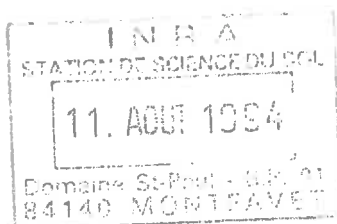




I.N.R.A.
(Institut National de la
Recherche Agronomique)

E.S.I.T.P.A.
(Ecole Supérieure d'Ingénieurs
et de Techniciens pour l'Agriculture)

BIARD Frédéric
promotion 89



Mémoire d'ingénieur E.S.I.T.P.A.

**Intérêt des mesures radiométriques
en hyperfréquences passives
sur couvert agricole de blé**

**Application à l'inversion des paramètres de surface
à 1.4 GHz et 10.65 GHz**

Janvier 1994

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier l'ensemble du corps enseignant et la direction des études de l'E.S.I.T.P.A. qui m'ont permis d'accomplir ma formation d'ingénieur en Agriculture durant ces cinq dernières années, et sans qui je ne pourrais présenter ce travail aujourd'hui.

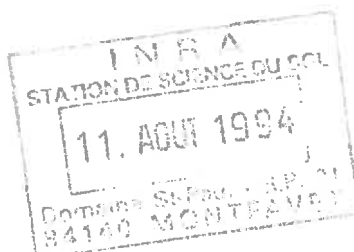
Je remercie Bernard Seguin, directeur de la station de bioclimatologie de l'I.N.R.A. de Montfavet, de m'avoir si chaleureusement accueilli dans son laboratoire pour y effectuer mon stage de fin d'études. J'exprime également ma plus sincère reconnaissance à mon maître de stage, Jean-Pierre Wigneron, pour sa gentillesse, sa disponibilité, et surtout l'immense patience dont il a su faire preuve à mon égard. J'associe également à mes remerciements l'ensemble des membres de l'équipe "télédétection" de la station qui ont su m'entourer de conseils avisés lors de mes différentes investigations.

Je salue André Chanzy et toutes les personnes qui ont participé à l'expérimentation de cet été 1993, avec lesquelles j'ai partagé de "chauds" moments de complicité ponctués d'agréables fous rires; Nadine Bruguier, Laurent Laguerre, Philippe Loudjani, sans oublier Driss et ses taries, Maurice et Jean-Claude.

Je n'oublierai pas les personnes qui, même si elles n'ont pas directement contribué à mon travail, ont partagé mes états d'humeur et égaillé mon quotidien pendant ces huit mois de stage; je pense particulièrement à mon colocataire et complice Thierry, à Panos, Claudine, Sylvie et l'ensemble des stagiaires de passage à la station.

Enfin, je remercie Gaëlle pour son soutien et sa compréhension.

A tous, de tout coeur, merci.



TITRE : "Intérêt des mesures radiométriques en hyperfréquences passives sur couvert agricole de blé - Application à l'inversion des paramètres de surface à 1.4 et 10.65 GHz"

RESUME

La télédétection dans le domaine des micro-ondes passives (1 à 100 GHz) est un outil intéressant pour l'estimation des paramètres de surface, et notamment pour l'étude des couverts végétaux. Actuellement, les recherches portent sur l'utilisation satellitaire des mesures radiométriques pour quantifier les processus énergétiques de surface. Il s'agit d'établir les relations qui existent entre la mesure micro-onde passive sur couverts végétaux et les paramètres physiques du milieu. Cet objectif s'appuie sur le développement de méthodes de correction et d'algorithmes d'inversion des données acquises pour estimer les paramètres géophysiques.

Cette étude porte sur l'exploration des possibilités d'application d'un modèle "continu" d'inversion des paramètres de surface dans le domaine des hyperfréquences passives. Elle est basée sur des mesures acquises sur un couvert de blé avec le sondeur multifréquence PORTOS. L'approche continue est basée sur la résolution des équations de transfert radiatif dans une strate de végétation. La diffusion au sein du couvert est liée à deux paramètres synthétiques qui décrivent les fluctuations diélectriques dans le milieu (les longueurs de corrélation). L'évolution temporelle de l'émission d'un couvert de blé au cours du cycle de végétation a été analysée à 1.4, 10.65 et 23.8 GHz. L'intérêt de la radiométrie micro-onde pour estimer les paramètres de surface (teneur en eau du sol, de la végétation, biomasse...) par l'approche continue est étudiée en s'appuyant dans un premier temps sur la comparaison directe des simulations avec les mesures radiométriques. Les mesures radiométriques sont inversées à 1.4 GHz et 10.65 GHz.

Les résultats montrent que les basses fréquences sont quantitativement sensibles aux variations des paramètres de surface, alors que les moyennes fréquences semblent donner des informations plus qualitatives, liées au stade physiologique du couvert.

TITLE : "Interest of passive microwave radiometry measurements on agricultural crop of wheat - Applying to surface parameters's inversion at 1.4 and 10.65 GHz"

ABSTRACT

In the remote sensing field, passive microwaves observations (1 to 100 GHz) are an interesting tool to monitor land surface parameters and especially vegetation cover features. Nowadays, development concern mostly the improvement of the radiometer spatial resolution and the implement of method of inversion to retrieve geophysical parameters from spaceborne observations.

This study analyse the interest of the continuous model to simulate vegetation microwaves emission. The continuous approach is based on a solution of radiative transfer equations in a single vegetation layer. Scattering is related to a couple of synthetic parameters (the correlation lengths) which parameterize the dielectric fluctuations inside the vegetation medium. Using this synthetic approach, the temporal evolution of a wheat field microwaves emission has been analysed at 1.4, 23.8 and 10.65 GHz during the whole vegetation development. Direct comparisons between simulated and measured data, and retrieval of surface parameters have been performed based on an inversion algorithm of the continuous model. The results showed that low frequency observations are sensitive to soil moisture and vegetation density, while high frequency measurements allow qualitative retrieval, mainly related to morphological changes of the vegetation canopy.

LISTE DES SYMBOLES ET ABBREVIATIONS

α, β, γ : angles d'Euler décrivant l'orientation d'un objet dans l'espace

B : champ magnétique associé au rayonnement

Bs : biomasse sèche végétale (Kg/m²)

Bf : biomasse fraîche végétale (Kg/m²)

c : célérité de la lumière (3.10⁸ m.s⁻¹)

C : coefficient reliant la température de brillance TB_p (K) et la luminance spectrale L_r (Wm⁻²sr⁻¹Hz⁻¹), tel que $C=2k/\lambda^2$

COMITAS : Commission ministérielle de la terminologie de la télédétection aérospatiale

δ : variance de la fonction d'autocorrélation de la permittivité du milieu continu

δ_e (m) : épaisseur de la strate du sol contribuant à l'émission

δ_p (m) : profondeur de pénétration de l'onde E.M. dans le milieu

d (m) : hauteur du couvert végétal

E : champ électrique associé au rayonnement

E.M. : électromagnétique

ϵ_p : émissivité micro-onde du couvert (p polarisation verticale (v) ou horizontale (h))

ϵ, μ : permittivité électrique et perméabilité magnétique du milieu

ϵ_r, μ_r : permittivité électrique et perméabilité magnétique relatives du milieu (ϵ_r est également appelée constante diélectrique du milieu avec $\epsilon=\epsilon_r.\epsilon_0$)

ϵ_0, μ_0 : permittivité électrique et perméabilité magnétique du vide

ϵ_N : constante diélectrique du milieu (N=1 (strate végétale), N=2 (sol))

ϵ_v, ϵ_s : constante diélectrique de la matière végétale et du sol

ϕ : angle d'azimut

f (GHz) : fréquence de la radiation E.M. exprimée en giga Hertz (10⁹ Hertz)

Fracv (m³/m³) : fraction volumique de la végétation

F_{pq} : tenseur de diffusion d'amplitude

γ : facteur d'atténuation du milieu ($\gamma=\exp(-z.K_e/\mu)$)

γ_{pq} : coefficient bistatique de diffusion (p,q=v,h)

Γ_1 (K/m) : gradient thermique au sein du couvert végétal ($\Gamma_1=(T_{1sup}-T_{1inf})/d$)

Γ_v, Γ_s : réflectivité à l'interface végétation-atmosphère et sol-végétation

Γ_{mn} : réflectivité à l'interface de deux milieux m et n

h : constante de Planck (6.63.10⁻³⁴ J)

hr, Q : paramètres de rugosité (réflectivité de Fresnel modifiée selon Wang et Choudhury, 1981)

(H) : polarisation horizontale de l'onde E.M.

H_p (Kg/Kg) : humidité pondérale de la végétation
 IB : indice de battance

k_0 : nombre d'onde dans le vide ($k_0=2\pi/\lambda_0$)
 k_N : nombre d'onde dans le milieu N, N=1 ou 2 ($k=2\pi/\lambda$)
 k : constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ J.K⁻¹)
 K_a (neper.m⁻²) : coefficient d'absorption du milieu
 K_s (neper.m⁻²) : coefficient de diffusion du milieu
 K_e (neper.m⁻²) : coefficient d'extinction du milieu ($K_e=K_a+K_s$)

λ (m) : longueur d'onde de la radiation (période spatiale)
 λ_a (m) : longueur d'absorption de l'onde E.M. dans un milieu
 l_z et l_p (m) : longueurs de corrélation diélectrique verticale et horizontale du milieu continu
 LAI (m²/m²) : Indice foliaire (Leaf Area Index)

$\mu = \cos\theta$: cosinus de l'angle d'incidence du rayonnement
 Mv_{sol} (m³/m³) : teneur en eau volumétrique du sol
 Mg (Kg/Kg) : teneur en eau gravimétrique de la matière végétale
 Mv (m³/m³) : teneur en eau volumétrique de la matière végétale

n : indice de réfraction du milieu
 n_e, n_0 : nombre de diffuseurs discrets par unité de volume
 $\rho(\beta)$: fonction de densité de probabilité d'inclinaison des feuilles
 P : matrice de phase composée des éléments (p, q') ($p, q=v, h$)

θ : angle d'incidence mesuré par rapport à la normale à la surface
 Q : paramètre de dépolarisation lié à la rugosité de surface (cf. hr)

ρ_λ : réflectance spectrale du couvert
 ρ_{ms} (g/cm³) : densité de la matière végétale sèche
 R_p, T_p ($p=v, h$) : coefficients de Fresnel en réflexion et en transmission
 $RMSE$: Root Mean Square Error (Ecart quadratique moyen)

σ : écart type des variations de hauteur de la surface du sol
 σ_{pq} : coefficient de rétrodiffusion radar

τ : épaisseur optique du milieu
 T_2 et T_1 (K) : température du sol ($T_2=T_s$) et de la végétation ($T_2=T_v$)
 T_{1sup} et T_{1inf} : températures au sommet et au bas du couvert végétal
(T_a, p_a, θ_a) : profil atmosphérique de température, de pression et de teneur en eau
 $TB_p(\theta_i)$ (K) : température de brillance du milieu ($p=v, h$)
 T_{sky} (K) : composante atmosphérique descendante

(V) : polarisation verticale de l'onde E.M.

ω : albédo de simple diffusion (single scattering albedo)
 ω_c, f, T : pulsation, fréquence, période temporelle de l'onde E.M.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
DEFINITION DES OBJECTIFS ET PRESENTATION DE L'ETUDE	1
 PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION HYPERFREQUENCES, MODELISATION DE L'EMISSION MICRO-ONDE	
CHAPITRE 1 : Intérêt de la télédétection en hyperfréquences	3
1.1 - Définition et importance de la télédétection	3
1.2 - Le développement de la télédétection micro-ondes	4
1.2.1 - Principe Actif, principe Passif.	4
1.2.2 - L'apport possible des micro-ondes à l'étude de la phytosphère	4
1.3 - Les radiomètres à bandes hyperfréquences	5
1.3.1 - Les instruments embarqués sur plates-formes satellitaires	5
1.3.2 - Radiomètres de terrain et aéroportés	6
 CHAPITRE 2 : Définition et propriétés d'un rayonnement électromagnétique Modélisation de la température de brillance	 7
2.1 - Bases physiques : nature et propriétés d'une onde électromagnétique	7
2.1.1 - Nature du rayonnement	7
2.1.1.1 - L'onde électromagnétique : définition de Maxwell	7
2.1.1.2 - Polarisation d'une onde plane et lumière naturelle	8
2.1.1.3 - Interface plane : réflectivité - transmittivité	9
2.1.1.4 - Absorption d'une onde électromagnétique	10
2.1.2 - Intensité du rayonnement électromagnétique	10
2.1.2.1 - Diffusion de l'onde électromagnétique dans un couvert végétal	11
2.1.2.2 - Emissivité : Loi de Planck	11
2.1.2.2.1 - Loi particulière dans le domaine des hyperfréquences	11
2.1.2.2.2 - Emission micro-onde de la végétation	12
2.2 - Modélisation de la température de brillance : le modèle simplifié	13
2.2.1 - Equation simplifiée de transfert radiatif	13
2.2.1.1 - Les composantes du transfert radiatif au sein d'un couvert	13
2.2.1.2 - Simplification du bilan radiatif	14
2.2.2 - Modélisation de la température de brillance : modèle simplifié	15
2.3 - Modélisation de la température de brillance : les modèles physiques	16
2.3.1 - Le modèle discret	16
2.3.1.1 - Principe général	16
2.3.1.2 - Les coefficients d'échange radiatifs et la matrice de phase	17
2.3.2 - Le modèle continu	18
2.3.2.1 - Principe général	18
2.3.2.2 - Les coefficients d'échange radiatifs et la matrice de phase	18
2.3.2.3 - Calcul de la température de brillance du couvert	20
2.3.2.3.1 - Expression de la température de brillance	20
2.3.2.3.2 - Solutions particulières du transfert radiatif	20
2.3.2.3.3 - Conditions aux interfaces sol-végétation et végétation-air	21
2.3.3 - Les données d'entrée des modèles physiques de simulation	21
2.3.3.1 - Les paramètres d'entrée communs aux deux modèles	21
2.3.3.2 - Les paramètres d'entrée propres au modèle discret	22
2.3.3.3 - Les paramètres d'entrée propres au modèle continu	22

DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION "PORTOS-1993"	
METHODOLOGIE, MESURES DES PARAMETRES D'ENTREE DU	
MODELE	23
CHAPITRE 3 : présentation générale du dispositif expérimental	24
3.1 - Objectif général de l'expérimentation	24
3.1.1 - Les principaux axes de recherche développés cette année	24
3.1.1.1 - Les recherches menées en collaboration avec l'INRA	24
3.1.1.2 - Les objectifs des stations Sciences du sol et Bioclimatologie	25
3.1.2 - Les précédentes campagnes de mesures réalisées avec PORTOS	25
3.2 - Le dispositif expérimental in situ	26
3.2.1 - Description générale du site	26
3.2.1.1 - Dispositions générales	26
3.2.1.2 - La parcelle de blé	26
3.2.2 - L'acquisition des données biophysiques	27
CHAPITRE 4 : mesures radiométriques avec PORTOS	28
4.1 - Quelques généralités sur le radiomètre PORTOS	28
4.1.1 - Présentation générale de l'instrument	28
4.1.2 - Mode de fonctionnement du radiomètre	28
4.1.3 - Des améliorations notables depuis 1991	29
4.2 - Mise en oeuvre des mesures radiométriques	29
4.2.1 - Etalonnages	29
4.2.2 - Déroulement des mesures avec PORTOS	30
4.2.3 - Description du jeu de données radiométriques	30
4.3 - Problèmes rencontrés au cours des trois mois de manipulation	31
4.3.1 - Interrogations sur les données du canal 5.05 GHz	31
4.3.2 - Déficience du canal 36.5 GHz	32
4.3.3 - Dégâts de condensation sur les antennes	32
4.3.4 - Inadéquation des lobes d'antenne : effet de "bordure"	32
4.4 - Evolution temporelle de l'émissivité hyperfréquence d'un couvert de blé	33
4.4.1 - Contribution du couvert végétal à l'émission	33
4.4.1.1 - Dans les très basses fréquences : 1.4 GHz	33
4.4.1.2 - Dans les moyennes fréquences : 10.65 et 23.8 GHz	34
4.4.2 - Contribution du sol à l'émission	34
CHAPITRE 5 : mesures des paramètres de végétation	
caractérisation géométrique d'un couvert de blé	36
5.1 - Caractéristiques générales du couvert	36
5.1.1 - La mise en place de la culture	36
5.1.2 - Caractérisation des principaux stades du cycle de végétation	36
5.2 - Protocoles de mesure	38
5.2.1 - Les mesures au champ	38
5.2.2 - Les mesures en laboratoire	39
5.2.2.1 - L'exploitation des échantillons "2 rangs"	39
5.2.2.2 - L'exploitation des échantillons "10 brins" (structure fine)	39
5.3 - Biomasse et teneur en eau du couvert	40
5.3.1 - Evolution de la biomasse au cours du cycle	40
5.3.2 - L'eau dans la plante	41

5.4 - Notions de surfaces et d'indices foliaires	42
5.4.1 - Le "Green Leaf Area Index"	43
5.4.2 - Le "Specific Green Leaf Area"	43
5.4.3 - Les indices de végétation en télédétection : intérêt des micro-ondes	43
5.5 - Calcul des fractions volumiques de végétation	44
5.5.1 - Le volume foliaire	44
5.5.2 - Le volume des tiges	46
5.5.3 - Le volume des épis	48
5.6 - Propriétés diélectriques du couvert de blé	48
5.7 - Orientation des éléments du couvert	49

TROISIEME PARTIE : RESULTATS, ANALYSE ESTIMATION DES PARAMETRES DE VEGETATION ET DE SOL PAR INVERSION DES DONNEES RADIOMETRIQUES	50
CHAPITRE 6 : le modèle continu "composite"	51
6.1 - Fondements théoriques du modèle "composite"	51
6.1.1 - Calcul du Ka à l'aide du modèle discret	51
6.1.1.1 - Le rapport Ka/Ks	51
6.1.1.2 - Transposition dans le modèle continu	52
6.1.2 - Evolution et sensibilité du rapport Ka/Ks	52
6.2 - Etude de sensibilité comparée du modèle continu initial et du modèle continu "composite" aux paramètres de végétation et de sol	53
6.2.1 - Fondement et méthode	53
6.2.2 - Influence de la biomasse sèche	54
6.2.3 - Influence de la teneur en eau du couvert	55
6.2.4 - Influence de la teneur en eau du sol	56
CHAPITRE 7 : principe de l'inversion et calage du modèle composite	58
7.1 - Inversion de l'humidité de surface et des paramètres de végétation	58
7.1.1 - Méthodologie	58
7.1.2 - Les causes de non inversibilité	59
7.2 - Inversion préliminaire des paramètres de calage	59
7.2.1 - Estimation des paramètres de rugosité hr et Q : fondements	60
7.2.1.1 - Méthode	60
7.2.1.2 - Analyse de l'inversion des paramètres de rugosité	61
7.2.2 - Inversion des longueurs de corrélation lz et lp	61
7.2.2.1 - Fondement et méthode	61
7.2.2.2 - Evolution temporelle des longueurs de corrélation	62
7.3 - Comparaison directe entre les mesures radiométriques et les simulations du modèle composite	63
7.3.1 - Ajustement des longueurs de corrélation à 1.4 GHz	63
7.3.2 - Ajustement des longueurs de corrélation à 10.65 GHz	64
CHAPITRE 8 : inversion des mesures radiométriques	65
8.1 - Inversion de l'humidité du sol et de la fraction volumique de végétation à 1.4 GHz	65
8.1.1 - Résultats d'inversion	65
8.1.1.1 - Estimation de "Mv _{sol} "	65
8.1.1.2 - Estimation de "Fracv"	66
8.1.2 - Discussion, interprétation des jours aberrants	66
8.1.2.1 - Points particuliers de l'inversion de "Mv _{sol} " à 1.4 GHz	66
8.1.2.2 - Points particuliers de l'inversion de "Fracv" à 1.4 GHz	67
8.2 - Inversion des paramètres de surface à 10.65 GHz	67
8.2.1 - Interprétation :	
les causes théoriques de la saturation des simulations du canal 10.65 GHz	68
8.2.2 - Les causes physiques de l'échec de la modélisation du canal 10.65 GHz :	
les particularités des céréales	68
8.3 - Synthèse des résultats d'inversion des mesures à 1.4 GHz et 10.65 GHz	69
8.3.1 - Dans les basses fréquences	69
8.3.2 - Dans les moyennes fréquences	70

ANNEXES

- Annexe n° 1 : évolution de la hauteur des strates du couvert**
- Annexe n° 2 : évolution de la densité de tiges / m² au cours du cycle de végétation**
- Annexe n° 3 : évolution de l'indice foliaire, de la biomasse et de l'humidité du blé**
- Annexe n° 4 : évolution des dimensions des diffuseurs végétaux dans le couvert**
- Annexe n° 5 : estimations de la densité de matière sèche des éléments du blé**
- Annexe n° 6 : représentation graphique de la relation liant la largeur d'une feuille de blé à sa longueur (relation adimensionnelle)**
- Annexe n° 7 : représentation graphique des relations liant l'épaisseur du limbe foliaire à la longueur pour deux états de turgescence (adimensionnelles)**
- Annexe n° 8 : représentation graphique de la relation liant le diamètre apparent d'une tige à sa longueur**
- Annexe n° 9 : représentation graphique de la relation liant le volume réel d'une tige à L.Dmax²**
- Annexe n° 10 : représentation graphique de l'évolution temporelle de la fraction volumique de végétation du couvert, et de chaque éléments végétaux**
- Annexe n° 11 : paramétrisation de la hauteur du couvert "d" et de la fraction volumique de végétation "Fracv" en fonction de la biomasse sèche totale du couvert**
- Annexe n° 12 : représentation de l'évolution de température de brillance "TB" en fonction de la biomasse sèche totale "Bst" et de l'humidité du couvert "Mg"**
- Annexe n° 13 : évolution de l'humidité de surface au cours de la campagne de mesures**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE

Parmi les conquêtes humaines les plus remarquables, celle de l'espace est sans doute la plus fascinante. Depuis que nous avons pris conscience du rôle de notre environnement, nous avons compris l'avantage de pouvoir avoir une vision synthétique de notre milieu sur une grande échelle. Les vues aériennes sont d'un grand intérêt, tant sur le plan stratégique (les premières images aériennes sont apparues pendant la première guerre mondiale), que scientifique, économique ou sociologique. A l'heure actuelle, la télédétection spatiale se situe parmi les outils d'investigation les plus puissants pour l'observation de notre planète. Que ce soit dans le cadre du suivi de la biosphère à l'échelle globale, ou celui du couvert végétal à l'échelle de la parcelle, la télédétection est un moyen efficace pour estimer les paramètres de surface qui interviennent dans les échanges énergétiques à l'interface sol-atmosphère. Actuellement, les grands axes de recherche portent sur le développement des capteurs et des algorithmes de correction des données acquises, et sur l'analyse physique de la mesure et sur son utilisation pour quantifier les processus énergétiques de surface. Notre étude s'inscrit précisément dans cette dynamique, et vise à établir les relations qui existent entre la mesure hyperfréquence passive sur couvert végétaux et les paramètres de surfaces.

DEFINITION DES OBJECTIFS ET PRESENTATION DE L'ETUDE

Cette étude, "Intérêt des mesures radiométriques en hyperfréquences passives sur couvert agricole de blé - Application à l'inversion des paramètres de surface à 1.4 GHz et 10.65 GHz", s'inscrit dans le contexte global des recherches actuellement menées en télédétection sur la diversification des moyens d'observation planétaire. De nombreux travaux mettent en valeur l'intérêt de la complémentarité des différents domaines de longueurs d'onde, et notamment des micro-ondes, pour l'évaluation et le suivi de l'évolution climatique, biologique et physique de la surface terrestre. Dans cette optique, le nouveau sondeur micro-onde multifréquence "PORTOS", développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), constitue un outil d'investigation de premier plan pour l'étude de l'influence des paramètres de surface sur l'émission micro-onde des surfaces naturelles.

L'expérimentation "PORTOS 1993" sur couvert de blé menée à l'INRA de MONTFAVET se place dans le prolongement direct de celle réalisée en 1991 sur couvert de soja (J.P. Wigneron, 1993). L'objectif de cette étude est double : il s'agit d'une part d'observer le comportement et la précision des modèles physiques de simulation de l'émission d'un couvert végétal sur une culture très répandue, mais réputée délicate à appréhender en hyperfréquences: le blé. D'autre part, cette étude a pour ambition d'explorer les possibilités d'application d'un algorithme d'inversion de mesures radiométriques pour estimer les paramètres de surfaces. Cette recherche se justifie dans la mesure où les méthodes d'inversion sont vouées à compléter les moyens de télédétection spatiale déjà utilisés (méthodes statistiques de traitement du signal, entre autre). L'étude du modèle d'inversion sur des surfaces bien caractérisées constitue une étape préliminaire indispensable avant la mise en oeuvre de l'algorithme de résolution sur une plus grande échelle (détection aérienne et spatiale).

Le plan de ce rapport s'articule suivant trois axes de recherche. Tout d'abord, la première partie se compose d'une étude bibliographique concernant les bases physiques de la radiométrie micro-onde et les modèles de simulation de l'émission d'un couvert. Ces rappels théoriques permettront de mieux cerner l'ensemble des processus qui influencent les échanges radiatifs au sein d'un couvert végétal, notamment en ce qui concerne l'expression des coefficients d'échanges radiatifs (coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction) qui déterminent le niveau d'émission global de la surface détectée. Nous aborderons également les différentes approches de la modélisation de l'émission micro-onde, et nous évoquerons plus spécialement les modèles physiques (modèle "discret" et modèle "continu") basés sur l'approche incohérente de la diffusion de volume, qui sont les modèles utilisés dans cette étude.

Au delà des aspects purement théoriques, cette partie est également destinée à faire prendre conscience de l'importance de la précision de la caractérisation structurale et géométrique de la culture observée; en l'occurrence le blé. Les modèles physiques de simulation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal nécessitent une modélisation morphologique et géométrique de la plante aussi précise que possible. Une partie de cette étude a consisté à modéliser l'aspect géométrique d'un couvert de blé, et nous avons suivi régulièrement l'évolution phénologique de cette culture afin d'obtenir une base de données biologiques suffisamment complète et significative pour paramétrer les modèles mis en oeuvre. Les résultats de cette étude morphologique font l'objet de la deuxième partie du rapport, consacrée au protocole expérimental et aux aspects de radiométrie de terrain. Nous discuterons également de la qualité et de la signification du jeu de données radiométriques acquis pendant la campagne de mesures.

La troisième partie présente l'analyse des résultats de simulation de l'émission et de l'inversion des paramètres de surface. Dans un premier temps nous présenterons le modèle continu "composite", qui est un modèle de simulation basé sur une approche continue de la modélisation du couvert, mais qui bénéficie d'une correction sur le coefficient d'absorption effectuée grâce au modèle discret. Après avoir analysé l'évolution temporelle des mesures radiométriques, nous discuterons du comportement de ce modèle en s'appuyant sur une étude de sensibilité réalisée pour trois paramètres de surface : la biomasse, l'humidité du couvert et l'humidité du sol. La précision du modèle "composite" sera abordée selon deux approches : la comparaison directe des simulations avec les mesures radiométriques, et l'inversion des paramètres de surface dans deux canaux basse et moyenne fréquences (1.4 et 10.65 GHz). L'étude de chacune de ces deux bandes radiométriques nous permettra de discuter de la pertinence de l'algorithme d'inversion dans l'hypothèse d'une future application satellitaire. Enfin, nous concluons sur les perspectives de développement des micro-ondes utilisées en complément des autres méthodes d'observation de notre planète.

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION EN HYPERFREQUENCES, MODELISATION DE L'EMISSION MICRO-ONDE

CHAPITRE 1

Intérêt de la télédétection en hyperfréquences

1.1 - Définition et importance de la télédétection

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plate forme aéroportées, spatiales, terrestres et maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet étudié. Sa définition officielle est "l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci" (COMITAS, 1988).

La télédétection moderne est née de la photographie aérienne, dont la vue générale et verticale a considérablement développé nos possibilités d'inventaire, de cartographie et de surveillance de l'environnement et des ressources depuis plus d'un siècle. Elle intègre les développements plus récent de la recherche spatiale, de la physique et de l'informatique pour constituer aujourd'hui un outil des plus puissants et des plus flexibles pour la gestion du milieu, la planification et le développement économique. Comme elle fait appel à des techniques en évolution rapide dans un monde en changement, ses possibilités d'applications sont en croissance constante et l'on découvre de plus en plus de domaines où elle peut avantageusement remplacer des méthodes traditionnelles d'investigation, longues, coûteuses et fastidieuses, ou encore intervenir comme un outil complémentaire qui améliore l'efficacité des méthodes conventionnelles éprouvées. Elle apporte aussi une information nouvelle, différente et qui présente l'avantage d'être localisable dans l'espace. En particulier, la télédétection est la principale source d'information pour les études de la transformation du globe dans le cadre des programmes internationaux de recherche sur les changements planétaires (climat, évolution du taux de CO₂, météorologie), et à ce titre, on peut considérer qu'elle intervient directement dans la conscience écologique de nos sociétés.

1.2 - Le développement de la télédétection micro-ondes

1.2.1 - Principe Actif, principe Passif

La télédétection dans le domaine des micro-ondes, ou hyperfréquences (1 à 100 GHz), peut être envisagée selon deux principes différents. On distingue habituellement le domaine "passif", appelé ainsi parce que l'on n'enregistre que l'émission naturelle des surfaces visées, du domaine "actif" où l'on "illumine" artificiellement la surface avec un radar pour interpréter le signal rétrodiffusé.

Dans les hyperfréquences passives, on étudie essentiellement des phénomènes d'émission dont les manifestations et la physique sous-jacente ressemblent beaucoup à ce que l'on observe dans le domaine de l'infrarouge thermique. Dans les hyperfréquences actives on étudie la rétrodiffusion du signal envoyé sur la cible à l'aide d'un radar (émetteur et récepteur), rétrodiffusion qui masque totalement l'émission naturelle de la surface. Les bases physiques inhérentes à la rétrodiffusion sont assez proches du domaine passif mais elles ne seront pas traitées dans ce rapport.

Néanmoins, dans les hyperfréquences passives, les variations d'émission sont beaucoup plus importantes que dans le domaine thermique. Elles interviennent à la première puissance sur la température de brillance, conformément à la loi de Rayleigh-Jeans présentée dans le paragraphe 2.1.2.2.1.

L'émission micro-onde des surfaces naturelles est aussi plus complexe que celle qui se produit dans le domaine thermique. L'émission micro-onde est fonction de la température et de l'émissivité. L'émissivité d'une surface dépend de la constante diélectrique du milieu ainsi que de la fréquence de l'onde et de l'angle de visée du radiomètre. Des contraintes matérielles d'instrumentation empêchent également de balayer le spectre d'une manière continue car il faut une antenne spécifique pour chaque bande de fréquence. Toutefois, le potentiel d'application de la radiométrie en hyperfréquences est très important pour l'humidité des sols, l'océanographie, l'étude de la neige et des glaces, ainsi que pour la végétation.

1.2.2 - L'apport possible des micro-ondes à l'étude de la phytosphère

Les micro-ondes passives ont été utilisées pour de nombreuses applications, mais principalement pour l'étude des océans, des glaces, et pour la caractérisation de l'atmosphère. Sur les surfaces terrestres, les études ont été beaucoup moins nombreuses, sans doute à cause de la résolution très grossière des capteurs qui correspondait mal à l'étude de la variabilité spatiale des paramètres de surfaces. De plus, la validité des informations collectées dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, et le domaine de l'infrarouge thermique, avec une meilleure résolution spatiale, ne justifiaient pas jusqu'alors l'emploi des micro-ondes qui n'ont longtemps servi qu'à estimer l'humidité de surface des sols, l'étude des végétaux restant "l'exclusivité" des petites longueurs d'ondes.

Cependant, les progrès techniques en cours permettent de reconsidérer ce point de vue. En effet, les hyperfréquences sont beaucoup moins affectées par les effets atmosphériques que les radiations de petites longueurs d'onde, simplifiant ainsi les corrections sur données satellitaires. En outre, les nouvelles générations de capteurs hyperfréquences satellitaires seront dotés de systèmes à résolution nettement plus fine que les capteurs déjà en place (développement des techniques

d'interférométrie entre autre, qui proposent un gain de résolution de facteur 10), et le développement de systèmes d'acquisition aéroportés n'est pas exclu.

De plus, les radiations micro-ondes présentent l'avantage d'être beaucoup plus passives vis à vis de la couverture nuageuse (surtout en basses fréquences). Elles sont moins affectées par la nébulosité qui, jusqu'à présent, était un frein à l'utilisation régulière des images satellitaires "conventionnelles" en zones tempérées (SPOT, LANDSAT, NOAA).

Enfin, il s'avère que les micro-ondes passives peuvent être d'un grand intérêt pour l'étude de la végétation dans la mesure où le signal capté est lié à la teneur en eau du couvert. Il peut également être corrélé aux paramètres de végétation comme la biomasse, le "Leaf Area Index" qui exprime le rapport de la surface foliaire d'interception totale du couvert par unité de surface au sol, les stress hydriques, et pourrait éventuellement permettre d'estimer la disponibilité en eau dans la zone de prélèvement racinaire. De nombreuses études ont été mises en oeuvre pour mesurer les paramètres de surface à partir de données satellitaires comme par exemple : l'estimation de la température de surface par analyses statistiques des données (Mac Farland et al., 1990), classification de divers types de culture (Wegmuller et al., 1993) ou de forêts (Hallikainen et al. 1988) à partir de leurs signatures micro-ondes. On peut également noter les nombreux travaux réalisés sur couverts agricoles, principalement en terme de biomasse et de teneur en eau (Pampaloni, 1992; Chukhlantsev, 1989; Wigneron, 1993).

Le rapport de polarisation (différence de polarisation normalisée) est un indice couramment utilisé pour suivre la densité de végétation, et il pourrait s'avérer intéressant pour compléter l'information apportée par l'indice de végétation normalisé (NDVI = rouge / proche infrarouge). En effet, ce dernier présente l'inconvénient de "saturer" pour des végétations à fort taux de recouvrement (LAI > 4 ou 5, taillis, forêts...) et ne permet pas de faire de distinction entre ces divers types de couverts "hauts". L'avantage des hyperfréquences est dû au fait que les micro-ondes sont des rayonnements "pénétrants" - (longueurs d'ondes pouvant atteindre 1 m) - qui permettent d'obtenir des informations sur la structure interne d'un couvert, contrairement aux petites longueurs d'ondes qui ne traduisent que des phénomènes de surface.

Les perspectives d'applications agronomiques et agricoles à grande échelle sont donc évidentes, et cela justifie l'intérêt croissant pour les mesures couplées dans les différents domaines de longueur d'ondes.

1.3 - Les radiomètres à bandes hyperfréquences

1.3.1 - Les instruments embarqués sur plates-formes satellitaires.

En ce qui concerne les capteurs radiométriques, d'importants développements ont vu le jour depuis les toutes dernières années. A la suite de SMMR embarqué sur Nimbus 7 et fonctionnel jusqu'en Octobre 1987, SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) - (19.3, 22.2, 37.0, 85.5 GHz) - fut lancé en Juin de la même année à bord du DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Son principal avantage tient dans les caractéristiques de son orbite circulaire et de l'angle de son faisceau qui lui permettent une couverture globale de la planète en 24 heures (Hollinger et al., 1990). Le sondeur micro-onde ATSR/M (23.8 et 36.5 GHz) fait partie de la charge d'observation de ERS-1 lancé en 1991 (Windsor and

Charlton, 1991). Il faut également noter l'actuelle mise au point du très prometteur MIMR (Multifrequency Imaging Microwave Radiometer) par l'Agence Spatiale Européenne (E.S.A.).

Ce radiomètre aura des caractéristiques similaires au SSM/I avec en outre une fréquence plus basse. Il doit être embarqué sur la plate-forme Polaire EOS (Earth Observing System) de la NASA, dont le lancement est prévu pour la fin de cette décennie (Kerr, 1991). Toujours dans le cadre du programme EOS, une excellente illustration outre-Atlantique du regain d'intérêt porté aux techniques micro-ondes passives, est le développement par la NOAA et la NASA, d'un système de radiométrie micro-onde multifréquence à haute résolution (HMMR), qui devrait permettre un suivi régulier du cycle hydrologique des continents, des caractéristiques de l'atmosphère et des océans.

1.3.2 - Radiomètres de terrain et aéroportés

Divers instruments aéroportés sont utilisés pour la caractérisation des surfaces continentales à une échelle plus locale. Leur rôle est fondamental car ils permettent d'illustrer les capacités et la sensibilité de la télédétection micro-onde appliquée à une haute résolution spatiale. Le PBMR (Pushbroom Microwave radiometer, 1.4 GHz) a pris part à diverses expériences (HAPEX-MOBILHY, FIFE...) concernant l'hydrologie et la détermination des flux de surface (Schmugge et al. 1991).

Le radiomètre PORTOS doublement polarisé, multifréquence (1.4, 5.05, 10.65, 23.8, 36.5 et 90 GHz), développé par le CNES - Centre National d'Etudes Spatiales - et MATRA-MARCONI, est conçu pour des expérimentations de terrain et aéroportées. Ses caractéristiques et ses performances liées à des avancées technologiques pour réduire l'encombrement des antennes et optimiser le contrôle thermique, en font un instrument d'investigation de premier ordre pour la communauté scientifique (cf. chapitre 4). Il a été mis à la disposition de l'INRA (stations de sciences du sol et de bioclimatologie - Montfavet) durant l'été 1991 où il a participé à des campagnes de mesure sur couvert de soja. Il a également pris part à la campagne HAPEX SAHEL 1992 en configuration aéroportée. Durant le printemps 1993, il a été de nouveau confié à l'INRA de Montfavet pour opérer sur couvert agricole de blé et sur sol nu (pour des mesures simultanées avec le radiomètre de terrain MARMOTTE, 4.30 GHz, développé conjointement par le LERTS - Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale, Toulouse - et le CHS - Centre Hyperfréquences & Semi-conducteurs, Lille). Il est également prévu une expérimentation sur le glacier du Mont-Blanc en Octobre 1993.

Il faut également signaler que de nombreux instruments européens, nord-américains ou russes sont à l'origine de travaux qui mettent en valeur l'intérêt de la radiométrie hyperfréquence sur couvert végétal (Brunfeldt et Ulaby (1986), Chukhlantsev et al.. (1989), Paloscia et Pampaloni (1992)).

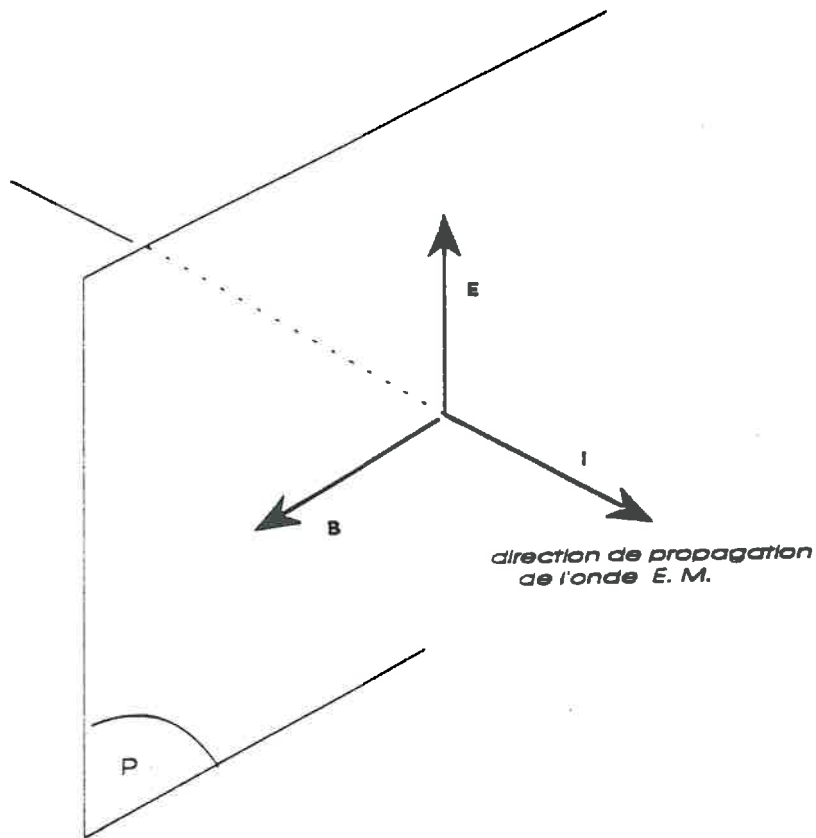


Figure 1.1 : Représentation graphique de la direction de propagation d'une onde électromagnétique définie par le plan contenant les vecteurs E et B

CHAPITRE 2

Définition et propriétés d'un rayonnement électromagnétique modélisation de la température de brillance

2.1 - Bases physiques : nature et propriété d'une onde électromagnétique

2.1.1 - Nature du rayonnement

L'énergie peut se transporter d'un point à un autre sous forme d'onde. Certaines ondes nécessitent pour se propager un milieu favorable (ondes sismiques), par contre, les rayonnements électromagnétiques (E.M.), comme la lumière, peuvent se transmettre dans le vide. Selon Maxwell, la radiation électromagnétique est une forme dynamique d'énergie qui ne se manifeste que dans son interaction avec la matière. La radiation électromagnétique se comporte donc comme un champ de forces dont les variations affectent les propriétés électriques et magnétiques de la matière. Après avoir décrit les caractéristiques générales de l'onde E.M., nous nous intéresserons aux interactions onde-milieu physique qui sont à l'origine de l'émission micro-onde à la surface de la terre. Cette interaction de l'onde avec la matière (végétaux, sol, eau...) fait intervenir différents processus physiques : diffusion, diffraction, absorption et réflexion.

2.1.1.1 - L'onde électromagnétique : définition de Maxwell

Une onde électromagnétique est représentée par deux vecteurs perpendiculaires associés, dont l'amplitude varie périodiquement avec le temps: **le champ électrique E** et **le champ magnétique B**. La direction de propagation de cette onde est perpendiculaire au plan défini par ces deux vecteurs (Fig. 1.1).

