à la transmittance du couvert.

Avant de passer à l'utilisation de ce modèle simplifié de transfert radiatif, il nous faut encore vérifier que les simplifications introduites ne le rendent pas trop imprécis par rapport au modèle de Suits initial.

3-2-3 Comparaison du modèle simplifié au modèle de Suits.

Pour mieux appréhender les limites d'utilisation d'un tel modèle simplifié, nous avons calculé les écarts types avec les simulations du modèle de Suits en individualisant chaque facteur de variation.

La réflectance directionnelle verticale (figure 3.12) est estimée avec le plus d'imprécision par rapport à la réflectance hémisphérique (figure 3.13) ou à la transmittance (figure 3.14).

Les écarts types augmentent quand la réflectance et la transmittance des feuilles s'élève. Mais, même pour la réflectance directionnelle, ils sont toujours inférieurs à 0,02 quand on excepte le cas des feuilles sénescentes dans le proche infrarouge ($\rho = .57$; $\tau = .41$). On remarque que l'erreur commise augmente légèrement avec la réflectance du sol, ou lorsque les feuilles se rapprochent de la verticale. Elle accuse un léger maximum pour un indice foliaire proche de 1, et un minimum pour un angle zénithal solaire compris entre 50 et 80°.

Le modèle simplifié proposé est donc globalement satisfaisant tant que la réflectance des feuilles ne dépasse pas la valeur de 50%.

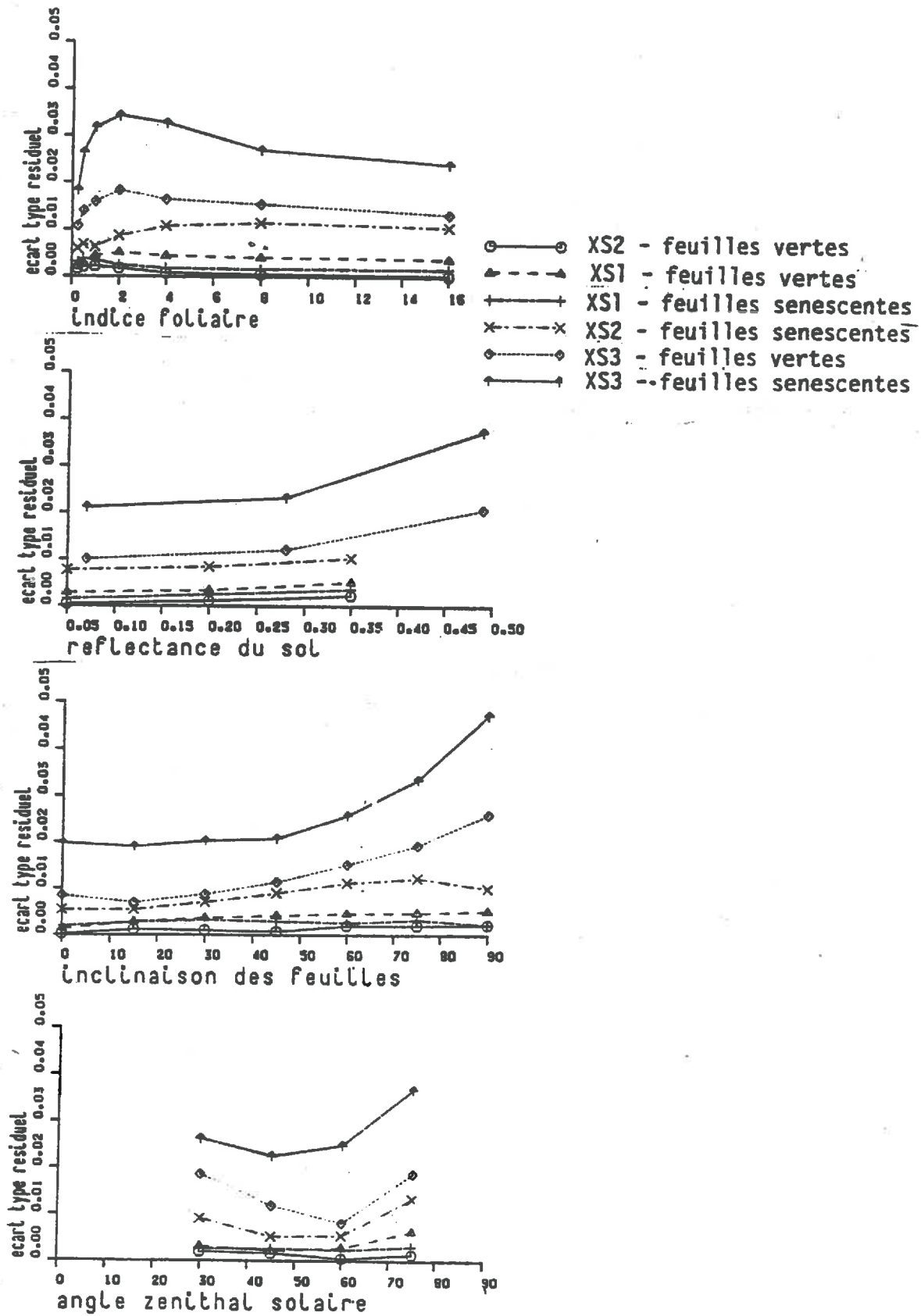


Figure 3.12: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.1) et celle issue du modèle de Suits.

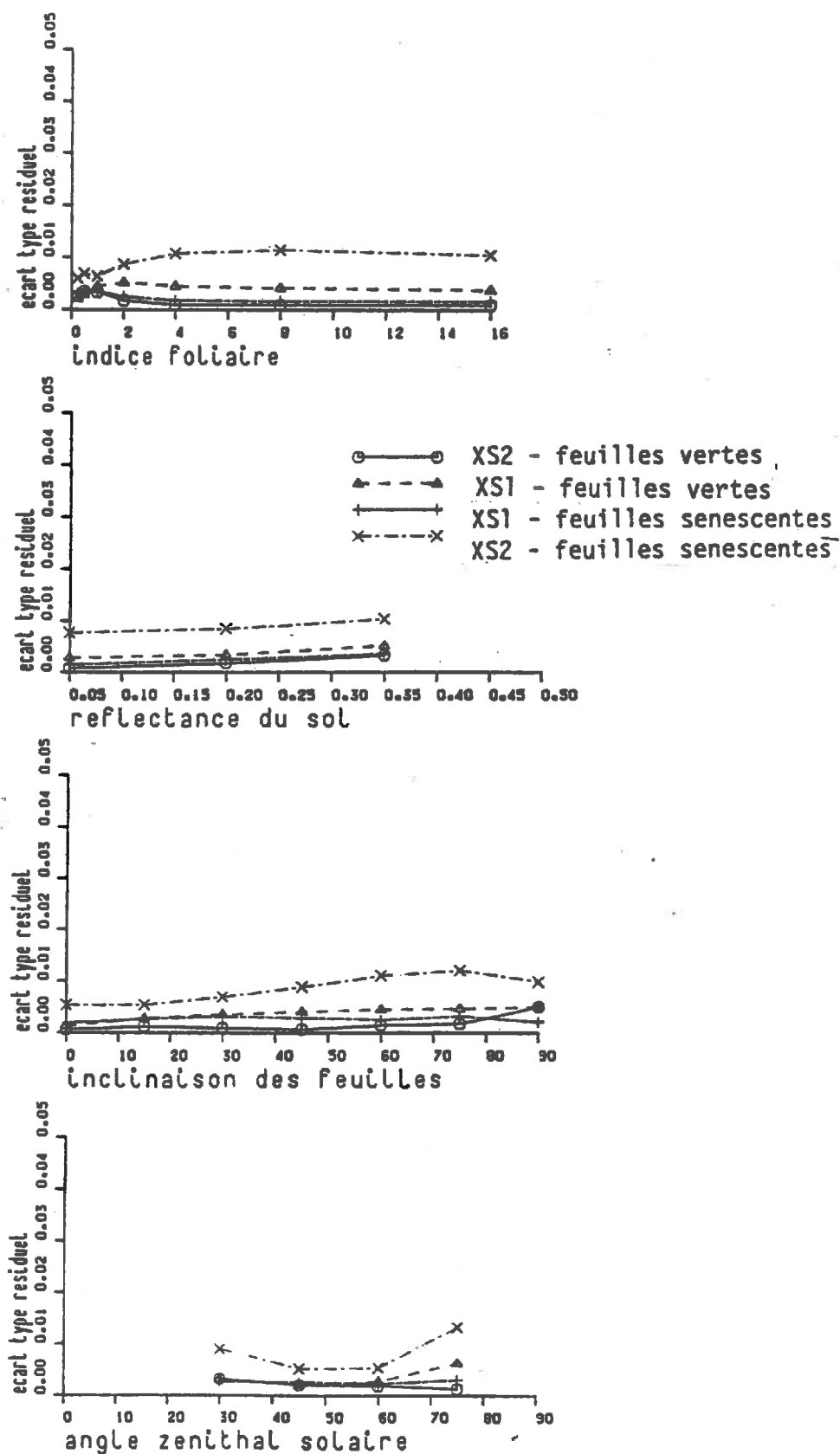


Figure 3.13: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.2) et celle issue du modèle de Suits.

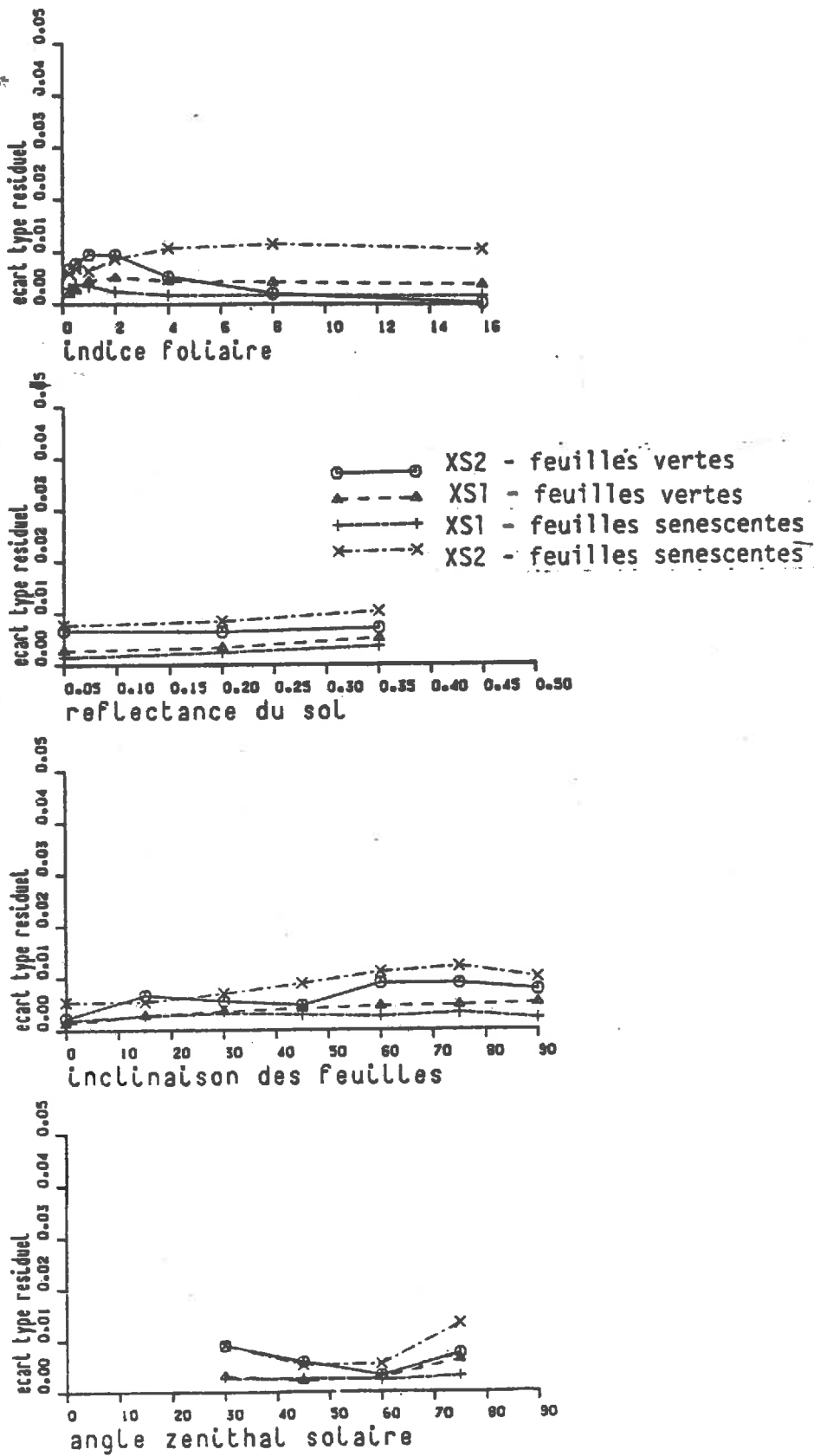


Figure 3.14: écart type de la distribution des résidus entre la réflectance directionnelle estimée par le modèle simplifié (3.3) et celle issue du modèle de Suits.

CONCLUSION PARTIELLE

Les relations entre la structure du couvert et sa réponse spectrale dépendent de facteurs externes à la culture comme la géométrie de l'éclairement, la position du soleil ou la réflectance du sol nu.

La difficulté de réaliser ou d'interpréter les expérimentations ayant pour but la mise en évidence de telles relations, nous a conduit à nous intéresser aux modèles analytiques de réflectance.

Du fait de leur complexité importante, nous proposons un modèle simplifié de réflectance directionnelle, mais aussi de réflectance hémisphérique et de transmittance du couvert. Nous nous sommes placés dans le cas simple de visées verticales d'un couvert monocouche, ne comportant qu'un seul composant: les feuilles. Ce modèle simplifié est basé sur une variation exponentielle de la réponse spectrale avec l'indice foliaire:

$$\rho_c = \rho_\infty + (\rho_s - \rho_\infty) \cdot e^{-K} \cdot IF \quad (3.1)$$

ρ_c : réflectance directionnelle de la culture
 ρ_∞ : réflectance directionnelle infinie de la culture
 ρ_s : réflectance du sol
 K : coefficient d'extinction pour la réflectance directionnelle.
 IF : indice foliaire

$$R_c = R_\infty + (R_s - R_\infty) \cdot e^{-K_h} \cdot IF \quad (3.2)$$

R_c : réflectance hémisphérique de la culture
 R_∞ : réflectance hémisphérique infinie de la culture
 R_s : réflectance du sol
 K_h : coefficient d'extinction pour la réflectance hémisphérique.

$$T = e^{-K_t} \cdot IF \quad (3.3)$$

T : transmittance du couvert
 K_t : coefficient d'extinction du rayonnement transmis

Ce formalisme simplifié permet une interprétation claire de la réponse spectrale du couvert en fonction de l'indice foliaire. On distingue en effet des facteurs déterminant l'amplitude de la variation de réflectance avec l'indice foliaire (ρ_s , ρ_∞ , R_s , R_∞), ainsi que des paramètres liés à la vitesse de saturation de la réflectance (K , K_h , K_t)

Les 5 paramètres ρ_o , K , R_o , K_h , K_t peuvent s'exprimer simplement en fonction de l'angle du soleil, de l'inclinaison des feuilles et de leur propriétés optiques.

Ce modèle reproduit fidèlement les simulations du modèle de Suits tant que la réflectance des feuilles ne dépasse pas 50%. Dans ces conditions, il est aisé de relier les comportements entre les différents domaines spectraux, ou la réflectance directionnelle, à la réflectance hémisphérique ou à la transmittance d'un même couvert.