Les quatre équations de Maxwell, dont la description détaillée n'est pas précisée dans le cadre de ce rapport, décrivent le phénomène de propagation des ondes E.M.; elles font appel à deux paramètres principaux : la **permittivité ϵ** et la **perméabilité magnétique μ** du milieu dans laquelle l'onde se propage. La solution des équations de Maxwell, pour des conditions limites particulières, donne les intensités des champs électriques et magnétiques en tous points de l'espace. En fait, toute onde E.M. peut être décrite par sa **fonction d'onde** qui associe le temps et l'espace. Pour une onde plane, cette fonction peut s'exprimer par :

$$E = E_0 \cos(\omega.t - k.x + \phi)$$

où le sens de déplacement sera suivant x, et la vibration perpendiculaire à cet axe.

E_0	est l'amplitude (V)
ω	est la fréquence angulaire ou pulsation ($\omega = 2\pi.\nu$) où ν est la fréquence
k	est le nombre d'onde ($2\pi / \lambda$) avec λ la longueur d'onde
ϕ	est le déphasage
t	est le temps (s)

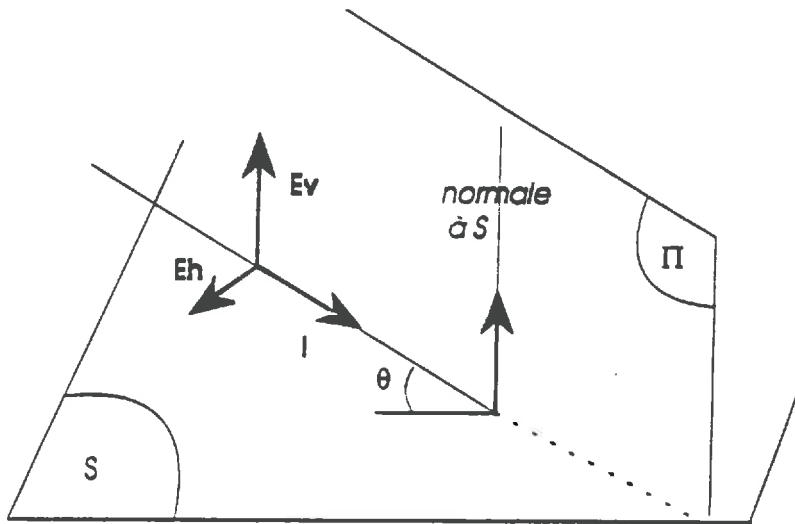


Figure 1.2 : Définition du plan d'incidence (π) d'une radiation électromagnétique incidente sur une surface plane (S).

2.1.1.2 - Polarisation d'une onde plane et lumière naturelle

La notion d'onde plane est fondamentale en électromagnétisme. En effet la plupart des concepts physiques sur la propagation des ondes E.M. sont formulés pour ces radiations dont la structure est très simple. De plus il est toujours possible de décomposer un problème radiatif complexe en somme de problèmes élémentaires faisant intervenir des ondes planes.

Une onde est dite plane lorsque le champ électrique E reste dans un même plan au cours de sa propagation. Le champ B , orthogonal à E , reste alors lui aussi dans ce même plan (P), dit **plan de polarisation**, qui est orthogonal à la direction de propagation de l'onde.

La notion de polarisation verticale ou horizontale découle de cette structure très particulière de l'onde plane. Cette notion est toujours relative à un **plan d'incidence**. Si l'on considère une onde plane se propageant dans la direction (i) et incidente sur une surface plane (S) de normale (n) (Fig. 1.2), le plan d'incidence (π) contient par définition les deux directions (n) et (i). Le champ E est toujours orthogonal à la direction d'incidence (car l'onde est plane). E peut donc être décomposé vectoriellement suivant deux directions privilégiées : la direction verticale (contenue dans le plan d'incidence), et la direction horizontale (perpendiculaire à ce même plan). L'onde plane peut alors s'écrire comme la somme de deux composantes :

$$E = E_{\perp} + E_{\parallel}$$

En ce qui nous concerne, la surface d'incidence (S) sera représentée par la surface terrestre : le sol et le couvert végétal.

La polarisation est essentielle dans les problèmes de réflexion et de diffusion d'ondes électromagnétiques. Ce phénomène est donc particulièrement important dans le domaine de la télédétection micro-onde, où le degré de polarisation du signal capté peut apporter des informations sur la nature de la surface observée.

Les radiations naturelles d'origine solaire sont non polarisées. Cependant, après interaction avec des surfaces planes naturelles (feuilles d'un couvert par exemple), l'onde peut devenir partiellement polarisée. En effet, l'eau, la cuticule des feuilles et les aérosols de l'atmosphère agissent comme des polariseurs sur le rayonnement solaire. Le caractère polarimétrique de l'onde est important à prendre en compte, car cet aspect, surtout étudié dans les domaines radar (Mead et McIntocsh, 1991; Tsang, 1991), le visible et le proche infrarouge (Rondeaux et Guyot, 1990), permet d'obtenir des informations complémentaires souvent reliées à la structure du milieu observé.

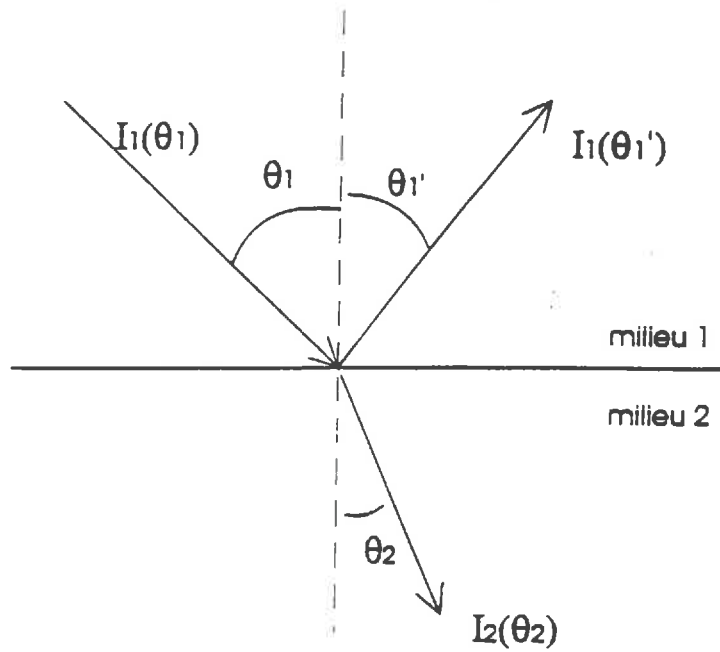


Figure 1.3 : représentation schématique de la loi de Snell-Descarte: réfraction ($I_2(\theta_2)$) et réflexion ($I_1(\theta_1')$) d'une onde plane ($I_1(\theta_1)$) incidente à l'interface de 2 milieux (1) et (2)

2.1.1.3 - Interface plane

Le cas particulier où l'onde entre au contact d'une interface plane est régit par des lois très générales qui décrivent l'interaction des éléments du couvert (feuilles, tiges...) avec les radiations hyperfréquences. Lorsqu'une discontinuité de la permittivité se produit à l'interface de deux milieux (1) et (2), l'onde subit des phénomènes de **réflexion** et de **réfraction**. Les deux **lois de Descartes** relient la direction des ondes planes réfléchi $i_1(\theta_1)$ et réfractée $i_2(\theta_2)$ à celle de l'onde incidente $i_1(\theta_1)$ pour une interface plane (Fig. 1.3).

$$\theta_1 = \theta_2$$

$$k_2 \sin \theta_2 = k_1 \sin \theta_1$$

Les **coefficients de Fresnel R_p et T_p** sont les rapports respectifs des champs réfléchis et transmis après interaction de l'onde sur le champ incident; p désignant la polarisation verticale (v) ou horizontale (h).

$$R_v = (n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2) / (n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2)$$

$$T_v = (2 n_1 \cos \theta_1) / (n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2)$$

et

$$R_h = (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2)$$

$$T_h = (2 n_1 \cos \theta_1) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2)$$

n_i étant l'indice de réfraction du milieu i .

Il découle de ces formulations que R_p et T_p s'expriment en fonction de l'angle d'incidence θ_1 et des permittivités des deux milieux contigus. La **réflectivité Γ** et la **transmittivité γ** caractérisent ces phénomènes en terme d'intensité. Ces paramètres sont couramment utilisés en transfert radiatif, où seule l'intensité de l'onde est prise en compte. Γ et γ sont définies en fonction des puissances incidente P_i , réfléchi P_r et transmise P_t . On peut également exprimer ces grandeurs en fonction des coefficients de Fresnel.

Ainsi on a :

$$\begin{aligned} \Gamma_{12p}(\theta_1) &= P_{rp}(\theta_2) / P_{ip}(\theta_1) = |R_{12p}(\theta_1)|^2 && \text{réflectivité} \\ \gamma_{12p}(\theta_1) &= P_{tp}(\theta_2) / P_{ip}(\theta_1) = |T_{12p}(\theta_1)|^2 && \text{transmittivité} \end{aligned}$$

Par ailleurs, Γ et γ sont liées par la relation simple fondée sur la conservation de l'énergie :

$$\Gamma_{12p}(\theta_1) = 1 - \gamma_{12p}(\theta_1)$$

2.1.1.4 - Absorption d'une onde électromagnétique

Conjointement aux processus de réflexion et de transmission qui se produisent au niveau d'une interface, l'absorption intervient lors de la propagation de l'onde dans un milieu. Ce phénomène d'absorption sous-entend une autre notion fondamentale en hyperfréquences passives : la notion de **profondeur effective d'émission** d'un milieu, qui sera largement utilisée dans la suite de ce rapport.

Il apparaît donc qu'en hyperfréquences, l'émission et l'absorption sont étroitement liées. Sans développer les formules découlant des postulats de Maxwell, on peut noter que la longueur d'absorption l_a , qui permet d'évaluer les pertes par absorption subies par le rayonnement, est la distance pour laquelle le champ électromagnétique subit une atténuation de l'ordre de 63%.

Formulée de façon mathématique on a :

$$l_a = \lambda_0 \cdot (\epsilon')^{1/2} / (\pi \cdot \epsilon'')$$

λ_0 longueur d'onde dans le vide ($\lambda_0 / (\epsilon_r)^{1/2} = \lambda$)
 ϵ' et ϵ'' parties réelle et imaginaire de la permittivité électrique relative du milieu ($\epsilon_r = \epsilon' + i \cdot \epsilon''$)

De façon générale on peut dire que l'atténuation de l'onde dans le couvert végétal sera d'autant plus intense (faible longueur d'absorption) que la fréquence et la partie imaginaire de la permittivité diélectrique du milieu seront élevées. On définit similairement la **profondeur de pénétration** δ_p lorsque l'atténuation porte sur l'intensité du champ électromagnétique ($\delta_p = l_a/2$). Notons toutefois que ces formulations, riches sur le plan théorique, sont peu utilisées car leur domaine de validité est restreint (milieu très homogène, à faible absorption et sans perte par conduction).

2.1.2 - Intensité du rayonnement électromagnétique

Après avoir brièvement présenté la nature physique et les principales caractéristiques d'une onde électromagnétique, nous allons maintenant nous intéresser aux paramètres qui permettent d'estimer l'intensité du rayonnement E.M. à travers les notions de diffusion et d'émission.

Cette notion d'intensité est primordiale en télédétection hyperfréquence puisque, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, la plupart des modèles de simulation micro-onde de couverts végétaux se basent sur les équations de bilan de transfert radiatif dans le couvert, où seule la notion d'intensité du rayonnement est prise en compte.

2.1.2.1 - Diffusion de l'onde électromagnétique dans un couvert végétal : Diffusion volumique

L'existence de particules microscopiques dans un milieu de transmission (eau, air, tissu végétal...), provoque des phénomènes de diffusion multidirectionnels d'une partie de l'énergie émise par la source. La diffusion se traduit par une dispersion du rayonnement dans toutes les directions et par une atténuation, ou extinction, de celui-ci dans la direction de propagation.

De plus, lorsque le milieu rencontré par l'onde incidente n'est pas homogène ou est un mélange de matériaux aux propriétés diélectriques diverses, une partie de l'onde transmise dans ce milieu sera diffusée par ces diverses composantes.

La diffusion résultante viendra alors de l'intérieur du volume de ce milieu et sera appelée **diffusion volumique**, ce qui est le cas des surfaces à couvert végétal et forestier.

2.1.2.2 - Emissivité : Loi de Planck

Tout corps émet une radiation thermique, fonction de sa température physique T , qui couvre un très large spectre en fréquence. Planck; en se fondant sur des résultats de la mécanique quantique, calcule cette émission pour un **corps noir**, c'est à dire un corps idéal qui absorbe toutes les ondes incidentes sur sa surface et n'en réfléchit aucune. L'émission du corps noir dans sa bande de fréquence df est paramétrisée par sa luminance spectrale L_f ($W/m^2.sr.Hz$). Elle est fonction de sa température T et de la fréquence f de l'onde émise selon la **loi de Planck** :

$$L_f = \frac{2hf^3}{c^2} \cdot (\exp(hf/kT) - 1)^{-1}$$

avec h : constante de Planck ($6.63 \cdot 10^{-34} J$)
 k : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$)
 f : fréquence de l'onde émise
 c : célérité de la lumière ($3 \cdot 10^8 m/s$)
 T : température du corps noir considéré (K)

2.1.2.2.1 - Lois particulières dans le domaine des hyperfréquences : Simplification de Rayleigh-Jeans

Dans le domaine des hyperfréquences, les énergies émises par les surfaces naturelles sont très faibles en comparaison de celles que l'on peut observer dans le domaine thermique. Bien que les phénomènes physiques sous-jacents à la télédétection dans ces deux domaines soient similaires, car ils s'appuient essentiellement sur les températures et l'émissivité des corps, on peut réaliser une simplification de la formule générale de Planck quand la fréquence est inférieure à 100 GHz (gamme de réception de Portos).

Cette simplification, appelée **loi de Rayleigh-Jeans**, n'est valable que dans le domaine des hyperfréquences et des ondes radio; elle exprime la relation linéaire entre la température (à la première puissance) et l'énergie émise par un corps noir à ces fréquences:

$$L_{\lambda} = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

avec L_{λ} : luminance spectrale hyperfréquences du corps noir ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)

k : constante de Boltzmann ($5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

λ : longueur d'onde d'émission (m)

La **température de brillance** T_B permet, comme la luminance spectrale L , d'exprimer l'émission micro-onde d'un corps dans une bande de fréquence donnée. T_B est définie simplement selon :

$$T_B = L / (2k.\lambda^2) \quad \text{donc pour un corps noir } T_{Bn} = T$$

La notion de température de brillance fournit un ordre de grandeur de l'émission beaucoup plus concret : le niveau d'émission d'un corps quelconque peut donc aisément être comparé à celui d'un corps noir de même température. Ainsi on peut introduire la notion d'émissivité qui, pour un corps de température T s'écrira :

$$T_B = e . T$$

L'émissivité d'un corps est donc définie comme le rapport de sa température de brillance T_B sur la température de brillance T_{Bn} d'un corps noir ayant la même température T ($T_{Bn} = T$).

2.1.2.2.2 - Emission micro-onde de la végétation

De façon générale, on peut dire que l'émissivité micro-onde d'un couvert végétal est une fonction de l'émissivité du sol, de la transmittance et de la réflectance de la végétation. Ces deux derniers paramètres dépendent eux même de la biomasse, de l'humidité relative et de la structure géométrique de la plante, de la longueur d'onde et de sa polarisation, ainsi que de l'angle de visée du capteur. En terme de contraste, l'émissivité d'un couvert est beaucoup plus forte que celle du sol humide qui se trouve en dessous. Si l'on raisonne en tenant compte du signal globalement perçu, on constate que la présence d'une couverture végétale augmente l'émissivité en hyperfréquence du sol en lui donnant une émission se rapprochant de celle d'un sol plus sec (Wang, 1981). Toute l'efficacité des modèles de simulation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal repose sur la capacité à différencier la contribution du sol de celle de la végétation (grâce à la théorie des fortes fluctuations qui permet de décrire le contraste d'émissivité sol-air-végétation), ce qui permettra de déconvoluer le signal globalement mesuré par le radiomètre et d'estimer les différents paramètres de surface.

Les bases physiques de la radiométrie micro-onde étant maintenant acquises, il nous appartient à présent d'étudier quelles sont les différentes approches théoriques de la modélisation de la température de brillance permettant de simuler l'émission micro-onde d'un couvert végétal. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine, et les paragraphes suivants relatent les différentes approches théoriques basées sur les équations de transfert radiatif au sein d'un couvert. Nous discuterons alors de la validité des différents modèles face aux nécessités imposées par l'algorithme d'inversion utilisé pour l'estimation des paramètres de surface, qui fera l'objet de la troisième partie de ce rapport.

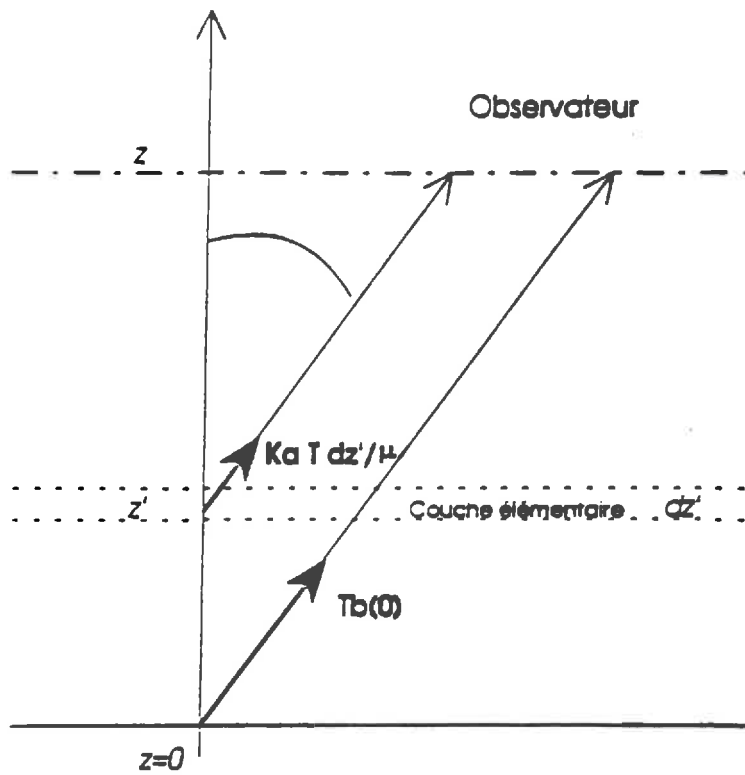


Figure 1.4 : le transfert radiatif simplifié: configuration géométrique du problème de l'émission

2.2 - Modélisation de la température de brillance : le modèle simplifié

Les travaux menés en hyperfréquences depuis les vingt dernières années, permettent de distinguer deux types d'approches de la modélisation de l'émission d'un couvert : les approches semi-empiriques fondées sur les équations simplifiées du transfert radiatif, et les approches physiques. La première est plus facile à relier à la mesure micro-onde, ce qui facilite son utilisation. Cependant elle reste purement "explicative" car elle est ajustée par des paramètres synthétiques décrivant l'absorption et la diffusion dans le couvert qui varient en fonction du type de couvert et du stade de développement de la culture. La portée du modèle simplifié reste donc assez réduite bien que simple à mettre en oeuvre, et nous ne l'utiliserons pas dans cette étude. Néanmoins, il me paraît utile de le présenter car il est d'un intérêt certain pour la compréhension des modèles physiques plus complexes, décrits dans les paragraphes suivants.

2.2.1 - Equation simplifiée de transfert radiatif

2.2.1.1 - Les composantes du transfert radiatif au sein d'un couvert

Dans le cadre de la modélisation par le transfert radiatif, le milieu physique est le plus souvent considéré comme homogène, plan et infiniment étendu, pour permettre une résolution numérique des équations de bilan radiatif. Le couvert est représenté par une ou plusieurs strates de végétation (feuilles vertes, feuilles fanées, épis...), délimitées au sommet par une interface végétation-atmosphère et à la base par une interface sol-végétation.

Les équations de transfert radiatif, qui sont décrites ici, représentent un bilan de l'énergie radiative dans un élément de volume infinitésimal où l'on prend en compte les effets d'absorption et de diffusion. Considérons la radiation d'intensité I se propageant dans le couvert végétal avec un angle d'incidence θ (et $\mu = \cos\theta$). Le sol et l'atmosphère délimitent la végétation aux cotes $z=0$ et $z=d$ (Fig. 1.4). Ces équations de transfert radiatif s'écrivent le plus généralement :

$$\mu \cdot dI_v(\mu, z) / dz = K_a CT(z) - K_{ev}(\mu) \cdot I_v(\mu, z) + \int_{-1}^1 ((v, v') \cdot I_v(\mu', z) + (v, h') \cdot I_h(\mu', z)) d\mu'$$

$$\mu \cdot dI_h(\mu, z) / dz = K_a CT(z) - K_{eh}(\mu) \cdot I_h(\mu, z) + \int_{-1}^1 ((h, v') \cdot I_v(\mu', z) + (h, h') \cdot I_h(\mu', z)) d\mu'$$

Elles se décomposent le plus généralement comme la somme de trois termes indépendants qui sont :

- la **fonction source d'absorption**, qui est le terme d'émission propre du milieu dans lequel se propage l'onde électromagnétique :

$$K_a \cdot C \cdot T \quad \text{avec } T \text{ température physique du milieu}$$

$$K_a \text{ coefficient d'absorption (Np/m}^2\text{)}$$

$$C = 2 \cdot K_0 / \lambda^2$$

- le **terme d'extinction**, qui représente la perte d'énergie à travers les phénomènes d'absorption et de diffusion (propre à chaque polarisation).

$$K_{ep} \cdot I_p \quad \text{avec } p = v, h$$

Ke coefficient d'extinction (Np/m²)

- le **terme de source par diffusion**, qui désigne la fraction de l'onde incidente de direction et de polarisation (cosθ' , q) quelconque, qui sera diffusée dans la direction incidente captée avec la polarisation choisie (cosθ , p) :

$$\int_{-1}^1 ((p, p') \cdot I_p(\mu', z) + (p, q') \cdot I_q(\mu', z)) d\mu'$$

La matrice des termes de couplage (p, q'), (avec p, q = v, h), est appelée **matrice de phase P**.

D'autre part, on peut définir deux termes caractéristiques du milieu végétal en fonction des trois coefficients de transferts radiatifs : coefficient d'extinction Ke, d'absorption Ka, et de diffusion Ks, définis par :

$$K_e = K_a + K_s \quad (\text{en Np/m}^2)$$

- l'**albédo de simple diffusion** ω, qui quantifie l'importance de la diffusion par rapport à l'absorption dans le milieu.

$$\omega = K_s / K_e$$

- l'**épaisseur optique du milieu** τ, produit du trajet vertical d'une onde E.M. dans un couvert de hauteur d.

$$\tau = K_e \cdot d$$

2.2.1.2 - Simplification du bilan radiatif

Le modèle de transfert radiatif dit "simplifié", consiste à négliger le terme de source par diffusion, donc par conséquent la matrice de phase. Ceci conduit à une expression analytique simple de l'émission d'un couvert, qui garde la même forme pour les deux polarisations (h) et (v).

En terme de température de brillance, on obtient l'équation suivante :

$$\cos\theta \cdot dT_B/dz = K_a \cdot T - K_e \cdot T_B \quad \text{avec } z \text{ hauteur du couvert végétal}$$

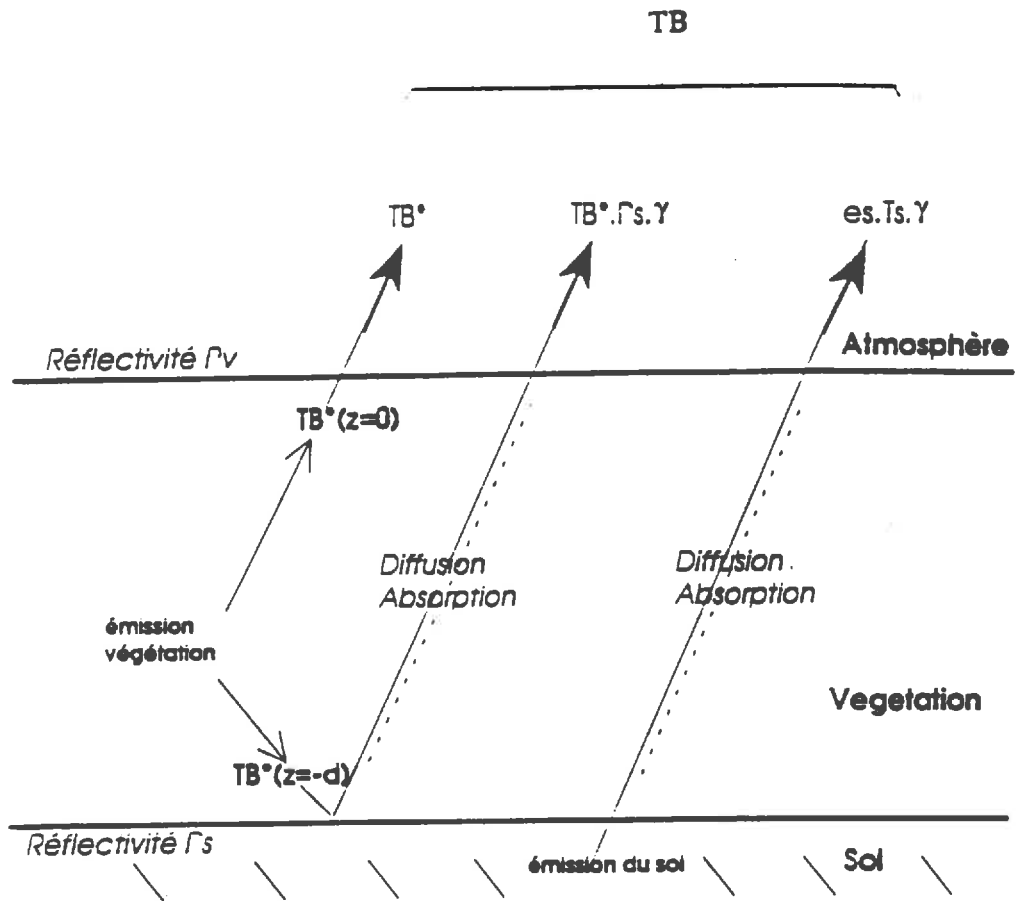


Figure 1.5 : principales contributions à l'émission globale du couvert

Après intégration sur la hauteur du couvert, et en supposant K_a , K_e , K_s , et T constants, on obtient une équation qui se présente comme la somme de deux termes qui sont :

$$T_B(z) = T_B(0) \cdot \exp(-z \cdot K_e / \mu) + \int_0^z (K_a \cdot T \cdot dz' / \mu) \cdot \exp(-(z - z') \cdot K_e / \mu)$$

- la température de brillance à la côte $z=0$, atténuée le long du trajet dans le couvert par un facteur d'extinction $\exp(-z \cdot K_e / \cos\theta)$.

- l'émission de chaque couche d'épaisseur dz atténuée par un facteur d'extinction agissant entre la couche considérée et l'observateur situé à la hauteur z .

Après intégration entre les bornes "0" et "z" on obtient l'équation de base du transfert radiatif simplifié, soit :

$$T_B(z) = T_B(0) \cdot \gamma + (1-\omega) \cdot (1-\gamma) \cdot T$$

avec $1-\omega = K_a / K_e$

$\gamma = \exp(-z \cdot K_e / \cos\theta)$ facteur d'atténuation par la végétation

2.2.2 - Modélisation de la température de brillance : modèle simplifié

A partir de l'équation de transfert radiatif simplifiée qui vient d'être décrite, nous pouvons exprimer simplement l'émission d'un couvert. Considérons une strate de végétation de température T_v et d'épaisseur d , reposant sur un sol de température T_s (l'influence des émissions atmosphériques et cosmiques étant négligées). On peut définir trois émissions distinctes qui contribuent à l'émission globale du couvert (Fig. 1.5):

- l'émission directe de la végétation
- l'émission de la végétation réfléchiée par le sol et atténuée par le couvert
- l'émission du sol, atténuée par le couvert

Nous désignerons par Γ_v et Γ_s les réflectivités respectives entre l'air et le couvert, et entre le couvert et le sol. Or, en première approximation l'indice de réfraction moyen de la strate de végétation est très proche de celui de l'air, aussi on ne tiendra compte que de la réflectivité couvert-sol.

On peut ainsi définir l'équation simplifiée de l'émission d'un couvert pour une polarisation donnée ($p = v, h$).

$$T_{Bp} = (1-\omega)(1-\gamma)(1+\Gamma_{sp} \cdot \gamma) \cdot T_v + (1-\Gamma_{sp}) \cdot \gamma \cdot T_s$$

2.3 - Modélisation de la température de brillance : les modèles physiques

Les modèles physiques de simulation intègrent une description précise du couvert végétal pour prendre en compte aussi fidèlement que possible l'interaction de l'onde E.M. avec le milieu (diffusion de volume, absorption, émission, processus d'interface entre les différentes strates...). La portée de ces modèles est vaste; cependant, ils ont surtout été développés en hyperfréquences actives, et peu de références font actuellement état de la validation avec les données radiométriques micro-ondes. C'est également un des objectifs de cette étude.

On distingue deux types de modèles physiques : le **modèle discret** et le **modèle continu**, ce dernier étant celui utilisé pour les simulations de T_B dans l'étude qui nous intéresse. Ces deux modèles prennent en compte la structure diélectrique d'un couvert, structure qui détermine l'ensemble des processus de diffusion et d'absorption. La différence entre ces deux approches porte sur la modélisation du couvert végétal, qui est déterminante dans le calcul des matrices de phases et des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction au sein de la culture.

2.3.1 - Le modèle discret

Sa fonction principale est d'estimer une température de brillance à partir d'une description géométrique très détaillée du couvert. Son rôle est de mieux comprendre l'ensemble des phénomènes de transferts radiatifs au sein de la végétation, mais sa complexité et le nombre de paramètres traités rendent délicat, voir impossible, son inversion. Il possède néanmoins une fonction "explicative" très importante pour la compréhension de l'ensemble des phénomènes radiatifs.

2.3.1.1 - Principe général

L'approche discrète prend en compte la contribution à la diffusion des différents diffuseurs discrets du milieu, comme les feuilles, les tiges et les épis du blé, par exemple.

Cette approche impose donc une caractérisation précise de chacun des éléments du couvert en terme de forme, de dimension, d'orientation (distribution de densité de probabilité d'orientation des feuilles), et de permittivité diélectrique. De plus, les équations physiques de la diffusion de volume se résolvent analytiquement pour des éléments géométriques à forme simple : sphère, disques, ellipsoïdes, cylindres... Il faudra donc "transformer" chaque élément du couvert en approximations géométriques simplifiées (ellipses, cylindres), basées sur des dimensions moyennes, caractéristiques de la structure physiologique de la culture.

D'autre part, la méthode de résolution du transfert radiatif impose une structure en strates homogènes, aux interfaces horizontales et infiniment étendues. L'architecture du modèle discret en découle tout naturellement : des cercles disposés en "chapelets" pour simuler les feuilles et des cylindres (pleins) pour simuler les tiges. Ces éléments se distribuent aléatoirement dans des strates superposées où ils ont des distributions de taille, d'orientation et de densité bien définies.

REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SIGNIFICATION PHYSIQUE DU TENSEUR DE DIFFUSION D'AMPLITUDE

Cas d'une partie élémentaire du feuillage

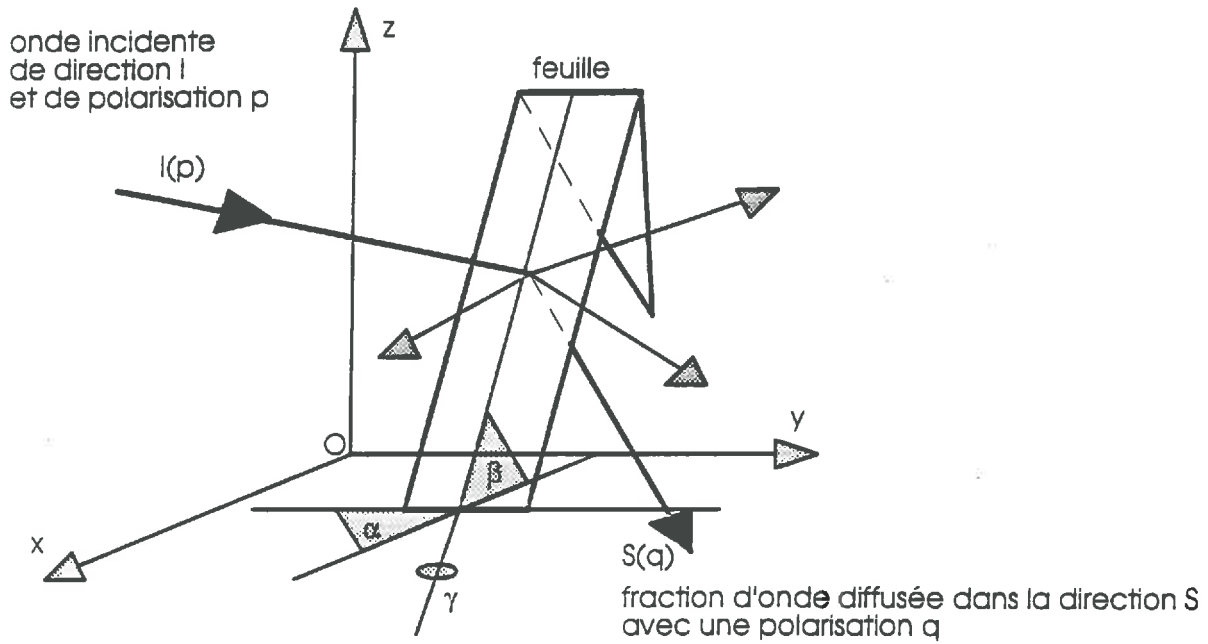


Figure 1.6 : configuration géométrique de l'approche théorique de la diffusion de volume dans les modèles physiques de simulation de température de brillance.

2.3.1.2 - Les coefficients d'échanges radiatifs et la matrice de phase

L'expression des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase découle directement de l'expression du **tenseur de diffusion d'amplitude F_{pq}** , qui correspond à la fraction d'onde diffusée dans la direction (s) avec une polarisation q (Fig. 1.6).

Pour l'ellipsoïde foliaire, les composantes (p,q') de la **matrice de phase** peuvent s'écrire :

$$(p, q') = n_0 \langle | F_{pq}(s, i) |^2 \rangle_{\alpha\beta\gamma}$$

où n_0 est le nombre de feuille par unité de volume
 $\langle \rangle_{\alpha\beta\gamma}$ désigne le moyennage sur les angles d'Euler d'orientation de la feuille dans l'espace.

Ces composantes peuvent aussi s'exprimer en fonction de la distribution densité de probabilité d'orientation des feuilles $P_d(\alpha, \beta, \gamma)$, (plus couramment mesurée), selon :

$$(p, q') = n_0 \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma |F_{pq}(s, i)|^2 P_d(\alpha, \beta, \gamma)$$

Le **coefficient de diffusion K_{sp}** ($p = v, h$) est déduit de l'expression des composantes de la matrice de phase :

$$K_{sp}(i) = \int_0^{\pi} \sin \theta_s \cdot d\theta_s \int_0^{2\pi} d\Phi_s [(v, p') + (h, p')]$$

avec θ_s et Φ_s , l'inclinaison et l'azimut de la direction de diffusion

Similairement, le **coefficient d'absorption K_{ap}** ($p = v, h$) est calculé à partir du théorème optique en hautes fréquences :

$$K_{ap}(i) = 4\pi / k \cdot \text{Im} \{ \langle F_{pp}(i, i) \rangle_{\alpha, \beta, \gamma} \}$$

où k désigne le nombre d'onde de la radiation ($k = 2\pi / \lambda$)
 et $\text{Im}\{ \}$ désigne la partie imaginaire du tenseur d'absorption

Le coefficient d'extinction est obtenu en sommant K_s et K_a :

$$K_{ep} = K_{ap} + K_{sp} \quad \text{avec } p = v, h$$

Ces formulations des composantes de la matrice de phase et des coefficients d'échanges radiatifs, présentés ici pour les ellipses foliaires, peuvent être généralisées à l'étude des tiges de blé, sachant que c'est la nature des tenseurs de diffusion d'amplitude $F_{pq}(ij)$ qui variera pour des éléments cylindriques verticaux.

2.3.2 - Le modèle continu

C'est le modèle de simulation que nous utiliserons pour l'inversion des données radiométriques car, contrairement au modèle discret, il est paramétré par quatre variables d'entrée seulement, ce qui permet d'inverser rapidement les températures de brillance mesurées, et de les convertir en paramètres de végétation (par des routines d'optimisation qui seront présentées dans la troisième partie de ce rapport).

2.3.2.1 - Principe général

Dans l'approche continue, la végétation est caractérisée par les fluctuations aléatoires dans l'espace de sa permittivité diélectrique ϵ (par la fonction d'autocorrélation de la permittivité R_ϵ). La modélisation continue du milieu ne nécessite qu'une description très simple de la structure du couvert. Sur ce plan, les termes de fraction volumique de la végétation (%), de hauteur de strate et les deux longueurs de corrélation (l_z et l_p) suffisent pour caractériser la structure du milieu.

2.3.2.2 - Coefficients d'échanges radiatifs et matrice de phase

La permittivité diélectrique d'un milieu ϵ se décompose dans l'espace selon une composante moyenne ϵ_m et une composante aléatoire ϵ_f de moyenne nulle.

$$\epsilon(r) = \epsilon_m + \epsilon_f(r)$$

$$\text{avec } \epsilon_m = \epsilon'{}_m + i\epsilon''{}_m \quad (\text{avec } \epsilon''{}_m \ll \epsilon'{}_m)$$

où (r) désigne le vecteur position dans l'espace

Toute l'information sur l'organisation spatiale et la permittivité des diffuseurs, qui détermine la "structure diélectrique" du couvert est paramétrisée par les deux longueurs de corrélation de permittivité, l_z et l_p , et par un terme de variance δ .

La fonction de corrélation R_ϵ de la permittivité peut être modélisée selon diverses formulations dont la plus courante est suivant une loi de Gauss dans le plan horizontal, et exponentielle dans la direction verticale, tel que :

$$R_\epsilon(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \delta \cdot \epsilon'{}_m \cdot \exp(-[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] / l_p^2 - |z_1 - z_2| / l_z)$$

avec x_i, y_i, z_i les coordonnées des vecteurs (r_i) dans l'espace

Le calcul des composantes de la matrice de phase d'un couvert végétal dans le cadre de la théorie des fortes fluctuations, qui permet de modéliser les milieux à forts contrastes diélectriques tels que les couverts végétaux (importante variation de permittivité entre le végétal et l'air ambiant), peut s'exprimer en fonction de trois termes de variances particuliers, notés δ_{11} δ_{13} δ_{33} , selon :

$$(v, v') = Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} \left\{ \left[\delta_{33} \sin^2 \theta \sin^2 \theta' + 1/2 \cdot \delta_{11} \cos^2 \theta \cos^2 \theta' \right] \cdot I_0(w) + 2\delta_{13} \sin \theta \cdot \sin \theta' \cdot \cos \theta \cdot \cos \theta' \cdot I_1(w) + 1/2 \cdot \delta_{11} \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \theta' \cdot I_2(w) \right\}$$

$$(v, h') = \delta_{11} Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} \cdot \cos^2 \theta [I_0(w) - I_2(w)] / 2$$

$$(h, v') = \delta_{11} Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} \cdot \cos^2 \theta' [I_0(w) - I_2(w)] / 2$$

$$(h, h') = \delta_{11} Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} [I_0(w) + I_2(w)] / 2$$

avec

$$Q(\theta, \theta') = K_1^4 \cdot l_p^2 / 4 \cdot \left[l_z / \left(1 + K_1^2 \cdot l_z^2 (\cos \theta - \cos \theta')^2 \right) \right] \cdot \exp \left[-K_1^2 \cdot l_p^2 / 4 \cdot (\sin \theta - \sin \theta')^2 \right]$$

$$w = K_1^2 \cdot l_p^2 / 2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \theta'$$

où θ et θ' sont les angles des directions incidente et diffusée

K_1 est le nombre d'onde au sein du couvert

$I_0(w)$ $I_1(w)$ $I_2(w)$ sont les fonction de Bessel modifiées d'ordre 0, 1 et 2

Le **coefficient de diffusion K_{sp}** ($p = v, h$) se déduit des composantes de la matrice de phase, comme pour l'approche discrète, selon la formule :

$$K_{sp} = \int_0^\pi d\theta_s \cdot \sin \theta_s [(v, p') + (h, p')]$$

où θ_s représente l'angle de la direction de diffusion

Le **coefficient d'absorption K_a** s'exprime généralement en fonction de la permittivité diélectrique moyenne du couvert végétal :

$$K_a = 2K_0 \operatorname{Im} \left\{ (\epsilon_m / \epsilon_0)^{1/2} \right\}$$

où $\operatorname{Im}\{ \}$ désigne la partie imaginaire du rapport des permittivité

K_0 est le nombre d'onde dans le vide

Toutefois, cette expression de K_a est peu précise. En effet on constate que, contrairement aux autres paramètres calculés dans l'approche continue, l'expression de K_a est indépendante des longueurs de corrélation (l_z et l_p), de la polarisation de l'onde et de l'angle d'incidence de la radiation. Cette paramétrisation du coefficient d'absorption paraît donc très sommaire, et dans la mesure du possible nous utiliserons le K_a estimé par l'approche discrète pour simuler les pertes par absorption.

2.3.2.3 - Calcul de la température de brillance du couvert

2.3.2.3.1 - Expression de la température de brillance par le transfert radiatif

Cette température est calculée par la résolution des équations de transfert radiatifs au sein du couvert. La méthode de résolution de ces équations est équivalente pour les deux modèles présentés, mais j'introduit volontairement ce paragraphe dans l'approche continue pour assurer une meilleure cohérence avec la suite de l'étude.