Nous sommes donc armés pour coupler la modélisation de la forme de l'évolution de la structure d'un couvert de blé (chapitre 2) à celle de la réponse spectrale instantanée d'un couvert, abordée dans ce chapitre. Cette synthèse doit aboutir à la proposition d'un modèle de forme de profil spectral. Elle permettra aussi d'estimer la partie photosynthétiquement active de l'énergie solaire absorbée par la culture. Ce sera l'objet de la quatrième et dernière partie de ce travail.

partie 4

<u>IV MODELISATION DU PROFIL SPECTRAL: APPLICATION A LA DETERMINATION DU RAYONNEMENT PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIF ABSORBE PAR LA CULTURE</u>	138
<u>4-1 CONSTRUCTION DU MODELE DE FORME DE PROFIL SPECTRAL</u>	138
4-1-1 <u>Position du problème</u>	138
4-1-2 <u>Mesures radiométriques</u>	140
4-1-3 <u>Construction du profil spectral</u>	142
4-1-3-1 Relations entre canaux	142
4-1-3-1-1 Détermination de la droite du sol d'Avignon	143
4-1-3-1-2 Evolution radiométrique d'un couvert dans le plan rouge-proche infrarouge	144
4-1-3-1-3 Détermination de la droite de la sénescence	148
4-1-3-2 Application du modèle de réflectance simplifié à un couvert comportant 2 strates et simplification de la stratification d'une culture de blé	147
4-1-4 <u>Vérification du comportement du modèle de forme de profil spectral</u>	150
4-1-4-1 Détermination de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles	150
4-1-4-2 Détermination de caractéristiques de l'évolution des surfaces de la culture	153
<u>4-2 APPLICATION A LA DETERMINATION DU RAYONNEMENT PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIF ABSORBE PAR LA CULTURE</u>	157
4-2-1 Application des modèles de réflectance et de transmittance au calcul du PAR absorbé par la culture	157
4-2-2 Détermination du PAR absorbé par la culture	158
CONCLUSION PARTIELLE	181
CONCLUSION GENERALE	164
BIBLIOGRAPHIE	184
ANNEXE	167

IV MODELISATION DU PROFIL SPECTRAL: APPLICATION A LA DETERMINATION DU RAYONNEMENT PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIF (PAR) ABSORBE

Nous avons décrit au chapitre 2 l'évolution de la structure d'un couvert de blé. Nous venons d'analyser et de proposer une formulation simplifiée des relations instantanées entre la structure du couvert et sa réponse spectrale. En utilisant les acquis de ces deux précédents chapitres, nous essaierons de construire un modèle d'évolution de la réflectance spectrale de couverts de blé. Nous appliquerons ce modèle à la détermination de la partie photosynthétiquement active du rayonnement solaire absorbée par la culture.

4-1 Construction du modèle de profil spectral

4-1-1 Position du problème

La construction d'un modèle de forme de profil spectral nécessite de composer notre modèle de forme d'évolution de la structure du couvert avec un modèle de réflectance directionnelle. L'intérêt d'une telle construction est de pouvoir estimer, à partir d'un profil spectral observé, les 5 paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces foliaires. Nous aurions alors réalisé une "inversion" de modèle de réflectance: Nous serions en mesure d'estimer à chaque instant l'indice foliaire et sa répartition dans les différentes strates.

Mais, la composition du modèle d'évolution de la structure avec notre modèle simplifié de réflectance n'est pas directement réalisable: deux problèmes principaux existent:

-1- Application du modèle de réflectance simplifié au cas d'un couvert comportant plusieurs strates.

Le modèle simplifié de réflectance ne s'applique strictement qu'au cas d'un couvert réduit à une strate composée d'un seul type d'éléments. Or, notre description du couvert de blé montre qu'il faut distinguer au moins trois strates:

- une strate de cols d'épis et d'épis verts
- une strate de tiges et de feuilles vertes
- une strate d'éléments sénescents.

-2- Problèmes liés au nombre de variables à estimer à chaque instant, face au nombre de variables d'entrée.

Notre modèle de forme d'évolution des surfaces foliaires nous permet de déduire, à chaque instant, la surface développée dans chacune des strates si celle d'une strate particulière est connue.

L'utilisation du modèle de profil spectral pour en extraire, à un instant donné, la surface d'une certaine strate revient bien alors à un problème d'inversion de modèle de réflectance.

Dans le cas simple d'un couvert ne comportant qu'une strate et un seul type d'élément, la détermination instantanée de l'indice foliaire à l'aide du modèle simplifié et à partir de la réflectance observée de la culture nécessite la connaissance :

- de la réflectance du sol
- de l'orientation des éléments du couvert
- des propriétés optiques des éléments du couvert
- de la position du soleil

La position du soleil est parfaitement déterminée en un lieu donné à partir de l'heure et de la date de la mesure.

Le chapitre 2 montre qu'il est possible d'attribuer à priori les valeurs des propriétés optiques d'un organe donné si l'on connaît son état.

Mais, même dans ce cas élémentaire le système d'équations auquel nous aboutissons comporte encore 3 inconnues:

- l'indice foliaire,
- la réflectance du sol sous culture et
- l'orientation des éléments du couvert.

Il nous faudrait donc au moins 3 bandes spectrales aussi indépendantes que possible pour trouver une solution à ce système à trois inconnues.

Nous rechercherons donc, dans un premier temps les relations existant entre les réflectances de couverts de blé dans les trois bandes spectrales du satellite SPOT. Cette analyse devra aboutir à la détermination du nombre de bandes spectrales réellement utilisables car suffisamment indépendantes. Elle nous permettra aussi de préciser quel rôle nous attribuerons aux canaux que nous aurons sélectionnés. Elle nous fournira enfin des éléments nous autorisant à réduire le nombre de strates à prendre en considération.

Nous analyserons dans un deuxième temps les approximations nécessaires pour appliquer le modèle de réflectance simplifié au cas d'une culture comportant plusieurs strates.

Le modèle de profil spectral étant construit, nous l'appliquerons à la recherche de différents paramètres d'évolution de la structure du couvert et comparerons ainsi les valeurs estimées aux valeurs mesurées expérimentalement.

L'ensemble de ces approximations ou vérifications sera basé sur les résultats de mesures radiométriques effectuées en particulier sur les trois variétés dont nous avons caractérisé la structure. Nous allons donc brièvement décrire la méthodologie de mesure radiométrique que nous avons utilisée.

4-1-2 Mesures radiométriques

Nous avons utilisé le radiomètre CIMEL (Guyot et al. 1981) de simulation du satellite SPOT comportant 3 bandes spectrales:

XS1:500 590nm

XS2:620 680nm

XS3:790 890nm

Il est composé de deux têtes:

- une tête d'éclairement équipée d'objectifs diffusant de 180° d'ouverture. Tournée vers le ciel, elle mesure l'énergie incidente.
- une tête de luminance, équipée d'objectifs de 12° d'ouverture. Elle vise la végétation et mesure le flux radiatif directionnel réfléchi par la culture.

L'étalonnage du système est réalisé en visant une surface blanche diffusante aussi lambertienne que possible (aluminium recouvert de sulfate de baryum) et étalonnée au spectrophotomètre du laboratoire.

Les deux têtes sont fixées à l'extrémité du bras d'un chariot mobile

Les mesures de luminance sont effectuées verticalement à 2,5m de hauteur et au Sud du chariot de manière à éviter au maximum les problèmes d'ombre portée. La tache au sol échantillonnée ainsi correspond à un cercle de 0,5 m de diamètre.

Parrallèlement aux mesures radiométriques, nous avons installé

- Un pyranomètre mesurant le rayonnement global, et un second équipé d'un anneau équatorial et destiné à mesurer le rayonnement diffus.
- un anémomètre

Les deux têtes du radiomètre et ces trois derniers capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition des données (Schlumberger, Orion) qui stocke les données sur support magnétique. L'heure précise est donnée automatiquement avec chaque série de mesures. Elle nous servira à calculer la position du soleil.

Le chariot mobile se déplace sans s'arrêter le long des rails qui traversent les parcelles décrites au chapitre 2. Un système de barrière photoélectrique permet de déclencher automatiquement la mesure quand le chariot passe devant des étiquettes disposées tous les mètres le long des rails. Les mesures radiométriques sont ainsi réalisées en 7 points fixes par parcelle. La précision relative obtenue sur cet échantillon est meilleure que 5%.

En plus de ces trois parcelles dont nous avons caractérisé la structure, nous avons réalisé un suivi radiométrique simultané de 16 autres parcelles de blé contigües, à raison d'un point fixe par parcelle (compte tenu de leur largeur réduite : 2m), et sur une parcelle de sol nu. Elles font partie d'un autre dispositif expérimental dont nous avons profité. Il s'agit d'un essai où 4 variétés très différentes ont été semées à 4 dates s'étalant du 28 septembre au 27 février. Le plan du dispositif expérimental est présenté à la figure 4.1

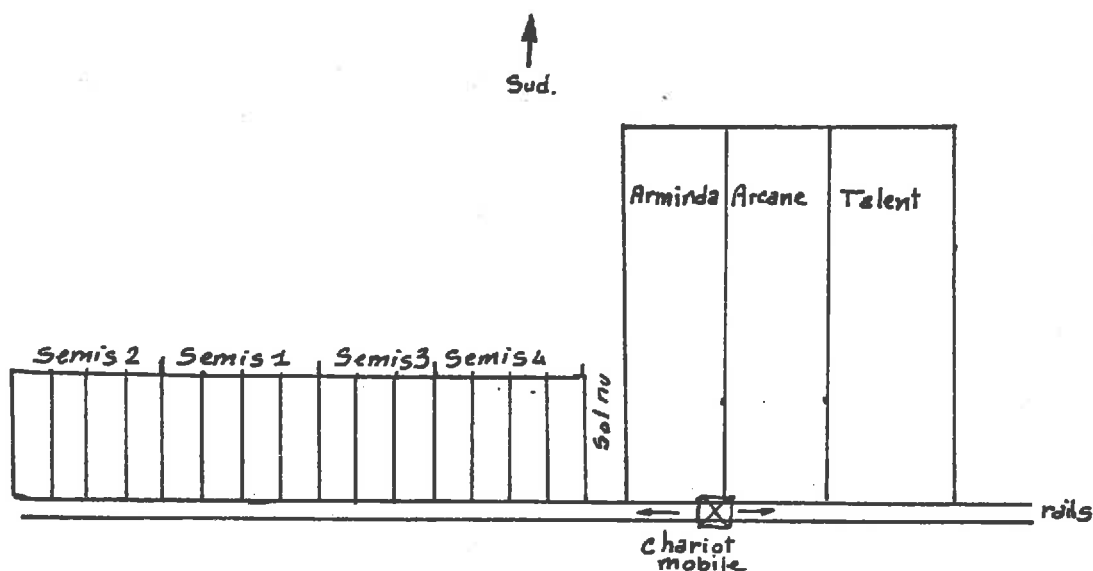


Figure 4.1 Plan du dispositif expérimental utilisé.

Nous nous servirons de ces données radiométriques supplémentaires représentant une grande variabilité d'états, pour étayer un certain nombre de remarques sur les relations entre canaux.

Les mesures sont réalisées le plus près possible du midi solaire, de telle manière que les variations de position du soleil entre parcelles soient minimales. La série complète de mesures demande environ 15 minutes pour être effectuées.

Nous avons choisi de préférence des journées avec un ciel bien dégagé, mais il nous est arrivé d'effectuer des mesures par temps couvert. La figure 4.1 présente les conditions d'acquisition des données.

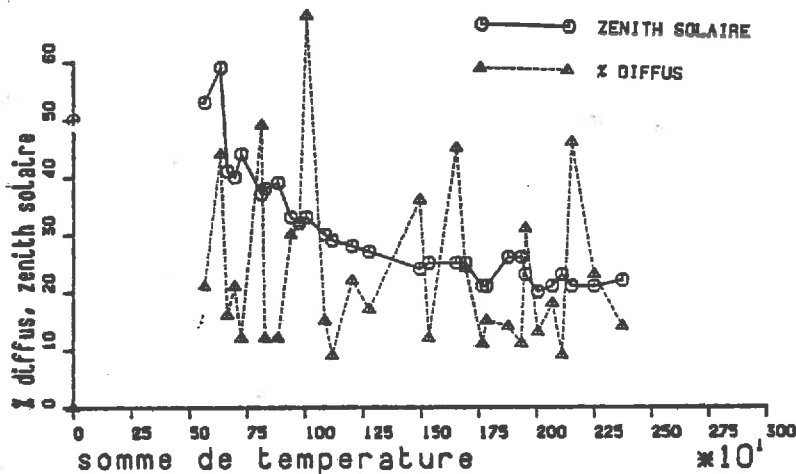


Figure 4.1: angle zénithal solaire et pourcentage de rayonnement incident pendant les mesures radiométriques. L'abscisse correspond au temps exprimé en somme des températures positives comptées depuis le semis. Ce type de représentation est aussi utilisé pour décrire l'évolution de la structure ou des réflectances.

4-1-3 Construction du profil spectral.

Pour choisir les canaux que nous utiliserons et déterminer le rôle que nous leur affecterons pour déduire l'évolution de la structure à partir du profil spectral, il nous faut analyser les relations pouvant exister entre canaux. Elles pourront aussi nous servir à simplifier la stratification du couvert.

4-1-3-1 Relations entre canaux

Le tableau 4.1 montre la matrice de corrélation entre les trois canaux SPOT. Elle est établie sur l'ensemble des observations élémentaires disponibles correspondant aux 19 parcelles et sur tout le cycle de mesure (32 dates de mesures).

	XS1	XS2	XS3
XS1	1.000	0.969	-0.100
XS2	0.969	1.000	-0.295
XS3	-0.100	-0.295	1.000

Tableau 4.1: Matrice de corrélation entre canaux SPOT établie sur l'ensemble des données disponibles (1535 points).

Le canal vert (XS1) est très corrélé au canal rouge (XS2). Cette constatation très classique sur la végétation s'explique en grande partie par la très grande proximité existant entre les coefficients d'extinction du modèle simplifié (3.1) dans ces bandes spectrales (figure 3.10). Il ne faudra pas attendre beaucoup d'informations supplémentaires de l'utilisation conjointe de ces deux canaux du visible.

Par contre, le canal proche infrarouge réagit de manière très différente.

Comme la plupart des auteurs, nous travaillerons dans le plan rouge-proche infrarouge, le contraste entre ces deux domaines étant le plus important. Ne disposant plus que de deux canaux, l'espoir de pouvoir estimer à chaque instant l'indice foliaire, la réflectance du sol et l'orientation des éléments du couvert s'évanouit du même coup.

Cependant, il faut noter que le plan rouge-proche infrarouge présente l'avantage d'être celui dans lequel la droite des sols définie par Richardson et Wiegand (1977) put être tracée. Nous allons en déterminer les caractéristiques.

4-1-3-1-1 Détermination de la droite du sol d'Avignon Montfavet

La rugosité et l'humidité de surface sont les principaux facteurs de variation de la réflectance d'un sol donné. Pour construire la droite du sol d'Avignon Montfavet, nous avons fait varier ces deux facteurs (arrosage, ratissage) et enregistré les niveaux de réflectance correspondant à chaque état.

La figure 4.2 montre qu'il existe effectivement une très bonne relation ($r=0.992$ $n=86$) entre la réflectance dans le rouge et la réflectance dans le proche infrarouge.

Il est intéressant de replacer l'évolution de couverts de blé par rapport à cette droite des sols.

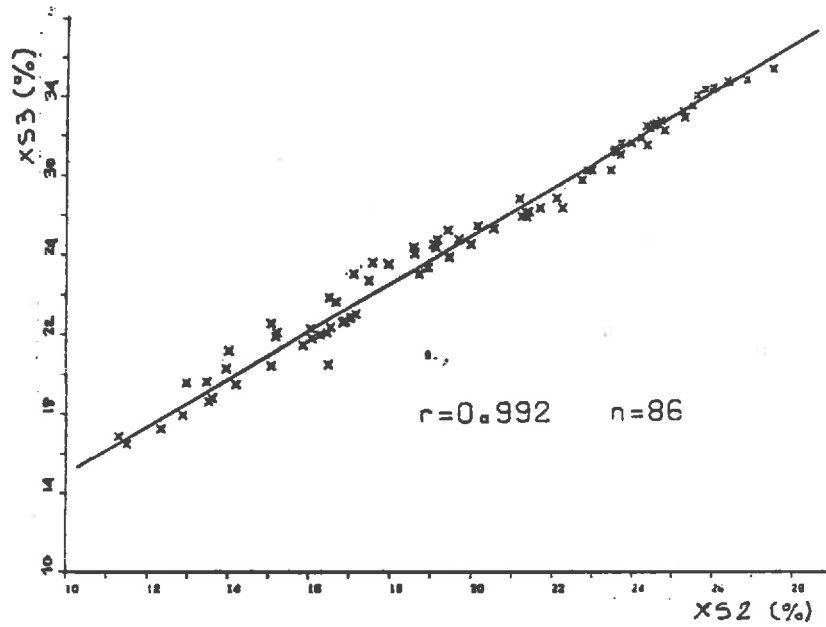


Figure 4.2: Droite des sols d'Avignon Montfavet
 $XS3 = 1.18 XS2 + 3.4$

4-1-3-1-2 Evolution radiométrique d'un couvert dans le plan rouge proche infrarouge

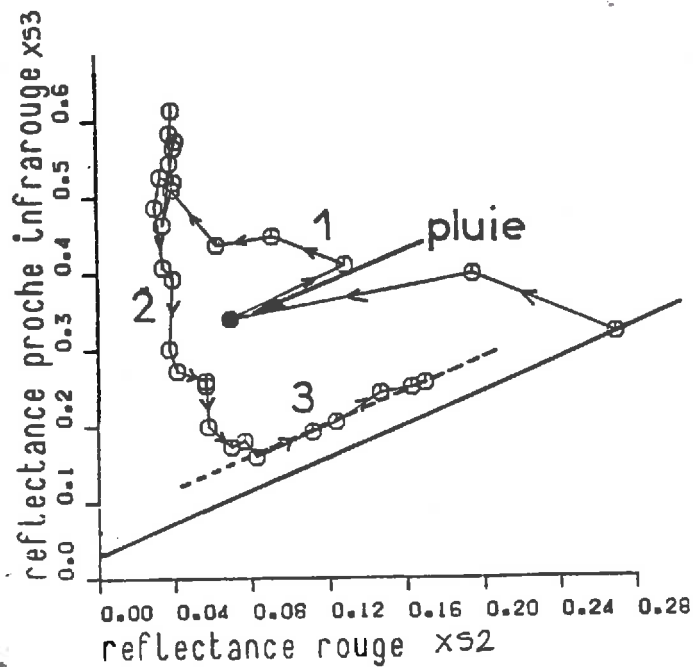


Figure 4.3: Evolution de la réflectance de couverts de blé dans le plan rouge-proche infrarouge
 trait plein: droite du sol
 trait pointillé: droite de la sénescence

La figure 4.3 montre que l'évolution radiométrique typique de couverts de blé dans le plan rouge-proche infrarouge peut se décomposer en trois phases distinctes:

-1- Une phase de diminution de la réflectance dans le rouge, pendant que le proche infrarouge varie relativement peu. Elle correspond à la période d'installation de la culture. Il existe un certain nombre "d'accidents" liés à des pluies ayant affecté les propriétés optiques du sol. Ils sont caractérisés par un glissement pratiquement parallèle à la droite des sols. La culture est peu couvrante à ce stade et les inter-rangs bien marqués. Il y a donc assez peu d'interactions entre les propriétés optiques du sol et la réflectance du couvert. Les effets sont additifs. C'est ce qui a motivé la construction de l'indice de végétation PVI de Richardson et Wiegand (1977). Les propriétés optiques du sol pourront être considérées comme peu différentes de la projection du point actuel sur la droite des sols. Dans le canal rouge, cette approximation surestime la réflectance du sol en cas de pluies. Par contre, elle sous estime d'autant plus la réflectance du sol sec que la végétation est bien développée. Bien qu'imparfaite, cette estimation de propriétés optiques du sol est moins erratique que l'utilisation du modèle simplifié; Nous pouvons écrire:

$$\rho_s = \rho_\infty + (\rho_c - \rho_\infty) e^{-K.I.F.}$$

En particulier, une erreur, même faible, sur la mesure de la réflectance du couvert induira une erreur très importante sur la détermination de ρ_s , compte tenu de la valeur élevée du coefficient d'extinction K.

$$\frac{d \rho_s}{d \rho_c} = e^{-K.I.F.}$$

Cette première phase s'arrête vers le stade début montaison.

-2- Une phase de saturation de la réflectance rouge. Ce canal sera donc un très mauvais révélateur de l'indice foliaire de la culture. Par contre, le proche infrarouge est encore sensible à l'indice foliaire. Il évolue parallèlement à l'axe des ordonnées. La couverture du sol par la végétation étant très importante, la réflectance dans le rouge, mais aussi dans le proche infrarouge ne sera pas très affectée par des variations de réflectance du sol.

-3- Une phase de "désaturation" du rouge, correspondant à la maturation de la culture. Le proche infrarouge passe par un minimum, puis remonte parallèlement à la droite des sols. Ce phénomène est intéressant car il permet de construire une droite de la sénescence, homologue de la droite des sols.

4-1-3-1-3 Détermination de la droite de la sénescence

Nous avons regroupé l'ensemble des données de réflectance rouge et proche infrarouge correspondant à un état de végétation suffisamment avancé pour que les feuilles vertes aient totalement disparu. La figure 4.3 montre la relation très hautement significative obtenue.

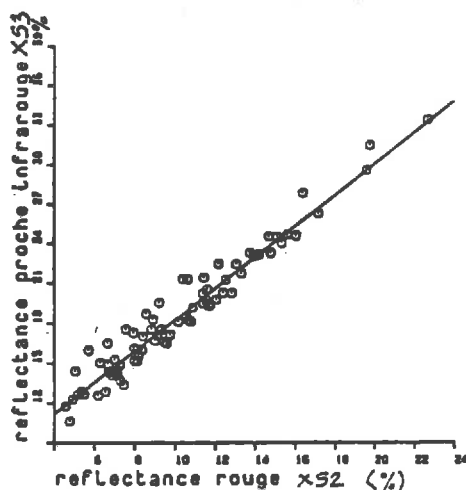


Figure 4.3: droite de la sénescence $r=0.973$ $n=80$
 $XS3 = 1.18 XS2 + 6.3$

La pente de la droite de régression est très proche de celle de la droite du sol d'Avignon-Montfavet. Par contre, l'ordonnée à l'origine est plus élevée.

Une culture complètement sénescente se comporte donc de manière similaire à un sol nu: Les éléments qui la composent ont une transmittance nulle (Il n'y a pratiquement plus de feuilles dans le cas de la culture sénescente). Nous avons aussi remarqué la similitude existant entre le spectre de réflectance d'organes sénescents et celui du sol. La remontée le long de la droite de la sénescence en fin de cycle correspond au dessèchement de la culture.

L'analyse des relations entre canaux montre que les canaux verts et rouges sont très redondants. Nous n'utiliserons donc que les canaux rouge et proche infrarouge pour déterminer les caractéristiques biologiques sous-jacentes au profil spectral.

Compte tenu de la saturation rapide du canal rouge survenant à des indices foliaires relativement faibles (entre 2 et 3), nous utiliserons le canal proche infrarouge pour estimer l'indice foliaire de la culture. La réflectance du sol ou de la strate sénescente dans le proche infrarouge sera déduite de la réflectance du couvert dans le canal rouge: Ce sera la projection sur la droite du sol ou de la sénescence du point actuel de la végétation.

Pour déterminer l'évolution des surfaces vertes développées par la culture à partir de deux bandes spectrales, nous serons amenés à faire une hypothèse sur l'orientation des éléments verts du couvert.

Mais il nous faut encore résoudre le problème de l'application du modèle simplifié à un couvert qui ne comporte plus que deux strates:

- une strate de tiges et d'épis verts
- une strate de feuilles et de tiges vertes.

Une analyse qualitative simultanée de l'évolution des surfaces développées dans chacune de ces strates et de la réflectance proche infrarouge nous y aidera.

4-1-3-2 Application du modèle de réflectance simplifié à un couvert comportant 2 strates et simplification de la stratification d'une culture de Blé.

La figure 4.4 montre que le maximum de réflectance correspond au maximum de surface foliaire verte. Il se produit au stade du gonflement. Le maximum de surface verte totale ne survient que beaucoup plus tard, vers le stade floraison. La réflectance proche infrarouge a alors commencé à décroître. La relation entre indice de surface verte (surface verte développée par la culture par unité de surface de sol) et réflectance n'est donc pas simple.

Passé le gonflement, le changement de structure le plus évident est l'apparition de la strate d'épis dont le port est vertical et la transmittance nulle. Ce changement de structure permet d'expliquer la chute progressive de la réflectance proche infrarouge après le stade gonflement alors que l'indice de surface verte continue à croître et que le port foliaire varie relativement peu.

Cette remarque va nous dicter la manière de simplifier la stratification tout en la rendant plus compatible à l'utilisation du modèle simplifié de réflectance.

Avignon 1985

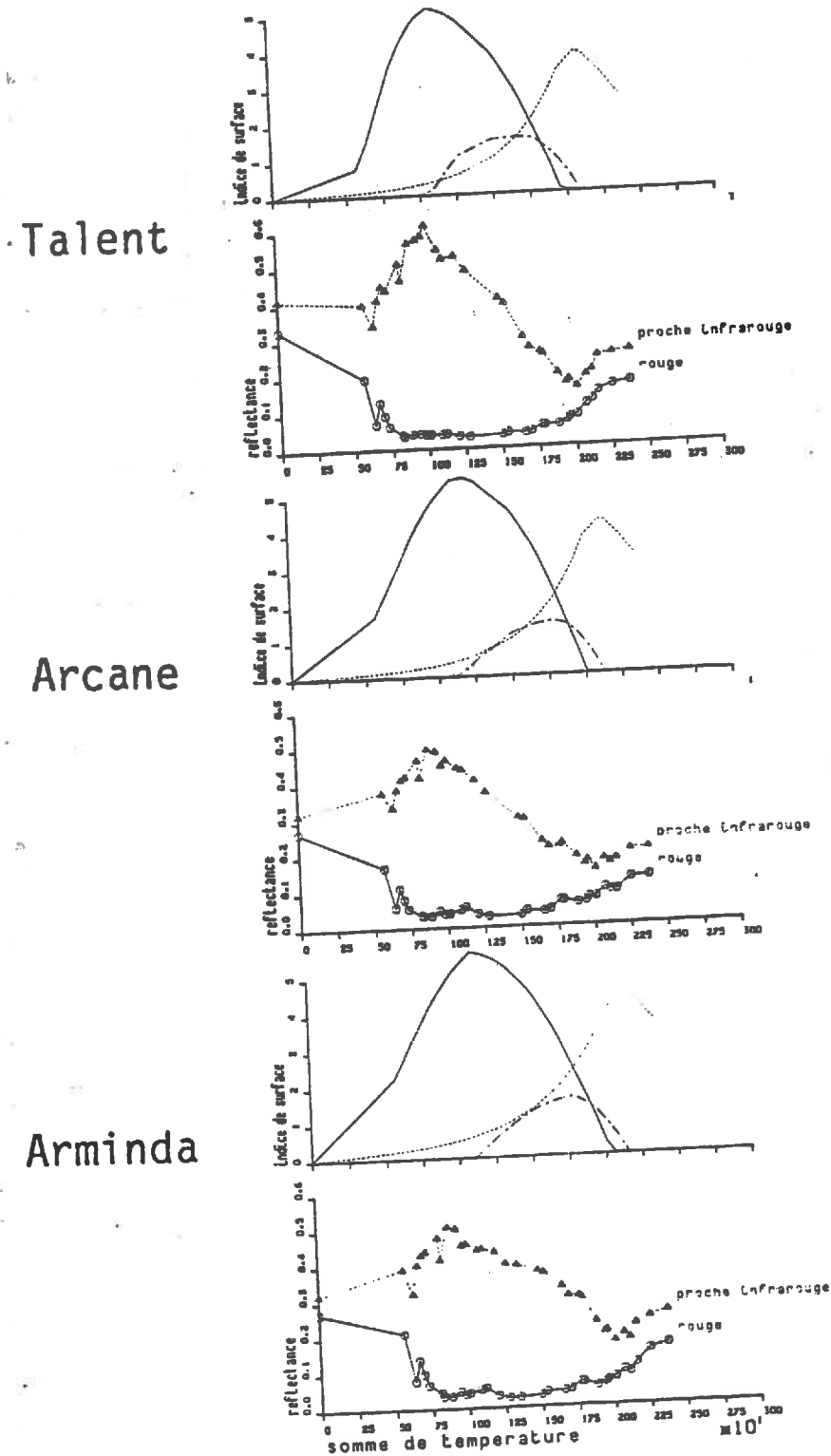


figure 4.4: Evolution simultanée de la réflectance rouge et proche infrarouge et des surfaces des différentes parties du couvert. l'indice de surface d'un organe correspond à sa surface par unité de surface de sol.

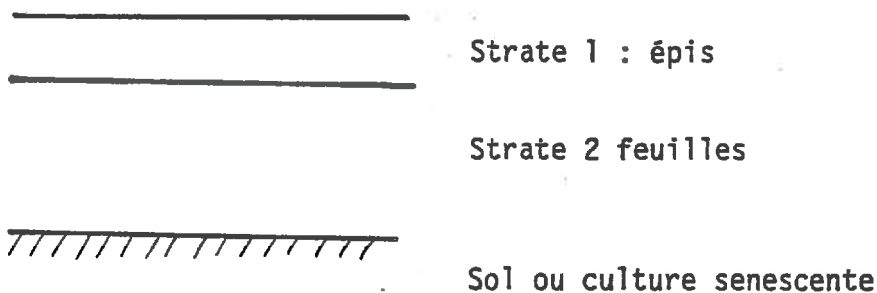
- indice de surface verte des épis et cols d'épis
- indice de surface verte développée sous la dernière feuille
- indice de surface des éléments sénescents

On ne considérera plus que deux strates vertes monocomposites:

- Une strate de feuilles et de tiges vertes. Mais on assimilera les propriétés optiques des tiges à celles des feuilles. Leur contribution faible pour la majeure partie du cycle et leur réflectance supérieure à celle des feuilles (Lemaster et Chance 1980) compense en partie l'effet de leur transmittance nulle, ce qui nous encourage à une telle simplification.

- Une strate composée de tiges et d'épis verts.

Il est alors possible d'appliquer dans ces conditions le modèle simplifié à chacune de ces strates en posant:



$$\rho_{c2} = \rho_{\infty 2} + (\rho_s - \rho_{\infty 2}) e^{-K_2 \cdot IF_2}$$

$$\rho_{c1} = \rho_{\infty 1} + (\rho_c - \rho_{\infty 1}) e^{-K_1 \cdot IF_1}$$

L'approximation que l'on introduit ainsi aboutit à considérer que le flux incident au niveau de la strate inférieure est uniquement un flux directionnel solaire. Cette simplification n'est pas très perturbante car la strate supérieure a une importance limitée. En effet l'indice de surface des tiges et des épis qui la composent est faible et ne dépasse que très rarement la valeur 1.

On confond d'autre part la réflectance directionnelle de la strate inférieure avec celle (supposée diffuse) du fond de la strate supérieure. Cette approximation est plus gênante du fait de l'anisotropie marquée de la réflectance de strates dont les éléments sont plutôt verticaux, comme c'est le cas des feuilles vertes.

Enfin, nous estimerons la réflectance proche infrarouge du "fond" de la deuxième strate à partir de la réflectance mesurée dans le rouge en utilisant la droite du sol avant le stade gonflement (la sénescence est encore peu importante) ou la droite de la sénescence après ce stade.

Nous sommes donc maintenant en mesure de coupler le modèle d'évolution de la structure au modèle de réflectance du couvert: Nous avons achevé la construction du modèle de forme de profil spectral. Nous vérifierons son comportement en estimant un certain nombre de paramètres de structure à partir de profils spectraux observés. Nous comparerons alors;

- les valeurs de ces estimations aux valeurs mesurées quand cela est possible
- les profils spectraux calculés à partir de ces estimations de paramètres de structure aux mesures radiométriques expérimentales.