Au sein du couvert végétal, les équations de transfert radiatif peuvent s'exprimer en terme de température de brillance pour une radiation d'intensité T , se propageant dans la direction θ (cf. paragraphe 2.2.1.1.).

$$\mu \cdot dT_v(\theta, z) / dz = Ka \cdot T_1(z) - Ke_v(\theta) \cdot T_v(\theta, z) + \int_{-1}^1 ((v, v') \cdot T_v(\theta', z) + (v, h') \cdot T_h(\theta', z)) d\mu'$$

$$-\mu \cdot dT_v(\pi - \theta, z) / dz = Ka \cdot T_1(z) - Ke_v(\pi - \theta) \cdot T_v(\pi - \theta, z) + \int_{-1}^1 ((v(\pi - \theta), v') \cdot T_v(\theta', z) + (v(\pi - \theta), h') \cdot T_h(\theta', z)) d\mu'$$

où $\theta = \cos^{-1}(\mu)$ et $\theta' = \cos^{-1}(\mu')$

les indices v et h se réfèrent aux polarisations

Ka et Ke sont les coefficients d'absorption et d'extinction du milieu

(v, v') et (v, h') sont les termes de couplage de la matrice de phase (en polarisation verticale)

T_1 intensité de la radiation dans le couvert (exprimé en K)

T_p ($p = v, h$) intensité de la radiation polarisée (K)

Rq : ces équations décrites pour une onde à polarisation verticale seraient identiques pour la polarisation horizontale.

2.3.2.3.2 - Solution particulière du transfert radiatif

La solution générale de ce système d'équation s'obtient en sommant les solutions du système d'équations homogènes (obtenues par la méthode de quadrature de Gauss) avec une solution particulière déterminée simplement en considérant un profil de température linéaire $T_1(z)$ au sein de la végétation.

$$T_1(z) = T_1^0 + (z + d) \cdot \Gamma_1$$

où T_1^0 est la température de végétation au niveau du sol

Γ_1 est le gradient de température dans le couvert

Dans ces conditions, une solution particulière (T_{a0} , T_{s0}) du système d'équation de transfert radiatif peut s'écrire :

$$T_{a0} = 2[T_1^0 + \Gamma_1 \cdot (z + d)]$$

$$T_{s0} = -2\Gamma_1[\mu / Ka]$$

2.3.2.3.3 - Conditions aux interfaces sol-végétation et végétation-air

A l'**interface sol-végétation**, la radiation $T_p(\theta_1)$ se propageant vers le haut dans le couvert s'écrit comme la somme de la radiation descendante $T_p(\pi - \theta_1)$ réfléchiée par le sol et de la radiation émise par le sol.

A l'**interface végétation-atmosphère**, la radiation descendante $T_p(\pi - \theta_1)$ s'écrit comme la somme de la radiation montante $T_p(\theta_1)$ réfléchiée à l'interface et l'émission atmosphérique descendante et transmise à l'interface.

Les phénomènes de réfraction et de transmission seront modélisés selon l'approche de Fresnel (interfaces planes).

Les conditions aux limites s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \text{pour } z = 0 & \quad T_p(\pi - \theta_1) = (1 - r_{10p}) \cdot T_{sky}(\theta_0) + r_{10p} \cdot T_p(\theta_1) \\ \text{pour } z = -d & \quad T_p(\theta_1) = r_{12p} \cdot T_p(\pi - \theta_1) + (1 - r_{12p}) \cdot T_2 \end{aligned}$$

où $T_{sky}(\theta_0)$ est la température de brillance atmosphérique descendante
 r_{mn} ($m, n = 0, 1, 2$) désigne la réflectivité de Fresnel à l'interface entre les milieux m et n

C'est en substituant ces conditions aux limites dans le système global des équations de transfert radiatif que nous obtenons l'expression de la température de brillance au sommet du couvert, où chaque valeur du vecteur T_B correspond à un angle d'incidence donné, et ce pour chaque polarisation. Ces expressions sont les simulations de températures de brillance recherchées, et elles peuvent aisément être comparées aux mesures radiométriques de PORTOS seront également formulées en terme de température de brillance $T_{Bp}(\theta)$.

2.3.3 - Les données d'entrée des modèles physiques de simulation

2.3.3.1 - Les paramètres d'entrée communs aux deux modèles

Les paramètres d'entrée communs aux deux modèles sont ceux utilisés pour la résolution des équations de transfert radiatif. Mis à part la fréquence de la radiation qui est déterminée par les caractéristiques du radiomètre, ces paramètres peuvent se regrouper en trois grandes classes : les paramètres de végétation, de sol et ceux relatifs à l'atmosphère.

Les paramètres de végétation regroupent les données de structure (fraction volumique de la végétation fracv (m^3/m^3), hauteur du couvert végétal d (m)), et des paramètres relatifs au calcul de la permittivité diélectrique du couvert (teneur en eau gravimétrique du couvert végétal Mg (Kg/Kg), densité de matière sèche du couvert (ρ_{ms} g/cm^3)).

De la même façon les paramètres de sol tiennent compte de l'état de surface (réflectivité de Fresnel modifiée qui est une fonction des paramètres de rugosité hr et Q), et des paramètres nécessaires au calcul de la permittivité diélectrique du couvert (teneur en eau volumétrique, masse volumique de matière sèche, fraction en sable et argiles).

Enfin, les paramètres atmosphériques décrivent les profils de température de pression et de teneur en eau de l'atmosphère (pression de vapeur d'eau).

2.3.3.2 - Les paramètres d'entrée propres au modèle discret

Comme nous l'avons vu précédemment, les paramètres spécifiques du modèle discret doivent permettre la description précise de la structure géométrique du couvert végétal. Il s'agit des dimensions équivalentes de chaque élément du couvert transformé en forme géométrique simple. Dans le cas de notre étude sur le blé, les feuilles sont assimilées à des "chapelets" de cercles et les tiges à des cylindres pleins. On estimera également la fonction de distribution de densité de probabilité d'orientation des feuilles et des tiges en termes d'inclinaison, indispensable au calcul des coefficients d'échanges radiatifs au sein du couvert.

2.3.3.3 - Les paramètres d'entrée propres au modèle continu

Outre la fraction volumique de la végétation, qui ne peut d'ailleurs être estimée qu'à partir des mesures préalables de dimension des diffuseurs utilisées dans le modèle discret, le modèle continu nécessite principalement deux paramètres statistiques de description de la structure diélectrique du couvert : les longueurs de corrélation de permittivité verticale et horizontale (l_z et l_p). Ces paramètres n'étant pas mesurables directement il est d'abord nécessaire de les estimer par une inversion préliminaire sur une courte période où tous les paramètres de végétation sont parfaitement définis et stables, puis de les transposer dans le modèle continu.

DEUXIEME PARTIE : EXPERIMENTATION "PORTOS 1993"

METHODOLOGIE, MESURE DES PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

Cette deuxième partie présente l'organisation et le protocole expérimental de la manipulation "PORTOS 1993". Etant donné l'envergure de cette expérience, en terme de moyens matériels et d'investigations scientifiques, la réussite de ce projet doit être attribuée à l'ensemble de l'équipe ayant participé à la manipulation. Celle-ci se composait de techniciens et de chercheurs de la station de Bioclimatologie et de Sciences du sol de l'INRA, d'ingénieurs du CNES, d'un ingénieur de météo-France, de trois étudiants en thèse et de deux élèves ingénieurs de l'ESITPA. Pour ma part, j'ai été chargé du suivi et de la caractérisation structurelle du blé ainsi que des mesures d'humidité de surface sous le couvert. Le protocole décrit dans cette partie sera donc borné à l'étude du blé, et les aspects "sol nu" et "culture de sorgho", qui ont été menés simultanément pendant la manipulation, ne seront pas abordés dans le cadre de ce rapport.

L'acquisition et la mise en forme des données biologiques a duré quatre mois, à l'issue desquels j'ai pu présenter une base de données substantielle concernant l'évolution globale d'un couvert de blé, et d'une façon plus détaillée celle des différents organes végétaux au cours du temps, en terme de densité de forme, de dimension et d'orientation. Ces données ont ensuite été utilisées par J.P. Wigneron pour estimer les coefficients d'échanges radiatifs par le modèle discret, coefficients qui seront utilisés par la suite pour affiner le modèle continu, et caler les simulations aux mesures radiométriques.

CHAPITRE 3

PRESENTATION GENERALE : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

3.1 - Objectif général de l'expérimentation

L'expérimentation menée à l'INRA de Montfavet au cours du printemps 1993 s'inscrit dans le cadre général des études portant sur la télédétection hyperfréquence des surfaces continentales. L'objectif final est de parvenir à modéliser le système sol-végétation-atmosphère dans son ensemble, et plus particulièrement les interactions qui existent aux interfaces entre ces trois milieux. Les résultats obtenus serviront entre autre à optimiser l'interprétation des futures données satellitaires micro-ondes (capteur satellitaire européen MIMR en particulier), en terme de corrections atmosphériques, d'estimation des flux intervenant dans le bilan d'énergie du système, et des paramètres de végétation et de sol. Ces résultats pourraient être très prometteurs dans la perspective de synergie entre les mesures dans les domaines spectraux courants (visible, proche infrarouge, infrarouge thermique) et les hyperfréquences.

3.1.1 - Les principaux axes de recherche développés cette année

L'ensemble des expériences réalisées cette année sur le site de Montfavet dans le cadre de l'expérimentation "PORTOS 1993" peut se décomposer en cinq grands axes d'investigation. Plusieurs laboratoires de recherche travaillent conjointement avec l'INRA sur cette expérimentation [(LERTS, Toulouse - CNES, Toulouse - Facultés de Sciences françaises et étrangères...)], car les domaines d'application sont multiples, et l'agronomie n'en représente qu'un aspect.

3.1.1.1 - Les recherches menées en collaboration avec l'INRA

- Modélisation des effets atmosphériques sur la mesure de température de brillance des couverts végétaux. L'influence de l'effet atmosphérique est double: d'une part l'atmosphère contribue à l'émission, par une composante atmosphérique descendante réfléchiée par la surface puis atténuée par l'atmosphère, et par une composante atmosphérique montante directement perçue par le capteur. D'autre part, l'atmosphère affecte l'émission globale du couvert qui est atténuée (absorption, diffusion) au cours de son trajet vers le capteur.

- L'estimation du profil de température et de la permittivité diélectrique du sol. Ce dernier paramètre est principalement fonction de la teneur en eau du sol, qui influe également sur le profil de température.

- Détermination de l'état de rugosité d'un sol par mesures radiométriques. Les modèles semi-empiriques de rugosité développés jusqu'à présent en hyperfréquence (réflectivité de Fresnel modifiée), n'ont pas souvent eu l'occasion d'être confirmés par des mesures de terrain, et leur validation s'applique uniquement à des domaines restreints du spectre micro-onde. Pour pousser plus avant les investigations dans ce domaine, des mesures simultanées ont été réalisées avec le radiomètre monofréquence "MARMOTTE" (4.3 GHz) et PORTOS, sur des parcelles nues dont on a fait varier la rugosité dans une très large gamme.

3.1.1.2 - Les objectifs des stations Sciences du sol Bioclimatologie de l'INRA de Montfavet

L'objectif des chercheurs de la station de sciences du sol est de corréliser l'ETR (évapotranspiration relative) et la température de brillance mesurée à la surface d'un couvert de blé. Pour ce faire, ils envisagent tout d'abord d'estimer la température de surface du sol sous couvert grâce aux équations de bilan énergétique, qui dépend directement de l'humidité du sol (sur toute la profondeur de l'enracinement) d'après les théories développées dans le domaine de l'infrarouge thermique. Puis dans un deuxième temps, il s'agira de convertir ces données en terme de flux (notion de bilan hydrique) pour pouvoir estimer l'ETR - (A. Chanzy, INRA Montfavet 1993, T. Gaudin, mémoire d'ingénieur ESITPA - INRA Montfavet 1993).

D'autre part, l'étude menée par J.P. Wigneron à la station de bioclimatologie, "**estimation de paramètres sol et végétation à partir de mesures hyperfréquences passives**", s'inscrit dans le cadre général des études menées sur l'influence des paramètres du couvert végétal sur l'émission hyperfréquence d'une surface. L'objectif de la manipulation de cette année est double : il s'agit tout d'abord de valider les précédents résultats obtenus notamment sur couvert de soja au cours du printemps 1991, et de bien intégrer le problème de l'inversion des données dans la modélisation de la mesure radiométrique (importance de la sensibilité du modèle continu). Dans un deuxième temps, cette étude a pour objectif d'affiner la modélisation de l'émission d'un couvert végétal, notamment grâce à l'utilisation des derniers travaux de Karam (Université du Texas, USA) sur les matrices de phase du modèle discret, et de Y. Q. Jin (Université de Shanghai, Chine) pour le modèle continu.

3.1.2 - Les précédentes campagnes de mesures réalisées avec PORTOS

Avant d'être confié à l'INRA de Montfavet au printemps 1993, le radiomètre PORTOS avait déjà participé à deux campagnes de mesures. Les résultats de ces deux expérimentations ont été une source d'information de tout premier ordre pour la modélisation de l'émission hyperfréquence des surfaces naturelles en général, et pour l'étude qui nous concerne en particulier.

Encore en période de mise au point durant l'été 1991, le radiomètre avait opéré pour la première fois sur le site de l'INRA Montfavet pour effectuer des mesures de terrain sur sol nu (humidité, rugosité, température) - (A. Chanzy, 1992) - et sur couvert agricole de soja (J.P. Wigneron, 1993). Les résultats obtenus furent très riches du point de vue théorique, mais la stabilité de l'appareil était encore quelque peu précaire (contrôle thermique trop fluctuant). Néanmoins, cette expérimentation validait les premiers tests hors des laboratoires du CNES, et la manipulation fut des plus satisfaisante.

L'année suivante, le radiomètre PORTOS participait à la campagne HAPEX SAHEL 1992 en configuration aéroportée (embarqué sur le Folker 27 de l'IGN). Les données aériennes obtenues n'ont pas encore été interprétées (pour des questions de calibration), mais le bon comportement général du radiomètre laisse espérer des résultats intéressants.

DISPOSITION GENERALE DU SITE DE MESURE

LA PARCELLE "POIRSON"

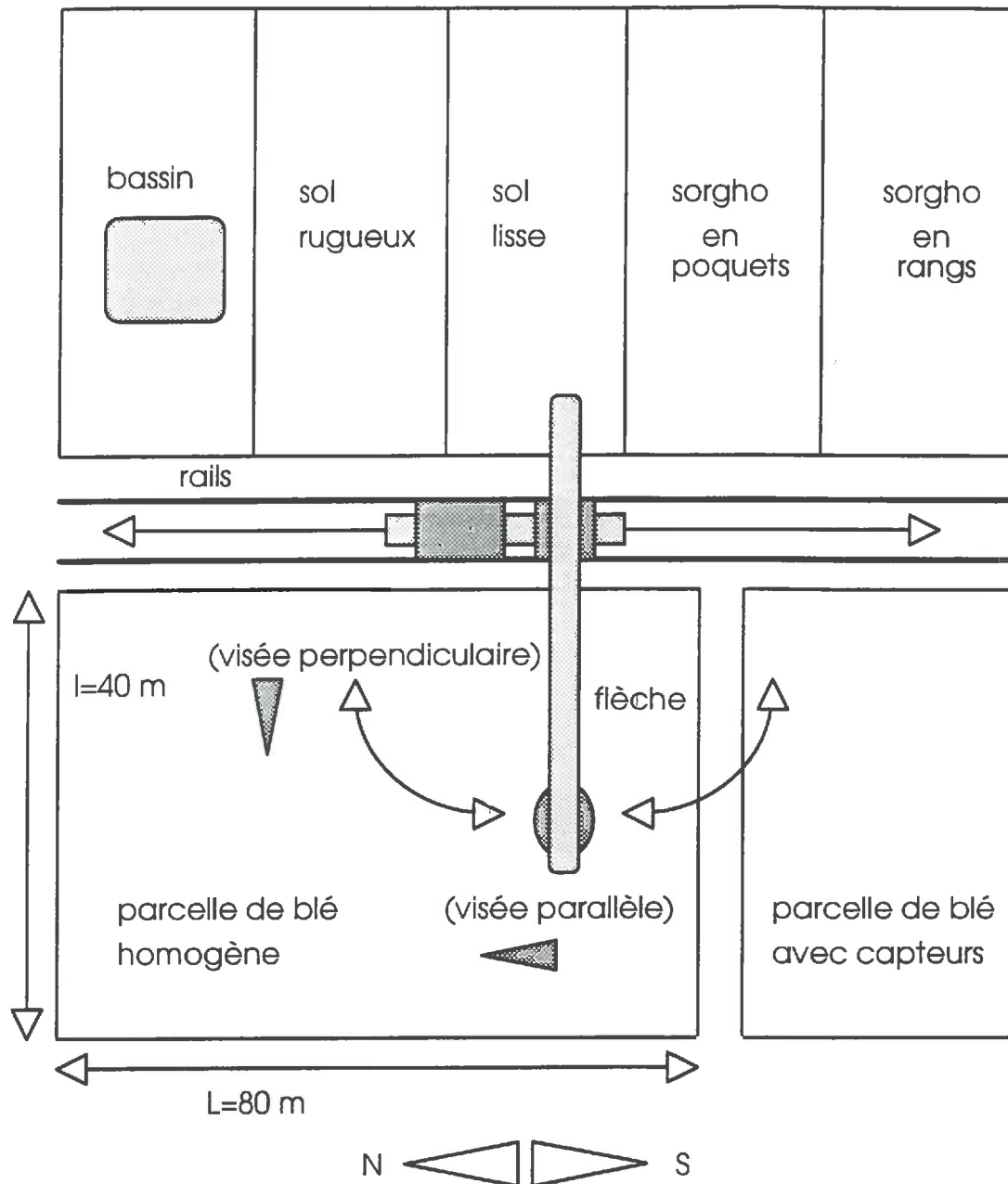


Figure 2.1 : dispositif expérimental de mesures radiométriques avec PORTOS sur couvert de blé (expérimentation PORTOS 1993).

3.2 - Le dispositif expérimental in situ

3.2.1 - Description générale du site

3.2.1.1 - Dispositif général

L'expérimentation PORTOS 1993 s'est déroulée sur la parcelle "télédétection" POIRSON du domaine St Paul de l'INRA à Montfavet. Cette parcelle se subdivise en six sous-parcelles entretenues en sol nu ou semées, au milieu desquelles passe une grue mobile portant le radiomètre (Fig. 2.1). Sur les parcelles "sol nu", les mesures ont suivi des phases successives de dessèchement et de réhumectation du sol pour différents états de rugosité. Sur les parcelles agricoles (blé - sorgho), les mesures ont suivi le développement des cultures depuis le semis jusqu'à un état avancé de maturité, sauf pour le sorgho qui connut d'importants problèmes de levée.

3.2.1.2 - La parcelle de blé

La parcelle dans laquelle se sont déroulées les mesures utilisées pour notre étude, s'étend sur une surface de 0.5 ha dont un quart fut consacré aux mesures des paramètres in situ (installation de thermocouples, sondes platine, radiothermomètre, station météorologique avec anémomètres, tensiomètres, sonde à neutron...). Le reste de la parcelle a été laissé "vierge" de tous capteurs pour procéder aux mesures radiométriques (conserver un couvert homogène).

La texture du sol de cette parcelle est de nature limono-argileuse (limons 62%, argiles 27%, sables 11%). Ces caractéristiques assurent une bonne capacité d'absorption et de dessiccation (bons contrastes d'humidité de surface), mais engendrent également une très forte tendance à la fissuration et à la battance ($IB \approx 5$), ce qui n'est pas sans poser de problème, notamment en ce qui concerne la rugosité de surface et l'homogénéité du couvert. La structure est assez compacte, l'absence de particules grossières et de matière organique ne font qu'ajouter à cet aspect "asphyxiant" du sol.

En dehors des conditions sèches qui engendrent un grand nombre de fissures, la faible rugosité de surface se caractérise par des mottes de 5 cm environ, et le développement rapide du couvert laisse supposer que cet état s'est maintenu tout au long du cycle de mesure.

La proximité des haies de cyprès qui entourent le site provoque des effets de "brise vent" qui ont eut quelques influences sur l'homogénéité de la levée et le taux d'humidité du sol et du couvert (diminution des échanges convectifs). Ce phénomène fut surtout remarquable en début de cycle (faible taux de couverture).

Enfin, le tassement du sol dû à la présence d'un ancien chemin d'accès a un peu pénalisé le développement de la culture au centre de la parcelle, mais tout comme l'effet brise vent des haies, les contrastes se sont peu à peu atténués au cours du développement de la culture.

3.2.2 - L'acquisition des données biophysiques in situ

Les mesures des caractéristiques du couvert de blé et du sol sous-jacent permettent de préciser les différents paramètres d'entrée des modèles continu et discret. L'estimation des ordres de grandeur et des variations de ces paramètres sera le fondement de l'interprétation des mesures radiométriques avec PORTOS. Les mesures in situ ont porté sur :

- **la température au sein du couvert de blé**, mesurée à l'aide d'un radiothermomètre Heiman type KT 17 (8 - 14 μm) et de thermocouples.

- **le profil thermique du sol**, mesuré par des sondes platines et des thermocouples reliés à un système d'acquisition qui enregistre tous les quarts d'heure. Ces capteurs étaient implantés jusqu'à 1 m de profondeur et de façon très régulière sur les dix premiers centimètres du sol (0-0.5, 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-10 cm).

- **le profil d'humidité dans les dix premiers centimètres du sol**, mesuré régulièrement à l'aide d'une tarière de surface graduée. Ces prélèvements permettent d'obtenir l'humidité pondérale du sol (après passage à l'étuve à 100°C pendant 24 h), qui sera ensuite convertie en humidité volumique (densité du sol : 1.43 g / cm³).

- **la caractérisation de la structure du couvert de blé**, en terme de biomasse, de dimensions de forme et d'orientation des diffuseurs. C'est une partie très importante de cette étude car la modélisation géométrique d'un couvert de blé pour une application en télédétection hyperfréquences n'a jamais été réalisée avec autant de précision auparavant, et c'est pourquoi j'y consacrerai un chapitre entier (Chapitre 5: mesures des paramètres de végétation & caractérisation géométrique d'un couvert de blé).

CHAPITRE 4

MESURES RADIOMÉTRIQUES AVEC PORTOS

4.1 - Quelques généralités sur le radiomètre PORTOS

4.1.1 - Présentation générale de l'instrument

PORTOS a fait l'objet d'un contrat CNES pour son étude et son développement, passé auprès de Matra-Marconi Espace, entre 1988 et 1991. Il s'agit d'un radiomètre micro-onde à six fréquences (1.4, 5.05, 10.65, 23.8, 36.5, 90 GHz) du type sondeur (passif), pouvant opérer sur des installations de terrain ou en mode aéroporté (en l'occurrence l'ARAT - Folker 27 de l'Institut Géographique National). En raison de l'encombrement de l'antenne du canal basse fréquence 1.4 GHz (1.20 m de diamètre), cette bande n'est disponible qu'en mode "terrain". Les six canaux hyperfréquences sont matériellement constitués de une ou deux voies suivant les polarisations :

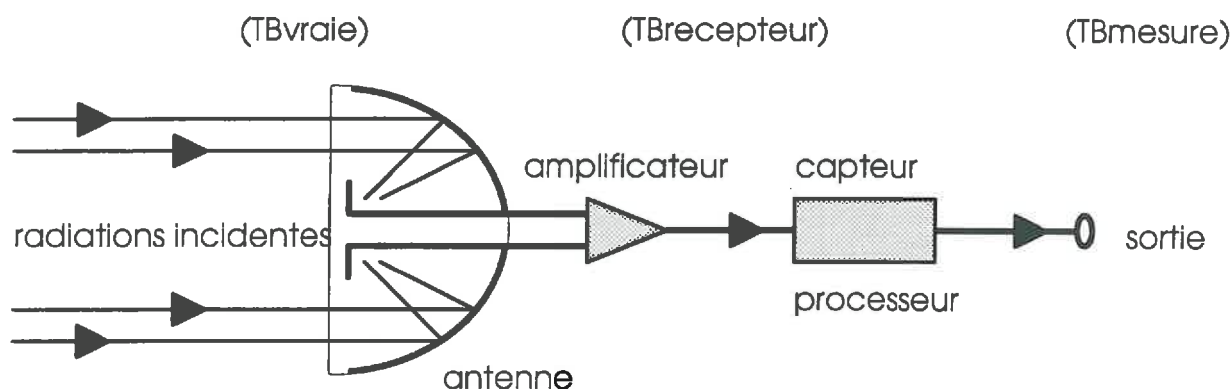
Pour les canaux 5.05, 10.65 et 90 GHz, les deux polarisations sont mesurées simultanément, ce qui nécessite deux voies distinctes.

Pour les canaux 1.4, 23.8, 36.5 GHz, Une seule polarisation est détectée par mesure (une seule voie utilisée). A 23.8 et 36.5 GHz le changement de polarisation s'effectue par simple commutation à partir de la console de contrôle. Pour le canal 1.4 GHz le changement de polarisation se fait par intervention manuelle en tournant l'antenne de 90°, ce qui exige la manipulation au sol du radiomètre. Cette contrainte matérielle engendre des "décalages" de mesure entre les deux polarisations H et V du canal 1.4 GHz (principalement en visée verticale où les deux mesures doivent être égales: $TB_h(\theta=0)=TB_v(\theta=0)$) qui, à défaut d'être mesurées quasi-simultanément comme les canaux 23.8 et 36.5 GHz, subissent des variations importantes (parfois plusieurs heures de décalage entre les mesures en polarisation H et V)).

4.1.2 - Mode de fonctionnement du radiomètre

Le signal capté est tout d'abord amplifié à cause de sa faible puissance, puis filtré pour éliminer les "bruits", converti sous forme analogique et enfin transmis à la centrale d'acquisition qui l'échantillonne toutes les 25 ms et le numérise sur 12 bits.

SCHEMA D'UN SONDEUR HYPERFREQUENCES PASSIVES



Les antennes peuvent être considérées comme l'aspect le plus innovant de PORTOS. La précision radiométrique absolue est directement liée aux performances de ces dernières. A ce sujet, il faut préciser que la température de brillance de l'antenne intègre l'intensité de la radiation incidente sur le capteur (que l'on désire estimer) pondérée par le diagramme de l'antenne, et l'intensité émise par le capteur lui même (terme de bruit).

4.1.3 - Des améliorations notables depuis 1991

Depuis sa dernière utilisation sur le site Montfavet en 1991, PORTOS a bénéficié de quelques améliorations notables, notamment en ce qui concerne le contrôle de température au sein de l'appareil qui présente désormais une stabilité thermique remarquable (le contrôle thermique à l'intérieur du radiomètre se fait autour de la consigne $+47^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$). La résolution radiométrique a directement bénéficié de ces améliorations puisqu'elle dépend directement de l'efficacité du contrôle des fluctuations du gain de la chaîne de traitement du signal (de l'ordre de 0.002°C), et de la température de référence (313 K). Cette résolution est actuellement de l'ordre de 2 K (contre 5K en 1991).

Une autre amélioration fut l'ajout d'une antenne de réception pour les canaux 1.4 et 5.05 GHz qui n'étaient équipés que d'antennes du type "cornet" en 1991. La technologie de l'antenne 5.05 GHz est de loin la plus complexe (réseau de cup dipôle avec coaxial carré), à cause principalement des contraintes de dimensions d'antenne qui décroissent avec la fréquence. L'antenne parabolique 1.4 GHz a également apporté un plus dans la résolution, mais son efficacité moyenne et l'importance des lobes secondaires associés ajouteront un terme de bruit significatif à la mesure radiométrique (perte antenne de l'ordre de 2 dB).

Les bandes basses fréquences sont très intéressantes pour l'étude des couverts végétaux car ce sont les longueurs d'ondes qui possèdent le plus fort "pouvoir pénétrant" (λ de l'ordre de 15 à 30 cm), et elles constituent par conséquent des indicateurs privilégiés de la teneur en eau du sol et de la biomasse (paramétrée par la fraction volumique de végétation en %).

4.2 - Mise en oeuvre des mesures radiométriques

4.2.1 - Etalonnages

L'objectif des calibrations est d'exprimer la température de brillance "vraie" à partir des températures mesurées par le radiomètre sur des surfaces de références. Des étalonnages réguliers des différents canaux ont été conduits tout au long de la campagne de mesure. Trois méthodes ont été utilisées : étalonnage sur charge chaude, sur charge froide et sur charge tiède, pour obtenir une droite de calibration satisfaisante en faisant varier l'angle d'incidence (trois nuages de points). On notera que l'étalonnage par mesure de la température de brillance du ciel n'a pas été réalisée à cause des contraintes de mobilité de l'appareil (retournement face au ciel impossible).

Etalonnage sur charge chaude : avec "écosorb"

L'antenne vise un panneau de mousse absorbante pyramidale construit de telle façon que son émissivité est très proche de 1 (approximation corps noir). Ainsi la température de brillance mesurée est sensiblement la même que celle de la

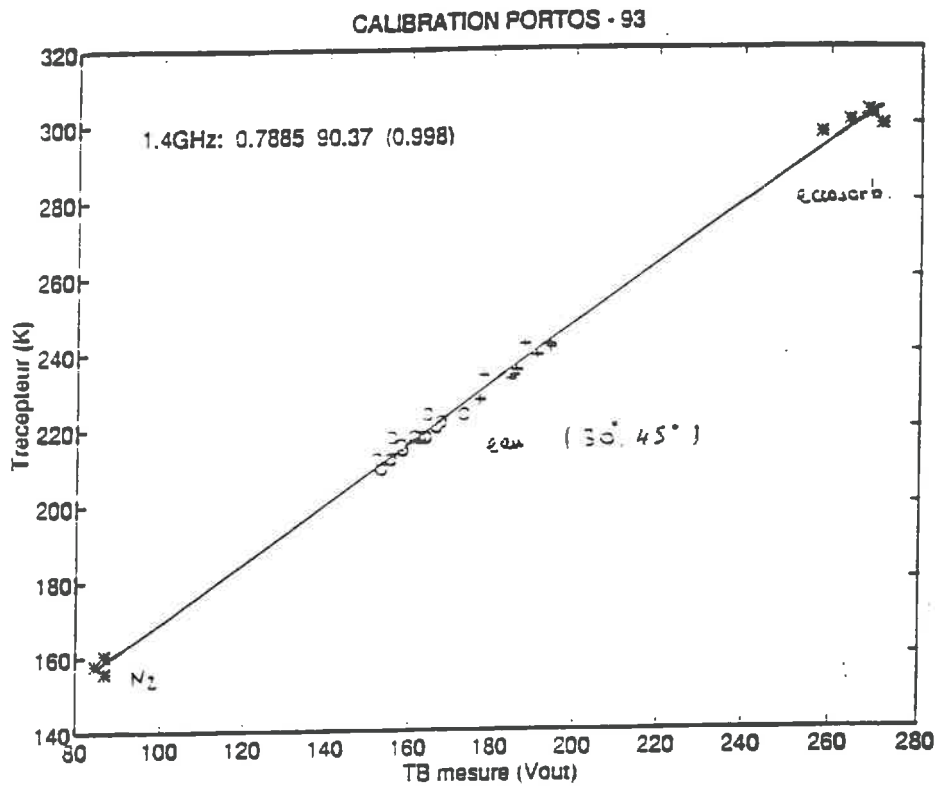


Figure 2.2a : droite de calibration du canal 1.4 GHz exprimant la température en sortie d'antenne (avant chaîne de traitement) en fonction de la température mesurée (en sortie de chaîne de traitement).

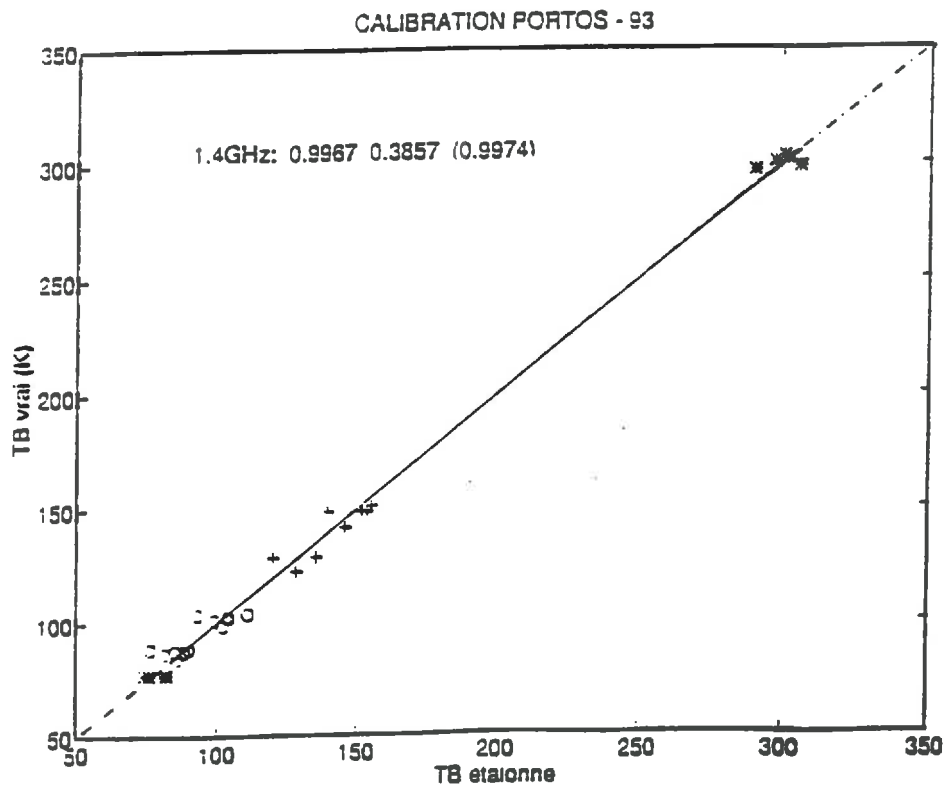


Figure 2.2b : droite de calibration du canal 1.4 GHz exprimant la température d'antenne (TB vraie) en fonction de la température étalonnée et corrigée des pertes (TB étalonné).

température de l'air ambiant (de l'ordre de 300 K). Pour des raisons de taille de lobe d'antenne le canal 1.4 GHz ne pu pas être étalonné suivant ce procédé et l'on du faire appel à l'emploi d'une "charge adaptée", d'émissivité égale à 1, introduite en dérivation dans le système et placée à l'air ambiant.

Etalonnage sur charge froide : "écosorb" immergé dans l'azote liquide

Cette fois ci la température de brillance émise est très proche de 77 K. Toujours pour des raisons d'encombrement d'antenne, le canal 1.4 GHz fut étalonné avec la même charge adaptée placée cette fois ci dans l'azote liquide.

Etalonnage sur charge tiède : eau

L'antenne vise la surface d'un bassin rempli d'eau avec un angle d'incidence θ par rapport à la verticale (θ doit être supérieur à 10° pour limiter la mesure des radiations émises par l'antenne et réfléchies par la surface). Des acquisitions à incidence de l'ordre de 30° à 50° permettent de bien découpler les points de mesure des deux polarisations H et V. Pour limiter la contribution du ciel à des angles d'incidence élevés, les mesures ont été effectuées par ciel clair dont la température de brillance peut être calculée avec précision à partir de données de radiosondage.

On obtient les droites de calibration de chaque bande spectrale (Fig.2.2a et Fig. 2.2b).

4.2.2 - Déroulement des mesures avec PORTOS

En configuration "terrain" sur le site de Montfavet, le radiomètre était installé sur la flèche d'une grue de 21 m de hauteur. Les visées se faisaient soit dans l'axe du semis de blé (visée parallèle), soit orthogonalement à cet axe (visée perpendiculaire). La grue se déplaçait sur des rails parallèles au champ de blé de manière à ce que, selon l'incidence, l'axe du capteur vise à peu près toujours la même cible au sein du couvert (au centre). Les mesures étaient acquises pour des angles d'incidence de 0° à 50° avec un pas de 10° . Ces angles étaient compatibles avec la projection au sol du lobe principal des différentes antennes qui devait être restreintes aux limites du champ, mais une incertitude persiste pour les incidences élevées en visée perpendiculaire (cf. 4.3.4). Les mesures se déroulaient généralement en fin de matinée et l'après-midi (hormis les interruptions liées à la maintenance, aux pannes et aux jours de mistral), et quelques journées ont été consacrées à l'acquisition de mesures "continues" (6 à 20H TU), avec un pas de temps de 30 à 45 minutes. Les mesures en journées continues n'ont pas été mises en oeuvre dans l'étude qui nous concerne, mais elles seront prochainement exploitées pour l'analyse des fluctuations quotidiennes de l'émission du couvert et la modélisation des variations d'activité métabolique du blé, de rosée et d'amplitude thermique diurne-nocturne.

4.2.3 - Description du jeu de données radiométriques

Six fréquences, deux polarisations, six incidences, deux directions de visée... les données PORTOS 1993 sont très fournies. Afin de pouvoir leur appliquer un traitement informatique pour utiliser le modèle d'inversion, les multiples mesures doivent être préalablement traitées et filtrées. Sans préjuger des résultats à venir, aux vues de la somme d'informations collectées on peut dores et déjà affirmer que la campagne PORTOS 1993 est un succès.

Un très large éventail de mesures

Des procédures automatisées ont assuré le traitement des données radiométriques (moyennage, filtration, corrections atmosphériques, étalonnage d'après les droites de calibration et recallages par ajustement des valeurs à $\theta = 0$ pour les polarisation H et V). Enfin les données sont sélectionnées pour différentes fenêtres horaires puis ajustées par des fonctions appropriées.

Le jeu de données radiométriques se compose de 415 mesures réparties sur 47 jours (DoY 109 à DoY 186), dont 5 jours de mesures continues. La durée importante de cette expérimentation (trois mois), et la qualité des informations collectées (bonne sensibilité radiométrique), font de cette base de données une source d'informations exceptionnellement riche pour l'étude de l'émission hyperfréquence des couverts végétaux. L'évolution de l'émission micro-onde du couvert de blé au cours du cycle de végétation est présentée et analysée au paragraphe 4.4 de ce chapitre.

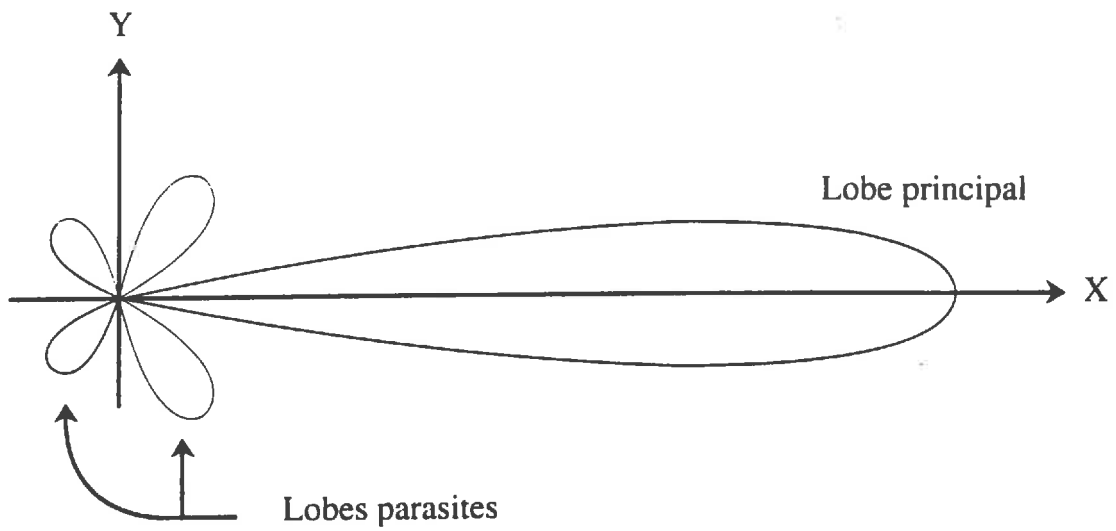
4.3 - Problèmes rencontrés au cours des trois mois de manipulation

4.3.1 - Interrogations sur les données du canal 5.05 GHz

La mise en forme des mesures du canal 5.05 GHz a permis de mettre en évidence un "**croisement de polarisation H et V**" pour des incidences inférieures à 20 degrés. L'écart entre TB_h et TB_v au nadir est de l'ordre de 20 K en pleine végétation. Ce découplage des températures de brillance à l'incidence 0° dans les deux polarisations a pu être observé tout au long du cycle de végétation, et augmente simultanément avec le développement du couvert. Malheureusement, après analyse détaillée, il s'avère que ce canal a été victime d'une dérive instrumentale qui a progressivement affecté la polarisation V tout au long du cycle de mesure (des phénomènes similaires ont été remarqués pour les mesures sur sol nu). Ce découplage ne peut donc pas être imputé à la structure du couvert végétal.

Cette constatation soulève néanmoins un problème important puisque les modèles de simulation et les algorithmes d'inversion utilisés ne peuvent pas prendre en compte cet aspect de découplage, à supposer qu'il ne soit pas comme ici le résultat d'une défaillance technique. En effet, dans l'approche continue, on considère qu'à l'incidence 0° les propriétés diélectriques d'un couvert sont isotropes (donc la température de brillance est identique pour les deux polarisations). Cette notion d'asymétrie du milieu, intrinsèque à l'approche continue classique, est incompatible avec les effets de géométrie vraisemblablement provoqués par les semis en rang. Toutes ces observations nous obligent pour l'instant à abandonner l'exploitation de ces données puisque nous ne disposons en fait que d'une seule polarisation.

En revanche, il serait judicieux de suggérer aux modélisateurs d'introduire une notion de symétrie horizontale du milieu dans le modèle de simulation, car si la longueur de corrélation l_z peut paramétrer une stratification verticale, l_p reste insuffisante pour décrire des phénomènes similaires dans un plan horizontal. On pourrait notamment imaginer de décomposer l_p en deux composantes l_x et l_y , ce qui permettrait de décrire précisément les fluctuations diélectriques du couvert dans les trois directions de l'espace xyz. Ceci constitue donc un axe de recherche et de développement intéressant pour les prochaines années, dans le cadre précis de la modélisation de l'émission hyperfréquence des couverts agricoles.