4-1-4 Vérification du comportement du modèle de forme de profil spectral.

Le modèle de réflectance proposé nécessite la connaissance de l'angle moyen d'inclinaison des éléments de chacune des 2 strates. La strate supérieure composée de tiges ou d'épis verts sera caractérisée par un angle moyen d'inclinaison de 90° (éléments verticaux).

Par contre, il nous semble difficile d'utiliser directement l'angle moyen d'inclinaison des feuilles que nous avons pourtant déterminé. La réflectance spectrale dépend en effet de la distribution spatiale des éléments du couvert qui recouvre les effets de rangs et la fonction de distribution des angles foliaires. L'angle d'inclinaison moyen utilisé dans le modèle simplifié (3.1) correspondant à une strate de blé réelle sera virtuel et intégrera ces différents facteurs.

La validation du modèle de profil spectral nécessitera donc la détermination d'un paramètre de calage: l'angle moyen d'inclinaison des feuilles.

4-1-4-1 détermination de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles.

Nous avons recherché la valeur de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles qui minimise les carrés des écarts entre la réflectance proche infrarouge mesurée et celle estimée par le modèle de forme de profil spectral en utilisant les variables explicatives suivantes:

- Le temps exprimé en somme de température. Il nous permet de déterminer à chaque instant les valeurs des surfaces vertes de chacune des deux strates. Nous employons pour cela le modèle d'évolution des surfaces des différents organes du chapitre 2. Les valeurs des 5 paramètres caractéristiques (K , T_i , b , T_s , a) de l'évolution des surfaces foliaires vertes utilisées pour chacune des trois variétés sont celles du tableau 2.12 .
- La réflectance rouge. Elle nous sert à déterminer la réflectance proche infrarouge du sol ou de la strate inférieure sénescente. Les coefficients des droites du sol ou de la sénescence utilisées sont ceux déterminés au chapitre 4-3.
- La position du soleil correspondant à chaque mesure radiométrique est calculée à partir de l'heure de la mesure.

Les propriétés optiques des éléments du couvert que nous avons utilisées correspondent à nos mesures, reportées au chapitre 2 ou à celles de Lemaster et Chance (1980) pour les tiges et la transmittance des feuilles. Traduites en réflectance infinie de la culture planophile correspondante, nous avons dans le proche infrarouge:

- feuilles vertes $\rho_* = 0.645$
- tiges et épis verts $\rho_* = 0.320$

Le tableau 4.1 montre les résultats de cette recherche de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles:

VARIETES	TALENT	ARCANE	ARMINDA
angle d'inclinaison moyen est.	51	69	67
s.	3	1	1
nombre de degrés de liberté	30	30	31
coefficient de corrélation	0.973	0.904	0.962
écart type résiduel	0.03	0.05	0.03
angle moyen mesuré	51	71	67

Tableau 4.1: détermination de l'angle d'inclinaison moyen par ajustement non linéaire.

Les ajustements sont globalement satisfaisants. En particulier, l'écart type résiduel de l'estimation de l'angle d'inclinaison moyen est très faible. La comparaison de la valeur estimée à la valeur mesurée (chapitre 2) est surprenante! Compte tenu des remarques précédentes sur la signification réelle de cet angle, toujours valables, nous ne chercherons pas à approfondir cette coïncidence frappante.

Les coefficients de corrélation élevés ne doivent pas cacher le fait qu'il existe un décalage dans le temps entre les profils spectraux estimés et mesurés pour les variétés Arcane et Arminda (figure 4.5).

Ce décalage peut provenir d'une mauvaise estimation des paramètres caractérisant l'évolution des surfaces des feuilles vertes (T_1 , b , T_2 , a). Nous avons remarqué au chapitre 2 que le manque de mesures biologiques précoces pour les deux variétés Arcane et Arminda entraîne une imprécision importante sur la détermination des paramètres T_1 , b , T_2 , et a , qui conditionnent la position du maximum de surface foliaire verte pour le modèle.

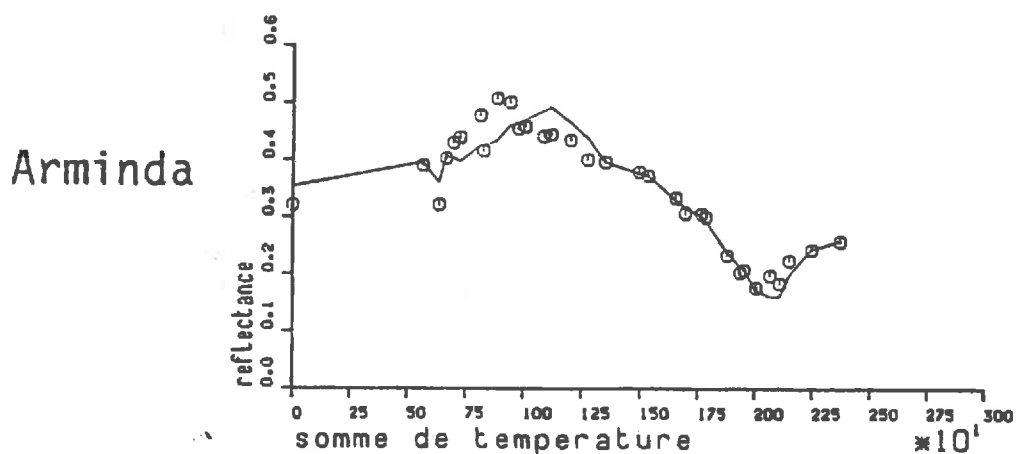
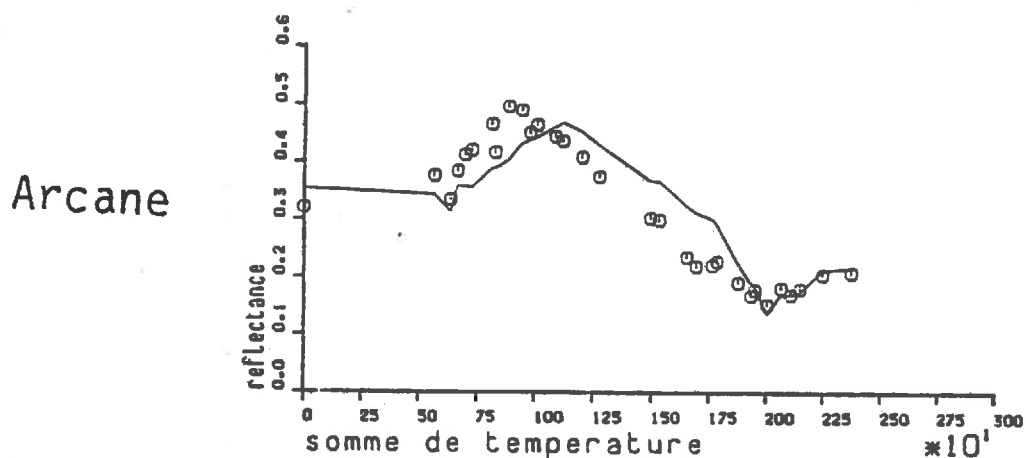
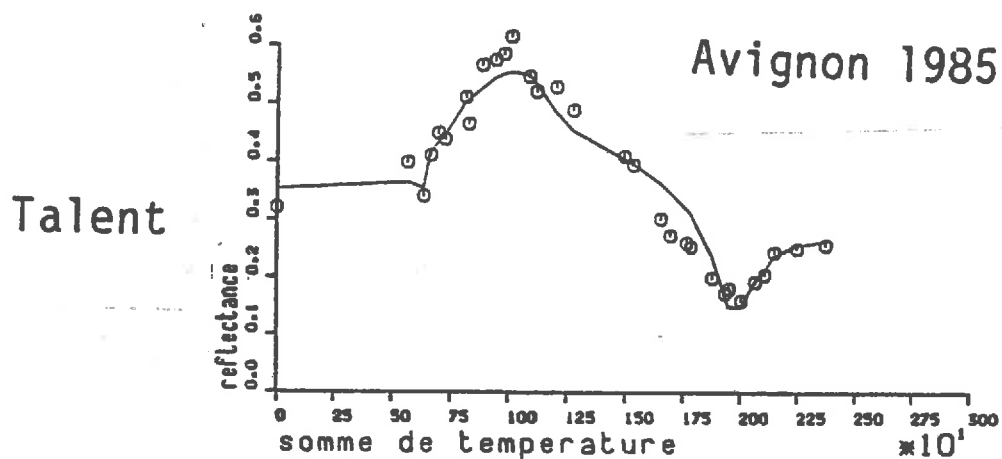


Figure 4.5: comparaison du profil spectral proche infrarouge observé (les points) et estimé (le trait plein).

Le modèle de réflectance simplifié ne semblant pas remis en cause, nous allons essayer de réestimer les valeurs de ces paramètres en les déduisant du profil spectral. Les mesures radiométriques ayant débuté plus tôt que les mesures de structure, il serait ainsi possible d'obtenir une meilleure estimation de ces paramètres.

4-1-4-2 Détermination de caractéristiques de l'évolution des surfaces de la culture.

Nous avons réestimé les paramètres T_i , b , T_s et a , caractéristiques de l'évolution des surfaces ainsi que l'angle moyen des feuilles dont l'estimation n'est sans doute pas indépendante des valeurs des 4 paramètres précédents. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle complet de profil spectral précédent et réalisé l'ajustement non linéaire correspondant. Les variables d'entrée sont toujours :

- le temps, exprimé en somme de températures.
- la réflectance rouge
- l'angle zénithal solaire.

Les propriétés optiques des éléments du couvert sont les mêmes que précédemment. Nous avons par contre conservé la valeur des paramètres K déterminés pour chaque variété. Ce paramètre définit la surface foliaire totale produite. Il n'intervient donc pas directement sur les vitesses de croissance (b) ou de sénescence (a) des surfaces, ni au niveau de la chronologie de ces événements (T_i , T_s). D'autre part, il n'est souvent pas très intéressant de multiplier le nombre de paramètres à déterminer car la précision de leur estimation diminue généralement du fait des corrélations entre paramètres et de la diminution du nombre de degrés de liberté.

Le tableau 4.2 compare les nouvelles estimations de ces paramètres à celles réalisées directement à partir des mesures de surface (chapitre 2).

Les valeurs T_i et b des variétés Arcane et Arminda sont modifiées.

La figure 4.8 montre que le décalage constaté précédemment est considérablement réduit. Les angles moyens des feuilles ont pourtant assez peu varié par rapport à la précédente estimation, pour ces deux variétés.

Par contre la valeur de l'angle des feuilles de la variété Talent est relativement modifiée et associée à un écart type important. La réponse faible à l'inclinaison des feuilles, pour un angle proche de 45° , de la réflectance infinie directionnelle et du coefficient d'extinction associé (figure 3.11) peut expliquer ce résultat.

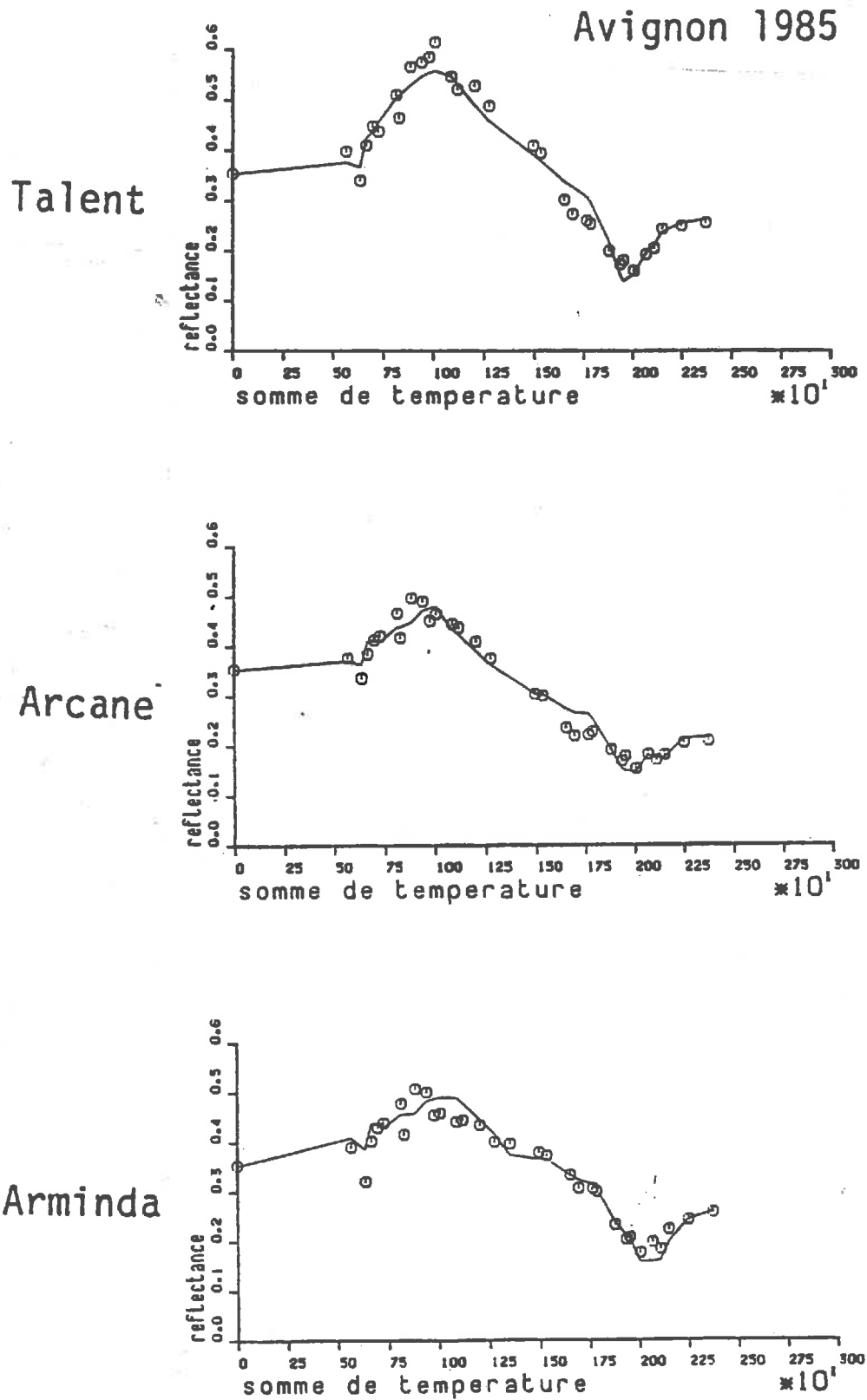


Figure 4.6: Comparaison du profil spectral proche infrarouge observé (les points) et estimé après réestimation des paramètres T_l , b , T_s , a (le trait plein)

VARIETES			TALENT	ARCANE	ARMINDA
T_i	1	est.	709	600	592
		s.	12	32	68
	2	est.	720	700	655
		s.	7	27	58
b	1	est.	0.0078	0.0068	0.0064
		s.	0.0009	0.0008	0.0015
	2	est.	0.0097	0.0058	0.0048
		s.	0.0011	0.0022	0.0027
T_s	1	est.	1949	1983	2023
		s.	14	18	18
	2	est.	1960	2003	2035
		s.	7	17	26
a	1	est.	0.0018	0.0013	0.0021
		s.	0.0004	0.0003	0.0003
	2	est.	0.0022	0.0021	0.0017
		s.	0.0002	0.0008	0.0002
angle moyen d'inclinaison des feuilles		est.	42	65	69
		s.	15	3	2
nombre de degrés de liberté			26	26	27
coefficient de corrélation			0.979	0.982	0.972
écart type résiduel			0.03	0.02	0.03

Tableau 4.2: Détermination des paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces foliaires vertes (1) et de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. Comparaison aux valeurs estimées directement à partir des mesures de surfaces (2).

est. valeur estimée du paramètre
s. écart type de l'estimation.