**Figure 2.3 : configuration géométrique de l'anisotropie de reception d'une antenne.
Problème des lobes secondaires**

4.3.2 - Déficience du canal 36.5 GHz

Tout au long de la manipulation, l'étude de l'écart type des mesures du canal 36.5 GHz a permis de mettre en évidence un dysfonctionnement de l'appareil dans cette bande de sondage. Les causes de cette déficience n'ont pas été clairement établies, mais grâce aux fréquentes mesures d'étalonnage, nous avons pu obtenir deux droites de calibrations distinctes (normale - anormale), qui permettront peut être l'exploitation ultérieure des données dans ce canal malgré son apparente instabilité. Hormis l'aspect purement technique, ce problème est particulièrement gênant pour l'étude d'un couvert végétal car la bande 36.5 GHz est parfois utilisée simultanément avec la bande 10.65 GHz pour inverser les données de biomasse, de teneur en eau et de LAI, par l'intermédiaire de la différence de température normalisée et l'indice de polarisation (S. Paloscia, P. Pampaloni (1992)).

4.3.3 - Dégâts de condensation sur les antennes

Les conditions climatiques du mois de Mai ont été la cause principale de la formation de condensation dans l'appareil. La présence d'eau sur les antennes peut diminuer significativement la valeur du signal capté en modifiant la température de brillance de l'antenne. Cette condensation a eut pour effet de biaiser les mesures matinales de certaines journées en modifiant le diagramme d'émission des antennes humides. Ce problème a nécessité l'intervention des techniciens du CNES qui ont dû démonter les antennes afin de les nettoyer. Fort heureusement, ces dégâts n'ont eut que peu d'impact sur le déroulement des mesures et après s'être assuré de la bonne étanchéité des modules, les mesures ont pu se poursuivre normalement.

4.3.4 - Inadéquation des lobes d'antenne : effet de "bordure"

C'est la trop grande hauteur de la grue porteuse (21 m) qui est à l'origine du débordement du lobe principal des antennes pour les fortes incidences. Sur la parcelle de blé qui nous concerne, ce phénomène était surtout remarquable pour les visées perpendiculaires à des incidences supérieures à 30°. La transmission d'une antenne peut être représentée par une courbe de gain selon un plan. On obtient un diagramme où apparaissent un lobe principal et des lobes secondaires qui illustrent l'anisotropie de réception de l'antenne (Fig. 2.3). Ces lobes ont une grande importance en radiométrie, car l'énergie captée dans ces derniers ne peut pas être clairement distinguée de l'énergie utile captée dans le lobe principal. On comprend donc bien l'intérêt de diriger le radiomètre sur une cible large et homogène proportionnellement à la taille des lobes d'antenne. Les conséquences de cet inadéquation géométrique font que le signal reçu à incidence élevée ne reflète pas exactement l'émission du blé, mais intègre également les haies alentours (visée parallèle) et le parking tout proche (visée perpendiculaire).

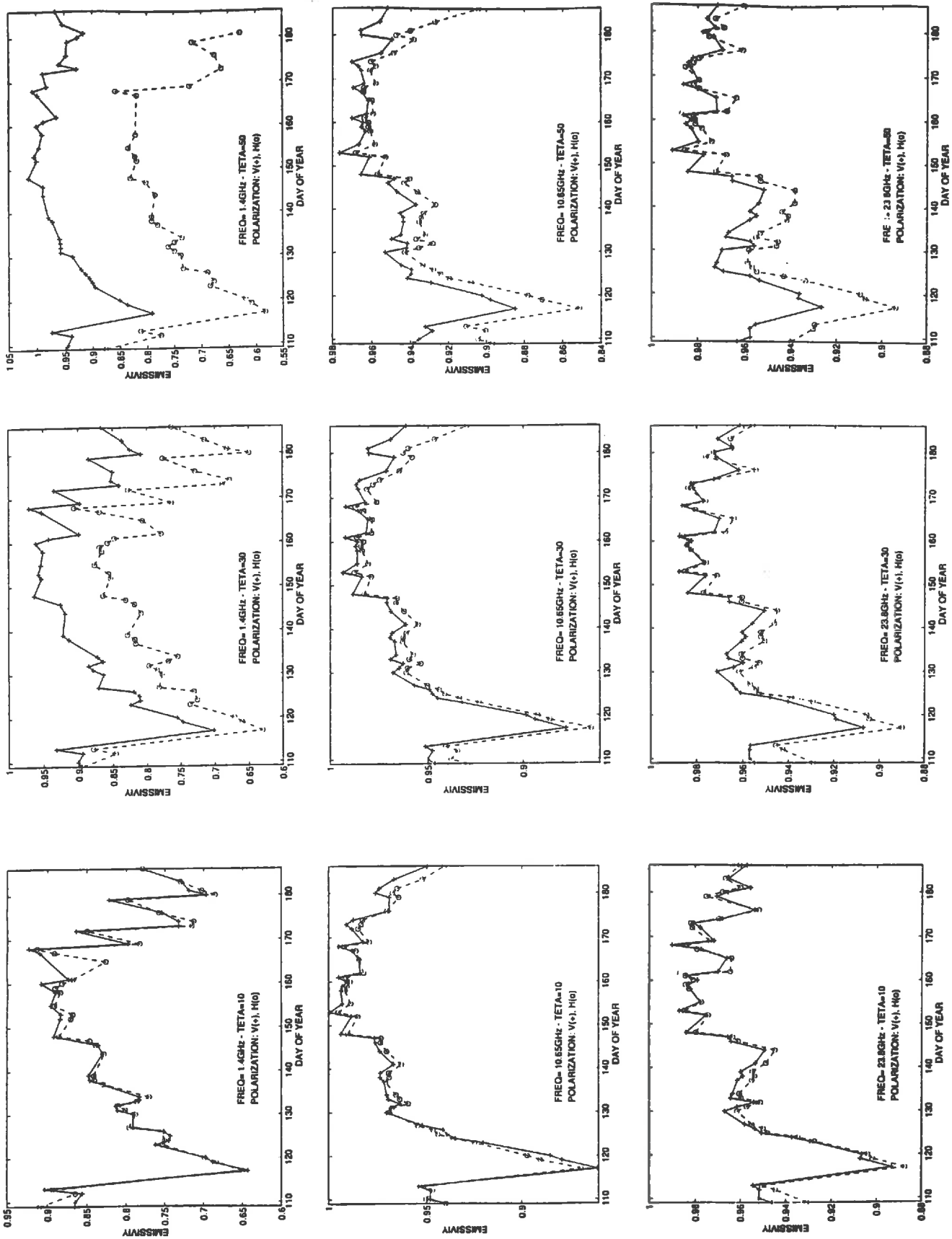


Figure 2.4 : Evolution temporelle de l'émission micro-ondes d'un champ de blé à 1.4, 10.65 et 23.8 GHz. (expérimentation PORTOS-93)

4.4 - Evolution temporelle de l'émissivité hyperfréquence d'un couvert de blé

La variation temporelle de l'émissivité micro-onde e_p d'un couvert de blé tout au long de son cycle de croissance est présentée pour trois bandes de fréquences du radiomètre PORTOS : 1.4, 10.65, et 23.8 GHz, pour trois incidences particulières, 10°, 30° et 50° (Fig. 2.4). Une estimation de l'émissivité est obtenue en divisant la température de brillance mesurée T_{B_p} par la température de surface du milieu T_{sm} mesurée par le radiothermomètre installé sur le support de PORTOS (soit $e_p = T_{B_p} / T_{sm}$). Dans les graphiques on peut observer une tendance générale assez nette dans l'évolution de e_p sur laquelle se superpose des variations amples et rapides. Trois paramètres principaux déterminent apparemment l'évolution du signal mesuré. D'une part, le développement et l'état hydrique du couvert végétal (qui seront paramétrés par la fraction volumique de végétation "Fracv" et l'humidité gravimétrique "Mg") semblent déterminer la tendance des évolutions de e_p . D'autre part, les fluctuations brusques de e_p sont souvent corrélées aux variations de l'humidité du sol.

4.4.1 - Contribution du couvert végétal à l'émission

Pendant la période de végétation du blé (jour 109 à 161), les tendances dans l'évolution de l'émissivité, et principalement l'augmentation de e_v et e_h à 1.4 GHz, 10.65 GHz et 23.8 GHz semblent directement liée au développement du couvert. Ces observations sont beaucoup plus distinctes pour des angles d'incidence élevés (50°) pour lesquels l'atténuation de la contribution du sol est importante. D'une manière générale, il apparaît que le développement de la végétation conduit à l'augmentation de l'émission micro-onde principalement à basses fréquences.

4.4.1.1 - Dans les très basses fréquences : 1.4 GHz

Du jour 109 au jour 150, l'augmentation de la biomasse végétale et le dessèchement du sol conduisent à une augmentation de e_p .

La diminution de e_p ($p = H \& V$) en fin de campagne, remarquée dans les basses fréquences (1.4 GHz), surtout aux faibles incidences (10° et 30°), pourrait être due au dessèchement sénescence du couvert qui franchi le seuil de 60% d'humidité à partir de la mi-Juin. Nous nous emploirons à vérifier cette hypothèse lors de l'étude de sensibilité présentée au chapitre 6. Il reste cependant que la période DoY 162 à DoY 186 est délicate à interpréter car elle se caractérise également par une dégénérescence végétale qui modifie la structure du couvert provoquant une "réapparition" du sol aux faibles incidences à 1.4 GHz. Les profondes modifications morphologiques doublées de forts contrastes d'humidité sol-végétation pendant cette période provoquent vraisemblablement des phénomènes de compensation qui rendent mal aisé l'interprétation de la diminution d'émissivité mesurée. Néanmoins, il reste que l'état hydrique du couvert est directement lié à la turgescence du végétal qui détermine sa structure spatiale. D'un point de vue biologique, la teneur en eau et la structure spatiale du blé sont indissociables en fin de cycle (maturation). Dans ces conditions, il semblerait que le seuil de 60% d'humidité définisse apparemment le stade à partir duquel le blé régresse biologiquement et s'efface au profit du sol.

4.4.1.2 - Dans les moyennes fréquences : 10.65 et 23.8 GHz

A 10.65 et 23.8 GHz on constate que l'émission croît rapidement avec l'augmentation de biomasse (jusqu'au jour 130) puis le signal paraît saturer. L'évolution de la biomasse pendant la montaison ne s'accompagne pas d'une augmentation de l'émission du couvert (plateau d'émission). L'allure de l'émission dans les moyennes fréquence laisse présager que les canaux 10.65 et 23.8 GHz seront insensibles aux variations des paramètres de surface pendant la période de végétation. En conséquence, il semble peu probable que la méthode d'inversion permette d'estimer ces paramètres sur toute la durée du cycle. Nous vérifierons cette hypothèse lors de la mise en oeuvre de l'inversion au chapitre 7.

On observe très nettement une rupture dans l'évolution de l'émissivité. A priori, on peut penser que cette brusque variation de ϵ_p ($p=H&V$) serait reliée à l'épiaison (jour 148). Cette observation montre clairement que les fréquences 10.65 GHz et 23.8 GHz sont très sensibles à l'émission micro-onde de la strate supérieure du couvert. Il est raisonnable de penser que seule une profonde modification morphologique comme l'épiaison peut provoquer aussi soudainement une telle augmentation d'émissivité. La fréquence 10.65 GHz permettrait donc à priori de détecter pratiquement au jour près la date de la sortie des épis de leur gaine.

Enfin, on remarque également une diminution de l'émission globale en fin de campagne à 10.65 et 23.8 GHz. Il nous appartiendra de vérifier si cette diminution est liée à la teneur en eau, ou si elle résulte d'une modification géométrique du couvert de blé pendant la maturation.

4.4.2 - Contribution du sol à l'émission

On constate que le canal 1.4 GHz est le plus sensible aux variations d'humidité du sol tout au long du cycle de mesure. Au début de la campagne, alors que le blé est en phase d'installation, du jour 109 au jour 125 où la fraction volumique atteint 0.25%, les brusques variations de ϵ_p semblent bien corrélées aux changements d'humidité du sol, notamment lors des pluies du jour 114 au jour 118. L'humidification du sol après une pluie ou une irrigation peut être détectée par une diminution sensible de l'émissivité. Dans toutes les fréquences, l'effet sol est beaucoup plus apparent aux faibles incidences (0° et 30°).

Au fur et à mesure que le couvert se développe, l'amplitude de ces variations décroît. Néanmoins, l'effet des irrigations conduites en fin de campagne (après le jour 162) est encore très visible aux basses fréquences et particulièrement dans le canal 1.4 GHz, alors qu'il a presque totalement disparu à 10.65 GHz. Cela s'explique par une diminution de l'atténuation par la végétation de l'émission du sol, qui s'accroît simultanément avec le flétrissement du blé dans les basses fréquences. Au delà du jour 125 et jusqu'à ce que le blé fane, l'émission micro-onde du couvert ne paraît plus corrélée à l'état de surface pour les moyennes fréquences (10.65, 23.8 GHz). L'atténuation de la contribution du sol par le couvert dépend du coefficient d'extinction (k_e est proportionnel à la fraction volumique de végétation "Fracv"), de la fréquence (la diffusion et l'absorption s'accroissent avec la fréquence), et de l'incidence de la mesure (l'extinction est proportionnelle au trajet de la radiation dans le couvert).

On peut également obtenir une information sur l'intensité des précipitations enregistrées : en effet, une analyse plus fine permet d'observer que les amplitudes de variation de ϵ_p dues aux fluctuations d'humidité du sol sont plus marquées à 1.4 GHz que dans les autres canaux, et que de façon générale, cette amplitude décroît avec la fréquence. Ceci peut s'expliquer par le fait que la grande majorité des apports d'eau pendant la campagne ont été suffisamment importants pour humidifier le sol de façon homogène sur plusieurs centimètres (7 à 10 cm en moyenne). Ainsi, il n'existait pas de contraste d'humidité entre la surface (dont l'émission est mesurée par les moyennes fréquences) et les cinq premiers centimètres de sol perçus par le canal 1.4 GHz. Cette observation est significative de précipitations abondantes, car dans le cas d'un apport d'eau "modéré", seule la surface s'humidifierait, et l'amplitude de la variation d'émissivité à 1.4 GHz serait "tamponnée" (liée à la profondeur d'émission, donc proportionnellement moins importante que dans les moyennes fréquences (J.P. Wigneron, 1993)).

CHAPITRE 5

MESURES DES PARAMETRES DE VEGETATION CARACTERISATION GEOMETRIQUE D'UN COUVERT DE BLE

5.1 - Caractéristiques générales du couvert

Avant toute chose, il est peut-être nécessaire de préciser que dans cette expérimentation le blé n'est considéré que comme une "strate végétale" possédant des propriétés diélectriques particulières, et la culture ne représente qu'un support physique pour l'étude de l'émission hyperfréquence des surfaces naturelles. Il faut donc s'efforcer d'oublier toute notion d'optimisation culturale et de rendement. En revanche, le couvert doit être appréhendé comme une organisation spatiale d'émetteurs et de diffuseurs végétaux qu'il convient de caractériser avec le plus de soin et de précision possible pour s'assurer de la cohérence des modèles de simulation de température de brillance.

5.1.1 - La mise en place de la culture

Le blé utilisé dans cet expérimentation était du PRINQUAL (Northrup - Benoist). C'est un blé dur, barbu, très précoce qui se sème au printemps et possède des caractéristiques assez "rustiques" (hauteur assez courte (1m), productivité moyenne). La préparation du sol fut très simple : labour; herse rotative et semis. La culture a bénéficié d'un léger apport d'azote (amonitrate) quelques jours avant le semis. Aucune fumure organique ou fumure de fond n'a été apportée.

Le semis a été effectué avec trois semaines de retard (le 19 mars 1993), ce qui a eut d'importantes conséquences sur la dynamique de développement de la culture. La densité de semis a également eut un impact sur la structure et le développement du couvert : 220 Kg / ha, soit environ 500 grains / m², avec un écartement entre les rangs de 17 cm (170 grains par mètre linéaire sur un rang). L'objectif était de compenser le retard de semis par une forte densité pour s'assurer d'un taux de couverture élevé.

5.1.2 - Caractérisation des principaux stades du cycle de végétation

Le cycle de développement du blé a été raccourci compte tenu du retard au semis. Mis à part un parasitage important dans la deuxième quinzaine du mois de Mai qui décima les feuilles des strates inférieures (niveau d'insertions 1,2 et parfois 3), le développement du couvert fut "normal" mais il peut néanmoins être caractérisé par deux aspects notables : une densité de pieds / m² élevée et un tallage très faible.

Ces caractéristiques ont eut de nombreux effets, sur la physiologie et l'organisation spatiale des diffuseurs dans le couvert, effets qui sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau synoptique des stades de développement du blé
Expérimentation "PORTOS 1993"**

Stade (Jonard-Vincent)	Date (DoY)	Caractérisation (Observations au champ et en laboratoire)
Semis	78	semis avec 3 semaines de retard densité : 220 Kg / ha soit \approx 500 grains / m ² problèmes de contiguïté à envisager : 170 p / m
Levée	95 - 100	levée hétérogène (humidité et tassement du sol) : plus précoce près de la haie et des rails plus tardive au centre de la parcelle
3 Feuilles	110 - 115	densité de pieds / m ² : 410 20 % de perte à la levée homogénéisation du taux de couverture des rangs
A Tallage	115 - 130	tallage très faible : 1,5 talles / pieds pas de talle herbacé : 1 épis / tige courte période de tallage (15 jours) densité finale : 610 tiges / m ² (210 tiges / m / rang)
B Redressement	130 - 135	déjà amorcé en cours de tallage pas de période déterminée : phase "sacrifiée" non visible à cause de la contiguïté des tiges amorce de gonflement pour certains pieds
C Gonflement	135 - 145	montaison extrêmement rapide (10 jours) développement de la 4ème feuille augmentation très marquée du volume apparent du dernier entre noeud
E Epiaison	145 - 150	bonne synchronisation de l'émergence des épis taille moyenne des épis (sans barbe) : 14 cm nombre moyen de grains / épis : \approx 50 montée de certains épis au dessus des feuilles
F Floraison	152 - 155	phase simultanée à la montée des épis développement rapide de la 5ème feuille
M Maturité grains	180	l'ensemble du couvert est desséché les épis ont un port "penché" certains grains ont "avorté" victimes d'un léger échaudage

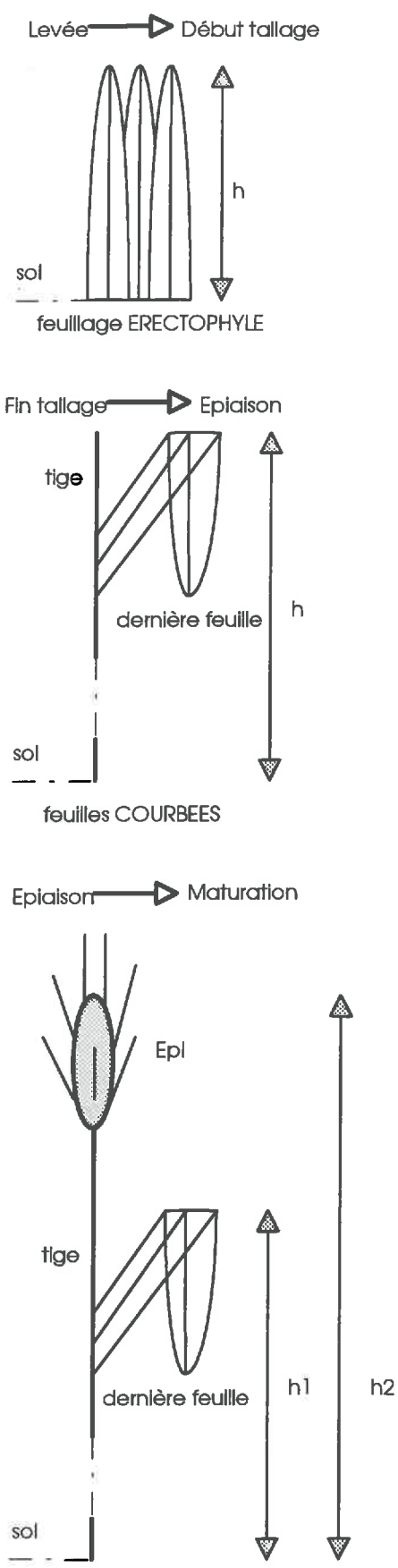


Figure 2.5 : illustrations des cotes utilisées pour les mesures de hauteur de couvert in situ

5.2 - Protocoles de mesure

Les mesures de caractérisation du couvert végétal se sont déroulées d'Avril à Juillet (DoY 90 à DoY 190). Les observations et les mesures ont essentiellement porté sur l'aspect extérieur et la géométrie structurale du couvert, ainsi que sur les dimensions, l'orientation et la teneur en eau des différents organes du blé. Les observations au champ et les prélèvements d'échantillons se déroulaient généralement le matin (8 - 9H TU), et les mesures en laboratoire étaient effectuées l'après-midi. Après analyse, on s'aperçoit que ce type de planning peut présenter quelques inconvénients, notamment en ce qui concerne l'estimation de l'humidité des feuilles, et de façon générale on peut affirmer que les paramètres observés en laboratoire biaisent quelque peu la "réalité du terrain" à cause du dessèchement inévitable des échantillons pendant la durée, souvent longue, des mesures.

5.2.1 - Les mesures au champ

Chaque visite sur la parcelle comprenait trois types d'opération :

- **L'observation générale du couvert a l'oeil nu**, afin de noter les stades de développement de la culture, d'estimer l'état phytosanitaire global de la parcelle, et de repérer d'éventuelles zones "claires" (carences, maladies, verse...), qui auraient pu altérer l'homogénéité du signal émis en laissant apparaître le sol. Ce type d'observation était tri-hebdomadaire.

- **La mesure de la hauteur totale du couvert**. Cette mesure était également effectuée trois fois par semaine. Chaque estimation comprenait une série de 50 mesures choisies de façon totalement aléatoire sur la parcelle, en prenant soin toutefois de ne pas tenir compte des effets de bordure (mesures effectuées à 2 mètres minimum du bord). En période végétative, la valeur notée correspondait à la hauteur maximum des feuilles supérieures de la plante, d'abord érectophyles (pointes des feuilles), puis courbées (sommet de l'angle de courbure). En période de maturation, l'opérateur notait la hauteur de la strate foliaire et la hauteur des épis. Cette dernière mesure fut assez approximative car la variabilité de hauteur des épis est beaucoup plus importante que celle des feuilles qui sont beaucoup plus couvrantes et homogénéisent l'interface végétation-atmosphère (Fig.2.5). L'évolution de la hauteur du couvert est présentée en annexe n° 1.

- **Le prélèvement d'échantillon pour l'analyse en laboratoire**. Celui-ci s'effectuait deux fois par semaine, suivant une routine bien déterminée pour les semis en ligne (Oliosio 1992), qui consiste à récolter trois échantillons de deux rangs de blé sur 1 mètre linéaire. Ce type d'échantillonnage est bien adapté à l'étude d'une culture au champ puisqu'il permet d'estimer le peuplement et d'extrapoler les résultats des mesures en laboratoire suivant la formule :

$$\text{Nombre de plante / m}^2 = (\text{Nombre total sur } 6 \times 1 \text{ m}) / (6 \times \text{l'inter-rang})$$

(voir " évolution de la densité de tiges / m² " annexe n° 2)

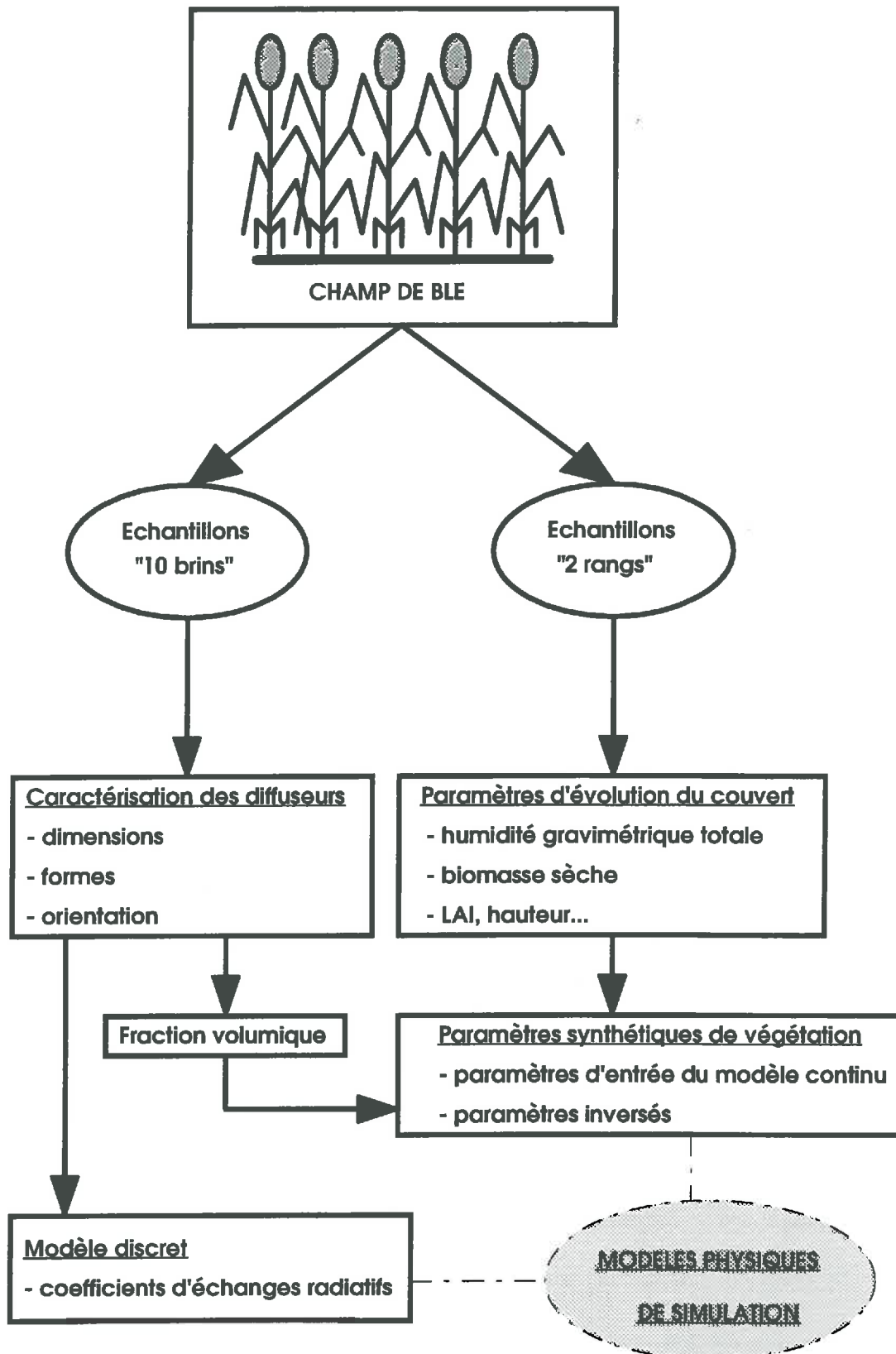


Figure 2.6 : architecture générale de la chaîne de traitement des données biologiques acquises en laboratoire pour chaque type d'échantillon.

5.2.2 - Les mesures en laboratoire

On distinguait deux types de mesures : celles pratiquées sur les échantillons de deux rangs pour estimer les paramètres de biomasse, de LAI, et de teneur en eau, et celles effectuées sur des sous-échantillons de 10 brins. Ces dernières étaient principalement axées sur la mesure des dimensions des différents organes du blé (feuilles, tiges, épis) - (Fig. 2.6).

5.2.2.1 - L'exploitation des échantillons "2 rangs"

Deux fois par semaine, ces échantillons étaient pesés, puis effeuillés en différenciant les feuilles vertes des feuilles sénescentes. Les feuilles vertes étaient ensuite passées dans un planimètre optique de type LI-COR (résolution 1 mm²), puis pesées et placées à l'étuve (80°C pendant 48H). Les tiges, les feuilles jaunes et les épis étaient également pesés et placés à l'étuve.

Les mesures effectuées sur ces échantillons ont permis d'obtenir :

- le Leaf Area Index (LAI), exprimé en m²/m²
- la biomasse fraîche (Bf), exprimée en g/m²
- la biomasse sèche (Bs), exprimée en g/m²
- la teneur en eau gravimétrique ($Mg = Bs / Bf$), exprimée en % ou en Kg/Kg
- l'humidité pondérale ($Hp = Bf / Bs$), exprimée en %

(voir annexe n° 3 sur " l'évolution des paramètres de végétation du couvert ")

5.2.2.2 - L'exploitation des sous-échantillons "10 brins" (Structure fine du couvert)

Une fois par semaine, ces sous échantillons étaient pesés, effeuillés puis mesurés. Les mesures ont porté sur la longueur, la largeur et l'épaisseur des feuilles suivant leur rang d'insertion et leur état de sénescence. Notons que seul le limbe de la feuille a été mesuré car la gaine foliaire a volontairement été laissée sur la tige, et considérée comme partie intégrante de celle-ci (épaisseur comprise). Les tiges ont également été mesurées sur leur longueur, leur diamètre apparent, et après l'épiaison, sur la taille du creux situé dans les entre-noeuds. Toutes ces données ont été acquises grâce à un micromètre digital (10⁻³ mm) de type SONY - MICROMATE.

Les mesures effectuées sur ces sous-échantillons ont permis d'obtenir :

- la largeur maximum des feuilles, exprimée en m
- la longueur totale des feuilles, exprimée en m
- l'épaisseur des feuilles, exprimée en m
- la longueur totale des tiges, exprimée en m
- le diamètre apparent maximum des tiges (+ gaine), exprimé en m
- la hauteur de grain dans les épis, exprimée en m
- la section moyenne des épis, exprimée en m

(voir annexe n° 4 sur " l'évolution des dimensions des diffuseurs végétaux ")

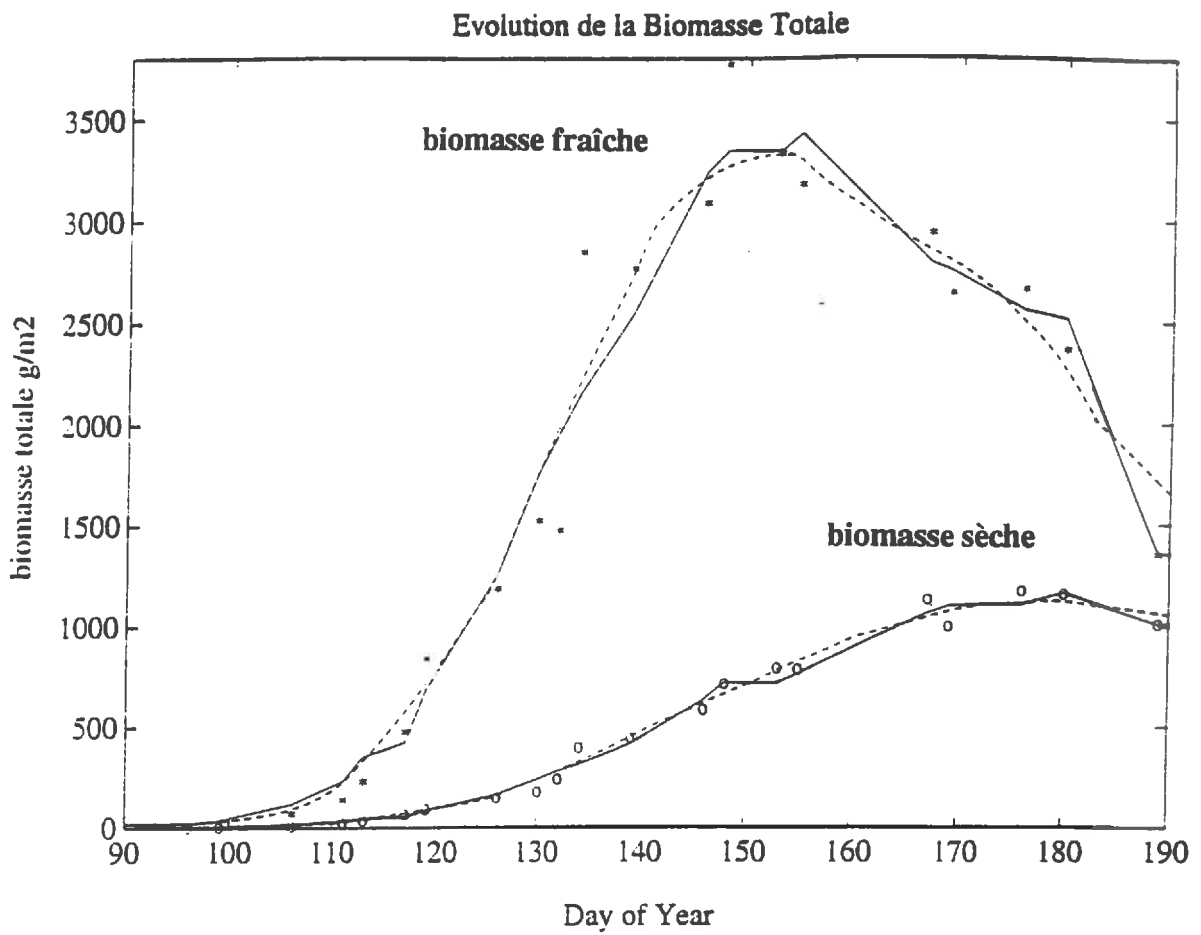


Figure 2.7 : évolution temporelle de la biomasse totale du blé au cours de l'expérimentation "PORTOS 1993"

5.3 - Biomasse et teneur en eau du couvert

La biomasse et la teneur en eau du couvert ont régulièrement été estimés en laboratoire au cours des trois mois de l'expérimentation.

5.3.1 - Evolution de la biomasse au cours du cycle

Les mesures de biomasse, et principalement de production de matière sèche sont de très bons indicateurs de l'état de développement du couvert. La figure 2.7 montre l'évolution de cette biomasse tout au long du cycle de végétation. On observe très nettement la phase végétative, marquée par une augmentation de la biomasse fraîche / m² jusqu'à la montée des épis, suivie d'une phase de dessèchement de la plante qui correspond au remplissage des grains. La production de matière sèche reste régulière tout au long du cycle pour atteindre un maximum de 1,1 Kg / m² à la maturité. La part respective des tiges, des feuilles et des épis dans la biomasse sèche totale en pleine végétation (DoY 140) est d'environ 50%, 40% et 10%, alors qu'à la maturité (DoY 180), ces proportions deviennent 45%, 15% et 40%. Ces résultats illustrent bien la fonction spécifique de chaque organe dans le cycle biologique du blé.

Interprétation de l'évolution de biomasse de chaque organe

Les tiges doivent assurer un rôle de maintien de la plante, et de transport de l'eau et des assimilats. L'évolution de la biomasse des tiges est très bien corrélée à celle de la plante entière car cet organe représente près de 50% du poids total du blé, ce qui montre l'importance des tiges dans la modélisation géométrique du couvert en phase végétative. On notera cependant que cette biomasse atteint son maximum au jour 160 ce qui correspond à la lignification des vaisseaux après la montée des épis, alors que la biomasse totale continue d'augmenter jusqu'au jour 180 : c'est le remplissage des grains. A partir du jour 160, les tiges perdent leur fonction biologique pour ne garder qu'une fonction de support végétal et leur importance structurelle s'atténue au profit de l'apparition des épis.

Les feuilles ont un rôle essentiel en phase végétative : site de la photosynthèse et de la production de matière sèche (amidon). En revanche, elles disparaissent presque totalement après la montée des épis : exportation des réserves carbonées vers les grains, et dessèchement. Nous nous intéresserons principalement aux feuilles vertes, car les feuilles sèches n'ont aucune importance structurelle ou biologique, bien qu'elles soient présentes dans la fraction volumique de végétation en fin de cycle. En terme de poids et d'humidité, les feuilles de blé sont proportionnellement moins importantes que les tiges, mais contrairement à ces dernières, leur dimension, leur surface et leur orientation sont beaucoup plus variables dans le temps ce qui en fait un élément clé dans la modélisation spatiale du couvert. Nous pouvons d'ailleurs paramétriser le "Leaf Area Index" par la biomasse sèche totale afin d'estimer le taux de couverture du feuillage par inversion (cf. 5.4).

Les épis ont un rôle éphémère, mais biologiquement et structurellement très important. Le gonflement s'est produit aux alentours du jour 140, qui marque la prise en compte des épis dans la morphologie du couvert. En cinq semaines, les épis passent de 10% à 40% de la biomasse sèche totale. Ceci correspond à une augmentation de taille, et surtout de poids, des grains qui stockent toutes les réserves formées dans les feuilles, d'abord hydratées puis peu à peu desséchées. Dans cette étude, les épis ont été considérés dans leur entier (sauf la barbe). Les résultats intègrent donc la croissance et la maturation des grains avec le dessèchement des enveloppes (glumes et glumelles).

5.3.2 - L'eau dans la plante

Dans le cadre de notre étude, deux grandeurs principales permettent de caractériser l'état hydrique de la plante que l'on désire relier à la permittivité du couvert végétal : l'humidité pondérale (H_p) et l'humidité gravimétrique (M_g).

L'**humidité pondérale** est le rapport de la masse d'eau P_e d'un échantillon et de sa masse sèche P_s , tel que :

$$H_p = \frac{P_e}{P_s} \quad \text{en Kg/Kg (ou en \%)}$$

On peut également calculer l'**humidité gravimétrique (M_g)** qui est le rapport du poids d'eau sur le poids total de l'échantillon, tel que :

$$M_g = \frac{P_e}{P_s + P_e} \quad \text{en Kg/Kg (ou en \%)}$$

M_g et H_p sont reliés par la relation simple : $M_g = \frac{H_p}{H_p + 1}$

A partir de l'humidité gravimétrique on peut définir l'humidité volumique M_v qui paramétrise quantitativement l'eau dans la plante, et peut s'exprimer simplement en fonction M_g selon :

$$M_v = M_g \rho_{ms} / [1 - M_g (1 - \rho_{ms})]$$

où ρ_{ms} est la densité de matière sèche de la végétation (g / cm^3).

Contrairement à H_p et M_g qui expriment la proportion d'eau dans le poids de la plante, M_v représente la quantité d'eau contenue dans le végétal en terme de volume. L'humidité volumique est le paramètre utilisé pour les calculs de permittivité diélectrique de "mélange", qui se fonde sur la fraction volumique des différents composants du milieu. La relation qui lie M_v et M_g est appelée le *shrinking model* (Ulaby et El-Reyes, 1987). Elle pose comme hypothèse que les variations de volume dans l'échantillon de végétation sont équivalentes aux variations de volume d'eau, ce qui est une bonne approximation si l'on se place sur une courte période (pour négliger l'augmentation de volume de matière sèche).

La densité de matière sèche de la végétation est le rapport masse / volume de matière sèche. Les techniques de mesure du volume d'un échantillon sec sont imprécises et très peu de travaux font état d'estimation de ρ_{ms} . Les estimations de volume des organes du blé, décrites au paragraphe 5.5, ont permis d'obtenir la valeur moyenne de 0.28 g.cm^{-3} (annexe n° 5). Cette valeur est cohérente avec l'estimation de 0.33 g.cm^{-3} , calculée pour un couvert de maïs (Ulaby-Reyes, 1987), qui est généralement utilisée par défaut dans la plupart des modèles de permittivité de la végétation (Mougins, 1989).

Intérêt de la teneur en eau pour estimer la permittivité diélectrique du végétal :

La teneur en eau volumique est prépondérante dans l'étude de l'émissivité d'un couvert puisqu'elle conditionne les fluctuations de la permittivité diélectrique de la matière végétale. Généralement, la végétation est modélisée par un milieu hôte constitué du tissu végétal contenant des inclusions d'eau et d'air (vaisseaux des tiges, parenchyme des feuilles). Un exemple à trois composantes est appelée modèle "réfractif", et peut s'écrire :

$$(\epsilon_v)^{1/2} = (1 - M_v)(\epsilon_b)^{1/2} + M_v(\epsilon_w)^{1/2}$$

où M_v désigne la fraction volumique de l'eau dans l'échantillon de matière végétale, ϵ_v , ϵ_w , ϵ_b sont respectivement les constantes diélectriques relatives de l'échantillon, de l'eau, et du tissu végétal.

Dans cette approche il faut distinguer le tissu végétal résiduel, l'eau libre, et un composant tissu végétal-eau liée. En effet la molécule d'eau est assimilable à un dipôle électrique qui s'oriente parallèlement au champ électrique de l'onde E.M.. Selon que la molécule d'eau est plus ou moins liée au tissu végétal par des forces physiques ou chimiques, elle suivra plus ou moins rapidement les fluctuations spatio-temporelles du champ de l'onde. Ce comportement détermine l'émissivité du végétal. Une telle approche a été reprise par Ulaby et El-Reyes (1987) dans la gamme 0.2 - 20 GHz. Plus récemment, les travaux de Mätzler et Sume (1989), après avoir permis de vérifier que le modèle de Ulaby n'était valide que pour des fréquences inférieures à 20 GHz, proposent une formulation empirique utilisable sur un domaine de fréquence très étendu (jusqu'à 90 GHz).

5.4 - Notions de surfaces et d'indices foliaires

La surface foliaire dépend de la forme et des dimensions de la feuille. Elle évolue simultanément à la croissance du végétal, et varie suivant le niveau d'insertion de la feuille considérée. Pour simplifier ce problème et pouvoir raisonner en strate homogène, nous avons considéré une feuille dite "moyenne" qui représente un compromis entre toutes les feuilles présentes sur la tige du végétal (pour un état physiologique donné : feuille verte / feuille fanée). Les dimensions caractéristiques de cette feuille moyenne sont obtenues à partir d'un échantillon de feuilles prélevées au champ et mesurées en laboratoire ($n > 100$). On calcule simplement la surface foliaire à partir des dimensions moyennes d'une feuille de blé, à savoir la longueur L et la plus grande largeur l_{max} .