Les paramètres T_s et a ont assez peu varié sauf pour Arcane qui se trouve avec une sénescence plus précoce mais plus lente. Ces deux paramètres sont d'ailleurs anticorrelés ($r < -0.5$). Les écarts types associés restent faibles.

La figure 4.8 montre que l'influence de la réflectance du sol sur celle du couvert, liée à la pluviométrie, est mal décrite par notre modèle. L'utilisation d'un canal visible (XS2) saturant très rapidement en est la cause majeure. L'utilisation du moyen infrarouge, peu corrélé avec le proche infrarouge (Baret et al. 1986) pourrait être intéressant: la transmittance élevée des feuilles recule les limites de la saturation et la réflectance du sol est très sensible à son état d'humidité de surface. Mais il faudrait alors pouvoir construire les droites du sol et de la sénescence, liant le domaine du proche infrarouge à celui du moyen infrarouge.

Notre modèle semble d'autre part sous estimer systématiquement la réflectance quand celle-ci est proche de son maximum. Il est vrai qu'un certain nombre de ces mesures ont été réalisées par temps couvert. Ces conditions augmentent généralement la réflectance directionnelle. Or nous n'avons pas tenu compte de ce facteur en ne considérant que le rayonnement solaire direct.

Avant de conclure, nous allons appliquer les résultats précédents à l'un des objectifs avancés: la détermination de la partie du rayonnement photosynthétiquement active absorbée par la culture.

4-2 Détermination de la partie photosynthétiquement active (PAR) absorbée par la culture

Notre analyse bibliographique a montré que la production de matière sèche peut être formalisée selon:

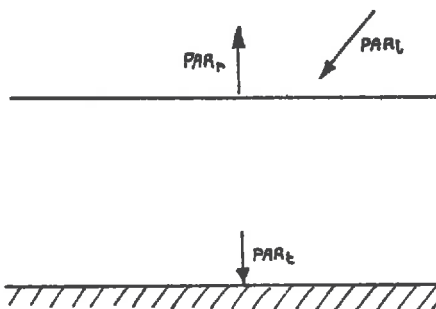
$$MS = \int_t \mathcal{E}_i \mathcal{E}_b \mathcal{E}_c \text{ RG dt}$$

La détermination de \mathcal{E}_i , efficacité de l'interception du rayonnement photosynthétiquement actif par télédétection serait donc un pas en avant vers la détermination de la productivité des cultures. Nous allons donc nous attacher à analyser comment extraire cette information à partir du profil spectral.

Nous décrirons dans un premier temps la démarche que nous avons suivie pour calculer \mathcal{E}_i à partir des modèles simplifiés du chapitre 3 et du modèle d'évolution de la structure du chapitre 2. Nous appliquerons alors ces résultats au calcul de \mathcal{E}_i de nos parcelles. Cette détermination nous permettra de calculer \mathcal{E}_b , efficacité de la transformation en matière sèche de l'énergie photosynthétiquement active absorbée par la culture.

4-2-1 Application des modèles de réflectance et de transmittance au calcul du PAR absorbé par la culture.

Le PAR absorbé par la culture est déterminé en faisant un bilan des flux diffus dans le domaine spectral du PAR (400-700nm).



$$PAR_i = PAR_r + PAR_a + (1 - R_s) PAR_t$$

$$1 = \frac{PAR_r}{PAR_i} + \frac{PAR_a}{PAR_i} + (1 - R_s) \frac{PAR_t}{PAR_i}$$

$$1 = R_c + \mathcal{E}_i + (1 - R_s) T$$

$$\mathcal{E}_i = 1 - R_c - (1 - R_s) T$$

PAR_i : flux directionnel incident

PAR_r : flux diffus réfléchi par le couvert

PAR_t : flux transmis par le couvert au niveau du sol

PAR_a : Énergie absorbée par la culture dans le domaine du PAR

R_c : $\frac{PAR_r}{PAR_i}$: Réflectance du couvert

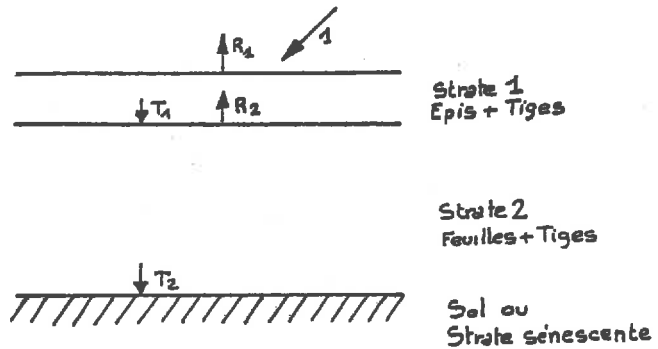
T : $\frac{PAR_t}{PAR_i}$: Transmittance du couvert

\mathcal{E}_i : $\frac{PAR_a}{PAR_i}$: efficacité de l'interception de PAR

R_s : Réflectance du sol ou de la strate sénescence.

Il est possible d'appliquer un tel bilan d'énergie radiative au couvert de céréales tel que nous l'avons schématisé au chapitre 4-1.

On décrira alors la réflectance diffuse et la transmittance des différentes strates en utilisant les expressions simplifiées (3.2) et (3.3):



$$R_1 = R_{s1} + (R_2 - R_{s1}) e^{-K_{h1} I F_1}$$

$$R_2 = R_{s2} + (R_s - R_{s2}) e^{-K_{h2} I F_2}$$

$$T_2 = T_1 \cdot e^{-K_{t2} I F_2}$$

$$T_1 = e^{-K_{t1} I F_1}$$

en faisant le bilan des énergies absorbées par l'ensemble des 2 strates, on obtient:

$$\xi_t = 1 - R_1 - (1 - R_s) T_2 \quad (4.1)$$

Nous remarquerons à ce niveau que les approximations introduites au chapitre 4-1, surtout gênantes pour les flux directionnels sont, dans le cas des flux diffus, des solutions analytiquement exactes.

Le calcul des différents termes de l'expression (4.1) nécessite la connaissance de la surface et de l'angle moyen d'inclinaison de chacune des strates.

Notre modèle de profil spectral nous permet d'estimer les paramètres caractérisant l'évolution des surfaces ainsi que l'angle moyen d'inclinaison des feuilles de la strate 2. Nous pouvons donc appliquer l'expression (4.1) à la détermination du PAR absorbé par nos cultures.

4-2-2 Détermination du PAR absorbé par la culture

Nous utiliserons les valeurs des paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces vertes et de l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, du chapitre 4-1-4-2 précédent. Nous les avons résumées dans le tableau 4.3:

VARIETES	TALENT	ARCANE	ARMINDA
K	284	296	330
T _i	709	600	592
b	0.0078	0.0068	0.0064
T _s	1949	1963	2023
a	0.0016	0.0013	0.0021
angle strate 1	90	90	90
angle strate 2	42	65	69
ρ* strate 1	0.065	0.065	0.065
ρ* strate 2	0.059	0.059	0.059

Tableau 4.3: valeurs des différents paramètres utilisées pour calculer l'énergie photosynthétiquement active absorbée par nos cultures

La réflectance du sol ou de la strate sénescence, R_s , sera supposée égale à celle mesurée dans la bande XS1. Les spectres très plats du sol et des éléments sénescents autorisent une telle approximation. N'ayant pas de moyens immédiats d'estimer l'état d'humidité du sol tout au long du cycle du développement de la culture, nous prendrons la valeur de réflectance correspondant à un sol sec (0,25). Cette hypothèse surestime ξ_c quand le sol est humide ou lorsque la fraction sénescence devient importante.

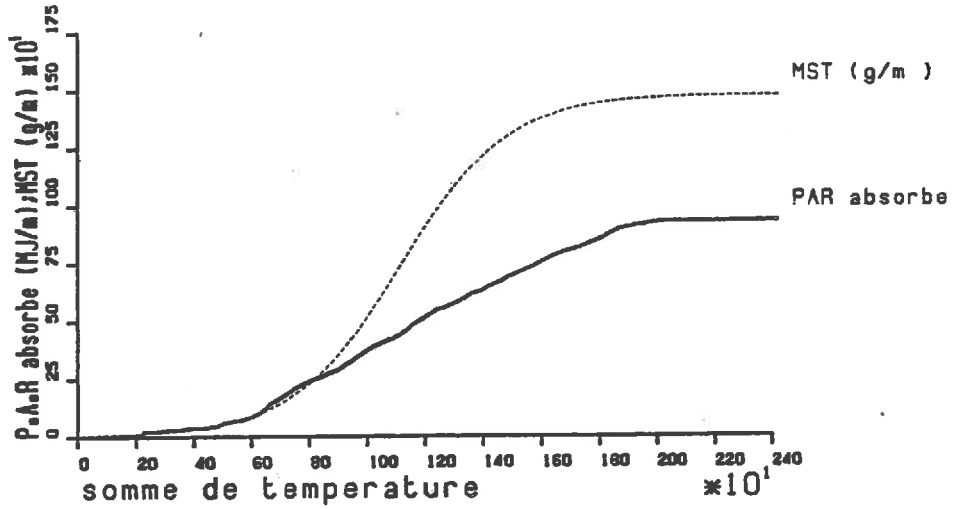
Nous calculons le PAR absorbé avec un pas journalier. L'algorithme de calcul du PAR absorbé par la culture, pour un jour donné (repéré par sa somme de températures positives depuis le semis), est alors le suivant:

- Calcul de la surface verte de chacune des deux strates. Nous utilisons le modèle d'évolution des surfaces du chapitre 2.
- Calcul avec un pas horaire de la hauteur du soleil.
- calcul de ξ_c avec un pas horaire
- calcul du rayonnement global horaire. Nous affectons à chaque heure une fraction du rayonnement global quotidien proportionnelle au rapport entre le rayonnement global horaire théorique (estimé par un modèle empirique) et le cumul sur la journée de ces rayonnements horaires théoriques.
- calcul du PAR absorbé par la culture sur la journée:

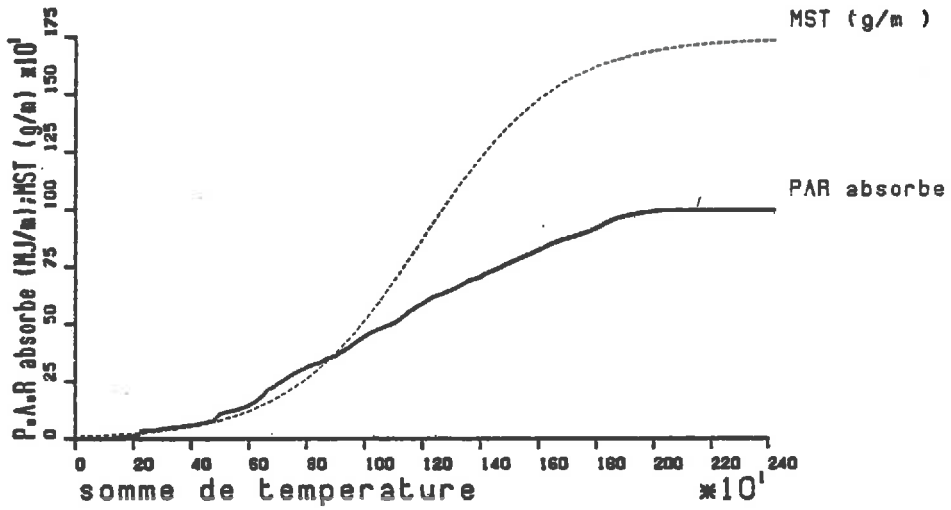
$$PAR_2 = \int_t \xi_c \cdot RG \cdot \xi_c \cdot dt$$

Suivant Varlet Grancher et al. (1981), nous prendrons $\xi_c = 0,5$

Talent



Arcane



Avignon 1985

Arminda

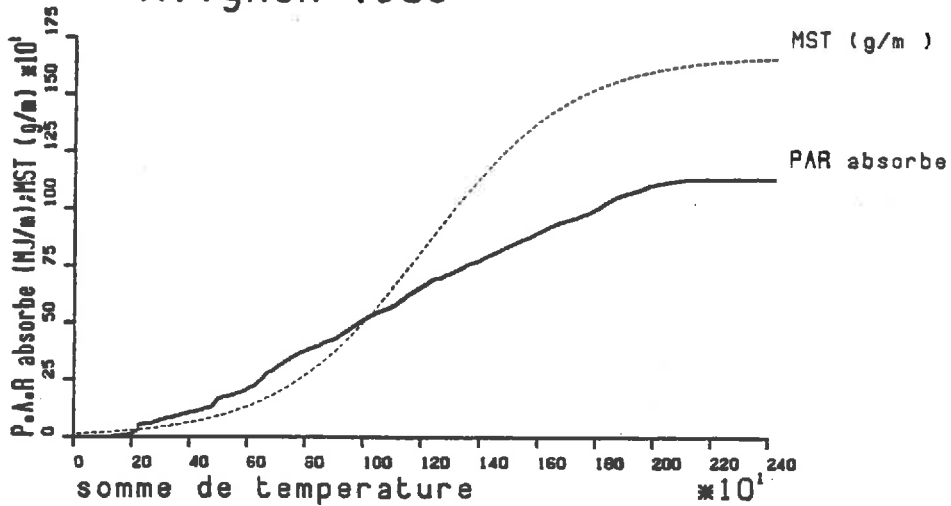


Figure 4.7: Estimation du PAR absorbé par la culture. Comparaison à la matière sèche produite.

La figure 4.7 montre l'évolution du PAR absorbé par les trois variétés. Nous sommes donc en mesure d'estimer l'efficacité, ϵ_b , de la transformation en matière sèche du rayonnement PAR absorbé par la culture. Nos estimations de ϵ_b sont très proches de celles de Steven et al. (1983) sur betterave:

Talent	1.59 g.MJ ⁻¹
Arcane	1.74 g.MJ ⁻¹
Arminda	1.47 g.MJ ⁻¹

Steven et al. (Betterave) 1.63 g.MJ⁻¹

CONCLUSION PARTIELLE

Globalement, nous pouvons considérer que notre modèle de profil spectral reproduit assez fidèlement la réalité dont, il faut le souligner, il est issu en partie. Il faudrait donc compléter les quelques vérifications que nous avons effectuées par une véritable validation sur d'autres jeux de données.

L'utilisation de ce type de modèle de forme de profil spectral dans le but d'en déduire l'évolution des surfaces développées par le couvert soulève une question importante: est-il possible d'estimer simultanément les 5 paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces vertes et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles? Il est difficile de répondre définitivement à cette question. Mais, quelle que soit la réponse, la réduction du nombre de paramètres à estimer doit être recherchée. Deux solutions en forme d'interrogations se présentent alors:

-1- l'angle d'inclinaison moyen des feuilles est-il une caractéristique variétale suffisamment stable pour qu'on lui affecte à priori une valeur? Dans ce cas, quelle erreur commet-on sur la détermination des caractéristiques de l'évolution des surfaces si l'angle moyen d'inclinaison des feuilles, correspondant à la culture réelle, n'est pas exactement celui que l'on s'est donné.

-2- Est-il possible de réduire le nombre de paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces en analysant, par exemple, les relations pouvant exister entre certains d'entre eux?

Une autre question importante surgit: Quelle fréquence d'observations radiométriques permet d'estimer suffisamment précisément les différents paramètres du modèle.

Toutes ces questions ne seront résolues qu'à partir d'expérimentations et de simulations effectuées dans des conditions aussi contrastées que possible.

La détermination du PAR absorbé par la culture se déduit très facilement des paramètres d'évolution de la structure que l'on peut estimer en "inversant" le modèle de profil spectral. Nous ne disposons malheureusement pas de mesures de PAR absorbé par la culture qui nous permettent de vérifier expérimentalement les simulations réalisées. Il faudra donc s'attacher à valider ce modèle, spécialement pour des stades précoces ou tardifs de la culture, quand ϵ_i peut être le facteur limitant.

L'intérêt évident de ce type de modèle, est de fournir une estimation continue du PAR absorbé.

Ce calcul, issu du profil spectral, permet de fournir aux modèles agrométéorologiques déterministes classiques une information essentielle. La télédétection compléterait alors ce type d'approche.

Enfin, ce modèle, une fois validé, constitue un outil efficace pour tester l'intérêt des différents indices de végétation comme estimateurs du PAR absorbé.

conclusion

CONCLUSION GENERALE

L'étude de la dynamique d'évolution du couvert, appréhendée à partir de moyens de télédétection, est apparue comme une façon de mieux cerner l'état d'un couvert végétal.

L'analyse du "profil spectral", évolution dans le temps des données radiométriques, pour en extraire des informations sur l'évolution de la structure du couvert, nous a amené à construire un modèle de forme de profil spectral basé sur une logique biologique de croissance ou de sénescence du couvert.

Nous proposons un modèle de forme de profil spectral dont les paramètres ont une signification biologique précise. Nous l'avons composé à partir de deux sous-modèles que nous avons élaborés en premier lieu:

- Un sous-modèle de forme d'évolution de la structure du couvert:
Nous avons découpé le couvert de blé en trois strates de caractéristiques distinctes; nous avons décrit l'évolution des surfaces de chacune de ces strates en utilisant des lois de croissance ou de sénescence classiques. Le port foliaire est supposé constant au cours de la croissance.
Ce sous-modèle, construit sur des cultures de blé, pourrait être étendu, sans profondes modifications, à d'autres cultures annuelles.

- Un sous-modèle simplifié de réponse spectrale du couvert:
Nous avons utilisé un formalisme simple de réponse directionnelle de la culture, du type loi de Beer. Il permet d'interpréter la réponse spectrale en termes d'amplitude et de vitesse de variation de la réflectance avec l'indice foliaire.
Nous avons vérifié sa validité dans le cas d'une culture ne comportant qu'une strate et un type de composant. Nous avons donné une signification physique simple à ses paramètres.

Le modèle de forme de profil spectral résultant, reproduit correctement notre réalité expérimentale, sauf quand la culture est peu couvrante, et que les propriétés optiques du sol varient. L'estimation des propriétés optiques du sol à partir d'un canal moyen-infrarouge plutôt que du canal rouge, permettrait de remédier à cet inconvénient.

Le modèle de forme de profil spectral est inversible. Par ajustement de ce modèle à l'évolution des réflectances mesurées, nous avons déterminé un certain nombre de paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces foliaires ou de l'orientation des éléments du couvert. Mais il faudra vérifier si l'estimation précise et simultanée de l'ensemble des paramètres est possible et avec quelle fréquence de mesures radiométriques.

En utilisant un formalisme similaire à celui du profil spectral, nous avons construit un modèle d'évolution du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par la culture. Il utilise les mêmes paramètres que ceux caractérisant le profil spectral. Nous l'avons appliqué à l'estimation de l'efficacité de la transformation en matière sèche du PAR absorbé par la culture.

Par sa capacité d'accéder aux caractéristiques de l'évolution des surfaces foliaires, un des éléments de la culture les plus sensibles aux conditions du milieu, et à celles du PAR absorbé, le modèle de profil spectral fournit des informations pertinentes sur l'état des cultures. Il constitue un pont entre l'approche agrométéorologique déterministe classique et la télédétection.

Ce travail ne peut prétendre avoir résolu tous les problèmes liés à la description de la forme du profil spectral. En particulier, il faudrait vérifier le comportement du modèle proposé dans d'autres situations. Il constitue néanmoins une approche originale puisque il prend en considération les relations entre l'état des cultures et, non pas la réponse radiométrique instantanée, mais l'évolution de celle-ci dans le temps.

Par cet aspect dynamique et sa conception en grande partie déterministe, ce travail constitue un pas de plus vers l'estimation du rendement des cultures, à partir des données radiométriques.

bibliographie

AASE J.K

1978

RELATIONSHIP BETWEEN LEAF AREA AND DRY MATTER IN WINTER WHEAT
AGRON. J 70, 563

AASE J.K SIDDOWAY F. H.

1980

DETERMINING WINTER WHEAT STAND DENSITIES USING SPECTRAL REFLECTANCE
MEASUREMENTS
AGRON. J. 72:149-152

AASE J.K SIDDOWAY F. H.

1981

ASSESSING WINTER WHEAT DRY MATTER PRODUCTION VIA SPECTRAL REFLECTANCE
MEASUREMENTS
REMOTE SENS. ENVIRON. 11:267-277

AASE J.K. SIDDOWAY F.H. MILLARD J.P.

1984

SPRING WHEAT-LEAF PHYTOMASS AND YIELD ESTIMATES FROM AIRBORNE SCANNER
AND HAND-HELD RADIOMETER MEASUREMENTS
INT. J. REMOTE SENS. 5(5):771-781

AJAI SASHIKUMAR M.N. KAMAT D.S. AGGARWAL P.K. SINGH A.K. SINHA S.K

1984

A MODEL OF DRY MATTER AND GRAIN YIELD ESTIMATION IN WHEAT.
PROC. CROP GROWTH CONDITIONS AND REMOTE SENSING:22-23 JUNE 1984
811-8114 I.S.R.O.-I.C.A.R.

ALLEN W.A. RICHARDSON A.J.

1968

INTERACTION OF LIGHT WITH A PLANT CANOPY.
J. OPT. SOC. AMERICA. 58(8):1023-1028

ALLEN W.A. GAYLE T.V. RICHARDSON A.J.

1970

PLANT CANOPY IRRADIANCE SPECIFIED BY THE DUNTLEY EQUATIONS
J. OPT. SOC. AM. 80(3):372-378

ALRICHS J.S. BAUER M.E.

1983

RELATION OF AGRONOMIC AND MULTISPECTRAL REFLECTANCE CHARACTERISTICS OF
SPRING WHEAT CANOPIES
AGRON. J. 75:987-997

ASRAR G. FUCHS M. KANEMASU E.T. HATFIELD J.L.

1984a

ESTIMATING ABSORBED PHOTOSYNTHETIC RADIATION AND LEAF AREA INDEX FROM
SPECTRAL REFLECTANCE IN WHEAT.
AGRON. J. 76:300-308

ASRAR G. KANEMASU E.T. YOSHIDA M.

1985b

ESTIMATES OF LEAF AREA INDEX FROM SPECTRAL REFLECTANCE OF WHEAT UNDER
DIFFERENT CULTURAL PRACTICES AND SOLAR ANGLE.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:1-11

ASRAR G. KANMASU E.T. JACKSON R.D. PINTER P.J.

1985

ESTIMATION OF TOTAL ABOVE GROUND PHYTOMASS PRODUCTION USING REMOTELY SENSED DATA

REMOTE SENS. ENVIRON. 17:211-220

BACHACOU J. MASSON J.P. MILLIER C.

1981

MANUEL DE LA PROGRAMMATHEQUE STATISTIQUE AMANCE 81

INRA CNRF 54880 CHAMPENOUX 516 P.

BADHWAR G.D.

1984a

CLASSIFICATION OF CORN AND SOYBEANS USING MULTITEMPORAL THEMATIC MAPPER DATA.

REMOTE SENS. ENVIRON. 16:175-182

BADHWAR G.D.

1984b

AUTOMATIC CORN-SOYBEAN CLASSIFICATION USING LANDSAT M.S.S. DATA.

I:NEAR-HARVEST CROP PROPORTION ESTIMATION.

REMOTE SENS. ENVIRON. 14:15-29

BADHWAR G.D.

1984c

AUTOMATIC CORN-SOYBEAN CLASSIFICATION USING LANDSAT MSS DATA.II:EARLY SEASON CROP PROPORTION ESTIMATION.

REMOTE SENS. ENVIRON. 14:31-37

BADHWAR G.D. VERHOEF W. BUNNIK N.J.J.

1985a

COMPARATIVE STUDY OF SUITS AND SAIL CANOPY REFLECTANCE MODELS.

REMOTE SENS. ENVIRON. 17:179-195

BADHWAR G.D. HENDERSON K.E.

1985b

APPLICATION OF THEMATIC MAPPER DATA TO CORN AND SOY-BEAN DEVELOPMENT STAGE ESTIMATION

REMOTE SENS. ENVIRON. 17:197-201

BALDY C.

1972

SUR L'ENERGIE ACTIVE EN PHOTOSYNTHESE ET SON UTILISATION PAR DES GRAMINEES AU COURS DE LEUR DEVELOPPEMENT.

ANN. AGRO.23(6) 685-699

BALDY C.

1973

SUR L'ENERGIE ACTIVE EN PHOTOSYNTHESE. SON UTILISATION PAR DES GRAMINEES AU COURS DE LEUR DEVELOPPEMENT.

ANN. AGRO. 24(1) 1-31

BARET F. HUET M.

1979

CONTRIBUTION A L'UTILISATION AGRONOMIQUE DE LA TELEDETECTION: ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE D'UN COUVERT VEGETAL, SON ETAT PHYSIOLOGIQUE ET LES DONNEES RADIOMETRIQUES.

RAPPORT DE FIN DE STAGE; INRA STATION DE BIOCLIMATOLOGIE 84140

MONTFAVET (FRANCE) 115 P.

BARET F. GUYOT G.

1986a

SUIVI DE LA MATURATION DE COUVERTS DE BLE PAR RADIOMETRIE DANS LES
DOMAINES VISIBLE ET PROCHE INFRAROUGE
AGRONOMIE 8 (ACCEPTÉ POUR PUBLICATION)

BARET F. GUYOT G. BEGUE A. MOREL P.

1986b

ETUDE DE LA COMPLEMENTARITE DU MOYEN INFRAROUGE AVEC LE VISIVBLE ET LE
PROCHE INFRAROUGE POUR LE SUIVI DE LA VEGETATION
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; LES ARCS; 16-20
DEC. 1985 409-412

BARIOU R. LECAMUS D. LE HENAFF F.

1985

INDICES DE VEGETATION
DOSSIERS TELEDETECTION; CENTRE REGIONAL DE TELEDETECTION.
UNIVERSITE RENNES 2 150 P.

BARNETT T.L. THOMPSON D.R.

1983

LARGE AREA RELATION OF LANDSAT MSS AND NOAA AVHRR SPECTRAL DATA TO
WHEAT YIELD.
REMOTE SENS. ENVIRON. 13:277-290

BERG A. FLOUZAT G. GALLI DE PARTESI S.

1978

SYNTHESE DES RESULTATS ACQUIS DANS LE CADRE D'UN PROGAMME DE
COLABORATION EUROPEENNE EN TELEDETECTION APPLIQUEE A L'AGRICULTURE ET A LA
A LA SYLVICULTURE
INT. CONF. EARTH OBSERVATION FROM SPACE AND MANAGEMENT OF PLANETARY
RESOURCES; TOULOUSE 8-11 MARS 1978 27-40

BEST R.G. HARLAN J.C.

1985

SPECTRAL ESTIMATION OF GREEN LEAF AREA INDEX OF OATS.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:27-38

BONHOMME R.

1974

DETERMINATION DES PROFILS D'INDICE FOLIAIRE ET DE RAYONNEMENT DANS
UN COUVERT VEGETAL A L'AIDE DE PHOTOGRAPHIES HEMISPHERIQUES
FAITES IN SITU
THESE UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

BONHOMME R. VARLET-GRANCHER C.

1978

ESTIMATION OF GRAMINEOUS CROP GEOMETRY BY PLANT PROFILES INCLUDING
LEAF VARIATIONS
PHOTOSYNTHETICA 12(2):193-196

BRACH E.J. DESJARDINS R.L. LORD D. DUBE P.A.

1981

FIELD SPECTROMETER TO MEASURE PERCENT GROUND COVERAGE AND LEAF AREA
INDEX OF AGRICULTURAL CROPS.
SIGNATURE SPECTRALE D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 8-11 SEPT
1981 323-330

BUNNICK N.J.J.

1978

THE MULTISPECTRAL REFLECTANCE OF SHORTWAVE RADIATION BY AGRICULTURAL CROPS IN RELATION WITH THEIR MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES
THESIS. MEDELINGEN LANDBOUWHOGESCHOOL, WAGENINGEN 78-1 176PP.

CHANCE J.E. LE MASTER E.W.

1977

SUITS REFLECTANCE MODELS FOR WHEAT AND COTTON: THEORICAL AND EXPERIMENTAL TESTS
APPL. OPT. 16(2):407-412

CHANCE J.E. LEMASTER E.W.

1978

PLANT CANOPY LIGHT ABSORPTION MODEL WITH APPLICATION TO WHEAT.
APPL. OPTICS 17(18):2629-2636

CHANCE J.E.

1981

CROP IDENTIFICATION AND LEAF AREA INDEX CALCULATIONS WITH LANDSAT MULTISPECTRAL DATA
INT. J. REMOTE SENS. 2:1-14

CHANDA S.V. JOSHI A.K. VAISHNAV P.P. SINGH Y.D.

1985

LEAF AREA DETERMINATION IN PEARL MILLET USING LINEAR MEASUREMENTS-AREA AND MATTER-AREA RELATIONSHIPS
PHOTOSYNTHETICA 19(3):424-427

CHASSERAY E.

1984

ETUDE DU STRESS HYDRIQUE DU BLE PAR TELEDETECTION; APPLICATION A L'AVERTISSEMENT A L'IRRIGATION EN ZONE ARIDE PAR RADIOTHERMOMETRIE.
THESE E.N.S.A.R. 84/4 F2 91 P.

COLWELL J.E.

1973

BIDIRECTIONAL SPECTRAL REFLECTANCE OF GRASS CANOPIES FOR DETERMINATION OF ABOVE GROUND STANDING BIOMASS.
PH. D. THESIS, ANN ARBOR 174 P.

COLWELL J.E.

1974

GRASS CANOPY BIDIRECTIONAL REFLECTANCE
PROC. 9th INT. SYMP. REMOTE SENSING OF ENV. 1061-1065
ENV. RES. INST. MICHIGAN, ANN ARBOR, USA

CRIST E.P.

1984

EFFECTS OF CULTURAL AND ENVIRONMENTAL FACTORS ON CORN AND SOYBEAN SPECTRAL DEVELOPMENT PATTERNS.
REMOTE SENS. ENVIRON. 14:3-13

CURRAN P.J.

1981

MULTISPECTRAL REMOTE SENSING FOR ESTIMATING BIOMASS AND PRODUCTIVITY. PLANTS AND THE DAY LIGHT SPECTRUM. ED. BY SMITH H. ACADEMIC PRESS
65-99

CURRAN P.J. MILTON E.J.

1983

THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE CHLOROPHYLL CONCENTRATION, LAI AND REFLECTANCE OF A SIMPLE VEGETATION CANOPY.

INT. J. REMOTE SENS. 4(2):247-255

DAUGHTRY C.S.T. BAUER M.E. CRECELIUS D.W. HIXSON M.M.

1980

EFFECTS OF MANAGEMENT PRACTICES ON REFLECTANCE OF SPRING WHEAT CANOPIES.

AGRON. J. 72:1055-1080

DAUGHTRY C.S.T GALLO K.P. BAUER M.E.

1983

SPECTRAL ESTIMATORS OF SOLAR RADIATION INTERCEPTED BY CORN CANOPIES.

AGRON. J. 75:527-531

DAUGHTRY C.S.T HOLLINGER S.E.

1984

COSTS OF MEASURING LEAF AREA INDEX OF CORN.

AGRON. J. 76:836-841

DAUZAT J.

1985

MODELISATION DES TRANSFERTS RADIATIFS AU SEIN DES COUVERTS VEGETAUX SUR LA BASE DE DONNEES OBTENUES PAR UN SYSTEME OPTOELECTRONIQUE DE POINTS QUADRATS

THESE UNIV. SC. TECHN. DU LANGUEDOC, MONTPELLIER 183 P.

DE WIT C.T.

1980

ON COMPETITION

VERSLAGEN VAN LANDBOUWKUNDIGE ONDERZOEKINGEN 66-68 WAGENINGEN

DE WIT C.T.