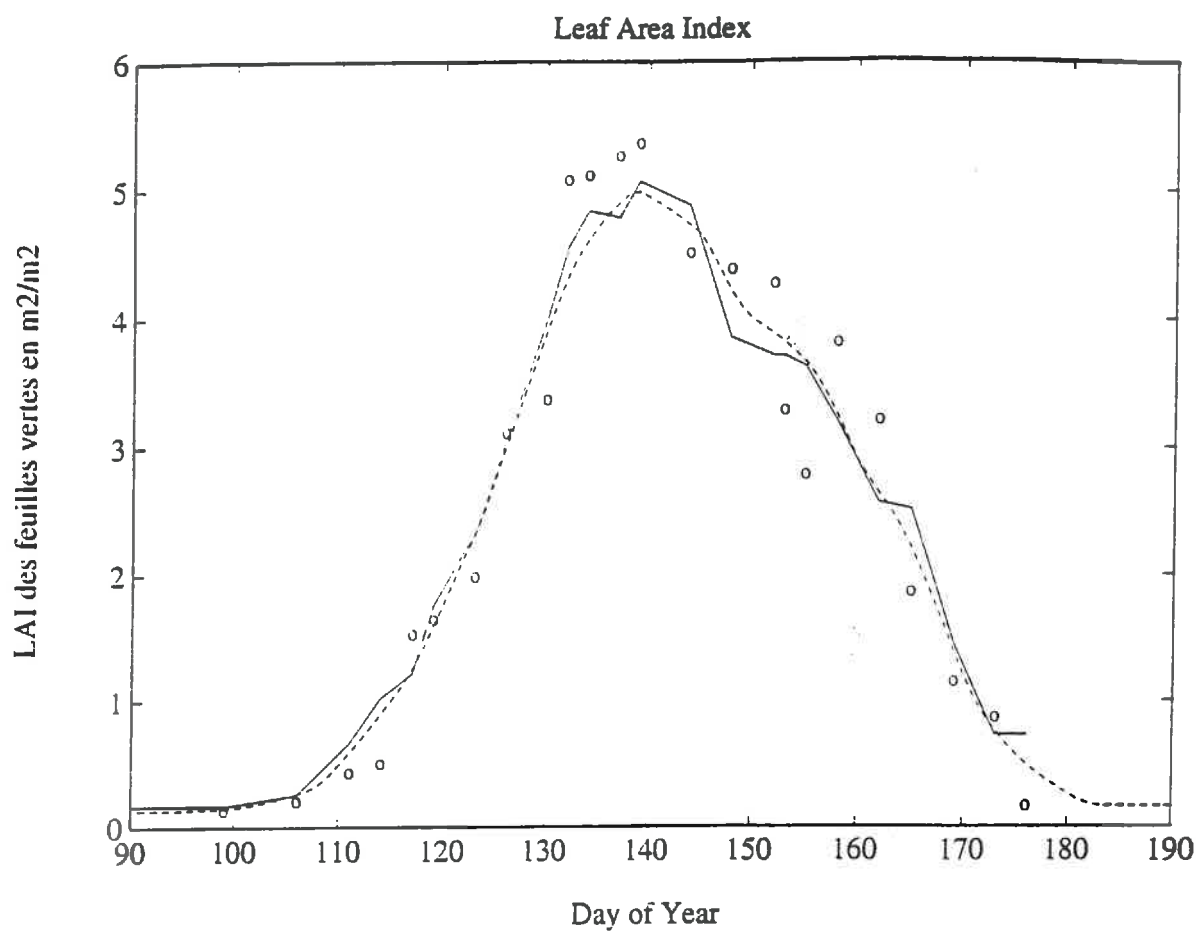


Figure 2.8 : évolution du LAI au cours du cycle de végétation (PORTOS 1993)

$S = \alpha \cdot L \cdot l_{\max}$ où L est la longueur de la feuille et l_{\max} la plus grande largeur
avec $\alpha = 0.66$ pour le blé dur
("Crop structure and light microclimate", p 148).

Des mesures plus précises ont permis de trouver une relation adimensionnelle entre la largeur et la longueur de la feuille de blé qui permet également de calculer la surface foliaire par intégration polynomiale (cf. 5.5.1)

5.4.1 - Le "Green Leaf Area Index"

Le GLAI se définit comme la surface foliaire totale des feuilles vertes développée par mètre carré de surface au sol (m^2/m^2). Pour simplifier, nous utiliserons le terme courant de LAI pour nommer implicitement le GLAI, en gardant à l'esprit que seules les feuilles vertes sont prises en compte.

Hormis les aspects photosynthétiques précédemment évoqués qui ne seront pas abordés dans cette étude, le LAI est directement lié au taux de recouvrement et à l'architecture spatiale qui sont déterminants dans les aspects de transferts radiatifs au sein du couvert. En effet, la disposition spatiale et la surface d'interception des feuilles influent directement sur "l'opacité" de la strate végétale en terme de coefficient d'extinction (K_e), de diffusion (K_s) et d'absorption (K_a).

Le LAI est directement mesuré en laboratoire par planimétrie. L'évolution du LAI au cours du cycle de mesure est présentée dans la figure 2.8. On observe que le recouvrement maximum ($5 m^2/m^2$) se situe aux alentours du jour 140 (début épiaison). Cette courbe permet ainsi de différencier très nettement la phase végétative de la phase de fructification et de maturation.

5.4.2 - Le "Specific Green Leaf Area"

Le SGLA, ou plus simplement le SLA, exprime le lien qui existe entre la production de matière sèche et le développement de la plante. Il se définit comme la surface foliaire exprimée par unité de poids sec de feuilles vertes (m^2/g) (il est indépendant des notions d'encombrement spatial). En utilisant le poids sec, nous nous assurons de l'indépendance de ce caractère vis à vis des variations d'humidité, mais il faut néanmoins porter attention à l'heure des mesures qui peut avoir une influence sur la répartition des assimilats dans les feuilles et faire varier le poids (H. Sinoquet, B. Andrieu, 1993). Utilisé sur un couvert agricole, le SLA pourrait être un bon indicateur de l'activité photosynthétique de la culture en fonction de son stade phénologique (le SLA est un des principaux paramètres des modèles de croissance; F.W.T. Penning de Vries, D.M. Jansen, H.F.M. Ten Berge et A. Bakema (1989)), et serait sans doute utile dans une dynamique globale de prévision de rendements à grande échelle.

5.4.3 - Les indices de végétation en télédétection : intérêt des micro-ondes

En règle générale, la sensibilité de la température de brillance aux paramètres de végétation est assez faible, au contraire des mesures de réflectance utilisées pour les petites longueurs d'ondes. C'est pourquoi des observations précises et des modèles adaptés sont nécessaires pour extraire les paramètres géophysiques des

données radiométriques hyperfréquences. Les résultats les plus significatifs ont été obtenus en 1991 à l'aide de sondeurs opérant dans les bandes 10 et 36 GHz. Ces données ont été traitées à l'aide d'un modèle de simulation continu qui considérait la végétation comme une succession de strates homogènes en terme d'absorption et de diffusion. Il a été montré que des observations simultanées à 10 et 36 GHz, en polarisation H et V, étaient très utiles pour différencier certains types de couverts et estimer les conditions d'humidité de surface, particulièrement si ces observations étaient couplées à des mesures dans l'infrarouge thermique - (S. Paloscia et P. Pampaloni, 1992). Plus précisément, il semblerait que la différence de température normalisée (δT_n) entre les températures de brillance à 36 et 10 GHz, et l'index de polarisation à 10 GHz (PI), sont fonction de la biomasse et peuvent être reliés au LAI de certaines cultures. Cet aspect, encore en cours d'études, pourrait à l'avenir permettre de compléter les méthodes de détection de culture par image satellitaire qui jusqu'à présent était subordonné à l'emploi des petites longueurs d'ondes.

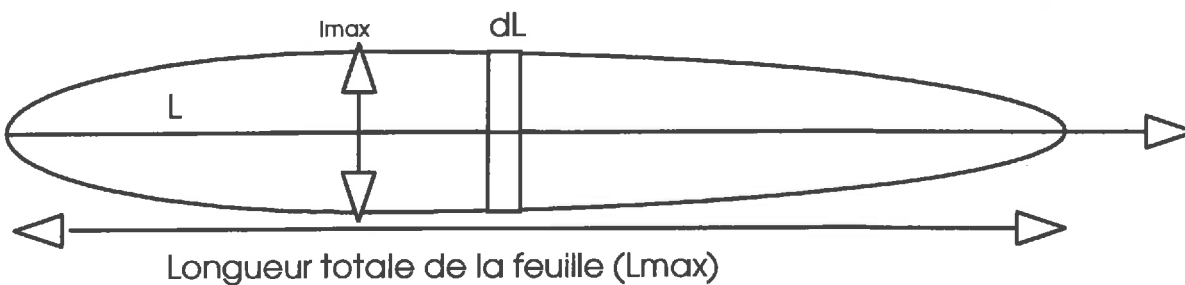
5.5 - Calcul des fractions volumiques de végétation

La fraction volumique de végétation ($Fracv, m^3/m^3$) est un des principaux paramètres d'entrée du modèle continu de simulation de température de brillance. Elle se définit comme le volume total d'éléments végétaux par unité de volume (m^3) dans une strate considérée (hauteur totale du couvert, strate de feuille, d'épis...). Ce paramètre intervient dans le calcul de la permittivité du couvert végétal qui se compose d'un milieu hôte, l'air, et d'inclusions d'éléments végétaux dispersés et orientés aléatoirement en première approximation (cf. 5.6.1). Pour calculer la fraction volumique de végétation, il faut avant tout estimer le volume moyen de chaque organe végétal. Les paragraphes suivants synthétisent l'ensemble des résultats concernant la caractérisation structurelle des organes du blé dur.

5.5.1 - Le volume foliaire

la démarche a consisté à trouver des régressions polynomiales liant la largeur et l'épaisseur à la longueur de la feuille, de façon à pouvoir calculer le volume foliaire par intégration. Nous avons négligé la nervure centrale des feuilles qui représente moins de 3% du volume foliaire en première approximation.

- Calcul de la surface foliaire par intégration



Sur ce principe on peut calculer la surface foliaire tel que : $S = \int_0^{L_{max}} l \cdot dL$

Il existe une relation adimensionnelle qui relie la largeur de la feuille de blé à la longueur. Cette relation est une fonction parabolique du second degré, dont l'illustration graphique est présentée en annexe n° 6.

$$\frac{l}{l_{\max}}(L) = -2.13494 \left(\frac{L^2}{L_{\max}^2} \right) + 1.365262 \left(\frac{L}{L_{\max}} \right) + 0.757307$$

La surface foliaire peut alors s'exprimer en fonction de la longueur totale et de la largeur maximum de la feuille, tel que :

$$S = l_{\max} \int_0^1 \left[-2.13494 \left(\frac{L^2}{L_{\max}^2} \right) + 1.365262 \left(\frac{L}{L_{\max}} \right) + 0.757307 \right] . d \left(\frac{L}{L_{\max}} \right)$$

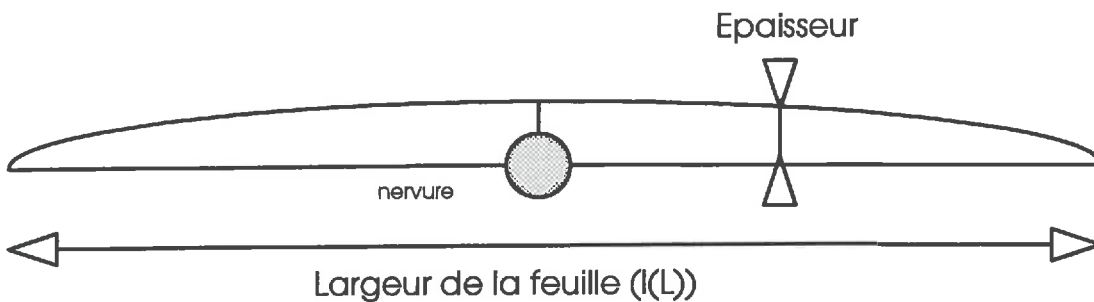
ou, plus simplement

$$S = 0.73 . l_{\max} . L_{\max}$$

Ce résultat est cohérent avec la formule empirique établie par Lazarov en 1965, qui donnait un coefficient de 0.65 pour le calcul de la surface en fonction de la largeur et de la longueur (8% d'écart entre la méthode par intégration et la méthode de régression).

- Calcul du volume foliaire par intégration

COUPE TRANSVERSALE DE FEUILLE DE BLE DUR



L'épaisseur est mesurée au milieu du limbe foliaire de façon à limiter les effets de bordure et de lignification de la nervure centrale. Tout comme pour la largeur, il existe une relation adimensionnelle entre l'épaisseur d'une feuille de blé et sa longueur. Deux séries de mesures en pleine végétation et en fin de maturation ont permis de décrire l'évolution de l'épaisseur du limbe en condition normale de turgescence et en condition desséchée. Ces résultats sont illustrés en annexe n° 7.

En condition normale de turgescence : $e(L) = -0.54524(L) + 0.932761$

En condition desséchée : $e(L) = -0.51119(L) + 0.90932$

Suivant ces résultats, nous pouvons exprimer le volume foliaire en fonction de la longueur, de la largeur maximum et de l'épaisseur maximum tel que :

$$V = \int_0^{L_{\max}} l \cdot e \cdot dL$$

ou plus simplement (en condition normale de turgescence)

$$V = 0.516 \cdot l_{\max} \cdot L_{\max} \cdot e_{\max}$$

Après intégration sur la longueur moyenne des feuilles échantillonnées tout au long du cycle de mesure nous obtenons l'évolution du volume foliaire sur cette même période. Il suffit ensuite de multiplier ce volume unitaire par le nombre moyen de feuilles au mètre carré pour obtenir le volume foliaire total par unité de surface (m²). La fraction volumique des feuilles sera le rapport de ce volume total sur la hauteur de strate étudiée. Dans le cas de notre étude nous avons pris la hauteur totale du couvert, mais l'on pourrait également envisager des simulations calculées uniquement sur la strate feuillue.

5.5.2 - Le volume des tiges

La morphologie des tiges en phase végétative est très différentes de celle observée en phase de fructification et de maturation. Le calcul du volume des tiges doit être adapté à chacun de ces stades physiologiques.

- volume des tiges en période végétative

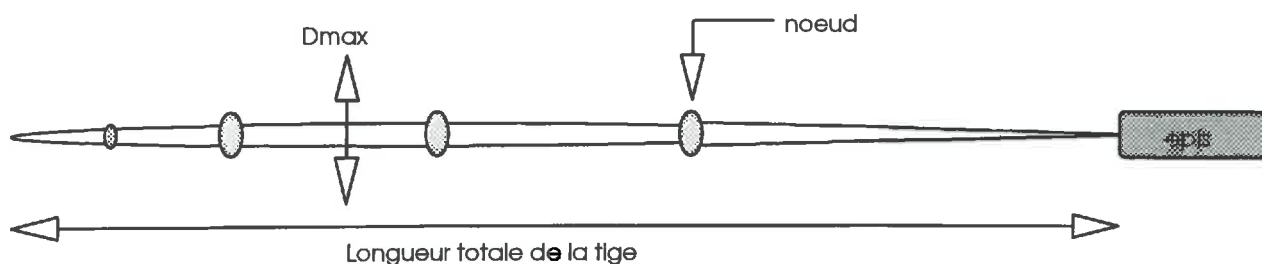
Durant les mois d'Avril et Mai, les mesures en laboratoire n'ont pas permis de mettre en évidence des variations significatives du diamètre apparent le long d'une tige. Les tiges sont pleines (vaisseaux plus ou moins lignifiés), et les noeuds ne sont pas encore très marqués. Pendant la période végétative, tant que le dernier entre noeud n'est pas apparu, le cylindre semble être la meilleure approximation du volume des tiges.

$$V = \int_0^{L_{\max}} \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} \right) \cdot dL \quad \text{où } D \text{ est le diamètre apparent}$$

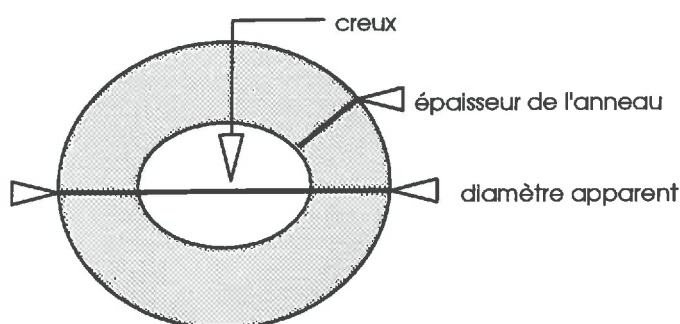
- Volume des tiges en période de maturation

L'émergence des épis et l'élongation du dernier entre noeud marque le début de la transformation morphologique des tiges de blé (jour 150). Les noeuds s'épaississent, les entre noeuds se lignifient, se rétractent (déshydratation), et les vaisseaux ligneux dégénèrent pour laisser place à des creux. Le volume des tiges ne peut plus être estimé par un cylindre, par contre l'anneau semble être la meilleure approximation.

Morphologie d'une tige de blé après épiaison



COUPE TRANSVERSALE D'UN ENTRE-NOEUD



Des mesures précises au micromètre ont permis d'établir une relation entre le diamètre apparent des tiges et leur longueur (annexe n° 8). Ces mesures nous ont permis de déterminer avec précision l'emplacement sur la tige où l'on observe un diamètre maximum : dans le deuxième tiers du troisième entre-noeud.

Dans un deuxième temps nous avons obtenu le volume exact des tiges en sommant les volumes d'anneaux calculés tous les 4 cm sur lesquels le diamètre apparent et l'épaisseur de l'anneau étaient supposés constants. Puis nous avons introduit un coefficient correcteur pour prendre en compte le volume des noeuds, assimilés à des cylindres pleins. Le résultat a permis d'obtenir une relation linéaire liant le volume réel des tiges à la longueur fois le diamètre apparent maximum au carré ($L \cdot D_{\max}^2$), (annexe n° 9). Ces deux derniers paramètres ayant été mesurés tout au long de la campagne de mesure, il fut aisé d'estimer le volume des tiges au cours de cette période.

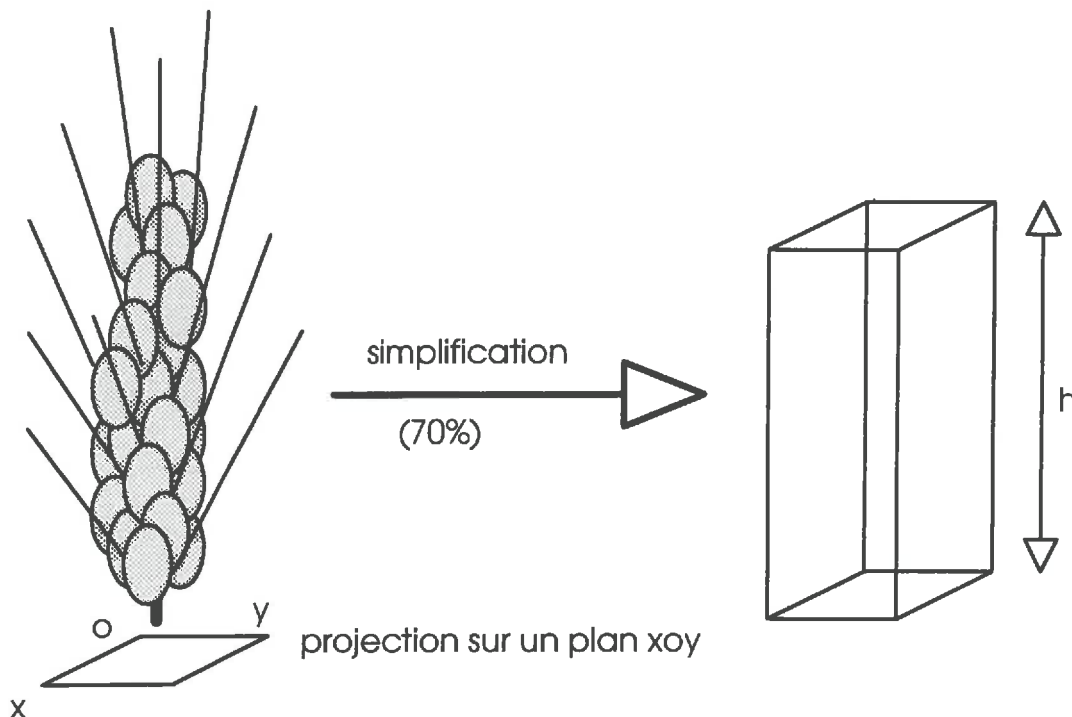
$$V(L \cdot D_{\max}^2) = 0.220693(L \cdot D_{\max}^2) + 5.348841 \quad (\text{en cm}^3)$$

On obtient la fraction volumique des tiges suivant le même principe que celui décrit pour les feuilles.

Rq : on peut également calculer le volume apparent des tiges sans tenir compte des creux situés dans les entre-noeuds. Ce volume apparent est très supérieur au volume réel calculé (4 fois plus élevé), mais les travaux réalisés jusqu'à présent sur la caractérisation morphologique du blé pour la modélisation de l'émission hyperfréquence d'une culture ne tiennent pas compte des creux. Il pourrait être intéressant de comparer ultérieurement l'influence de la variation de volume des tiges sur les simulations de l'émission micro-onde d'un couvert de blé.

5.5.3 - Le volume des épis

La forme très complexe des épis de blé n'a pas permis de calculer leur volume de façon mathématique. N'ayant pas eut le temps de mettre en place un protocole de mesures par immersion, nous avons du recourir à une simplification grossière qui consiste à considérer l'épi comme un parallélépipède de base cubique et de hauteur h . Pour cela nous avons relevé la section apparente de l'épi, que nous avons arbitrairement diminué de 30% pour corriger les vides existants entre les glumes. Cette approximation parallélépipédique nous a paru valable dans la mesure où les grains de blé sont alignés de façon alternées sur deux génératrices régulières, et que la projection verticale de l'épi dans un plan xoy "s'apparente" à un carré.



Des mesures régulières de hauteur de grains et de section de l'épis ont permis d'estimer le volume apparent des épis tout au long de la campagne.

L'annexe n°10 présente l'évolution temporelle de la fraction volumique de végétation de tous les éléments du couvert de blé.

5.6 - Propriétés diélectriques du couvert de blé

La permittivité moyenne d'un couvert intervient à deux niveaux dans la modélisation. Elle est directement reliée à l'absorption au sein du couvert, mais elle intervient également dans la prise en compte des phénomènes de réfraction aux interfaces entre le couvert et les deux milieux contigus sol - atmosphère. Il est possible d'estimer directement cette permittivité à partir de formules développées pour milieu hétérogènes (Tsang et Kong, 1981). La formule de Polder-Van en particulier, reprise par Ulaby (1981), permet de modéliser la permittivité d'un milieu hôte (l'air) contenant des inclusions de végétation ellipsoïdales ou discoïdales

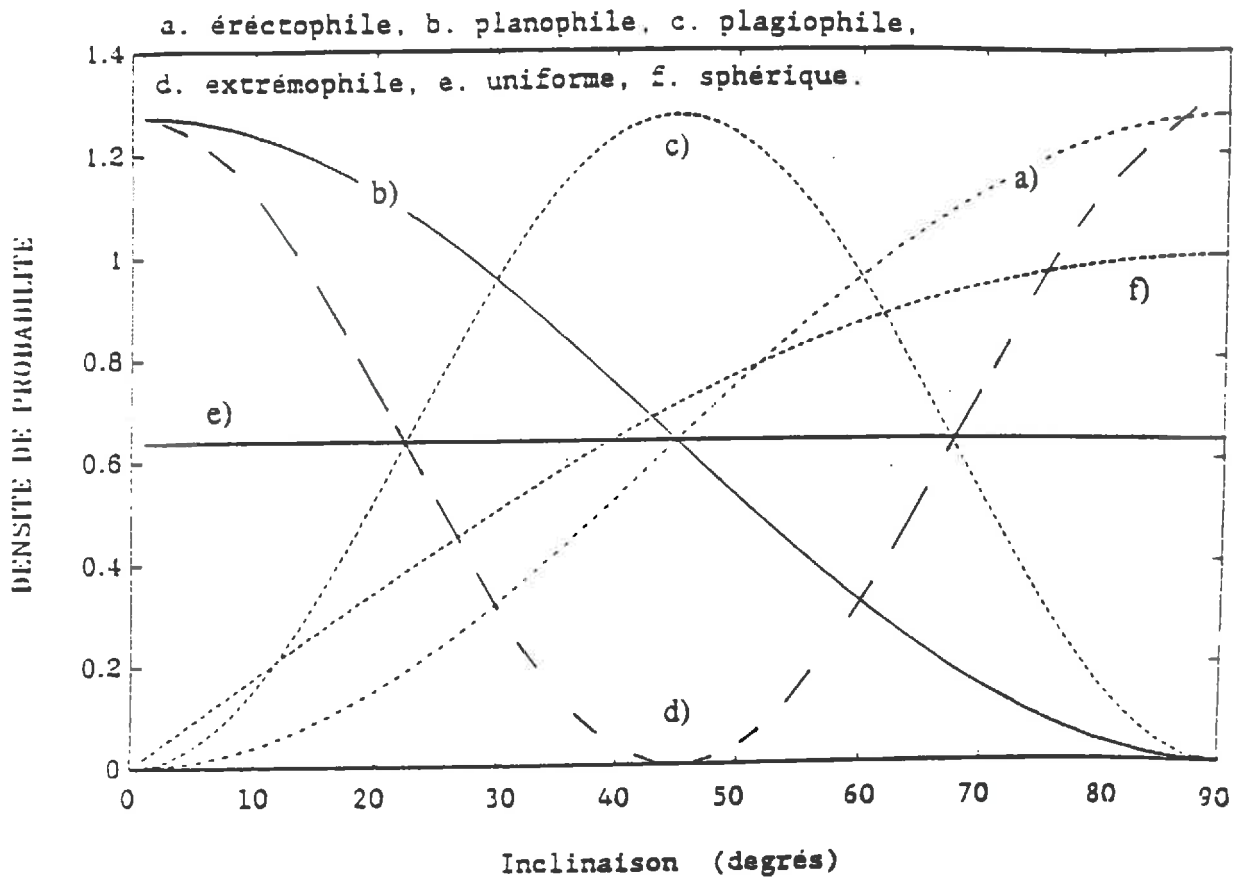


Figure 2.9 : différents types de fonction de distribution de l'inclinaison des feuilles (d'après Mougin 1989)

d'orientation aléatoire (feuille de blé par exemple). Pour ce faire, il faut convertir toutes les dimensions foliaires brutes en dimensions "équivalentes" correspondant aux dimensions des objets géométriques qui simulent les éléments du couvert. Dans le cas des feuilles de blé, nous avons utilisé une configuration en "chapelet de disques" pour la modélisation, et les tiges ont été assimilées à des cylindres pleins. Ces dimensions équivalentes sont les paramètres utilisés en entrée de la modélisation discrète permettant d'exprimer le rapport K_a/K_s . Ce type d'approche a été mis en oeuvre par Jin (1992) dans le modèle continu que nous utilisons dans cette étude.

5.7 - Orientation des éléments du couvert

Les données de structures doivent être complétées par des informations sur l'agencement dans l'espace des différents éléments du couvert. Ainsi la disposition précise d'un objet quelconque dans l'espace est paramétré par 6 variables indépendantes (classiquement 3 variables de position (x,y,z) et 3 variables angulaires (α,β,γ)). Des études récentes montrent que, d'une part les éléments du couvert sont caractérisés par des distributions d'orientation dans l'espace non uniformes qui évoluent parfois rapidement dans le temps (Kimes et Kirchner, 1983; Goel et Strebel, 1984; Ustin et al., 1991). D'autre part que, dans tous les domaines de longueurs d'onde, la nature de ces distributions joue un rôle important dans la modélisation des échanges radiatifs. Aussi, il faut sélectionner une représentation précise de la fonction de distribution de l'orientation, qui doit être à la fois simple pour permettre respectivement une validation efficace et l'inversion des paramètres de la représentation (Fig. 2.9).

Parmi les diverses formulations, Goel et Strebel (1984) proposent une représentation Béta, adaptée à des couverts caractérisés par une prédominance d'éléments verticaux (distribution érectophile). La densité de probabilité $p(\beta)$ de cette fonction ne contient qu'un seul extremum dans son domaine de représentation $[0^\circ < \beta < 90^\circ]$ pour les distributions d'inclinaison et $[0^\circ < \beta < 360^\circ]$ pour les distributions en azimut.

Dans le cas précis de la distribution d'orientation des feuilles de blé nous avons choisi une fonction de densité de probabilité $p(\beta)$ qui est définie par :

$$p(\beta) = \cos^n \left[\left[\frac{(\beta - \beta_{\max})}{(\beta_0 - \beta_{\max})} \right] \cdot \pi / 2 \right]$$

$$\beta_{\max} = 60^\circ \quad \beta_0 = 0^\circ \quad n = 1$$

Les tiges ont quant à elles un port dressé vertical tout au long du cycle de mesure. Il n'y a pas de variation significative de la distribution d'orientation au cours de la journée ni au cours du cycle de végétation. Nous considérerons donc une orientation constante à 90° par rapport au sol ($\pm 4^\circ$).

TROISIEME PARTIE : RESULTATS, ANALYSE

ESTIMATION DES PARAMETRES DE VEGETATION ET DE SOL PAR INVERSION DES DONNEES RADIOMETRIQUES HYPERFREQUENCES

L'objectif de cette troisième et dernière partie est d'étudier la précision des simulations du modèle "composite", et l'intérêt de ce modèle employé comme outil d'inversion des mesures radiométriques.

Après avoir exposé les bases théoriques sur lesquelles repose le modèle "composite", le sixième chapitre présente une étude de sensibilité aux différents paramètres du milieu (biomasse, humidité du couvert, humidité du sol), afin de pouvoir mieux interpréter les inversions qui suivront. Dans le septième chapitre nous exposerons l'algorithme d'inversion, le principe théorique et la signification des paramètres de calage utilisés. L'ajustement des longueurs de corrélation s'appuiera sur la comparaison directe des simulations du modèle avec les mesures radiométriques.

Le huitième chapitre est consacré à l'analyse des résultats d'inversion dans les basses et moyennes fréquences (1.4 et 10.65 GHz). Nous nous appliquerons à inverser les paramètres de surface canal par canal, en prenant soin de rester cohérent avec l'objectif final d'une inversion simultanée de l'ensemble des paramètres du milieu dans plusieurs bandes de fréquence.

Enfin, nous concluons sur la capacité du modèle d'inversion à estimer les paramètres de surfaces d'un champ de blé à partir des mesures radiométriques micro-ondes, et d'évoquer les perspectives d'application de l'algorithme d'inversion à l'échelle aéroportée ou satellitaire.

CHAPITRE 6

LE MODELE CONTINU "COMPOSITE"

6.1 - Fondements théoriques du modèle "composite"

Comme nous l'avons vu dans la première partie, dans l'approche continue le coefficient d'absorption K_a s'exprime généralement en fonction de la permittivité diélectrique moyenne du couvert végétal. Dans cette approche le calcul de K_a présente l'inconvénient d'être indépendant des paramètres décrivant les fluctuations diélectriques (l_z, l_p), de la polarisation de l'onde et de l'angle l'incidence de la radiation. Afin d'y remédier, on se propose d'utiliser le rapport K_a/K_s calculé par l'approche discrète.

6.1.1 - Calcul du K_a à l'aide du modèle discret

6.1.1.1 - Le rapport K_a / K_s

Dans l'approche discrète, les coefficients d'échanges radiatifs s'expriment directement en fonction du **tenseur de diffusion d'amplitude F_{pq}** , qui décrit la fraction de l'onde incidente (i), de polarisation p , diffusée par un élément végétal (repéré par les angles d'Euler α, β, γ) dans la direction (s) avec une polarisation q .

Les composantes de la matrice de phase des feuilles s'expriment généralement en fonction de la distribution de densité de probabilité d'orientation des feuilles $P_d(\alpha, \beta, \gamma)$ (azimut, inclinaison, rotation autour de l'axe foliaire) tel que :

$$(p, q') = n_0 \int_0^\pi d\alpha \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma |F_{pq}(s, i)|^2 \cdot P_d(\alpha, \beta, \gamma)$$

De cette expression on peut déduire le coefficient de diffusion K_{s_p} ($p = v, h$) :

$$K_{s_p}(i) = \int_0^\pi \sin \theta_s \cdot d\theta_s \int_0^{2\pi} d\Phi_s [(v, p') + (h, p')]$$

avec θ_s et Φ_s , l'inclinaison et l'azimut de la direction de diffusion

de la même façon, on obtient le coefficient d'absorption K_{a_p} ($p = v, h$) qui est donné par le théorème optique pour les feuilles selon :

$$K_{a_p}(i) = 4\pi / k \cdot \text{Im} \left\{ \left\langle F_{pp}(i, i) \right\rangle_{\alpha\beta\gamma} \right\}$$

où k désigne le nombre d'onde de la radiation ($k = 2\pi / \lambda$)
 $\text{Im}\{ \}$ désigne la partie imaginaire du tenseur
 $\langle \rangle_{\alpha\beta\gamma}$ désigne la moyenne sur les angles d'Euler

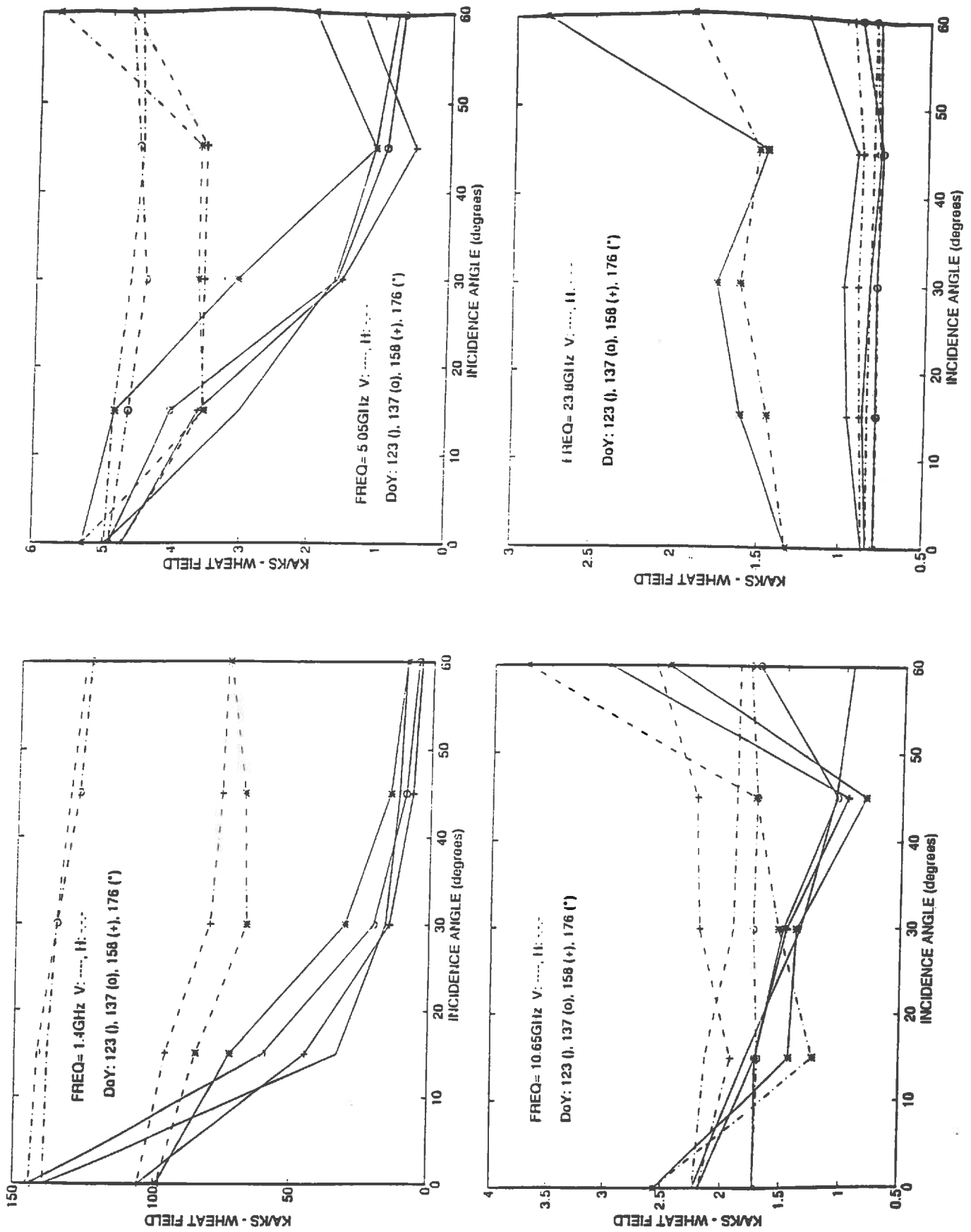


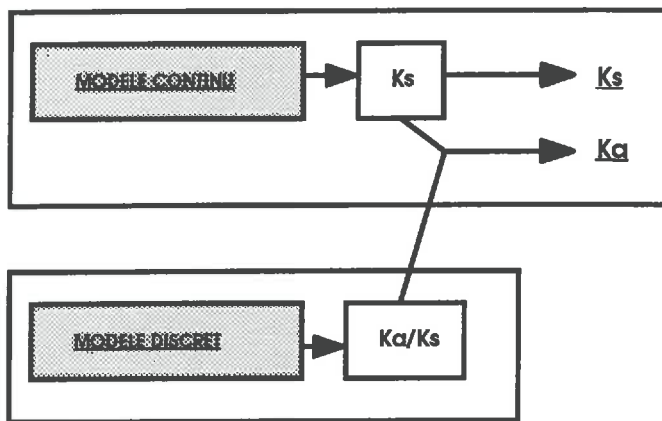
Figure 3.1 : évolution du rapport $(K_a/K_s)_p$ ($p = v, h$) calculé par le modèle discret. sensibilité à la teneur en eau du couvert et aux variations d'incidences

Après avoir pratiqué la même opération pour les tiges on peut calculer le rapport $\alpha = K_a/K_s$ du couvert. Il est donc possible de calculer à partir du modèle discret un K_a dépendant de la fréquence, de la polarisation et de l'angle d'incidence de la radiation.

6.1.1.2 - Transposition dans le modèle continu

Pour que l'estimation du K_a soit satisfaisante dans une approche de type continue, il faut que ce coefficient soit relié aux longueurs de corrélation l_z et l_p . Pour cela il suffit de multiplier le rapport K_a/K_s de l'approche discrète par le K_s calculé dans le modèle continu qui s'exprime en fonction des composantes de la matrice de phase, elle même paramétrée par les longueurs de corrélation. Ceci est admis dans la mesure où l'on considère que les deux modèles mis en oeuvre décrivent le même phénomène, et doivent en principe estimer des grandeurs identiques.

SYNTHESE DES MODIFICATIONS APPORTEES DANS LE MODELE CONTINU "COMPOSITE"



6.1.2 - Evolution et sensibilité du rapport K_a/K_s (Fig. 3.1)

Afin de faciliter l'inversion des paramètres de surface, il est souhaitable de ne conserver que les paramètres d'entrée propres au modèle continu. Cela suppose que le rapport $\alpha = K_a/K_s$ ne soit que peu sensible aux variations de structure du couvert. Pour s'assurer de cette hypothèse, nous avons procédé à une étude de sensibilité de α en fonction de l'angle d'incidence, de la fréquence et de l'âge du blé.

L'observation de l'évolution angulaire du rapport K_a/K_s à 1.4, 5.05, 10.65 et 23.8 GHz pendant le cycle de végétation permet de distinguer deux grandes tendances. On constate tout d'abord que le rapport K_a/K_s décroît avec la fréquence étudiée, surtout aux faibles incidences (valeur maximum au nadir, 100 à 150 à 1.4 GHz). Ceci illustre le fait que dans les basses fréquences, la diffusion est très faible face aux phénomènes d'absorption. Plus la fréquence augmente et plus les phénomènes de diffusion s'amplifient (la valeur de K_a/K_s proche de 1 à 23.8 GHz). A basse fréquence, le rapport diminue avec l'angle d'incidence. En effet, en augmentant l'angle de visée, le trajet de l'onde dans la strate de végétation est plus long, ce qui provoque l'accroissement des phénomènes de diffusion (K_e augmente), particulièrement en polarisation verticale (lié à la structure géométrique du blé).

Parallèlement, on constate que le rapport K_a/K_s est sensible à la teneur en eau du couvert, principalement en polarisation horizontale. La sensibilité de K_a/K_s à la teneur en eau gravimétrique "Mg" de la végétation décroît avec la fréquence, et de façon générale elle est plus marquée pour des angles d'incidence élevés (de l'ordre de 50°). L'amplitude de la sensibilité à la teneur en eau du couvert provient sans doute de l'accroissement de la quantité d'eau détectée, contenue dans la végétation (surtout à basse fréquence 1.4 GHz).

L'utilisation du modèle discret permet de calculer le rapport K_a/K_s en fonction de :

- la fréquence
- la polarisation p (p=v, h)
- l'angle d'incidence (θ de 0° à 60°)
- la teneur en eau du couvert

6.2 - Etude de sensibilité comparée du modèle continu initial et du modèle continu "composite" aux paramètres de végétation et de sol

La modification apportée au modèle continu initial par l'introduction de K_a/K_s issu du modèle discret, peut laisser prévoir quelques modifications dans l'allure des simulations de l'émission d'un couvert. Dans ce paragraphe, nous nous proposons de montrer les changements intervenus dans le nouveau modèle en étudiant comparativement la sensibilité des deux modèles aux paramètres de végétation et à l'humidité de surface.

6.2.1 - Fondement et méthode

Cette étude de sensibilité a été réalisée sur trois fréquences qui sont les trois premiers canaux basses et moyennes fréquences de PORTOS : 1.4, 5.05 et 10.65 GHz. La méthode a consisté à faire varier simultanément deux paramètres et observer l'allure des températures de brillances simulées. Les paramètres choisis pour étudier l'influence de la végétation sur le signal simulé sont :

- **la biomasse sèche totale.** Pour cette étude nous avons provisoirement paramétré la hauteur du couvert (d) et la fraction volumique de végétation (Fracv) par la biomasse sèche totale du couvert (Bst), de façon à réduire le nombre de paramètre d'entrée (les polynômes exprimant la hauteur totale du couvert "d" et la fraction volumique de végétation "Fracv" en fonction de la biomasse sèche totale du couvert "Bst" sont présentés en annexe n° 11). La plage de variation de Bst est fixée à 0 - 1 Kg / m², ce qui représente approximativement l'évolution de biomasse du couvert de blé sur son cycle complet.

- **la teneur en eau du couvert** (Mg en Kg/Kg), qui intervient directement dans l'intensité de l'émissivité de la végétation et dont on a pu suivre quotidiennement l'évolution au cours de la campagne de mesure. La plage de variation de Mg est fixée à 90 - 50 %, ce qui décrit l'évolution du dessèchement de la culture du semis jusqu'à la maturité.

Tableau 3.2a :
paramètres de calages utilisés pour l'étude de sensibilité comparée

Fréquences (GHz)	Paramètres de rugosité hr et Q		Longueurs de corrélation lz et lp		humidité du sol
1.4 GHz	0.1	0.15	29.7 mm	2.39 mm	$MV_{sol} = 20\%$
5.05 GHz			29.7 mm	2.39 mm	
10.65 GHz			0.75 mm	0.82 mm	

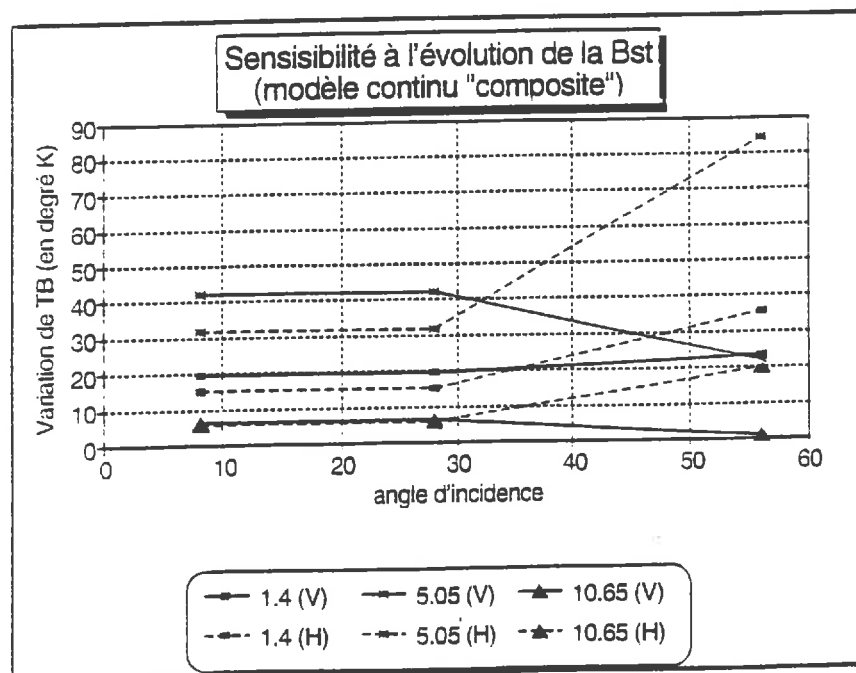
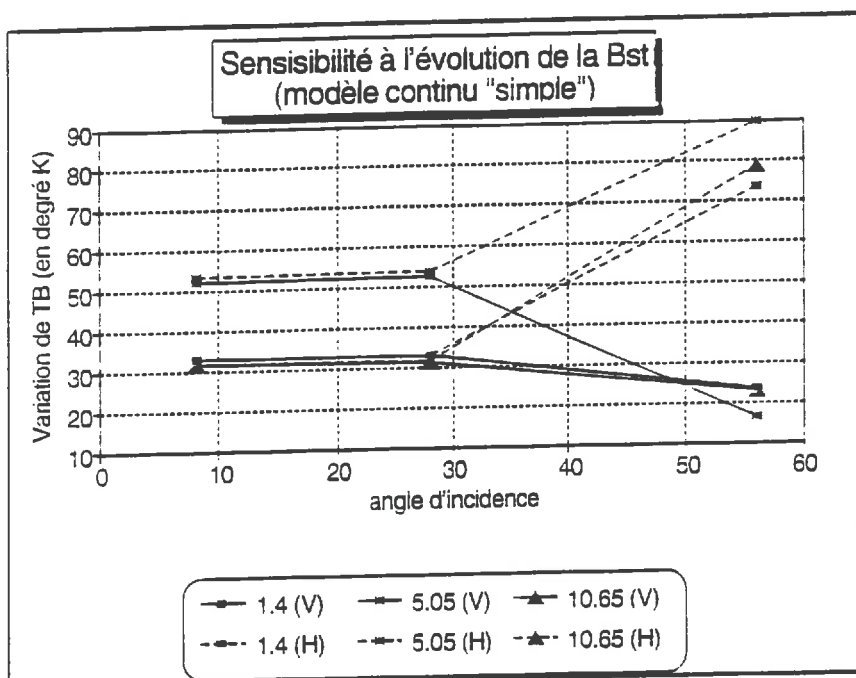


Figure 3.2b : sensibilité comparée du modèle continu "simple" et du modèle continu "composite" à l'évolution de la biomasse sèche totale d'un couvert à 1.4, 5.05 et 10.65 GHz

La sensibilité Ψ de la variable X au paramètre p pour une incidence θ est définie dans cette étude selon :

$$\Psi(X,p)_\theta = (dX(dp))_\theta$$

avec dX la différence de température de brillance définie pour une variation dp des paramètres de surface (biomasse, teneur en eau du sol et de la végétation)

L'étude porte sur les différences de TB_p pour 3 angles d'incidence particuliers compris entre 0° et 60° (angles de Gauss, propres au modèle). Pour chacun de ces angles, la température de brillance a été exprimée en fonction de la biomasse sèche totale et calculée pour 5 niveaux d'humidité du couvert dans les deux polarisations. L'humidité volumique du sol a été arbitrairement fixée à 20%. La température du couvert est fixée à 300 K. Les paramètres de rugosité du sol et les longueurs de corrélation l_z et l_p prennent des valeurs arbitraires, issues des résultats obtenus sur couvert de soja pendant la campagne PORTOS 1991 (Tableau 3.2a). (Les représentations graphiques de $TB = f(Bst, Mg)$ sont présentées en annexe n° 12).

Discussion sur la méthode utilisée :

On peut discuter de la validité d'une telle méthode. En effet, il est sans doute incorrect de prendre des longueurs de corrélation identiques pour les deux modèles. Dans le modèle classique, la valeur du coefficient d'absorption est apparemment sous-estimée ce qui implique probablement une surestimation des longueurs de corrélation (phénomène de compensation). Pour sa part, le modèle composite permet de calculer un K_a beaucoup plus élevé (surtout à basse fréquence) et ce modèle doit certainement être ajusté avec d'autres longueurs de corrélation. Une telle simplification introduit donc vraisemblablement un biais dans la valeur des simulations de l'émission du couvert, et l'on doit donc rester prudent quant à la validité des résultats présentés dans cette étude de sensibilité comparée.

6.2.2 - Influence de la biomasse sèche (Fig. 3.2b)

Méthode :

L'allure de la relation exprimant TB en fonction de Bst dans les deux modèles est de type cubique, quelque soit l'incidence et la polarisation. Le maximum de la courbe de température est défini par une abscisse de $Bst = 0.8 \text{ Kg/m}^2$ qui correspond au maximum de la hauteur du couvert de blé sur son cycle (environ 1m). C'est ce maximum de température que nous choisissons pour comparer la sensibilité de chaque modèle à la biomasse sèche totale.

La sensibilité s'exprimera : $\Psi(Tb_p, Bst)_\theta = (Tb_p(Bst = 0.8) - Tb_p(Bst = 0.1))_\theta$. C'est la différence de température simulée entre Les points $Bst = 0.8 \text{ Kg/m}^2$ et $Bst = 0.1 \text{ Kg/m}^2$ pour un angle d'incidence θ compris entre 0° et 60° .

Résultats :

Pour le modèle de base, les variations de température de brillance en fonction la biomasse sont de l'ordre de 30 à 50 K pour les faibles incidences (sans distinction de polarisation). Pour des incidences supérieures à 40° , seule la polarisation H garde une sensibilité importante (70 à 90 K), alors que la sensibilité de la

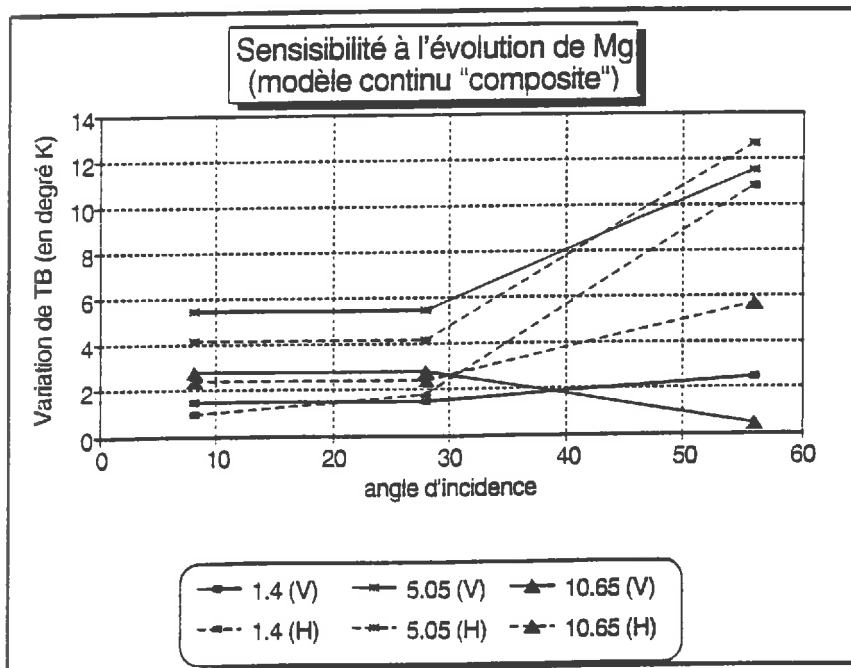
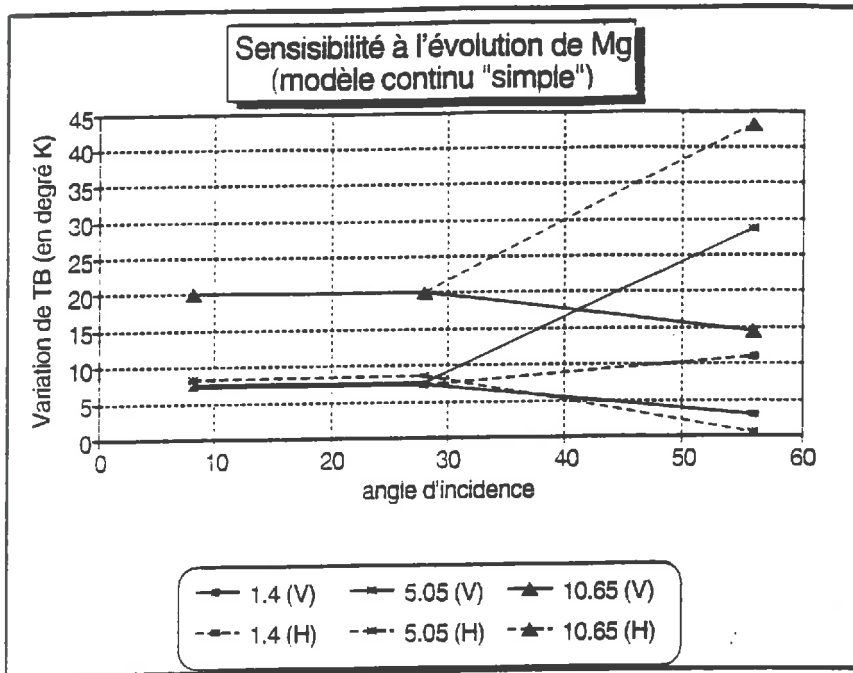


Figure 3.2c : sensibilité comparée du modèle continu "simple" et du modèle continu "composite" à l'évolution de l'humidité végétale (Mg Kg/Kg) à 1.4, 5.05 et 10.65 GHz

polarisation V diminue de 50% (15 à 25 K seulement). Le modèle composite décrit approximativement la même sensibilité à la Bst que le modèle continu simple. Le maximum de température atteint est très variable suivant les fréquences considérées. Comme pour le modèle initial la sensibilité à Bst augmente avec l'incidence, particulièrement en polarisation H (jusqu'à 85 K pour une incidence de 56° dans la bande 5.05 GHz).

Discussion et conclusion :

Dans l'approche classique, la fréquence la plus significativement sensible à la variation de biomasse du couvert est la fréquence 5.05 GHz, ce qui est en accord avec les résultats déjà obtenus avec les simulations de T_{bv} du modèle continu sur la forêt Amazonienne (J.C Calvet, 1992). Le modèle composite confirme cette constatation mais semblerait malgré tout moins sensible aux variations de Bst. La fréquence 5.05 GHz apparaît en tout état de cause comme la plus sensible aux variations de biomasse dans les deux modèles.

A travers les simulations du modèle composite, l'émissivité micro-onde d'un couvert de blé apparaît moins sensible aux variations de biomasse que dans le modèle continu initial. La modification apportée par l'introduction du rapport K_a/K_s a semble-t-il "tamponné" l'influence de la fraction volumique de végétation sur l'émissivité de la culture (paramétrée par Bst).

6.2.3 - Influence de la teneur en eau du couvert (Fig. 3.2c)

Méthode :

Le niveau de teneur en eau du couvert ne modifie pas l'allure, mais le maximum de la courbe de température de brillance simulée en fonction de la Bst. Pour ce paramètre, la sensibilité sera définie par : $\Psi(T_{bp}, Mg)_0 = (dT_{bp}(dMg=0.4))_0$ c'est à dire la différence de température de brillance simulée entre un couvert à 90% et un couvert à 50% d'humidité. On constate que l'écart de température engendré par une variation d'humidité de 40% du couvert est une fonction croissante de la Bst dont le maximum se situe également à $Bst = 0.8 \text{ Kg/m}^2$. Nous allons donc étudier maintenant la variation de température simulée au point d'abscisse $Bst = 0.8 \text{ Kg/m}^2$ entre un couvert humide et un couvert sec.

Résultats :

Pour le modèle de base, la fréquence 10.65 GHz est de loin la plus sensible aux variations d'humidité du couvert. Pour des incidences moyennes de 0° à 30°, un dessèchement du couvert de 90% à 50% d'humidité se traduit invariablement par une augmentation de 20 K de la température de brillance (sans distinction de polarisation). Pour une même variation de Mg, les bandes 1.4 et 5.05 GHz n'affichent qu'un écart de 7 à 8 K, mais cette fois-ci en diminuant. Pour les fortes incidences, la sensibilité à la teneur en eau s'accroît dans toutes les fréquences, mais la plus significative reste la bande 10.65 GHz, particulièrement en polarisation H où l'écart de température peut dépasser les 40 K. On notera enfin que dans les basses fréquences la TB simulée est une fonction croissante de l'humidité de la végétation, alors que dans la bande 10.65 GHz on observe une température d'autant plus élevée que le couvert est sec.

Dans leur ensemble, les simulations du modèle composite sont très peu sensibles aux variations de teneur en eau du couvert pour des incidences comprises

entre 0° et 30° (1 à 5 K), particulièrement les bandes 1.4 et 10.65 GHz qui présentent des écarts de températures inférieurs au seuil de résolution radiométrique de PORTOS. Toutefois on note des différences plus importantes de température pour des incidences dépassant 50° (de l'ordre de 6 à 12 K), principalement en polarisation H. La fréquence 5.05 GHz apparaît être la plus sensible à la teneur en eau du couvert, sans distinction de polarisation, alors que les simulations acquises dans les deux autres bandes spectrales semblent davantage indépendantes de l'état d'humidité du couvert.

Discussion et conclusion :

Contrairement aux observations faites concernant la sensibilité des deux modèles à la biomasse, ce résultat met en évidence une différence marquante de sensibilité à l'humidité de la végétation. La fréquence 10.65 GHz en particulier, qui possédait une bonne sensibilité à l'humidité de la végétation dans l'approche continue simple, apparaît désormais presque totalement insensible à la teneur en eau végétale dans les simulations du modèle composite. Nous devons toutefois émettre une réserve concernant le niveau de cette insensibilité vis à vis de Mg car il faut rappeler que ce résultat est calculé pour une végétation bien développée ($B_{st}=0.8\text{Kg/m}^2$), et que les longueurs de corrélations utilisées ne sont pas adaptées. Toutefois, ce résultat semblerait prouver que la diminution de température de brillance observée en fin de campagne ne serait pas due au dessèchement du couvert (déterminant la permittivité diélectrique), mais serait probablement liée au changement de structure provoqué par le flétrissement (la distribution d'inclinaison des feuille a changé).

A partir des simulations de l'approche continue modifiée, on peut admettre à priori que l'émissivité du couvert de blé est beaucoup moins dépendante de la teneur en eau du végétal qu'à partir de l'ancien modèle. Là encore l'introduction du rapport K_a/K_s semble atténuer l'influence de l'humidité de la végétation sur l'émission micro-onde, et l'émissivité d'un champ de blé ne serait soumise qu'à de faibles variations liées à la teneur en eau de la végétation au cours du cycle. Cette constatation peut d'ailleurs être appuyée par l'analyse de l'évolution temporelle de l'émissivité du couvert à 10.65 et 23.8 GHz, où l'on peut observer un plateau de saturation de l'émission durant la phase de végétation, qui prouve qu'entre 90% et 60% d'humidité le signal n'est pas sensible au dessèchement (cf. chapitre 4).

6.2.4 - Influence de la teneur en eau du sol

Méthode :

Pour étudier l'influence de l'humidité de surface, nous avons réitéré les simulations précédemment obtenues en fixant dans un premier temps l'humidité volumique du sol ($M_{v_{sol}}$) à 1% (sol sec) puis à 30% (sol humide). Nous avons ensuite de nouveau observé le niveau des écarts de température, considérés pour chacun des états d'humidité de surface.

Résultats, discussion :

On observe que de façon générale dans les deux modèles, la sensibilité de la température de brillance simulée aux variations de teneur en eau du couvert et de biomasse augmente avec l'humidité volumique du sol. Ceci s'explique par le fait que l'émissivité micro-onde d'un sol est principalement fonction de sa teneur en eau. Lorsque l'humidité volumique d'un sol augmente, sa permittivité diélectrique s'accroît également et son émission diminue (Jackson et Schmugge 1989). Dans le domaine des hyperfréquences, un sol humide émet moins intensément qu'un sol sec.

De plus, lorsque la fréquence augmente, la diffusion et l'absorption s'intensifient au sein du couvert et atténuent la contribution du sol à l'émission globale mesurée au sommet du couvert (surtout aux fortes incidences). Aussi, la sensibilité à $M_{V_{sol}}$ est maximale à 1.4 GHz et décroît avec la fréquence. Pour les deux modèles, à 10.65 GHz le signal micro-onde sur couvert de blé homogène ne dépend plus des caractéristiques du sol, dont la contribution est presque totalement atténuée. L'augmentation de biomasse provoque à la fois un accroissement de l'émission de la végétation et de l'atténuation de l'émission du sol. Cette atténuation est d'autant plus marquée que l'émission du sol est forte (sol sec). Ceci explique pourquoi l'émission est plus sensible à la biomasse sur sol sec.

Conclusion :

Le modèle continu composite simule une émissivité moins dépendante à la teneur en eau du sol que l'ancien modèle. Le modèle composite permet de "limiter" les fluctuations d'émissivité simulée, contrairement à l'ancien modèle qui décrivait des écarts de TB pouvant aller de 50 à 100 K.

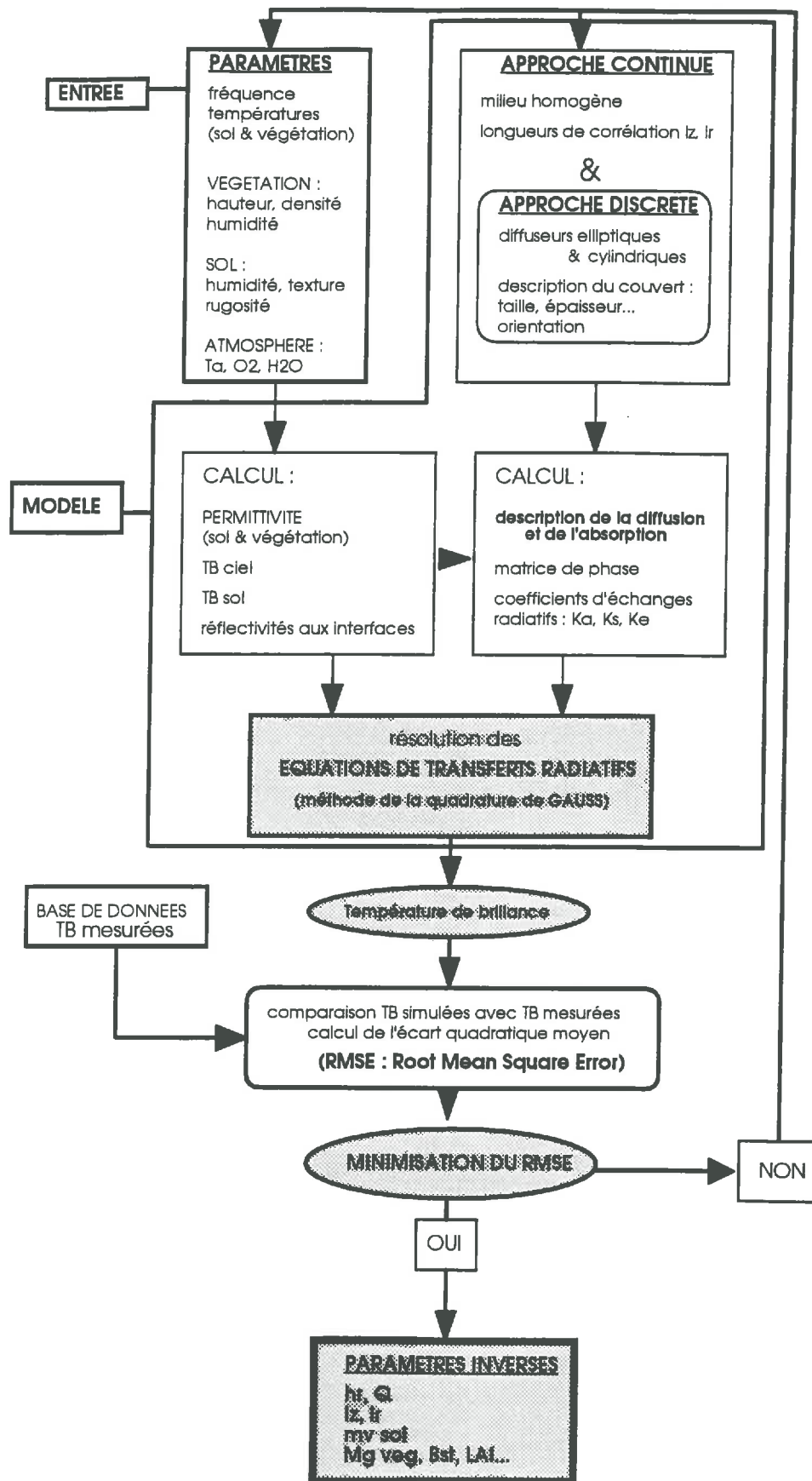


Figure 3.3 : Architecture générale du principe d'inversion à partir du modèle continu composite

CHAPITRE 7

PRINCIPE DE L'INVERSION ET CALAGE DU MODELE COMPOSITE

Le schéma présenté page ci-contre résume le principe d'inversion des données radiométriques à partir du modèle continu composite (Fig. 3.3).

7.1 - Inversion de l'humidité de surface et des paramètres de végétation : principe et méthode

Dans le cadre de ce rapport nous nous limiterons à l'inversion des paramètres dans deux bandes spectrales. L'objectif à terme est de parvenir à inverser les trois paramètres du milieu dans plusieurs fréquences simultanément, ce qui permettrait de compenser les "lacunes" de certaines bandes spectrales par les informations contenues dans d'autres longueurs d'onde. Néanmoins, l'étude détaillée de chaque canal hyperfréquence du radiomètre se révèle très intéressante pour la mise en forme et la compréhension des informations contenues dans chaque longueur d'onde, et elle est du reste nécessaire pour permettre le calage de I_z et I_p en fonction de la fréquence. Chaque bande hyperfréquence est sensible à une certaine gamme de paramètre. Il nous appartient ici de les définir afin d'en étudier les interactions et de pouvoir optimiser une future méthode d'inversion "globale".

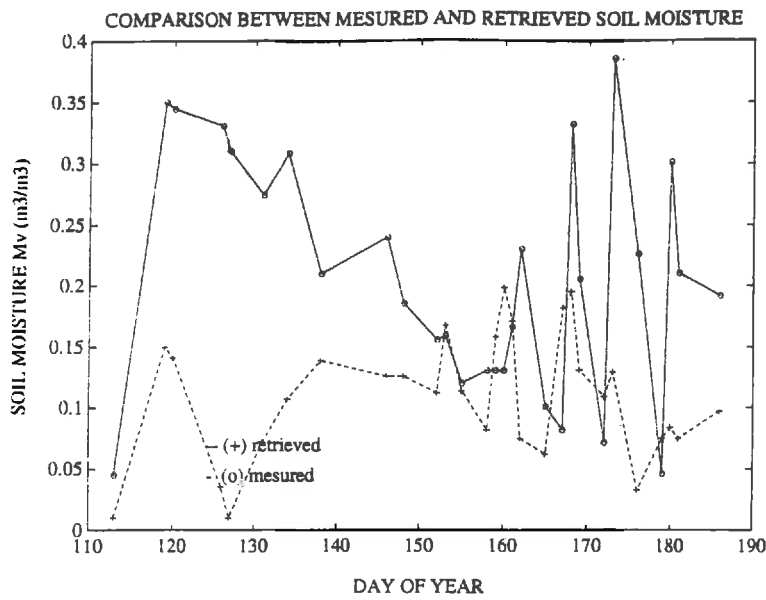
7.1.1 - Méthodologie

L'inversion des paramètres cultureux a été menée sur deux bandes basse et moyenne fréquences du radiomètre (1.4 et 10.65 GHz). Après avoir calibré les paramètres de rugosité (h_r , Q) et les longueurs de corrélation (I_z , I_p) dans chaque bande, nous avons procédé à l'inversion des paramètres suivant l'algorithme décrit dans la figure 3.3. Les paramètres inversés sont : l'humidité volumique du sol, la fraction volumique de végétation et la teneur en eau du couvert. Comme pour les paramètres d'ajustement, la méthode utilisée consiste à inverser le modèle continu pour retrouver les différents paramètres en utilisant une routine de minimisation basée sur l'algorithme du Simplex (NAG, 1990).

La variable minimisée est le "Root Mean Square Error", ou RMSE entre l'émissivité simulée et mesurée e_p ($p = H, V$), exprimée en température de brillance tel que :

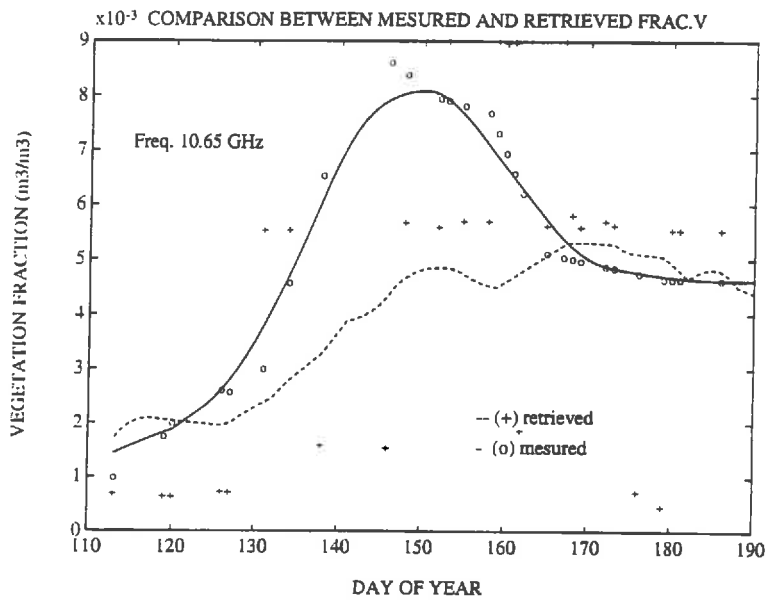
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dif_i)^2}{n}} \quad \text{en degré K}$$

avec $dif_i = (TB \text{ simulée} - TB \text{ mesurée})$ au i éme jour de mesure

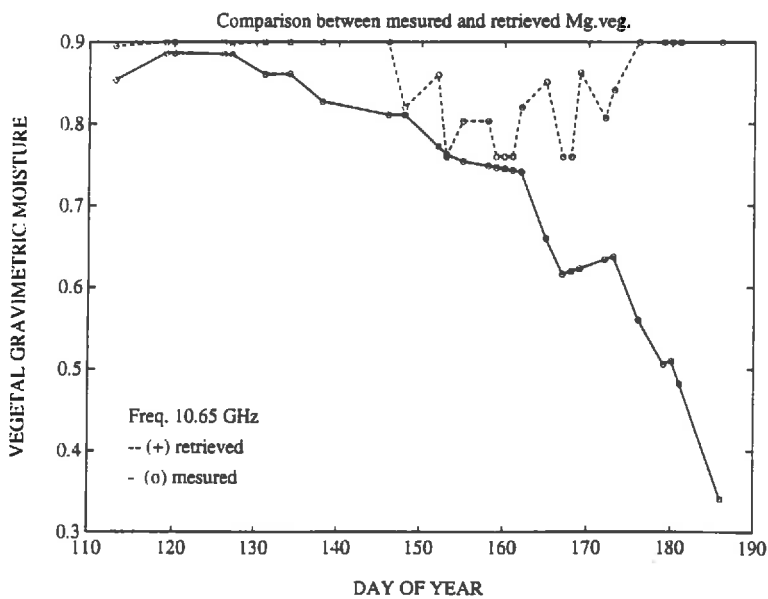


surestimation de l'émission du sol jusqu'à l'épiaison

sous-estimation de l'émission du sol en phase de maturation



sous-estimation de $Fracv^{inv}$ suivie d'une stabilisation due à une saturation du signal



surestimation de Mg^{inv} en début de cycle pour compenser les faibles valeurs de $Fracv$

surestimation de Mg en fin de cycle pour compenser les fortes valeurs de Mv_{sol}^{inv}

Figure 3.4 : illustration des phénomènes de compensation sol-végétation lors de l'inversion simultanée de Mv_{sol} , $Fracv$ et Mg à 10.65 GHz

Les études menées pour inverser simultanément trois paramètres ont conduit à des résultats faussés par les phénomènes de compensation qui se produisent entre le sol et la végétation (Fig. 3.4). Le modèle ne parvient pas à reproduire le phénomène d'atténuation de l'émission du sol pendant le développement du couvert, et les inversions conduisent à une faible humidité de sol (forte émission du sol), qui se compensent par une sous-estimation de la biomasse (faible émission de la végétation). L'humidité du couvert paraît ne pas beaucoup influencer sur les simulations en période de végétation (les valeurs inversées atteignent les bornes). L'humidité de la végétation compense les écarts de biomasse au cours du cycle.

Il a donc fallu recourir à des inversions combinées de deux paramètres, voire d'un seul, soigneusement choisis en fonction de la fréquence étudiée, et utiliser les bases de données biologiques acquises sur le terrain pendant la manipulation pour caler les paramètres manquants. Ce principe repose sur l'hypothèse que les paramètres de surface non inversibles à partir d'un canal doivent être paramétrisables par des variables connues ou obtenues par inversion dans une autre bande de fréquence (complémentarité des canaux en vue d'une inversion globale).

7.1.2 - Les causes de non inversibilité

Toutes considérations théoriques de modélisation mises à part (mauvais ajustement des paramètres de calage), on peut noter deux situations particulières dans lesquelles les mesures radiométriques n'aboutissent pas à des inversions cohérentes (RMSE trop élevé ou valeur inversée aberrante) :

- **non simultanité des mesures radiométriques avec les mesures *in situ***. Ce cas est surtout rencontré dans les données du canal 1.4 GHz (sensibles aux fluctuations d'humidité du sol), dont la période de mesure est parfois décalée des heures d'irrigations (jour 168, 174), où tout simplement des heures de mesure d'humidité (en Mai et Juin, le sol possédait une forte cinétique de dessèchement journalière).

- **l'acquisition de données dans une seule polarisation**. Soit par erreur de manipulation (console), soit pas manque de temps (permutation de l'antenne du canal 1.4 GHz), certaines journées de mesures ne possèdent qu'une seule polarisation. Il arrive alors que l'inversion échoue, vraisemblablement par manque d'information radiométrique.

7.2 - Inversion préliminaire des paramètres de calage

La première étape de l'inversion consiste à estimer les paramètres d'ajustement du modèle h_r , Q , I_z et I_p en utilisant les données acquises sur le terrain pendant deux périodes particulières que sont :

- la période où le signal du sol domine : **S-période** (estimation h_r et Q)
- la période où le signal du couvert domine : **C-période** (estimation I_z et I_p)

On pose ensuite comme hypothèse que ces derniers sont constants tout au long de la manipulation. On utilise ces données de calage pendant tout le cycle de mesures qui se déroule du jour 109 (1 mois après le semis) jusqu'à la maturité des épis de blé (jour 186), noté **V-période**.

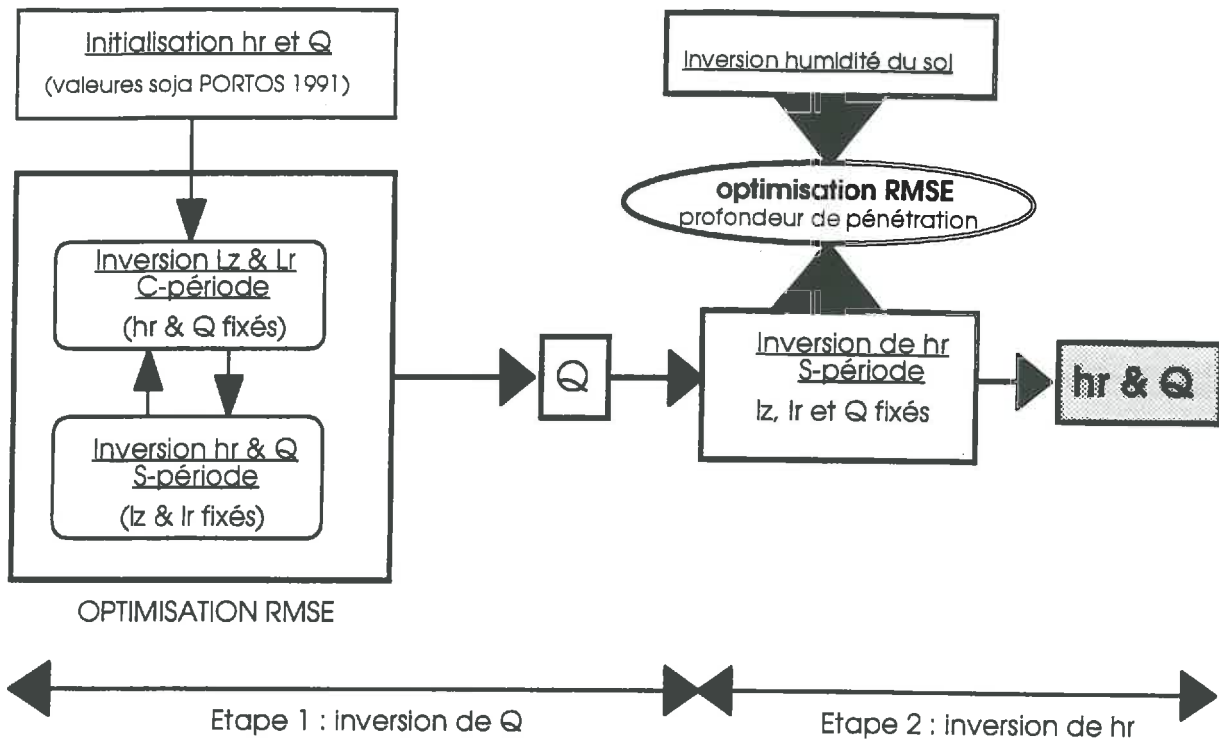


Figure 3.5 : les deux étapes du protocole d'inversion des paramètres de rugosité hr & Q

L'étape ultime de l'inversion conduira à l'estimation des paramètres de végétation et d'humidité de sol à partir des mesures radiométriques.

7.2.1 - Estimation des paramètres de rugosité h_r et Q : fondements

Les études menées par J.P. Wigneron sur couvert de soja en 1991 ont montré qu'une inversion simultanée de tous les paramètres de calage du modèle ne convergait pas vers des valeurs d'inversion acceptables ($RMSE > 10$ K). L'estimation des paramètres de calage doit donc s'effectuer en deux étapes distinctes. Tout d'abord, les paramètres de rugosité h_r et Q doivent être déduits des mesures radiométriques effectuées sur le stade de développement le plus précoce de la culture, afin de minimiser l'effet de la végétation (I_z et I_p n'ont que peu d'influence).

Dans l'étude qui nous concerne, la rugosité du sol est prise en compte par deux paramètres d'ajustement h_r et Q , qui modélisent la réflectivité hyperfréquence du sol (Wang et Choudhury, 1981). La réflectivité résultante Γ_p , où p représente la polarisation (H & V), est donnée par :

$$\Gamma_p = [(1-Q)\Gamma_{sp}(\theta, p) + Q\Gamma_{sp}(\theta, p)] \exp(-h_r \cos^2 \theta) \quad (1)$$

$$h_r = 4 \cdot (2\pi / \lambda)^2 \sigma^2 \quad (2)$$

où $\Gamma_{sp}(\theta, p)$ est la réflectivité spéculaire de polarisation p et d'incidence θ , λ est la longueur d'onde dans l'espace libre, et h_r et Q sont des paramètres calés respectivement pour la rugosité (magnitude de la réflectivité de surface), et la redistribution de polarisation de l'énergie. Le domaine de validité de (2) se situe uniquement dans les basses fréquences, par contre le domaine d'application de (1) qui est semi-empirique n'est pas limité. Si l'équation physique liant h_r à l'écart type des hauteurs de rugosité σ reste théorique et ne se confirme pas par des mesures expérimentales (Wang et al., 1983), il n'en demeure pas moins que la première équation est une formulation acceptable pour estimer les mesures de variations angulaires de la réflectivité du sol.

7.2.1.1 - Méthode

Le décalage d'un mois entre le semis et le début des mesures radiométrique a posé quelques problèmes pour l'estimation des paramètres de rugosité. En effet, la végétation était déjà développée lorsque le radiomètre a effectué ses premières mesures, et le signal du sol était en parti masqué par l'émission de la végétation. D'autre part, de fortes pluies apparues au jour 114 et prolongées jusqu'au jour 118 ont pu modifier la rugosité. Il a fallu inverser les paramètres de rugosité en se basant uniquement sur les données radiométrique du début de cycle (sol humide) avec un couvert en cours de développement.

Dans ces conditions, la méthode d'inversion la plus satisfaisante consiste à opérer en deux temps (Fig. 3.5) : tout d'abord, l'inversion préliminaire de Q par itérations successives à partir d'une approximation de I_z et I_p pris sur la C-période. Puis connaissant Q , on inverse h_r et l'humidité de surface $M_{V_{sol}}$. Ceci nous permet d'ajuster h_r et la profondeur de pénétration de l'onde dans le sol δ_e (à 1.4 GHz). Ainsi, en comparant les valeurs inversées avec les mesures dans ce canal, on peut estimer la profondeur de la strate contribuant à l'émission du sol.

7.2.1.2 - Analyse de l'inversion des paramètres de rugosité

Les résultats de l'inversion préliminaire portant sur h_r et Q sont donnés dans le tableau 7.1. On considère que les paramètres de rugosité inversés sur la S-période restent constants tout au long du cycle de mesure, et que les conditions de surface sont préservées (on ne tient pas compte de la fissuration du sol pendant les fortes chaleurs du mois de Juin). Après calage de h_r et Q , la précision du module "sol" du modèle composite est assez satisfaisante. Pour douze points de comparaison (six valeurs d'incidence θ et deux polarisations (H) et (V)) croisés avec neuf jours de mesure sur sol "clairsemé", le RMSE est de l'ordre de 3.8 K à 1.4 GHz. La valeur de δ_e d'environ 5 cm, ce qui est légèrement supérieur aux valeurs rapportées dans la bibliographie (Wang, 1987; Jackson et Schmugge, 1989; Wigneron, 1993). On constate également que Q s'accroît avec la fréquence, conformément aux observations faites par J.P Wigneron sur couvert de soja (1993). La surface étant relativement lisse, h_r est très faible à 10.65 GHz. Par contre, sa valeur élevée à 1.4 GHz est assez surprenante. Néanmoins des observations similaires de dépendance de h_r et Q avec la fréquence ont été faites par Wang (1983) et Wigneron (1993). A ce sujet, une analyse plus conséquente de la rugosité doit être menée à partir des mesures acquises par PORTOS et MARMOTTE sur les parcelles de sol nu adjacentes au couvert de blé.

Tableau 7.1 : valeurs inversées de la rugosité du sol à 1.4 GHz et 10.65 GHz.

Fréquences	h_r	Q	δ_e	RMSE (deg K)
1.4 GHz	0,275	0,213	5 cm	3,80 K
10.65 GHz	0,000	0,300	0.5 cm	4,33 K

7.2.2 - Inversion des longueurs de corrélation l_z et l_p

7.2.2.1 - Fondement et méthode

Tout comme les paramètres de rugosité, l'inversion simultanée en une seule étape des longueurs de corrélation, de l'humidité du sol et des paramètres de végétations n'aboutit pas à des résultats cohérents (J.P. Wigneron, 1993). Il est nécessaire de calibrer l_z et l_p à partir de données de terrain soigneusement définies sur une période déterminée avant d'inverser les paramètres du milieu sur l'ensemble du cycle de mesure. Dans un premier temps les longueurs de corrélation sont inversées sur l'ensemble du cycle de mesure (DoY 109 à DoY 186), afin d'observer leur évolution et d'analyser la signification du RMSE. Puis, on prend une valeur moyenne de l_z et l_p sur la C-période, pendant laquelle ces paramètres ont un comportement relativement stable puisque le couvert est à son maximum de développement (période de pleine végétation située en principe autour de la date de floraison). Dans un deuxième temps, on suppose que les longueurs de corrélation sont constantes tout au long du cycle de végétation, et l'on peut alors inverser les paramètres de végétation et l'humidité du sol. Nous verrons que certains problèmes peuvent se poser pour l'inversion, car la structure morphologique particulière du blé a une forte influence sur les longueurs de corrélation, et principalement l_z .