1985

PHOTOSYNTHESIS OF LEAF CANOPIES

AGRIC. RES. DEPT. 663; CENTRE FOR AGRIC. PUBL. AND DOC.

WAGENINGEN 57P

DEBOUCHE C.

1979

PRESENTATION COORDONNEE DE DIFFERENTS MODELES DE CROISSANCE

REVUE STAT. APPL. 27(4):5-22

DELECOLLE R. GURNADE J.C.

1980

LIAISONS ENTRE LA MORPHOLOGIE DU BRIN, LE RENDEMENT DE L'EPI ET LES COMPOSANTES DU RENDEMENT CHEZ LE BLE TENDRE. I: EFFET VARIETAL

ANN. AGRON. 31(1):85-105

DONALD C.M. HAMBLIN J.

1976

THE BIOLOGICAL YIELD AND HARVEST INDEX OF CEREALS AS AGRONOMIC AND PLANT BREEDING CRITERIA.

ADV. AGRON. 28:361-405

DUNTLEY S.Q.

1942

THE OPTICAL PROPERTIES OF DIFFUSING MATERIALS

J. OPT. SOC. AMERICA 32(2):61-70

DURAND R.

1987

ACTION DE LA TEMPERATURE ET DU RAYONNEMENT SUR LA CROISSANCE.
ANN. PHYSIOL. VEG. 9(1) 5-27

ELVIDGE C.D. LYON R.J.P

1985

INFLUENCE OF ROCK-SOIL SPECTRAL VARIATION ON THE ASSESSEMENT OF GREEN
BIOMASS.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:265-279

EMORI Y. YASUDA Y. SAITO M.

1981

YIELD ESTIMATION OF SUGAR BEET BY HAND HELD SPECTRAL RADIOMETER.
SIGNATURE SPECTRALE D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 8-11 SEPT
1981 363-370

EVANS G. CLIFFORD

1972

THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF PLANT GROWTH
STUD. ECOL. 1 734 P.

EZRA C.E. TINNEY L.R. JACKSON R.D.

1984

EFFECT OF SOIL BACK-GROUND ON VEGETATION DISCRIMINATION USING LANDSAT
DATA
REMOTE SENS. ENVIRON. 18:233-242

FEYERHERM A.M. PAULSEN G.M.

1981

DEVELOPMENT OF A WHEAT YIELD PREDICTION MODEL.
AGRON. J. 73:277-282

GALLO K.P. DAUGHTRY C.S.T. BAUER M.E.

1985

SPECTRAL ESTIMATION OF ABSORBED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN
CORN CANOPIES.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:221-232

GARDNER B.R. BLAD B.L. THOMPSON D.R. HENDERSON K.E.

1985

EVALUATION AND INTERPRETATION OF THEMATIC MAPPER RATIOS IN EQUATIONS
FOR ESTIMATING CORN GROWTH PARAMETERS
REMOTE SENS. ENV. 18:225-234

GATES D.M.

1970

PHYSICAL AND PHYSIOLOGICAL PROPERTIES OF PLANTS.
IN "REMOTE SENSING WITH SPECIAL REFERENCE TO AGRICULTURE AND
FORESTRY". NATIONAL AC. SCIE. CHAP. 5:224-252

GAUSMAN H.W.

1974

LEAF REFLECTANCE OF NEAR INFRARED
PHOT. ENG. 40(2):183-191

GAUSMAN H.W. RODRIGUEZ R.R. WIEGAND C.L.

1976

SPECTROPHOTOMETRIC REFLECTANCE DIFFERENCES BETWEEN DEAD LEAVES AND
BARE SOILS.
J. RIO GRANDE VALLEY HORTICULTURAL SOC. 30:103-107

GERBERMAN A.H. CUELLAR J.A. GAUSMAN H.W.

1984

RELATIONSHIP OF SORGHUM CANOPY VARIABLES TO REFLECTED INFRARED RADIATION FOR 2 WAVELENGTHS AND 2 WAVEBANDS.
PHOT. ENG. REMOTE SENS. 50(2):209-214

GOEL N.S., THOMSON R.L.

1983

ESTIMATION OF AGRONOMIC VARIABLES USING SPECTRAL SIGNATURES.
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJET EN TELEDETECTION; AVIGNON 12-16 SEPT 1983 45-53

GURNADE J.C. MALET P.

1981

MACROPHYSIOLOGIE DE LA MATURATION DU BLE D'HIVER EN CONDITIONS NATURELLES; II: LIAISONS ENTRE LA SENESCENCE DU MAITRE BRIN ET LA MATURATION DES GRAINS CHEZ LA VARIETE TALENT
AGRONOMIE 1(4) 255-280

GUYOT G. HANOCK J.F. BUIS J.P. SAINT G.

1983

MISE AU POINT D'UN RADIOMETRE DE SIMULATION DE SPOT
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; BORDEAUX 12-16 SEPT 1983:233-242

GUYOT G.

1983

VARIABILITE ANGULAIRE ET SPATIALE DES DONNEES SPECTRALES DANS LE VISIBLE ET LE PROCHE INFRA-ROUGE.
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 12-16 SEPT 1983 27-44

GUYOT G.

1984

CARACTERISATION SPECTRALE DES COUVERTS VEGETAUX DANS LE VISIBLE ET LE PROCHE INFRA-ROUGE; APPLICATION A LA TELEDETECTION.
BULL. SOC. FRANC. PHOTGRAM. TELEDET. N°95 3:5-22

GUYOT G. DUPONT O. JOANNES H. PRIEUR C. HUET M. PODAIRE A.

1984

INVESTIGATION INTO THE MID. IR. SPECTRAL BAND BEST SUITED TO MONITORING VEGETATION WATER CONTENT.
E.R.I.M.

HATFIELD J.L.

1981

SPECTRAL BEHAVIOR OF WHEAT VARIETY TRIALS.
PHOT. ENG. REMOTE SENS. VOL 47 N°10 1487-1491

HATFIELD J.L.

1983

REMOTE SENSING ESTIMATORS OF POTENTIAL AND ACTUAL CROP YIELD.
REMOTE SENS. ENVIRON. 13:301-311

HATFIELD J.L. ASRAR G. KANEMASU E.T.

1984

INTERCEPTED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION IN WHEAT CANOPIES BY SPECTRAL REFLECTANCE.
REMOTE SENS. ENVIRON. 14:65-75

HOLBEN B.N. JUSTICE C.O.

1981

AN EXAMINATION OF SPECTRAL BAND RATIOING TO REDUCE THE TOPOGRAPHIC EFFECT ON REMOTELY SENSED DATA.
INT. J. REMOTE SENS. 2:115-133

HUET M.

1983

EVOLUTION DES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE D'UN COUVERT DE BLE UTILISATION DES TECHNIQUES DE TELEDETECTION MICRO-ONDES
THESE UNIV. P. SABATIER, TOULOUSE 90 P.

HUETE A.R POST D.F. JACKSON R.D.

1984

SOIL SPECTRAL EFFECTS ON 4 SPACE VEGETATION DISCRIMINATION.
REMOTE SENS. ENVIRON. 15:155-167

HUETE A.R. JACKSON R.D POST D.F.

1985

SPECTRAL RESPONSE OF A PLANT CANOPY WITH DIFFERENT SOIL BACKGROUNDS.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:37-53

IDSO S.B. PINTER P.J. JACKSON R.D. REGINATO R.J.

1980

ESTIMATION OF GRAIN YIELDS BY REMOTE SENSING OF CROP SENESCENCE RATES.
REMOTE SENS. ENVIRON. 9:87-91

ITCF

1984

COMPARAISON DE DIFFERENTES METHODES D'ECHANTILLONNAGE
NOTE INTERNE ITCF 30 P.

JACKSON R.D. PINTER P.J. IDSO S.B. REGINATO R.J.

1979

WHEAT SPECTRAL REFLECTANCE: INTERACTION BETWEEN CROP CONFIGURATION, SUN ELEVATION, AND AZIMUTH ANGLE.
APPL. OPT. 18(22) 3730-3732

JACKSON R.D.

1983a

SPECTRAL INDICES IN N-SPACE.
REMOTE SENS. ENVIRON. 13:409-421

JACKSON R.D. SLATER P.N. PINTER P.J.

1983b

DISCRIMINATION OF GROWTH AND WATER STRESS IN WHEAT BY VARIOUS VEGETATION INDICES THROUGH CLEAR AND TURBID ATMOSPHERES.
REMOTE SENS. ENVIRON. 13:187-208

JOLIVET E.

1983

INTRODUCTION AUX MODELES MATHEMATQUES EN BIOLOGIE.
I.N.R.A. ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET AGRONOMIQUES 11; ED. MASSON
151 P.

KAMAT D.S. GOPALAN A.K.S. AJAI SHASHIKUMAR M.N. SINHA S.K. CHATURVEDI

G.S. SINGH A.K.

1985

ASSESSMENT OF WATER STRESS EFFECTS ON CROP.
INT. J. REMOTE SENS. 6:577-589

KANEMASU E.T.

1974

SEASONAL CANOPY REFLECTANCE PATTERNS OF WHEAT, SORGHUM, AND SOYBEAN.
REMOTE SENS. ENVIRON. 3:43-47

KAUTH R.J. THOMAS G.S.

1976

THE TASSELED CAP. A GRAPHIC DESCRIPTION OF THE SPECTRAL TEMPORAL
DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL CROPS AS SEEN BY LANDSAT.
PROC. SYMP. MACHINE REMOTELY SENSED DATA. IEE CATALOG N° 761103-1
MPSRD NEW-YORK.

KIMES D.S. SMITH J.A. RANSON K.J.

1980

VEGETATION REFLECTANCE MEASUREMENTS AS A FUNCTION OF SOLAR ZENITH ANGLE.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 46:1583

KIMES D.S. MARKHAM B.L. TUCKER C.J. Mc MURTEY J.E.

1981

TEMPORAL RELATIONSHIPS BETWEEN SPECTRAL RESPONSE AND AGRONOMIC VARIABLES
OF A CORN CANOPY.
REMOTE SENS. ENVIRON. 11:401-411

KIMES D.S. KIRCHNER J.A.

1983

DIURNAL VARIATION OF VEGETATION CANOPY STRUCTURE
INT. J. REMOTE SENS. 4(2):257-271

KIMES D.S.

1984

MODELING THE DIRECTIONAL REFLECTANCE FROM COMPLETE HOMOGENEOUS
VEGETATION CANOPY STRUCTURE
INT. J. REMOTE SENS. 4(2): 299-311

KIMES D.S. HOLBEN B.N. TUCKER C.J. NEWCOMB W.W.

1984

OPTIMAL DIRECTIONAL VIEW ANGLES FOR REMOTE SENSING MISSIONS.
INT. J. REMOTE SENS. 5(8) 887-908

KLEMAN J. FAGERLUND E.

1981

SPECTRAL SIGNATURE MEASUREMENTS OF BARLEY CROPS. THE INFLUENCE OF
IRRIGATION AND FERTILISATION.

KOLLENKARK J.C. DAUGHTRY C.S.T. BAUER M.E. HOUSLEY T.L.

1982

EFFECTS OF CULTURAL PRACTICES ON AGRONOMIC AND REFLECTANCE
CHARACTERISTICS OF SOYBEAN CANOPIES.
AGRON. J. 74:751-758

KUBELKA P. MUNK F.

1931

EIN BEITRAG ZUR OPTIK DER FARBANSTRICHE
ZEITS. FEURTECHN. PHYSICK 12:593-601

KUMAR M. MONTEITH J.L.

1981

REMOTE SENSING OF CROP GROWTH.
PLANTS AND THE DAY LIGHT SPECTRUM. ED. BY SMITH H.ACADEMIC PRESS
133-144

LE MASTER E.W. CHANCE J.E.

1980

A SEASONAL VERIFICATION OF THE SUITS SPECTRAL REFLECTANCE
MODEL FOR WHEAT
PHOT. ENG. REMOTE SENS. 48(1):107-114

LEAMER R.W. NORIEGA J.R. WIEGAND C.L.

1978

SEASONAL CHANGES IN REFLECTANCE OF TWO WHEAT CULTIVARS.
AGRON. J. 70:113-118

LEBRETON J.D MILLIER C.

1982

MODELES MATHEMATIQUES DETERMINISTES EN BIOLOGIE
ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET AGRONOMIQUES. INRA PP 208

LEDENT J.F.

1977

RELATION ENTRE RENDEMENT PAR EPI ET CARACTERES MORPHOLOGIQUES A MATURITE
CHEZ DIVERSES VARIETES DE BLE D'HIVER
ANN. AGRON. 28(4):391-407

LEDENT J.F.

1978

ETUDE INTRAVARIETALE DES RELATIONS ENTRE LE RENDEMENT PAR EPI ET LES
CARACTERES MORPHOLOGIQUES CHEZ LE BLE D'HIVER: RELATIONS
MORPHOLOGIQUES A LA FLORAISON
ANN. AGRON. 29(8):825-840

MALET P. GURNADE J.C.

1981

MACROPHYSIOLOGIE DE LA MATURATION DU BLE D'HIVER EN CONDITIONS
NATURELLES. I: NOTION DE REPRESENTATIVITE CHRONOLOGIQUE ET NORMES
D'ECHANTILLONNAGE.
AGRONOMIE 1(3) 235-242

MARKHAM B.L. KIMES D.S. TUCKER C.J.

1981

TEMPORAL SPECTRAL RESPONSE OF A CORN CANOPY.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 48(11) 1599-1605

MASLE-MAYNARD J.

1980

ELABORATION DU NOMBRE D'EPIS CHEZ LE BLE D'HIVER. INFLUENCE DE
DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE LA STRUCTURE DU PEUPEMENT SUR
L'UTILISATION DE L'AZOTE ET DE LA LUMIERE.
THESE INST. NAT. AGRON. PARIS-GRIGNON 269 P.

MIGUET J.N.

1983

ETUDE DE DIFFERENTES METHODES DE SUIVI DE LA PHASE DE MATURATION DU BLE
D'HIVER: NOTION DE REPRESENTATIVITE QUANTITATIVE.
MEMOIRE FIN D'ETUDE ENSA RENNES PP93

MILLER G.P. FUCHS M. HALL M.J. ASRAR G. KANEMASU E.T. JOHNSON D.E.

1984

ANALYSIS OF SEASONAL MULTISPECTRAL REFLECTANCES OF SMALL GRAINS.
REMOTE SENS. ENVIRON. 14:153-167

MONSI M. SAEKI T.

1953

UBER DEN LICHTKACTOR IN DE PFLANTZENGEZELLSCHAFTEN UND SEINE BEDEUTUNG
FUR DIE STOFFPRODUKTION
JAP. J. BOT. 14:22-52

MONTEITH J.L.

1972

SOLAR RADIATION AND PRODUCTIVITY IN TROPICAL ECOSYSTEMS
J. APPL. ECOL. 9:747-768

MONTEITH J.L.

1977

CLIMATE AND EFFICIENCY OF CROP PRODUCTION IN BRITAIN
PHIL. TRANS. ROY. SOC. LOND. B281:277-294

OLIVER R.E SMITH J.A.

1974

A STOCHASTIC CANOPY MODEL OF DIURNAL REFLECTANCE
FINAL REPORT, U.S. ARMY RESEARCH OFFICE-DURHAM. DAH-CO4--74-G00001
COLORADO STATE UNIVERSITY, FORT COLLINS, COLORADO 80521

PARK J.K. DEERING D.W.

1982

SIMPLE RADIATIVE TRANSFER MODEL FOR RELATIONSHIPS BETWEEN CANOPY BIOMASS
AND REFLECTANCE.
APPL. OPTICS 21:303-309

PEARSON R.L. MILLER L.D.

1972

REMOTE MAPPING OF STANDING CROP BIOMASS FOR ESTIMATION OF THE
PRODUCTIVITY OF THE SHORT-GRASS PRAIRIE, PAWNEE NATIONAL GRASSLANDS,
COLORADO.
PROC. 8 INT. SYMP. ON REMOTE SENS. OF ENVIRON., ANN ARBOR, 1357-1381

PERRY C.R. LAUTENSCHLAGER L.F.