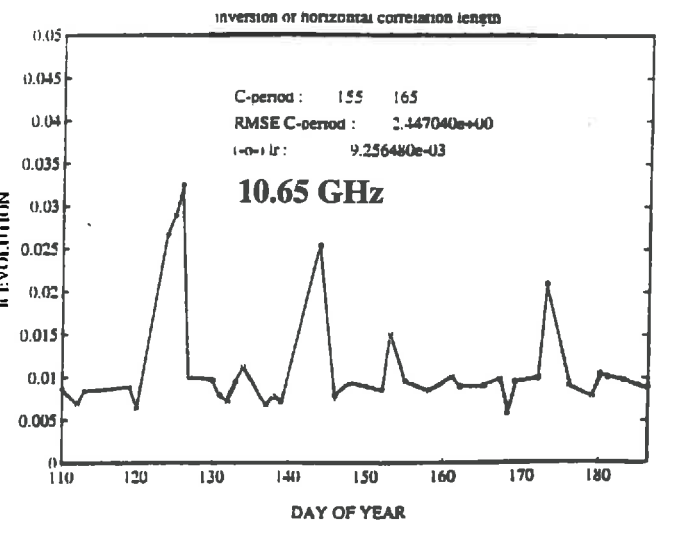
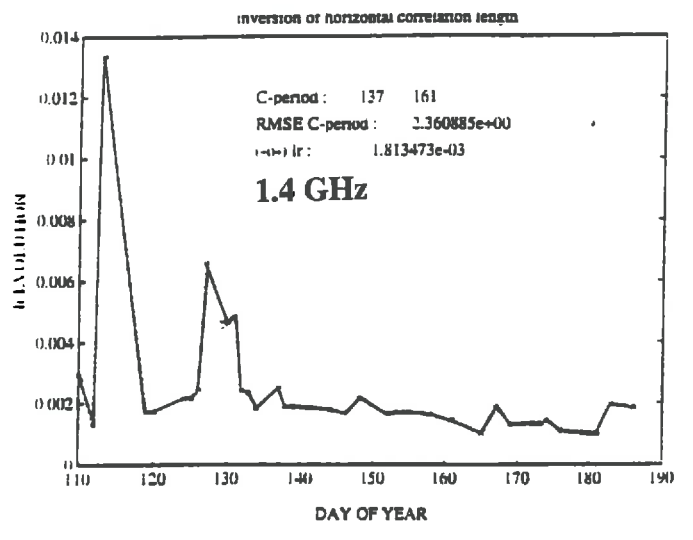
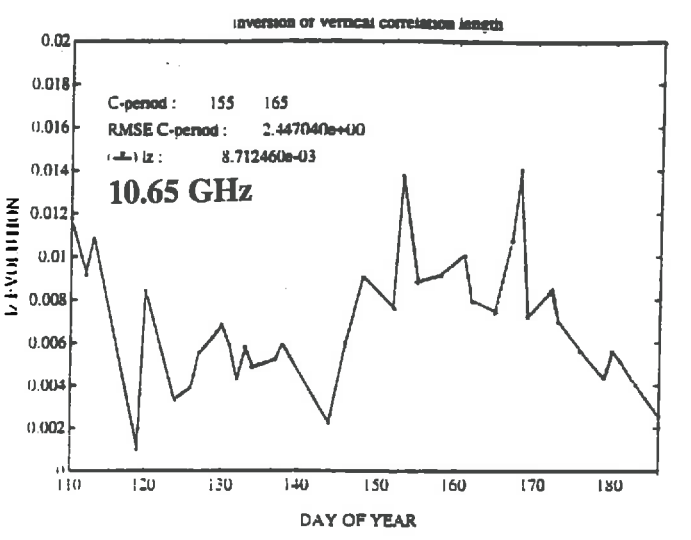
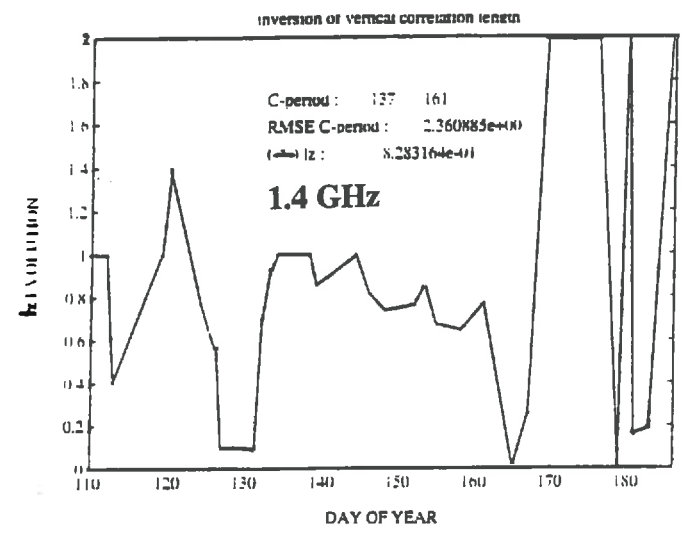
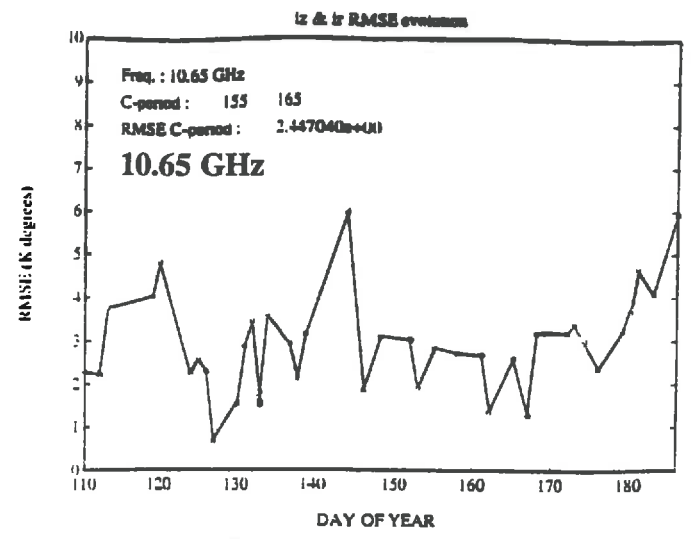
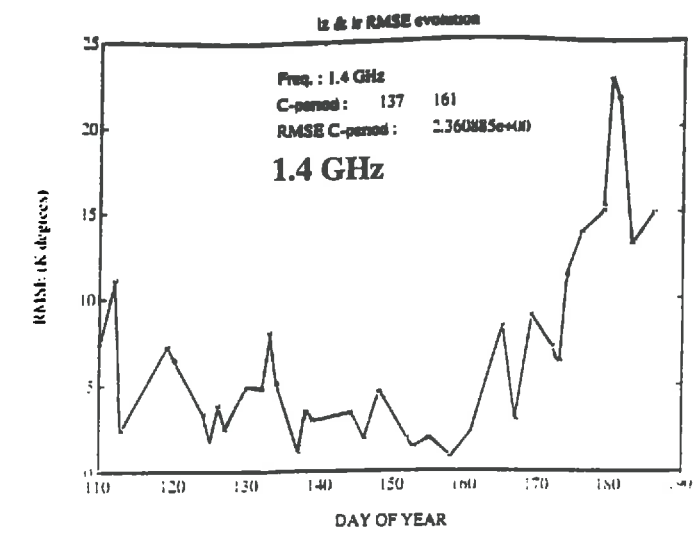


Figure 3.6 : évolution temporelle des longueurs de corrélation (lz,lr) à 1.4 et 10.65 GHz

7.2.2.2 - Evolution temporelle des longueurs de corrélation

L'évolution temporelle des longueurs de corrélation dans les bandes 1.4 et 10.65 GHz est présentée page ci-contre (Fig. 3.6). Les paramètres d'entrée du modèle caractérisant l'état du couvert (sol et végétation) proviennent de l'ensemble des mesures *in situ*. On constate que l_z est beaucoup plus fluctuante que l_p en fonction du stade de développement du blé, qui pour sa part se stabilise assez vite et reste relativement constante dès que le taux de recouvrement a atteint son maximum ($LAI = 5,4$).

La précision obtenue lors de l'inversion des longueurs dans les bandes 1.4 et 10.65 GHz paraît satisfaisante puisque le RMSE moyen pendant la C-période est de l'ordre de 2,4 K.

Analyse de l'évolution de " l_p "

L'apparente stabilité de l_p à partir du jour 137 (principalement à 10.65 GHz) pourrait être interprétée par le fait que la culture de blé étudiée n'a obtenu qu'un faible coefficient de tallage (1,5), et que chaque tige a développé un épis; il n'y a donc pas eut de forte différence de densité des éléments végétaux avant et après épiaison. De plus, le semis en rang impose une certaine "discipline" au blé dont la structure spatiale dans un plan horizontal reste liée à la direction des sillons. La configuration géométrique horizontale du couvert de blé ne varie donc pas beaucoup pendant la campagne de mesure, et cela pourrait expliquer l'apparente stabilité de l_p

Analyse de l'évolution de " l_z "

De façon générale, on peut distinguer l'existence de trois "niveaux" de valeurs pour l_z . A 1.4 GHz on observe une forte variabilité de l_z pendant la période de mise en place et de tallage du blé. A la fin de cette période, l_z converge néanmoins vers des valeurs assez faibles (0.1). Puis, lorsque la végétation a atteint le maximum de recouvrement ($LAI = 5,4$), l_z gagne un niveau de valeurs beaucoup plus élevé (de l'ordre de 0,83). Cette valeur est assez stable et offre un RMSE moyen tout à fait acceptable (2,36 K). Vers la mi-Juin, le blé se dessèche fortement et la morphologie de la culture est modifiée. A partir de cette date l'inversion de l_z ne converge plus et tend vers des valeurs très élevées (> 2), alors le RMSE calculé ($RMSE > 10$) indique que l_z inversé ne permet plus de décrire les fluctuations d'émissivité mesurées par le radiomètre.

A 10.65 GHz on observe également un premier seuil de convergence de l_z vers des valeurs de l'ordre de $5,5E-3$ pendant le stade "feuillu" de la culture. Puis, pendant la pleine végétation (sortie de épis) les inversions de l_z se stabilisent autour de $9E-3$ avec un RMSE moyen de 2,45 K (DoY 155 à DoY 165). Enfin, le dessèchement de la culture en fin cycle fait converger l'inversion de l_z vers des valeurs plus faibles (de $6E-3$ à $4E-3$), associées à une augmentation significative mais néanmoins acceptable du RMSE ($4 K < RMSE < 6 K$).

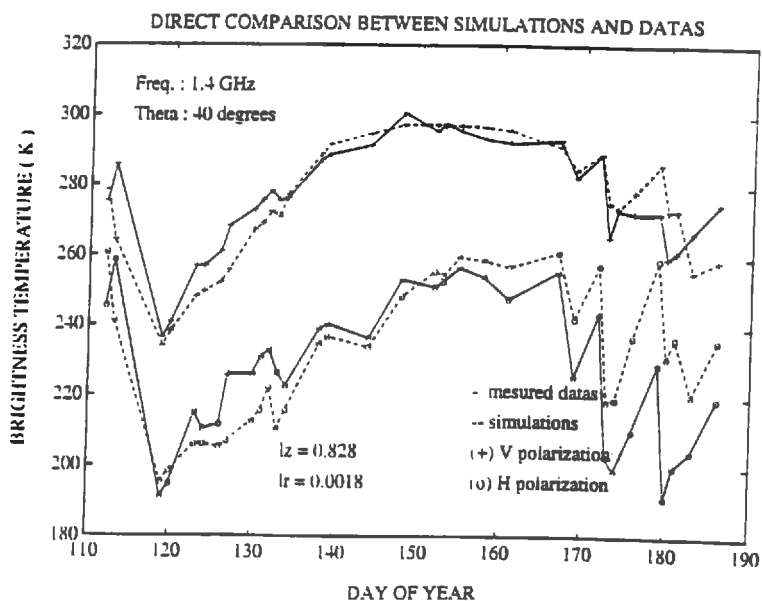
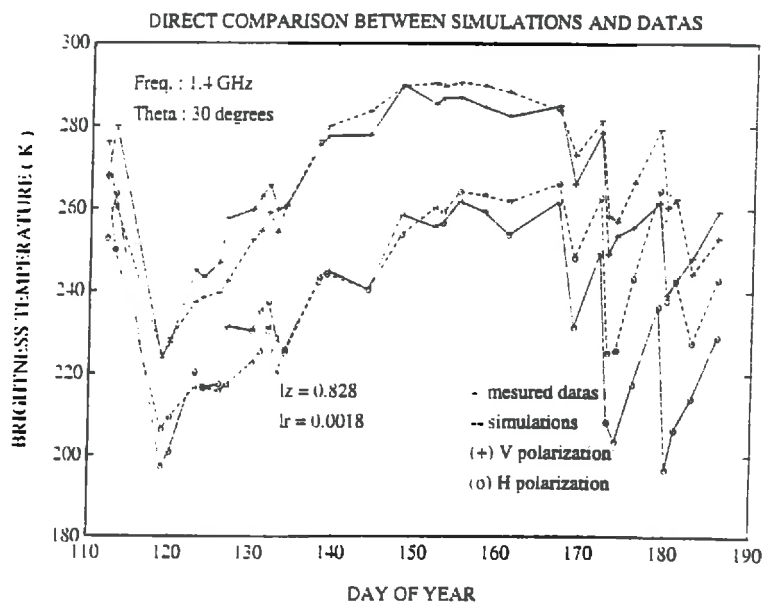
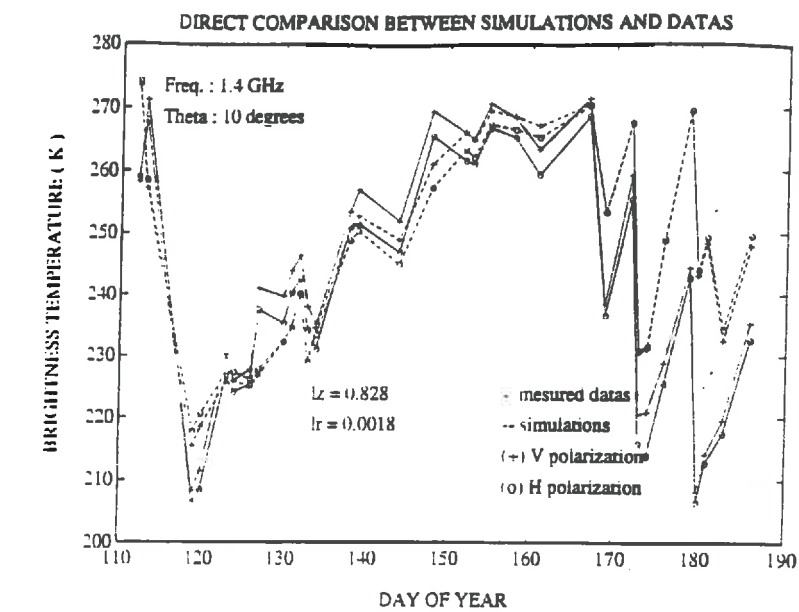


Figure 3.7a : comparaison directe entre la température de brillance simulée par le modèle continu "composite" et TB mesurée à 1.4 GHz pour $\theta = 10^\circ, 30^\circ$ et 40° . (l_z, l_p) calées sur la période DoY 137 à DoY 161 (expérimentation PORTOS-93)

Conclusion :

La morphologie particulière du blé, et principalement les modifications de sa structure verticale au cours du cycle de croissance de cette céréale, a une importante influence sur le calage du paramètre de fluctuation diélectrique vertical l_z du modèle continu. Les valeurs inversées de l_z ne convergent pas vers une valeur stable pendant le cycle de végétation. Il faut manifestement différencier au moins deux phases morphologiques distinctes dans le cycle du blé. Une phase "feuillues", où le blé se caractérise par des feuilles nombreuses et des petites tiges, et une phase "tiges", où le blé se caractérise par des tiges très développées surmontées d'épis avec des feuilles plus ou moins sénescentes. Ce contraste de structure est d'autant plus marqué que la fréquence est élevée car plus la longueur d'onde est petite et plus l'émission dépend des couches supérieures du couvert. Il faut donc déterminer avec soin le couple de valeurs (l_z, l_p) qui permettra de décrire le plus précisément possible les variations d'émissivité sur toute la campagne de mesure. Cette condition est nécessaire pour obtenir les meilleures simulations possibles qui permettront d'inverser les paramètres de végétation.

7.3 - Comparaison directe entre les mesures radiométriques et les simulations du modèle composite

Afin d'ajuster au mieux le modèle de simulation continu il faut choisir le couple de longueur de corrélation (l_z, l_p) le plus pertinent parmi les valeurs obtenues lors de l'inversion préliminaire. Pour se faire, nous pouvons utiliser la méthode de comparaison directe entre les données radiométriques et les simulations du modèle continu ajusté avec différents couple de valeurs $l_z - l_p$ pris sur deux périodes distinctes : avant et après épiaison. Les résultats sont présentés dans le tableau 7.2.

Cette étape fait partie de la mise au point de l'algorithme d'inversion, car elle n'est pas réalisable en conditions réelles (où l'on ne disposera pas de mesures de terrain pour caler les longueurs de corrélation).

7.3.1 - Ajustement des longueurs de corrélation à 1.4 GHz

Les comparaisons montrent qu'à 1.4 GHz il est judicieux de prendre la moyenne des longueurs de corrélations obtenues sur une période de pleine végétation qui s'étend de DoY 137 à DoY 161 (Fig. 3.7a).

Cette période intègre les deux configurations morphologiques du blé avant et après l'épiaison. Pour cette fréquence, les modifications qui interviennent dans la strate supérieures du couvert lors de la sortie des épis n'altèrent pas beaucoup l'émission globale de la végétation car la profondeur de pénétration radiométrique est élevée (proportionnelle à la longueur d'onde, qui dans le cas présent est de l'ordre de 30 cm). De plus, les épis sont des éléments présentant une faible surface apparente, une faible humidité, et sont répartis de façon plus ou moins dense dans une strate de faible épaisseur. En terme de fraction volumique de végétation, on peut discuter la validité de leur intégration sur l'ensemble de la couche végétale alors qu'ils sont très localisés. La part des épis dans l'émission globale du couvert végétal est incertaine et on peut se demander si à 1.4 GHz leur contribution est significative, ou bien si ils restent radiométriquement "transparents" aux très basses fréquences.

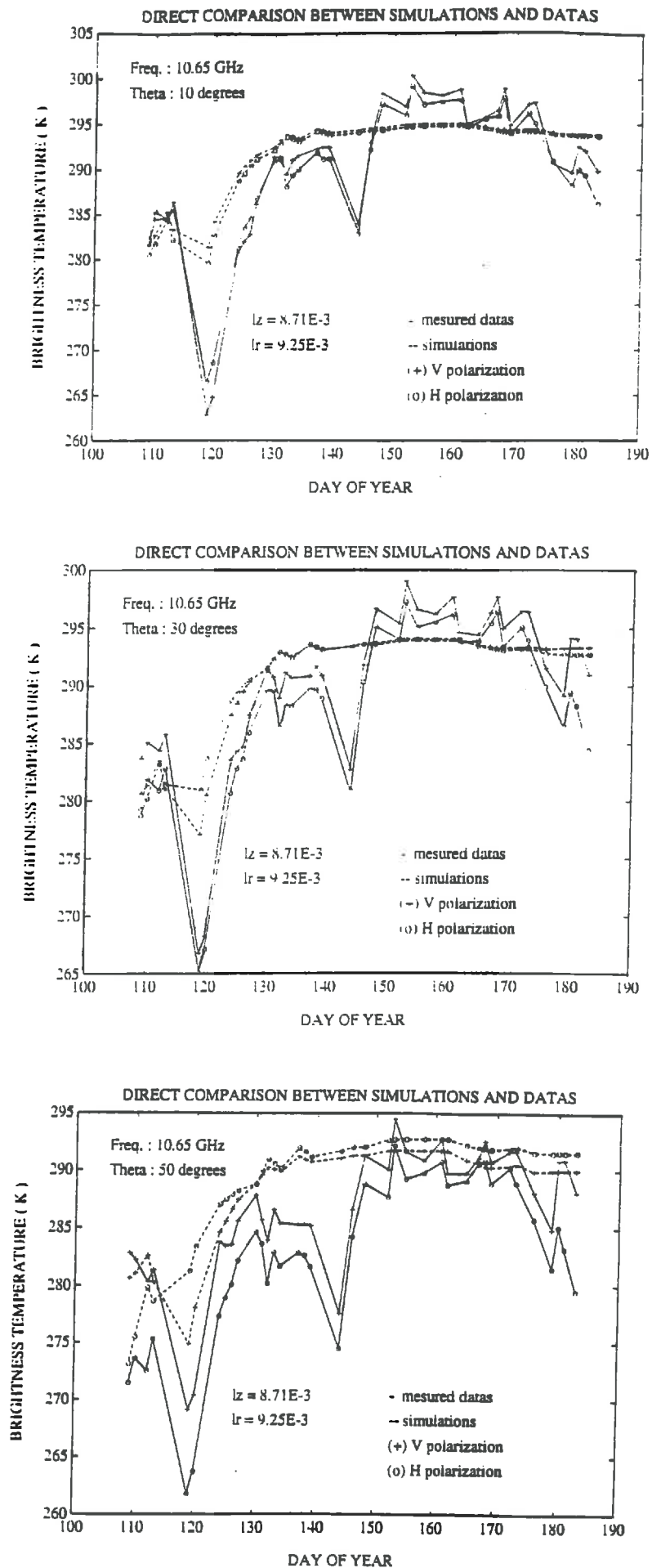


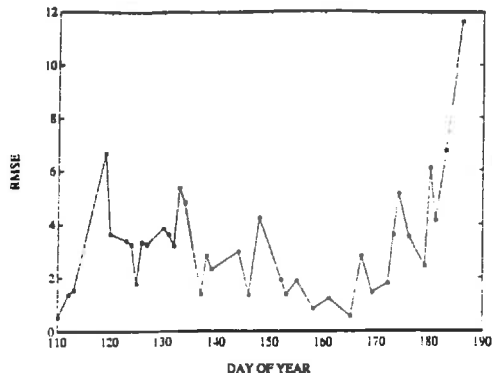
Figure 3.7b : comparaison directe entre la température de brillance simulée par le modèle continu "composite" et TB mesurée à 10.65 GHz pour $\theta = 10^\circ, 30^\circ$ et 50° . (l_z, l_r) calées sur la période DoY 155 à DoY 165 (expérimentation PORTOS-93)

7.3.2 - Ajustement des longueurs de corrélation à 10.65 GHz

Le canal 10.65 GHz concerne des radiations dont les longueurs d'ondes sont beaucoup plus courtes que celles du canal 1.4 GHz (environ 3 cm contre 30 cm à 1.4 GHz). Les changements morphologiques qui interviennent au sommet du couvert vont donc profondément modifier les caractéristiques d'émission de la végétation. Ce phénomène s'illustre très bien par les comparaisons directes qui montrent que (l_z, l_p) estimées avant l'épiaison permettent de simuler correctement les variations d'émissivité en début de campagne mais le modèle sous-estime alors l'émission du couvert dès que les épis apparaissent (RMSE > 10 K). Parallèlement, un ajustement après l'épiaison entraîne une surestimation de l'émission du couvert en début de manipulation (RMSE de 8 à 15 K). Nous avons alors choisi des longueurs de corrélation "intermédiaires" sur la période DoY 155 DoY 165, qui représentent un compromis permettant de minimiser la surestimation en début de campagne et la sous-estimation en fin de campagne, de façon à pouvoir tenter l'inversion des paramètres de surface (Fig.3.7b).

tableau 7.2 : valeurs inversées des longueurs de corrélation à 1.4 et 10.65 GHz

Fréquences	l_z	l_p	RMSE (deg K)
1.4 GHz	0,828 m	1,813E-3 m	2,36 K
10.65 GHz	8,71E-3 m	9,25E-3 m	2,45 K



← Evolution temporelle des RMSE (K) obtenus lors de l'inversion simultanée de Mv et $Fracv$ à 1.4 GHz

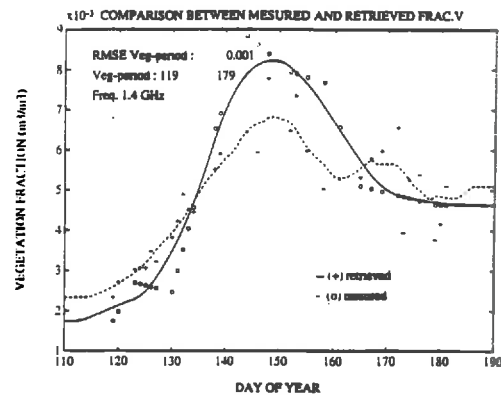
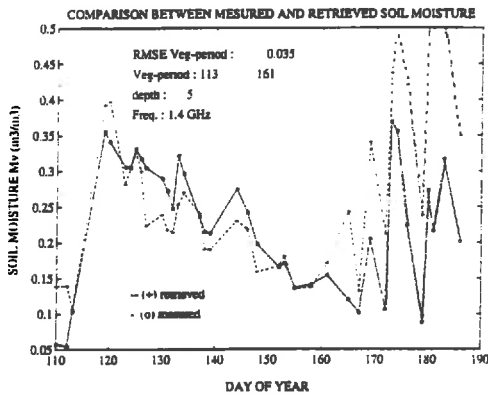


Figure 3.8a : représentation graphique de l'évolution de $Mv_{sol}^{mes} / Mv_{sol}^{inv}$ et $Fracv^{mes} / Fracv^{inv}$ à 1.4 GHz au cours du cycle de mesure (expérimentation PORTOS-93).

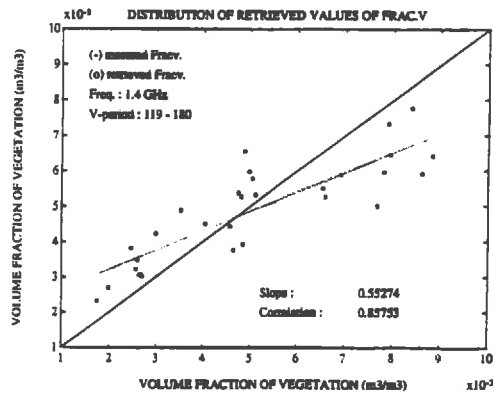
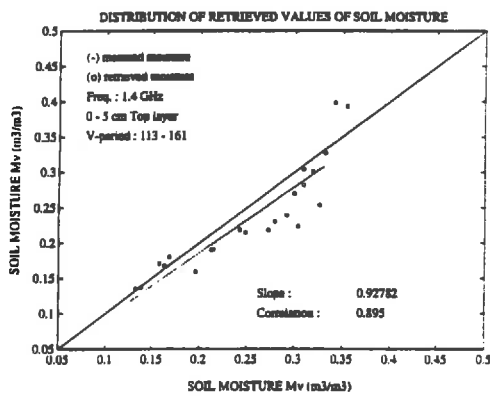


Figure 3.8b : étude de la distribution des valeurs inversées de Mv_{sol} et $Fracv$ par rapport aux mesures *in situ* à 1.4 GHz (expérimentation PORTOS-93).

CHAPITRE 8

INVERSION DES MESURES RADIOMETRIQUES

8.1 - Inversion de l'humidité du sol et de la fraction volumique de végétation à 1.4 GHz

L'analyse de l'évolution de l'émissivité mesurée a montré que les variations enregistrées dans le canal 1.4 GHz étaient principalement déterminées par les fluctuations d'humidité du sol. Nous avons également constaté que le signal était assez bien corrélé au développement de la végétation sur le cycle végétatif. En vertu de ces deux constatations nous avons procédé à l'inversion combinée de l'humidité volumique du sol ($M_{v_{sol}}$ en %) et de la fraction volumique de végétation (Fracv en Kg/Kg). Les résultats de cette inversion sont présentés sous forme graphique en terme d'évolution temporelle pendant la campagne (Fig. 3.8a), et sous forme statistique (Fig. 3.8b).

8.1.1 - Résultats d'inversion

Durant l'inversion des mesures radiométriques, nous avons constaté que certains jours conduisent à des valeurs qui divergent de l'allure générale de la courbe des estimations. Afin d'analyser la qualité des inversions, nous n'avons pas tenu compte des jours aberrants. Ces jours particuliers seront discutés ultérieurement dans le paragraphe 8.1.2. Tous les échecs d'inversion reposent sur des problèmes de mesure (une seule polarisation, non simultanément des mesures...) où un mauvais ajustement des paramètres de calage. Le modèle par lui même n'est pas en cause, et nous avons décidé de ne pas inclure ces jours dans le résultat pour juger de l'efficacité réelle de l'algorithme d'inversion, et anticiper sur les conditions d'application futures (dans l'hypothèse d'une utilisation satellitaire le modèle sera correctement calé, et les mesures contrôlées).

8.1.1.1 - Estimation de " $M_{v_{sol}}$ "

L'humidité volumique du sol sur les cinq premiers centimètres est inversée de façon satisfaisante ($RMSE M_{v_{sol}} = 3,5\%$) sur la période DoY 113 à DoY 161 (installation du blé jusqu'au premier stade de flétrissement). L'étude de la distribution des inversions autour des valeurs mesurées révèle une bonne corrélation (89,5%). Cependant, on peut noter un léger biais dans la direction du nuage de distribution des valeurs inversées (pente = 0,93) qui traduit une certaine tendance à la sous-estimation de l'humidité volumique du sol sur cette période.

Au delà du jour 161, lorsque le blé se dessèche, l'humidité du sol n'est plus correctement estimée. Les inversions suivent encore les brusques variations d'humidité de surface (provoquées par les irrigations), mais on observe une surestimation importante. Plus on progresse dans le flétrissement du couvert, plus l'écart $M_{v_{mes}} / M_{v_{inv}}$ s'accroît. Cette constatation montre que le modèle, ajusté par des paramètres de calage propres à la "pleine végétation", semble incapable de distinguer l'émission du sol sur un couvert desséché et flétri.

8.1.1.2 - Estimation de "Fracv"

En ce qui concerne la fraction volumique de végétation, son évolution est approximativement estimée (RMSE Fracv = 10%) sur la période allant du jour 119 au jour 179 (à partir de Fracv = 0,2% jusqu'à un stade de flétrissement avancé). Lors de la mise place du blé, la croissance de la fraction volumique de végétation est bien retrouvée. A partir de la fin du tallage et pendant la période de montaison, les inversions se décalent de la courbe de mesure, et lors de la sortie des épis la fraction volumique est sous-estimée de 10 à 12%. Cette observation pourrait suggérer que la contribution des épis à l'émissivité globale du couvert est surestimée par les mesures *in situ*, et n'est pas significative pour l'inversion dans le canal 1.4 GHz. Dans ce cas, on pourrait douter de la pertinence et de la validité des points situés après le jour 165, mais on doit malgré tout remarquer que les inversions effectuées sur la période de flétrissement du couvert se répartissent approximativement autour de la valeur mesurée Fracv = 0.5%. La distribution des inversions autour des valeurs mesurées montre un nuage de points assez diffus, mais néanmoins bien corrélé (85,7%). La pente du nuage de répartition des inversions (0.55) révèle forte une tendance à la surestimation en début de cycle (jusqu'à la montaison) vraisemblablement due au calage des longueurs de corrélation sur couvert "étouffé" (après tallage), suivie d'une sous-estimation globale en fin de cycle ("transparence" des épis).

8.1.2 - Discussion, interprétation des jours aberrants

8.1.2.1 - Points particuliers de l'inversion de Mv_{sol} à 1.4 GHz

Une étude rapide des RMSE (modèle / mesures) montre que les paramètres sont inversés avec une précision satisfaisante jusqu'au jour 180 (RMSE compris entre 1 et 5 K), sauf au jour 119 (RMSE = 6,7 K) et 174 (RMSE = 8,4 K) qui se caractérisent par de forts contrastes d'humidité de sol. L'allure des RMSE ne semble donc pas fiable pour détecter les jours aberrants

Concernant l'inversion de l'humidité volumique du sol, on remarque qu'aux jours 110 et 112 l'humidité est surestimée. Ce phénomène est probablement dû à l'inadéquation des paramètres de rugosité sur les premiers jours de mesure (lié aux problèmes rencontrés lors de l'inversion préliminaire de hr et Q sur sol "clairsemé" cf. 7.2.1). Le jour 168 présente également une importante différence d'humidité entre la mesure ($Mv^{mes}=21,5\%$) et l'inversion ($Mv^{inv}=9,5\%$), alors que le RMSE est raisonnablement fixé à 2,3 K. Cela provient du fait que la mesure d'humidité *in situ* a été faite après une séance d'irrigation, alors que l'inversion repose sur des mesures radiométriques faites avant irrigation (valeur inversée logiquement faible).

Par ailleurs, on constate que les inversions et les mesures divergent nettement après le jour 161 à partir duquel le modèle surestime fortement l'humidité du sol. On peut vraisemblablement expliquer ce phénomène en supposant que le modèle, calé sur des longueurs de corrélation de "pleine végétation", tente de reproduire la diminution d'émissivité de la fin de campagne en réduisant au minimum la contribution du sol (augmentation d'humidité de surface), alors qu'il considère le couvert comme géométriquement stable (surestimation (Iz,lp)).

8.1.2.2 - Points particuliers de l'inversion de "Fracv" à 1.4 GHz

L'inversion de la fraction volumique de végétation conduit à des résultats acceptables mais néanmoins grossièrement répartis autour des valeurs mesurées, notamment en fin de campagne. L'inversion conduit à des valeurs aberrantes pour les jours 110, 112 et 113, 137, 168 et 180 à 186. Les divergences observées sur les trois premiers jours tend à confirmer l'inadéquation des paramètres d'ajustement en début de campagne, qui amène le modèle à surestimer la contribution de la végétation au détriment de celle du sol. D'autre part le jour 137 ne comporte qu'une seule polarisation dans les mesures (polarisation V), et dans ce cas l'inversion échoue. Toutefois, on a également remarqué des jours où des mesures à polarisation unique conduisent à des résultats satisfaisants (125, polarisation H; 165, polarisation V). L'effet d'une polarisation unique sur l'inversion des mesures radiométriques est encore mal connu, mais on peut supposer que l'absence des informations contenues dans la polarisation manquante est susceptible d'introduire un biais dans certains cas. Le jour 168 conduit à une fraction volumique de végétation très faible (proche de 0). Cela est très certainement dû à une minimisation de l'émission de la végétation pour compenser la surestimation de la contribution du sol lors de l'inversion de l'humidité de surface. Enfin, les jours 180 à 186 sont associés à un RMSE élevé (RMSE compris entre 7 et 11,7 K) qui indique clairement que les valeurs inversées ne permettent pas de simuler fidèlement les variations d'émissivité mesurées à ce stade de végétation (blé desséché).

Conclusion :

Le canal 1.4 GHz est très sensible à l'humidité de surface du sol pendant la période végétative du blé. Ce paramètre est essentiel pour l'inversion des mesures radiométriques dans les autres canaux, puisqu'il permet d'estimer le niveau d'émissivité du sol et donc sa contribution dans l'émission globalement mesurée. Les résultats d'inversion obtenus sur la fraction volumique de végétation sont surprenants dans la mesure où cette fréquence paraît ne pas détecter les épis. Il est probable que la fraction volumique de végétation mesurée avec les épis "intégrés" dans toute la strate de végétation soit surestimée pour l'inversion des mesures à 1.4 GHz. Enfin, le modèle continu paraît incapable de décrire l'évolution de la fraction volumique de végétation à partir du jour où le couvert se flétrit.

8.2 - Inversion des paramètres de surface à 10.65 GHz

L'allure des mesures d'émissivité dans le canal 10.65 GHz pouvaient laisser supposer que cette fréquence était peu sensible au développement du couvert (paramétré par la fraction volumique de végétation Fracv en %), ainsi qu'à sa teneur en eau (humidité gravimétrique de la végétation Mg en %). En effet, l'analyse de l'évolution temporelle de l'émission du couvert à 10.65 GHz montre une augmentation assez rapide de e_p qui semble bien coïncider avec le développement de la culture jusqu'à la montaison. Ensuite, on observe la présence de deux plateaux qui montrent que le signal sature de la montaison jusqu'à la maturation. Nous pouvons donc penser à priori qu'en dehors de la période d'installation de la culture, il sera impossible d'inverser la fraction volumique de végétation sur tout le cycle. Enfin,

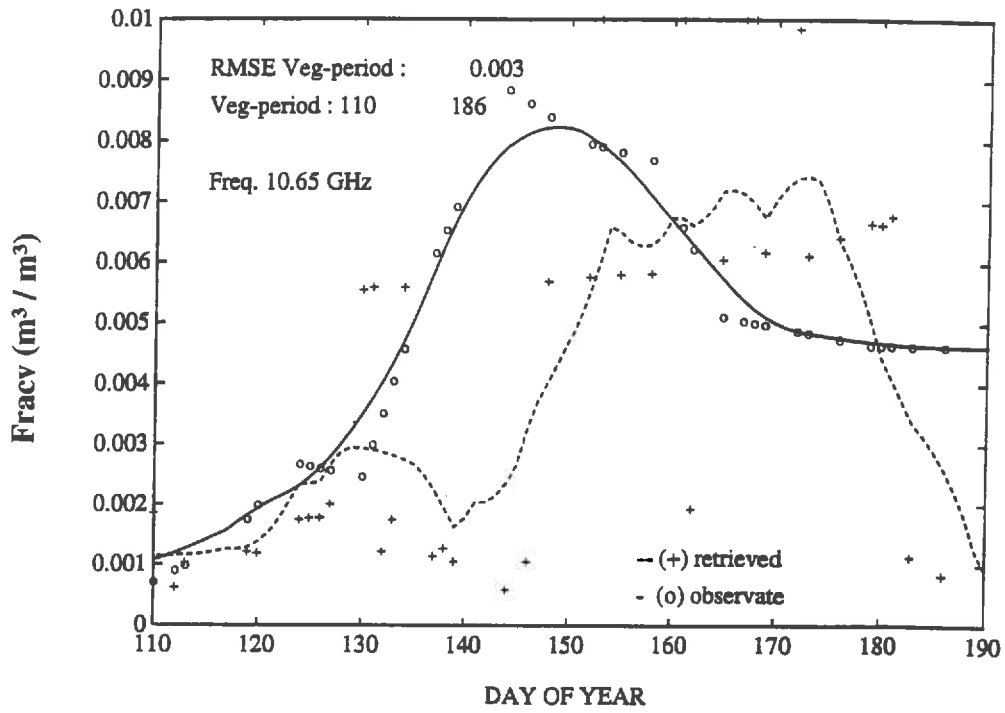


Figure 3.9 : représentation graphique des désaccords mesures / inversion de Fracv à 10.65 GHz. Conséquences de la "saturation" du canal 10.65 GHz.

on remarque une décroissance qui pourrait être liée au dessèchement du couvert (jour 165 - 170), mais l'étude de sensibilité semble indiquer que non.

Afin de vérifier nos hypothèses, nous avons procédé à l'inversion simultanée de Fracv et de Mg en utilisant les mesures d'humidité de sol *in situ* pour estimer Mv_{sol} . D'autre part, dans un souci de complémentarité avec le canal 1.4 GHz, nous nous sommes également proposé d'inverser indépendamment l'humidité du couvert, puis la fraction volumique de végétation. Il s'avère que toutes les tentatives d'inversion ont échoué. Concernant Mg, cette constatation est en accord avec l'étude de sensibilité du chapitre 6 qui démontre que les simulations du modèle composite dans la fréquence 10.65 GHz sont insensibles aux variations d'humidité du couvert (en période de végétation "turgescence"). Seule l'inversion de la fraction volumique de végétation abouti à des résultats suffisamment cohérents pour être discutés (Fig. 3.9).

8.2.1 - Interprétation : les causes théoriques de la saturation des simulations du canal 10.65 GHz

L'inversion de la fraction volumique de végétation a été conduite à partir du modèle continu calé avec des longueurs de corrélation caractéristiques d'un couvert fraîchement épié. Pendant la phase d'installation, l'évolution de Fracv est nettement sous-estimée (10 à 15 %) en moyenne. Il s'agit vraisemblablement là d'un décalage due aux longueurs de corrélation qui ne sont pas adaptées à une culture en court d'installation (avant tallage le nombre de pieds / m² est inférieur à 600). Puis, à partir du jour 137 (Fracv = 0,6%) qui annonce la fin du stade "feuillu" et le début de la montaison, on observe une saturation des inversions qui se stabilisent aux alentours de 0,6%. Or, c'est précisément à cette date que le modèle continu sature lui même, comme le montre la comparaison directe (Fig. 3.7b). Nous constatons alors que la méthode d'inversion, fondée sur la stabilité des longueurs de corrélation, n'est pas adaptée à l'estimation des paramètres de végétation dans le canal 10.65 GHz. La variabilité de la longueur de corrélation verticale l_z , intrinsèque aux modifications morphologiques du blé pendant son cycle de croissance, ne permet pas de prendre un couple ($l_z - l_p$) constant tout au long du cycle.

8.2.2 - Les causes physiques de l'échec de la modélisation du canal 10.65 GHz : les particularités des céréales

Parmi toutes les cultures agricoles, les céréales présentent la double particularité physiologique de taller, et d'épier. Ces caractéristiques biomorphologiques se révèlent extrêmement gênantes en radiométrie micro-onde. En effet, la couche végétale contribuant à l'émission mesurée est directement liée à la longueur d'onde de la radiation émise. Dans les très basses fréquences (1.4 GHz), la radiation est suffisamment pénétrante pour "tamponner" et intégrer les modifications géométriques qui peuvent intervenir dans le milieu végétal, et principalement au sommet (floraisons, fructification, bourgeonnement, épiaison...). Malheureusement, dans une certaine gamme de fréquences, où les longueurs d'ondes sont du même ordre de grandeur que les éléments végétaux du couvert (quelques centimètres), il se produit des phénomènes radiométriques complexes, qui sont vraisemblablement liés à la modification des coefficients de transfert radiatif dans la strate végétale considérée.