1984

FUNCTIONAL EQUIVALENCE OF SPECTRAL VEGETATION INDICES.
REMOTE SENS. ENVIRON. 14:169-182

PINTER P.J. JACKSON R.D. IDSO S.B. REGINATO R.J.

1981

MULTIDATE SPECTRAL REFLECTANCE AS PREDICTORS OF YIELD IN WATER STRESSED
WHEAT AND BARLEY.
INT. J. REMOTE SENS. 2(1) 43-48

POLLOCK R.B. KANEMASU E.T.

1979

ESTIMATING LEAF AREA INDEX OF WHEAT FROM LANDSAT DATA.
REMOTE SENS. ENVIRON. 18:307-312

PORTER J.R.

1984

A MODEL OF CANOPY DEVELOPMENT IN WINTER WHEAT.
J. AGRIC. SCI., CAMB. 102:383-392

PREVOT L.

1985

MODELISATION DES ECHANGES RADIATIFS AU SEIN DES COUVERTS VEGETAUX
APPLICATION ALA TELEDETECTION VALIDATION SUR UN COUVERT DE MAIS
THESE UNIVERSITE PARIS 6 PP110

RANSON K.J. DAUGHTRY C.S.T. BIEHL L.L. BAUER M.E.

1985

SUN-VIEW ANGLE EFFECTS ON REFLECTANCE FACTORS OF CORN CANOPIES.
REMOTE SENS. ENVIRON. 18:147-161

RICHARDSON A.J. WIEGAND C.L.

1977

DISTINGUISHING VEGETATION FROM SOIL-BACKGROUND INFORMATION.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 43:1541-1542

RICHARDSON A.J. WIEGAND C.L. ARKIN G.F. NIXON P.R.

1982

REMOTELY SENSED SPECTRAL INDICATORS OF SORGHUM DEVELOPMENT AND THEIR USE
IN GROWTH MODELING
AGRIC. METEOR. 26:11-23

RIPPLE W.J.

1985

ASYMPTOTIC REFLECTANCE CHARACTERISTICS OF GRASS VEGETATION
PHOT. ENG. REMOTE SENS. 51(12):1915-1921

RITCHIE J.T. OTTER S.

1985

DESCRIPTION AND PERFORMANCE OF CERES-WHEAT: A USER ORIENTED WHEAT
YIELD MODEL
ARS WHEAT YIELD PROJECT, JUNE 1985; ARS 38 159-175

ROUSE J.W. HAAS R.H. SCHELL J.A. DEERING D.W. HARLAN J.C.

1974

MONITORING THE VERNAL ADVANCEMENT AND RETROGRADATION OF NATURAL
VEGETATION.
NASA/GSFC TYPE III. FINAL REPORT, GREENBELT, MD, PP371

RUSSELLE M.P. WILHEM W.W. OLSON R.A. POWER J.F.

1984

GROWTH ANALYSIS BASED ON DEGREE DAY.
CROP SCIENCE 24:28-32

SAINT G.

1979

RELATION ENTRE RAYONNEMENT ET STRUCTURE.
IN PRINCIPES PHYSIQUES ET MATHEMATIQUES DE LA TELEDETECTION.
C.N.E.S PUBL. 737-790

SASHIKUMAR M.N. AJAI KAMAT D.S. CHATURVEDI G.S. SINGH A.K. SINHA S.K.

1984

RELATIONSHIP OF SPECTRAL AND CROP GROWTH VARIABLES.
PROC. CROP GROWTH CONDITIONS & REMOTE SENS.; 22-23 JUNE 1984
2.1.1-2.1.17

SHIBAYAMA M. WIEGAND C.L.

1985

VIEW AZIMUT AND ZENITH, AND SOLAR ANGLES EFFECTS ON WHEAT CANOPY
REFLECTANCE.
REMOTE SENS. ENVIRON. 18:91-103

SINCLAIR T.R. SCHREIBER M.M. HOFFER R.M.

1973

A DIFFUSE REFLECTANCE HYPOTHESIS FOR THE PATHWAY OF SOLAR RADIATION
THROUGH LEAVES
AGRON. J. 65:276-283

SINGH I.D. STOSKOPF N.C.

1971
HARVEST INDEX IN CEREALS
AGRON. J. 63:224-226

SMITH J.A. OLIVER R.E. BERRY J.K.

1977
A COMPARISON OF TWO PHOTOGRAPHIC TECHNIQUES FOR ESTIMATING FOLIAGE ANGLE
DISTRIBUTION
AUST. J. BOT. 25:545-553

STEVEN M.D. BISCOE P.V. JAGGARD K.W.

1983
ESTIMATION OF SUGAR BEET PRODUCTIVITY FROM REFLECTION IN THE RED AND
INFRARED SPECTRAL BANDS.
INT. J. REMOTE SENS. 4:325-334

SUITS G.H.

1972
THE CALCULATION OF THE DIRECTIONAL REFLECTANCE OF A VEGETATIVE CANOPY.
REMOTE SENS. ENVIRON. 2:117-125

SUITS G.H.

1983
EXTENSION OF A UNIFORM CANOPY REFLECTANCE MODEL TO INCLUDE ROW EFFECTS
REMOTE SENS. ENV. 13(2):113-129

TOMASSONNE R. LESQUOY E. MILLIER C.

1983
LA REGRESSION
ACTUALITES SCIENTIFIQUES ET AGRONOMIQUES. INRA 180 P.

TRIBOI E. ROUSSET M. LEMERCIER E.

1985
ETUDE DE L'INTERACTION GENOTYPE-MILIEU CHEZ LE BLE D'HIVER; ELABORATION
DU POIDS DE GRAIN.
COMPTE RENDU A.T.P. "ECOPHYSIOLOGIE DU BLE" CAMPAGNE 1984 :87-104

TUCKER C.J. MILLER L.D.

1977a
SOIL SPECTRA CONTRIBUTIONS TO GRASS CANOPY SPECTRAL REFLECTANCE.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 43(6):721-726

TUCKER C.J.

1977b
ASYMPTOTIC NATURE OF GRASS CANOPY SPECTRAL REFLECTANCE.
APPL. OPT. 16(5):1151-1157

TUCKER C.J.

1978a
POST SENESCENT GRASS CANOPY REMOTE SENSING.
REMOTE SENS. ENVIRON. 7:203-210

TUCKER C.J.

1978b
ARE TWO PHOTOGRAPHIC INFRARED SENSORS REQUIRED?.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 44(3):289-295

TUCKER C.J.

1978c

A COMPARISON OF SATELLITE SENSOR BANDS FOR VEGETATION MONITORING.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 44(11):1389-1380

TUCKER C.J.

1979a

RED AND PHOTOGRAPHIC INFRARED LINEAR COMBINATIONS FOR MONITORING
VEGETATION
REMOTE SENS. ENVIRON. 8:127-150

TUCKER C.J. ELGIN J.H. Mc MURTEY J.E.

1979b

TEMPORAL SPECTRAL MEASUREMENTS OF CORN AND SOYBEAN CROPS.
PHOT. ENG. REMOTE SENS. 45(5):643-653

TUCKER C.J. ELGIN J.H. Mc MURTEY J.E. FAN C.J.

1979c

MONITORING CORN AND SOYBEAN CROP DEVELOPMENT WITH HAND HELD RADIOMETER
SPECTRAL DATA.
REMOTE SENS. ENVIRON. 8(3):237-248

TUCKER C.J. HOLBEN B.N. ELGIN J.H. Mc MURTEY J.E.

1980

RELATIONSHIP OF SPECTRAL DATA TO GRAIN YIELD VARIATION.
PHOTOGRAM. ENGR. REMOTE SENS. 48(5):657-666

TUCKER C.J. BRENT N. HOLBEN B.N. ELGIN J.E. Mc MURTEY J.E.

1981

REMOTE SENSING OF TOTAL DRY MATTER ACCUMULATION IN WINTER WHEAT.
REMOTE SENS. ENVIRON. 11:171-189

TUCKER C.J. VANPRAET C.L. SHARMAN M.J. VAN ITTERSUM G.

1985

SATELLITE REMOTE SENSING OF TOTAL HERBACEOUS BIOMASS PRODUCTION IN THE
SENEGALIAN SAHEL:1980-1984.
REMOTE SENS. ENVIRON. 17:233-249

VANDERBILT V.C. KOLLENKARK I.C. BIEHL L.L. ROBINSON B.F. BAUER M.E.
RANSON K.J.

1981

DIURNAL CHANGES IN REFLECTANCE FACTOR DUE TO SUN-ROW DIRECTION
INTERACTIONS.
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 8-11 SEPT.
1981 499-508

VANDERBILT V.C. GRANT L.

1983

LIGHT POLARIZATION MEASUREMENTS: A METHOD TO DETERMINE THE SPECULAR AND
DIFFUSE LIGHT SCATTERING PROPERTIES OF BOTH LEAVES AND PLANT CANOPIES.
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 12-16 SEPT.
1983 55-66

VARLET-GRANCHER C. BONHOMME R. JACOB C. ARTIS P. CHARTIER M.

1980

CARACTERISATION ET EVOLUTION DE LA STRUCTURE D'UN COUVERT VEGETAL DE
CANNE A SUCRE.
ANN. AGRO. 31(4):429-454

VARLET GRANCHER C. CHARTIER M. GOSSE G. BONHOMME R.

1981

RAYONNEMENT UTILE POUR LA PHOTOSYNTHESE DES VEGETAUX EN CONDITIONS NATURELLES: CARACTERISATION ET VARIATIONS;
ACTA OECOLOGICA; OECOL. PLANT. 2(18) 189-202

VARLET-GRANCHER C. BONHOMME R. CHARTIER M. ARTIS P.

1982

EFFICIENCE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE PAR UN COUVERT VEGETAL.
ACTA OECOLOGICA. OECOL. PLANT. VOL 3 (17) N°1 3-28

VERHOEF W. BUNNIK N.J.J.

1978

THE SPECTRAL DIRECTIONAL REFLECTANCE OF ROW CROPS
NIWARS, DELFT, PUBL. 35

VERHOEF W. BUNNIK N.J.J.

1981

INFLUENCE OF CROP GEOMETRY ON MULTISPECTRAL REFLECTANCE DETERMINED BY THE USE OF CANOPY REFLECTANCE MODELS
SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION; AVIGNON 8-11
SEPT. 1981 273-290

VERHOEF W.

1984

LIGHT SCATTERING BY LEAF LAYERS WITH APPLICATION TO CANOPY REFLECTANCE MODELING: THE SAIL MODEL
REMOTE SENS. ENV. 18:125-141

WALTHALL C.L. NORMAN J.M. WELLES J.M. CAMPBELL G. BLAD B.L.

1985

SIMPLE EQUATION TO APPROXIMATE THE BIDIRECTIONAL REFLECTANCE FROM VEGETATIVE CANOPIES AND BARE-SOIL SURFACES.
APPL. OPT. 24(3):383-385

WARREN WILSON J.

1963

ESTIMATION OF FOLIAGE DENSENESS AND FOLIAGE ANGLE BY INCLINED POINT QUADRATS
AUST. J. BOT. 11:95-105

WEIR A.H. BRAGG P.L. PORTER J.R. RAYNER J.H.

1984

A WINTER WHEAT CROP SIMULATION MODEL WITHOUT WATER OR NUTRIENT LIMITATIONS.
J. AGRIC. SCI. CAMB. 102:371-382

WHEELER S.G. MISRA P.N. HOLMES A.Q.

1976

LINEAR DIMENSIONALITY OF LANDSAT AGRICULTURAL DATA WITH IMPLICATIONS FOR CLASSIFICATIONS.
PROC. SYMP. MACHINE PROCES. OF REMOTELY SENSED DATA, LARS, PERDUE UNIVERSITY

WIEGAND C.L. RICHARDSON A.J.

1982

COMPARISONS AMONG A NEW SOIL INDEX AND OTHER 2 AND 4 DIMENSIONAL VEGETATION INDICES
TECHNICAL PAPERS OF THE AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. ACSM-ASP CONVENTION, 14-20 MARS 1982, DENVER, COLORADO: 210-227

WIEGAND C.L.

1984a

CANDIDATE SPECTRAL INPUTS TO AGROMETEOROLOGICAL CROP GROWTH YIELD MODELS.
PROC. INT. COLL. SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION;
BORDEAUX, 1983 852-872

WIEGAND C.L. RICHARDSON A.J.

1984b

LEAF AREA, LIGHT INTERCEPTION AND YIELD ESTIMATES FROM SPECTRAL
COMPONENTS ANALYSIS.
AGRON. J. 76:543-548

annexe

ANNEXE : Programme de calcul de ρ, R, K, K_n, K_e

SUBROUTINE SUITS(XLAMB,ANGF,TTS,V)

XLAMB= reflectance infinie du couvert planophile correspondant
 ANGF = angle moyen d'inclinaison des feuilles
 TTS = angle zenithal solaire (en degres)
 V = matrice comportant 5 elements:
 V(1) = reflectance directionnelle infinie
 V(2) = reflectance hemispherique infinie
 V(3) = coefficient d'extinction pour la reflectance directionnelle
 V(4) = coefficient d'extinction pour la reflectance hemispherique
 V(5) = coefficient d'extinction pour la transmittance du couvert

REAL C1(4,5),C2(4,5),C3(4,5),E1(5,2),E2(5,2),E3(5,2),PL(5)
 &,D(3),Y(5),LAMB,V(5)

*****INITIALISATION DES PARAMETRES ET COEFFICIENTS*****

DATA PL/.0726,.0720,1.76,1.763,.8838/

DATA C1/-.0009472,.0,.0000004124,-.000000006219,
 &-.0003021,-.000007238,.0,.000000033080,
 &.009169,.0,-.000006929,.0000001625,
 &.02523,.0,-.000006740,.0000001547,
 &.008400,.0,-.000005884,.0000001434/

DATA C2/.00004834,-.0000008773,.0,.00000000007616,
 &.000001901,.0000001508,.0,-.00000000004578,
 &-.0003498,.0,.00000003797,-.0000000006427,
 &-.0003935,.0,.00000003769,-.0000000005539,
 &-.0001788,.0,.00000002081,-.0000000003562/

DATA C3/-.0000004769,.000000007165,.0,-.00000000004002,
 &-.00000006407,.0,.0000000007231,.00000000001397,
 &.0000009044,.0,.00000000003860,-.00000000002659,
 &.0000004261,.00000001947,.0,-.000000000002607,
 &.0000002980,.0,.0000000001136,-.000000000003640/

DATA E1/.1391,-.01325,.009348,.01837,.01883,
 &-1.918,0,-.001054,0.0,0./

DATA E2/.5897,1.1695,-.1706,-.2164,-.22926,
 &5.505,0,.00599,0.,0./

DATA E3/.2712,-.1525,1.1612,1.19807,1.21043,
 &-3.587,0,-.004934,0.,0./

*****CALCUL DES VALEURS POUR LAMBDA=VERT*****

DO 30 L=1,5

D1=C1(1,L)+C1(2,L)*TTS+C1(3,L)*TTS**2+C1(4,L)*TTS**3

D2=C2(1,L)+C2(2,L)*TTS+C2(3,L)*TTS**2+C2(4,L)*TTS**3

D3=C3(1,L)+C3(2,L)*TTS+C3(3,L)*TTS**2+C3(4,L)*TTS**3

YT=D1*ANGF+D2*ANGF**2+D3*ANGF**3

Y(L)=YT+PL(L)

CONTINUE

*****CALCUL DES VALEURS POUR LES AUTRES LAMBDA*****

LAMB=XLAMB/PL(1)

DO 50 I=1,5

V(I)=(E1(I,1)*LAMB**2+E2(I,1)*LAMB+E3(I,1))*Y(I)

&+(E1(I,2)*LAMB**2+E2(I,2)*LAMB+E3(I,2))*Y(I)**2

CONTINUE

RETURN

END