EXPLICATION DU COMPORTEMENT DES MOYENNES FREQUENCES (HYPOTHESES)

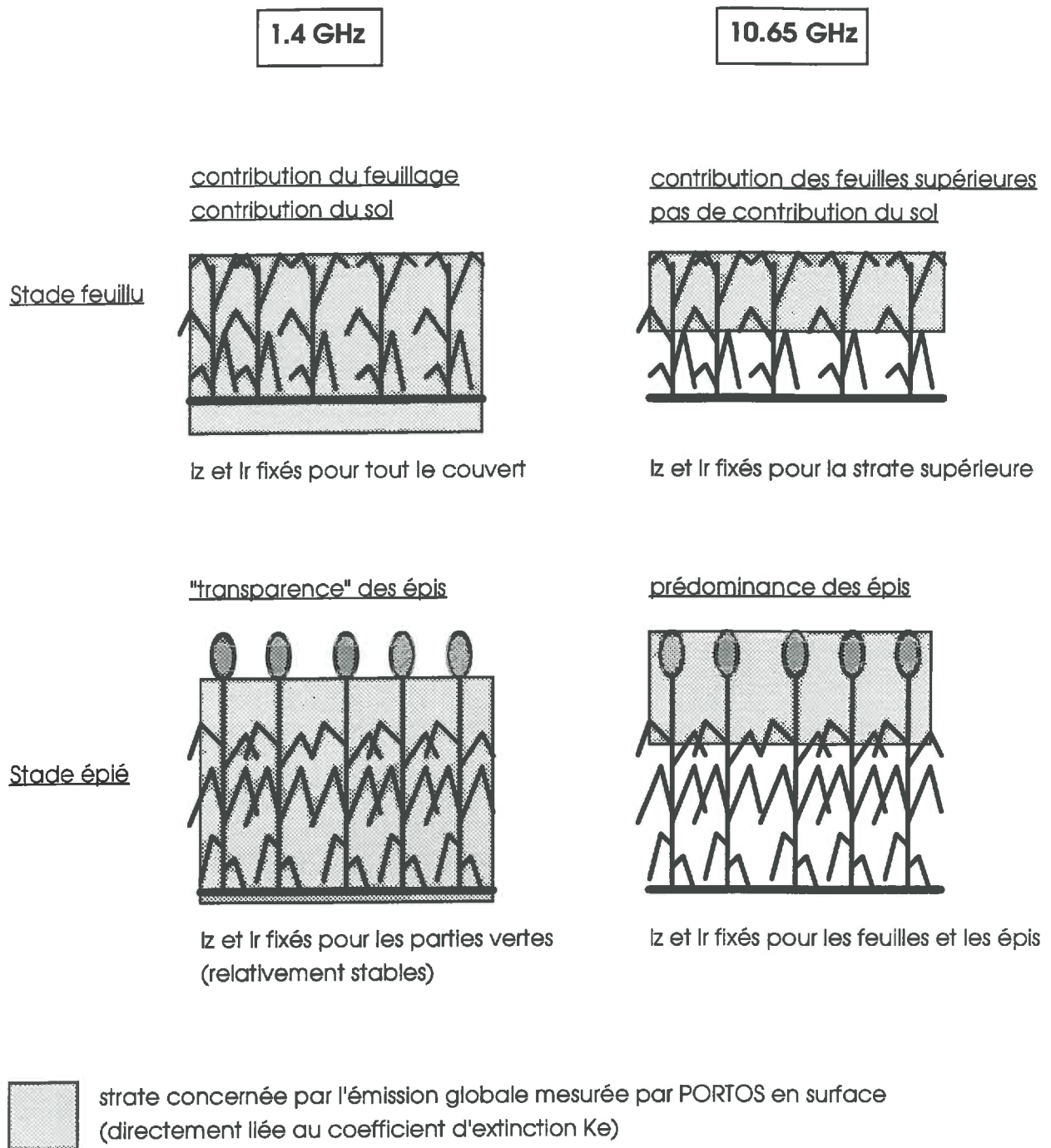


Figure 3.10 : illustration de l'influence des modifications morphologiques liées à l'épiaison sur l'émission hyperfréquence à 1.4 GHz et 10.65 GHz .

En l'occurrence, dans l'étude qui nous concerne, les épis ont une grande influence sur le niveau de l'émissivité mesurée dans les fréquences 10.65 GHz et 23.8 GHz (dont les radiations ont respectivement des longueurs d'ondes de l'ordre de 2,8 et 1,3 cm). Etant donné la profondeur de pénétration du rayonnement dans ces deux fréquences, l'évolution de la densité de végétation (coefficient de tallage), et les transformations morphologiques du couvert inhérentes à l'épiaison (élongation rapide des tiges et apparition des épis, provoquant une "translation" de la couche végétale détectée vers le sommet du couvert), on comprend qu'il soit impossible de trouver des paramètres de calage cohérents, valables tout au long du cycle de végétation (Fig. 3.10). Ceci expliquerait l'échec de l'inversion du canal 10.65 GHz. L'allure apparente des émissivités mesurées à 23.8 GHz laisse supposer que ce canal offrira les mêmes difficultés dans une optique d'inversion. On observe également une émissivité très élevée qui sature rapidement à 23.8 GHz. Cette saturation est significative de la structure verticale très particulière du blé.

Conclusion :

L'approche continue basée sur les équations de transferts radiatifs au sein d'un milieu homogène mono-stratifié ne permet pas l'inversion des paramètres de végétation d'un couvert de blé dans les moyennes fréquences. Il semblerait que dans le cas particulier du blé il faille recourir à la modélisation continue d'un milieu à au moins deux strates (couche de feuilles et de tiges, surmontée d'une couche d'épis), au sein desquelles on considérerait deux équations de transferts radiatifs (Ya-Qiu Jin, 1992). Mais d'ores et déjà, il apparaît que l'estimation des paramètres de densité et d'humidité sur un cycle de végétation complet est compromise dans les moyennes fréquences. Dans la mesure où l'inversion des longueurs de corrélation ne converge pas vers des valeurs "stables" après l'installation du couvert, il s'avère impossible de caler le modèle pour obtenir des simulations fidèles. En revanche, on peut tout à fait espérer aboutir à des inversions satisfaisantes sur une courte période définie par rapport à l'épiaison. Reste qu'une telle méthode serait lourde et d'un intérêt assez limité en utilisation sur le terrain (variabilité temporelle et inter-spécifique des longueurs de corrélation).

8.3 - Synthèse des résultats d'inversion des mesures à 1.4 GHz et 10.65 GHz

8.3.1 - Dans les basses fréquences

Le canal 1.4 GHz est très sensible à l'humidité de surface. Cette fréquence permet d'estimer l'humidité du sol sur les cinq premiers centimètres de façon satisfaisante pendant la période de végétation du blé. Durant la même période, ce canal est apparemment sensible à la biomasse "verte" du couvert (paramétrée par la fraction volumique de végétation des feuilles et des tiges). Il semblerait en effet que dans les basses fréquences, la contribution des épis à l'émission globale du couvert ne soit pas très importante. Il apparaît vraisemblablement que lors de la modélisation géométrique du couvert, nous avons surestimé la fraction volumique de végétation totale en intégrant les épis comme des émetteurs uniformément répartis dans la strate de végétation alors qu'ils sont localisés au sommet du couvert. Cette modélisation structurelle en une seule couche de végétation homogène ne semble pas convenir à l'inversion des mesures à 1.4 GHz.

D'autre part, il ressort de cette étude que le modèle d'inversion ne permet pas d'estimer les paramètres de surface sur un couvert de blé en cours de dessèchement. Ceci est probablement dû au changement de conformation spatiale de la végétation, lié au flétrissement, qui doit modifier les paramètres de calage du modèle pendant cette période (après le jour 161).

8.3.2 - Dans les moyennes fréquences

Les mesures radiométriques du canal 10.65 GHz sont très vite saturées à cause de la densité de végétation. A partir du jour où le couvert est installé, le signal mesuré par le capteur n'est plus sensible aux variations des paramètres de surface. Par conséquent, le canal 10.65 GHz ne permet pas d'estimer la biomasse du couvert de blé au cours du cycle de végétation de cette culture. De plus, la morphologie particulière des céréales ne permet pas d'utiliser le modèle d'inversion dans cette fréquence. La variabilité temporelle des longueurs de corrélation, liée aux changements morphologiques du couvert au cours du cycle végétal, nous empêche de caler le modèle avec des paramètres d'ajustement constants.

En revanche, il semblerait que le canal 10.65 GHz puisse fournir des informations intéressantes concernant le stade physiologique du couvert de blé, notamment en ce qui concerne la date d'épiaison et la période de dessèchement.

CONCLUSION GENERALE

INTERET DES MICRO-ONDES PASSIVES POUR LA TELEDETECTION SATELLITAIRE

1 - Synthèse des résultats, discussion : intérêt de la radiométrie micro-onde sur couverts agricoles

1.1 - Les données radiométriques

De l'analyse des données radiométriques PORTOS-1993 acquises sur une longue période de végétation (levée - dessèchement total), il ressort que deux paramètres du milieu au moins apparaissent déterminant dans l'évolution de l'émission micro-onde du couvert de céréale: l'humidité de surface du sol Mv_{sol} et la biomasse (paramétrée dans cette étude par la fraction volumique de végétation "Fracv"). Nous n'avons pas pu établir avec précision si la décroissance de la température de brillance en fin de cycle est due à la diminution de la permittivité diélectrique du couvert, ou si cette décroissance est liée aux modifications structurelles qui se produisent lors du flétrissement. Néanmoins, l'étude de sensibilité semblerait prouver que la teneur en eau n'est pas directement responsable de cette diminution de température, et que c'est donc la modification de structure qui serait déterminante. Toujours est-il qu'un couvert desséché émet globalement moins intensément qu'un couvert vigoureux.

On remarque également qu'à 10.65 et 23.8 GHz, il y a une saturation du signal après l'installation de la culture (fin de tallage), liée à la forte densité de végétation. L'émission micro-onde d'un couvert de blé est très élevée dans les moyennes fréquences, et le signal mesuré ne permet plus de détecter les variations des paramètres du milieu. Ceci tendrait à faire penser que les moyennes fréquences ne sont pas adaptées à la télédétection micro-ondes des céréales pour l'estimation des paramètres de surface.

Cependant, on peut noter un point positif. En effet, il semblerait que ces fréquences permettent de détecter avec précision la date d'épiaison du blé. Cet aspect mérite d'être approfondi et confirmé par des expérimentations ultérieures, car cela apporterait une information de tout premier plan dans l'hypothèse d'une application satellitaire. De même, le canal 10.65 GHz pourrait renseigner sur le suivi du développement du couvert, notamment en début et en fin de cycle de végétation (détecter la levée, et plus tard le dessèchement du couvert). Enfin, ce canal donne presque directement la température de surface du couvert (l'émissivité reste relativement stable pendant la période de végétation; T. Gaudin, 1993), ce qui pourrait être intéressant dans l'objectif d'une utilisation combinée des micro-ondes avec des mesures dans l'infrarouge thermique.

1.2 - Efficacité de la méthode d'inversion continue pour estimer les paramètres de surface sur un champ de blé dur

Dans cette étude, l'intérêt du modèle continu "composite" en tant qu'outil d'analyse de l'émission micro-onde d'un couvert de céréales a été analysé. Dans une étape préliminaire, l'inversion des longueurs de corrélation l_z et l_p montre que ces paramètres ne sont pas stables une fois le couvert installé ($Fracv > 0.2\%$ après tallage), particulièrement dans les moyennes fréquences (10.65 GHz). Le tallage, et plus fortement, l'apparition des épis provoquent une modification dans la distribution des fluctuations diélectriques qui règnent au sein du couvert. La variabilité temporelle des longueurs de corrélation qui en découle nous empêche de prendre un couple (l_z, l_p) constant pour toute la période de végétation et met en échec la méthode d'inversion à 10.65 GHz. Cependant, le calage de (l_z, l_p) à 1.4 GHz sur un couvert bien développé permet d'estimer assez précisément l'humidité du sol sur les cinq premiers centimètres au cours du cycle végétatif, jusqu'aux premiers signes de flétrissement (jusqu'au jour 161). Ceci semblerait indiquer que les basses fréquences sont pratiquement insensibles aux modifications structurelles liées à l'épiaison, et que cette gamme de longueurs d'ondes est bien adaptée à la télédétection des céréales.

Toutefois, les comparaisons directes effectuées entre les simulations du modèle continu "composite" et les mesures radiométriques prouvent que ce modèle est parfaitement apte à simuler l'émission micro-onde d'un champ de blé (à condition de lui appliquer les paramètres de calage appropriés). Les échecs d'inversion pour des fréquences supérieures à 10 GHz ne met pas en cause la l'efficacité du modèle. C'est apparemment l'algorithme d'inversion qui n'est pas adapté à l'étude des couverts de céréales, et plus généralement des couverts végétaux denses, dans les moyennes fréquences.

8.3.2.2 - Les perspectives d'utilisations de la méthode d'inversion

Les résultats obtenus permettent d'ores et déjà d'ébaucher plusieurs hypothèses d'application de la télédétection micro-onde des champs de céréales à grande échelle (aéroportée ou satellitaire, dans l'hypothèse où la résolution spatiale serait améliorée). Si l'on fait abstraction de la saturation du signal dans les fréquences supérieures à 10 GHz, on peut en revanche envisager l'utilisation des micro-ondes passives dans les basses fréquences (1 à 10 GHz). Notre étude a montré que le canal 1.4 GHz est très sensible aux variations d'humidité de surface sous un couvert. On pourrait donc songer à l'utilisation des mesures radiométriques en complément des modèles d'irrigation, ou en base de données pédologique. De plus, il semblerait que l'étude des amplitudes de variation d'émissivité liées au sol dans les différents canaux peut renseigner sur la nature des précipitations (cf. chapitre 4). La détection de l'humidité du sol sous une culture pourrait aussi servir à estimer la disponibilité en eau dans les grandes régions céréalières.

Toujours concernant l'état hydrique du milieu, il apparaît que les mesures radiométriques sont sensibles au flétrissement du couvert (diminution de la température de brillance dès que le blé franchi le seuil de 60% d'humidité). L'étude de la signature hyperfréquence d'une région céréalière pourrait renseigner sur l'état de turgescence de la culture détectée, et permettre de différencier les différents

stades de maturité, prévenir d'une éventuelle carence ou d'une propagation pathologique.

Il faudrait également poursuivre des recherches concernant la capacité du canal 10.65 GHz à détecter la date d'épiaison comme cela semble être le cas. Cela serait très utile pour anticiper et déterminer la période de floraison qui est très discrète chez les céréales.

2 - Les perspectives d'amélioration du modèle d'inversion continu

2.1 - Inversion des paramètres de surface dans plusieurs fréquences

Il résulte de cette étude que seules les basses fréquences permettent d'estimer les paramètres de surface en télédétection micro-onde des céréales. Le pouvoir pénétrant de ces radiations à grandes longueurs d'ondes permet d'intégrer une importante strate du couvert et de "tamponner" les modifications morphologiques de surface liées à l'épiaison. Après avoir ajusté les paramètres de calage pour chaque fréquence, il faudrait s'attacher à inverser les paramètres de surfaces dans plusieurs fréquences simultanément, de façon à optimiser la complémentarité des différents canaux. Les canaux les plus pertinents sont vraisemblablement 1.4, 5.05 et 10.65 GHz. Les bandes 1.4 et 5.05 GHz sont apparemment les plus sensibles aux paramètres du milieu, et le canal 10.65 GHz serait employé comme donnée "d'ajustement" pour prévenir toute dérive lors de l'inversion. De plus l'étude de sensibilité tend à montrer que la fréquence 5.05 GHz est la plus sensible aux paramètres de biomasse et d'humidité du couvert. L'avenir de la méthode d'inversion sur couvert de céréales repose donc maintenant en grande partie sur la cohérence des résultats qui seront obtenus lors de l'inversion simultanée des paramètres de surface dans les basses fréquences. Cette étude est actuellement menée par J.P. Wigneron (INRA de Montfavet, France).

2.2 - Développement d'un modèle à deux strates végétales

On peut espérer améliorer la prise en compte des épis dans les interprétations radiométriques en utilisant un modèle physique de simulation basé sur une modélisation du couvert de blé en deux strates distinctes (Ya-Qiu Jin, 1992). Il faudrait alors considérer deux systèmes d'équations de transferts radiatifs, ce qui compliquerait la résolution numérique du modèle d'inversion. De plus, un modèle à deux couches ne peut être envisagé qu'après l'épiaison, et son utilisation serait assez limitée en conditions réelles. Néanmoins, il pourrait être intéressant d'étudier les résultats obtenus avec un tel modèle, et de les comparer aux résultats issus d'un modèle à une seule strate. Cela permettrait sans doute de mieux comprendre le rôle des épis dans l'émission globale du couvert.

2.3 - Utilisation d'informations "a priori"

Afin de limiter le nombre de paramètres inconnus, nous pouvons envisager l'utilisation d'informations a priori sur l'état du couvert, ou anticiper sur l'évolution des paramètres de calage qui dépendent de la structure spatiale de la culture.

- **l'évolution de la biomasse.** L'utilisation de modèles de croissance pour connaître l'allure de l'évolution de la biomasse d'un couvert peut être envisagée pour paramétrer le modèle d'inversion et ajuster les estimations des autres paramètres de surface (hauteur, humidité...). En limitant le nombre de paramètres, on réduit les risques de dérive liés aux phénomènes de compensation sol-végétation lors de l'inversion. Cela permet d'optimiser l'algorithme d'inversion des paramètres de surface dans une fréquence particulière (le mieux étant d'estimer un seul paramètre par fréquence, les autres étant connus).

- **meilleure connaissance de l'effet des épis, des tiges et des feuilles.** Cette information nous permettrait de mieux interpréter les mesures radiométriques. En connaissant la contribution de chaque élément végétal il serait envisageable de faire des analyses agronomiques utiles sur le développement du couvert. Par exemple, il semble que les basses fréquences soient sensibles à l'évolution des tiges et des feuilles. En utilisant la complémentarité des autres fréquences, on pourrait penser à estimer la quantité d'épis, et peut être parvenir à faire des prévisions de rendement, ou de matière verte pour les cultures fourragères.

- **allure de l'évolution des longueurs de corrélation.** Cette information serait très utile pour optimiser le calage du modèle continu, et ainsi permettre l'inversion des paramètres de surface tout au long du cycle de végétation de la culture détectée. Cet aspect pourrait constituer un axe de recherche très intéressant pour l'étude de l'émission micro-onde des couverts végétaux dans les prochaines années.

3 - Les perspectives d'utilisation du modèle d'inversion à grande échelle

Dans l'immédiat, si la télédétection micro-onde des couverts agricoles ne peut se concevoir qu'en utilisation aéroportée (pour des raisons évidentes de résolution spatiale et temporelle liée à la taille et à la gestion des parcelles agricoles), l'application satellitaire des hyperfréquences devrait néanmoins être promise à un grand avenir dans le domaine de l'observation des surfaces naturelles continentales. Dans cet objectif, les algorithmes de résolution issus des modèles d'inversion continus paraissent bien adaptés à l'observation des couverts de type "persistants" (forêts, formations arbustives, garrigue, bordures littorales, savanes, pampa...). L'essentiel de l'intérêt des hyperfréquences passives repose sur la complémentarité des micro-ondes envers les autres domaines spectraux. C'est dans cet objectif qu'il faut envisager l'avenir des micro-ondes. Les améliorations techniques en cours de mise au point sur les nouveaux capteurs (meilleure résolution spatiale, meilleure précision des calibrations) conjuguées aux nombreuses études menées pour mieux comprendre les phénomènes physiques liés aux mesures radiométriques, permettent d'espérer d'importants progrès dans l'utilisation de la télédétection satellitaire à l'horizon du 21ème siècle.

Voyons donc maintenant quels sont les différents axes de recherches qui sont actuellement suivis concernant le développement des micro-ondes passives.

Du mètre carré au continent...

l'observation planétaire par les techniques de télédétection cherche à diversifier ses moyens d'investigation. La complémentarité des mesures effectuées dans différents domaines de longueurs d'ondes semble être la seule approche capable de permettre l'évaluation et le suivi de l'évolution climatique, biologique et physique de l'environnement terrestre.

3.1 - Optimisation des algorithmes d'inversion : Intérêt des mesures aéroportées

Dans le domaine récent de la radiométrie micro-onde passive sur couverts végétaux, les expérimentations en poste fixe comme celle réalisée cette année à l'INRA de Montfavet, sont particulièrement utiles pour la modélisation car tous les paramètres de surface peuvent être estimés sur des surfaces bien caractérisées. A moyen terme, il apparaît que des algorithmes d'inversion doivent être testés sur des mesures aéroportées, qui constituent une étape physique préliminaire aux procédures de résolution plus large comme l'interprétation de données satellitaires. C'est pourquoi des expérimentations aéroportées comme HAPEX SAHEL (1992) sont menées parallèlement aux mesures en postes fixes, afin de tester et de valider ces modèles, et d'analyser comment ces inversions pourraient être intégrées à des modèles de circulation globale (GCM) développés à l'échelle planétaire.

La qualité des techniques d'inversion dépend de deux facteurs : la précision des simulations du modèle mis en oeuvre et sa capacité à être inversé. Dans le modèle composite, la prise en compte de la diffusion de volume s'appuie sur une modélisation continue de la végétation, enrichie par le modèle discret qui tient compte des caractéristiques précises de dimensions, de forme et d'orientation des diffuseurs végétaux. Les longueurs de corrélation l_z et l_p qui décrivent les fluctuations spatiales de la permittivité diélectrique au sein de la végétation, sont des termes méconnus qui doivent être calés par des inversions préliminaires du modèle sur un couvert bien caractérisé. Ce sont précisément les variations de ces coefficients de calage qui sont limitants dans le cas présent. Néanmoins, cette étude montre l'intérêt des mesures hyperfréquences pour estimer les paramètres de surface. A ce sujet, les résultats obtenus dans le cas particulier de cette étude sur un couvert de blé encourageant à poursuivre la mise au point d'un modèle d'inversion continu qui pourrait être employé dans le cadre plus général de la télédétection des couverts végétaux (thème abordé au sixième Symposium International de mesures physiques et signatures en télédétection de Val d'Isère (J.P. Wigneron, Y.H. Kerr, F. Biard, N. Bruguier, Janvier 1994)).

3.2 - Synergie avec d'autres capteurs

La synergie la plus évidente concerne l'utilisation des micro-ondes passives avec les capteurs utilisés dans le domaine du visible et du proche infrarouge (SPOT, Thematic Mapper sur LANDSAT, NOAA...), qui permettent d'obtenir des informations sur la surface du couvert (nature et densité de végétation, surface foliaire) avec une résolution spatiale très fine (pixels de 20 à 30 m de côté, contre 60 à 100 Km en micro-ondes passives). Tout comme les sondeurs micro-ondes, ces capteurs

peuvent donner des informations intéressantes sur certaines caractéristiques morphologiques du couvert.

L'infrarouge thermique (IRT) peut également se révéler intéressant, mais dans ce domaine spectral il faut rester prudent et prêter attention à :

- la synchronisation des mesures, à cause de la très grande variabilité temporelle de la température de surface.

- la signification de la température de brillance mesurée en IRT, qui est une température de surface, alors que les hyperfréquences passives donnent une information intégrée sur toute la profondeur de pénétration de la radiation.

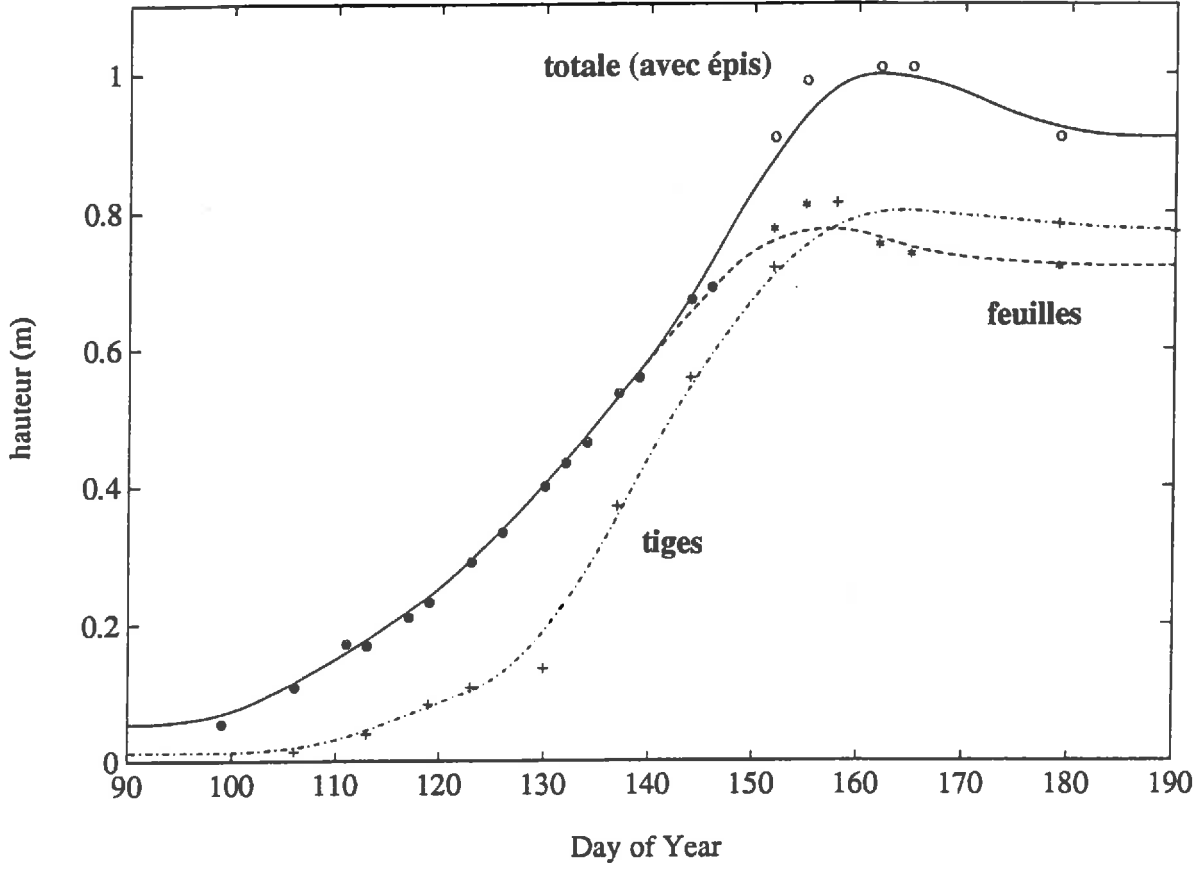
Dans le domaine des micro-ondes, mis à part l'utilisation de plusieurs fréquences pour estimer les différentes contributions au signal liées aux différentes sensibilités à certains paramètres, on peut également utiliser les hyperfréquences actives. Par exemple, l'utilisation de diffusomètres pourrait être utile. Ces capteurs mesurent le coefficient de rétrodiffusion radar (σ^0) à plusieurs angles d'incidence et peuvent renseigner sur l'évolution spatiale et temporelle de la rugosité de surface et de la biomasse. La résolution des diffusomètres embarqués sur satellites est assez grossière (50 Km pour Windsatt sur ERS-1), mais elle est bien adaptée au degré de résolution disponible sur les sondeurs micro-ondes.

Ainsi, les micro-ondes se révèlent être de bons indicateurs de l'état de surface. L'intérêt croissant pour les mesures couplées dans différentes longueurs d'ondes va sans doute permettre de dynamiser les recherches dans le domaine des hyperfréquences. Concernant la mise au point d'un modèle d'inversion continu, il reste encore beaucoup d'aspects à étudier : variabilité des longueurs de corrélation, prise en compte des effets de symétrie dans le couvert, modélisation de l'émission du sol... Plusieurs études sont en cours dans ce domaine, auxquelles participent de nombreux centres de recherche français (INRA, CNES, CNRS, CNRM Météo-France, LERTS, CESR).

ANNEXES

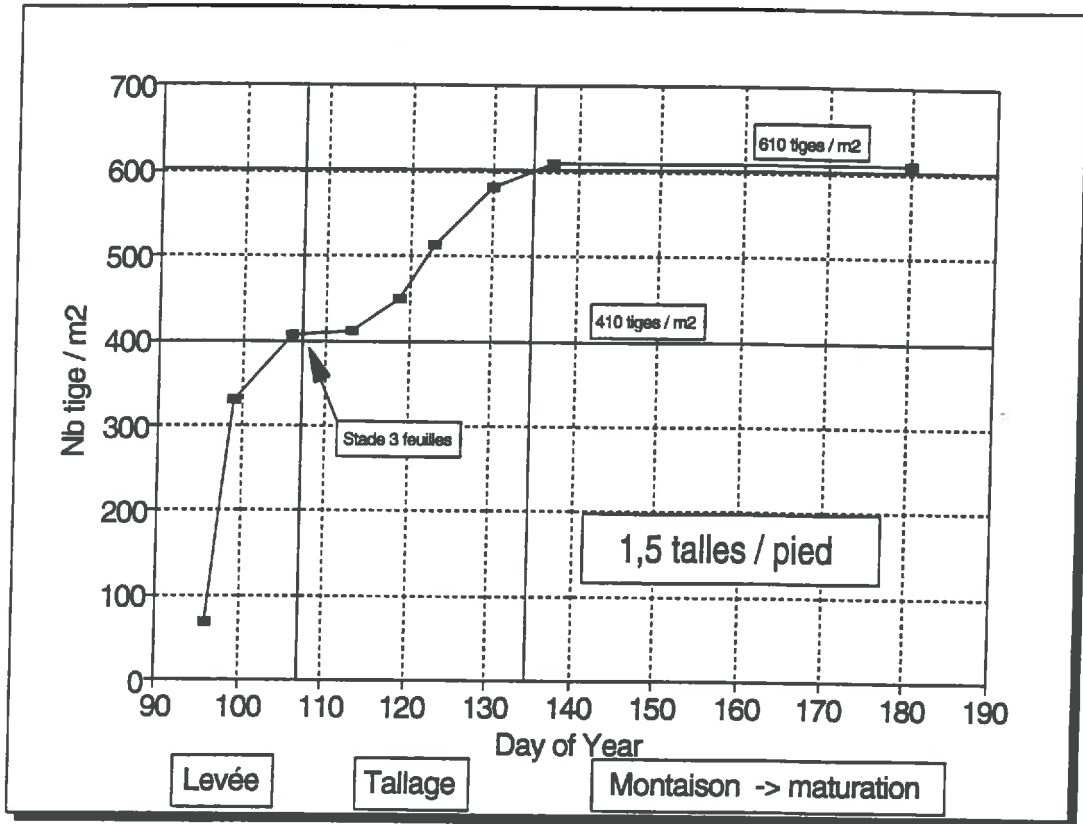
ANNEXE N° 1

EVOLUTION DE LA HAUTEUR DES DIFFERENTES STRATES DU COUVERT
AU COURS DE LA CAMPAGNE DE MESURES



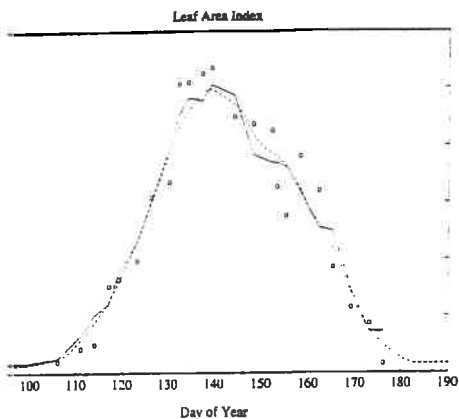
ANNEXE N° 2

EVOLUTION DE LA DENSITE DE TIGES / m²
AU COURS DU CYCLE DE VEGETATION

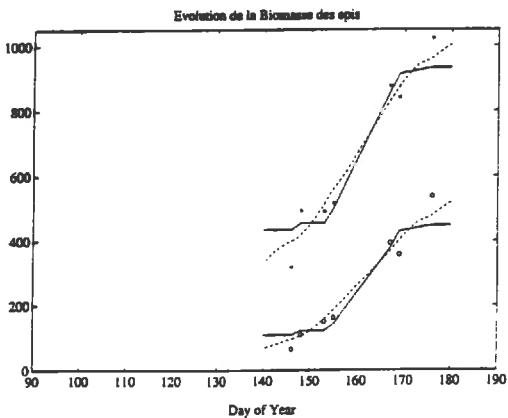
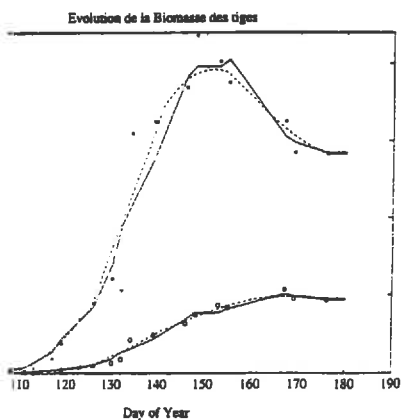
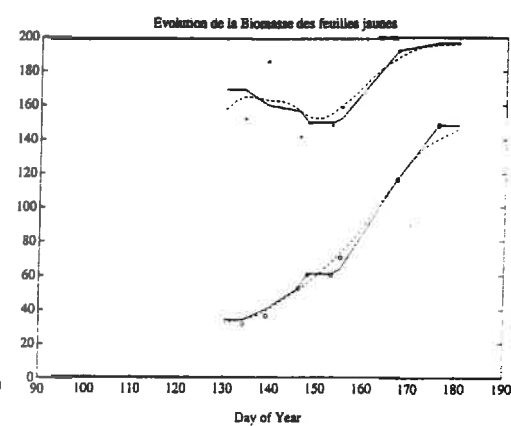
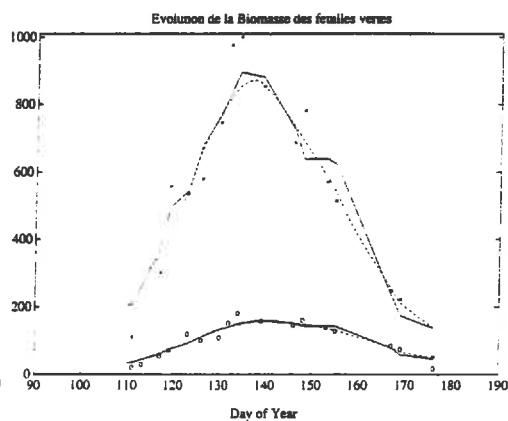
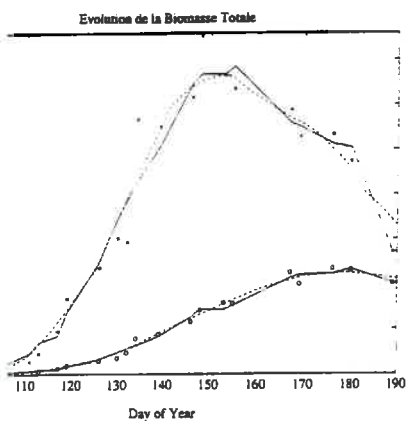


ANNEXE N° 3

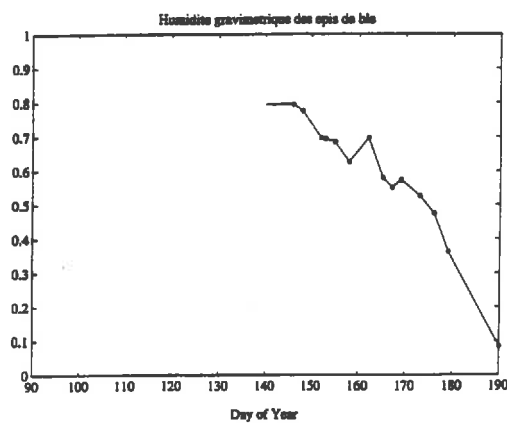
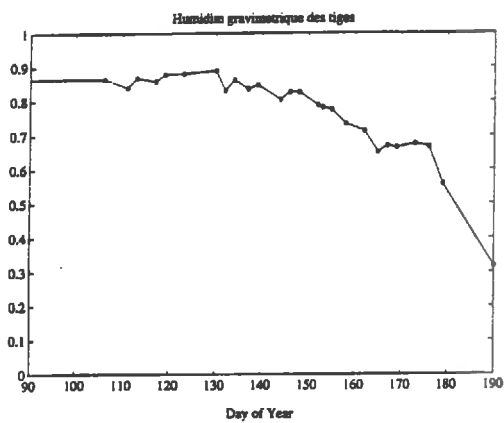
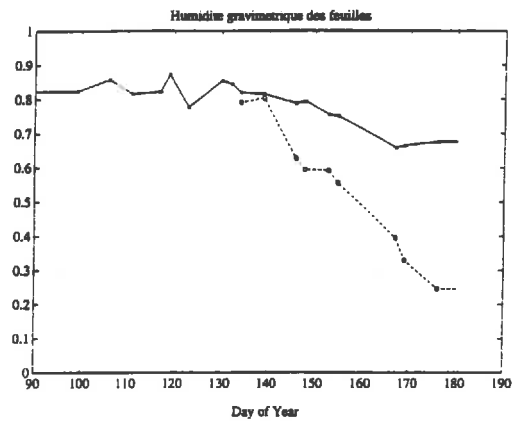
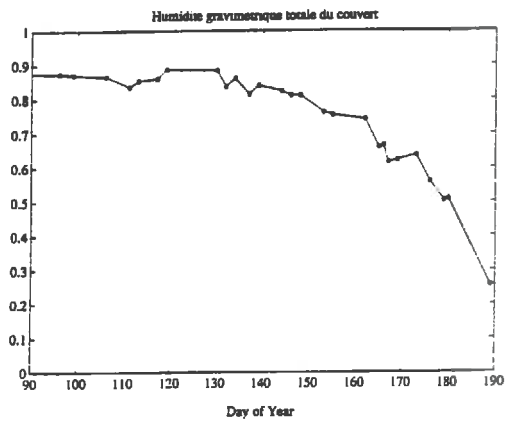
EVOLUTION DE L'INDICE FOLIAIRE, DE LA BIOMASSE ET DE L'HUMIDITE DU BLE AU COURS DU CYCLE DE VEGETATION



← (1) évolution du "Green Leaf Area Index" (m^2/m^2)



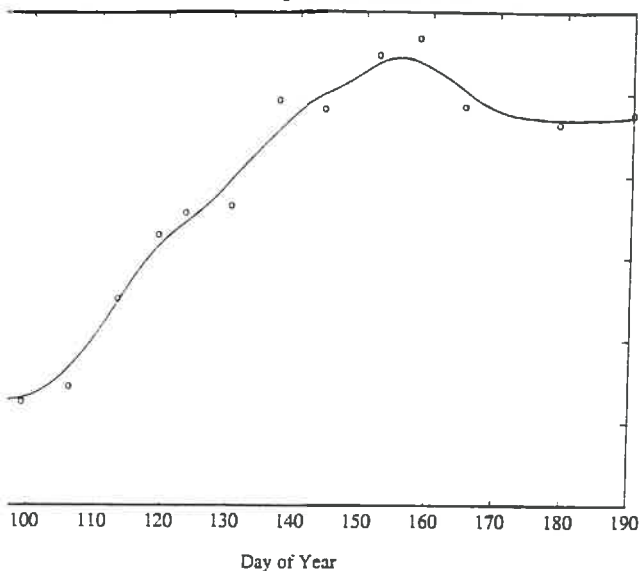
(2) évolution de la biomasse totale et de chaque élément physiologique du blé (g/m^2)



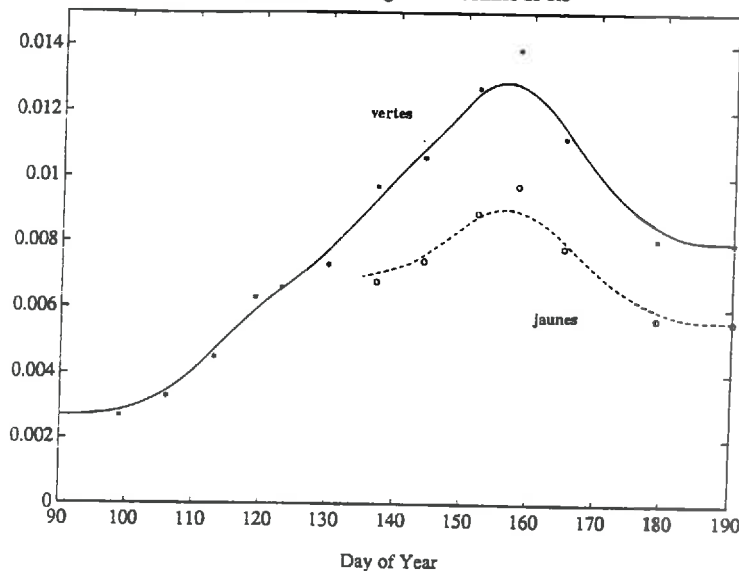
- (3) évolution de l'humidité gravimétrique (Mg en Kg/Kg) totale du couvert, et de la teneur en eau de chaque élément physiologique du blé (Mg feuilles, tiges, épis).

EVOLUTION DES DIMENSIONS DES DIFFUSEURS VEGETAUX DANS LE COUVERT DE BLE AU COURS DU CYCLE DE VEGETATION

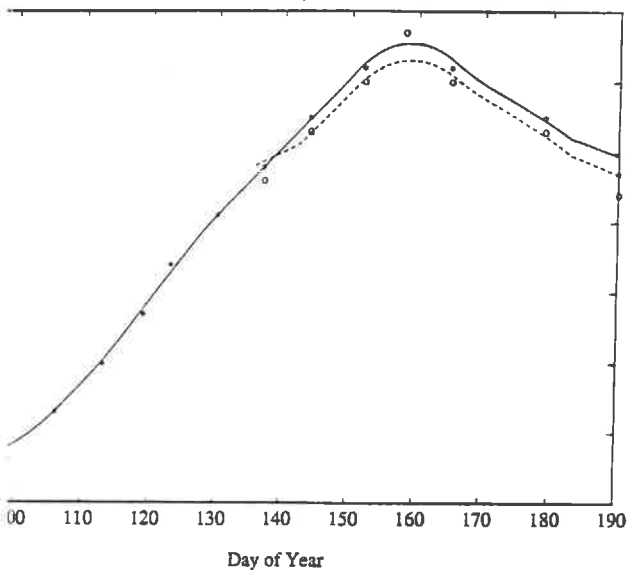
Evolution de la longueur des feuilles de ble



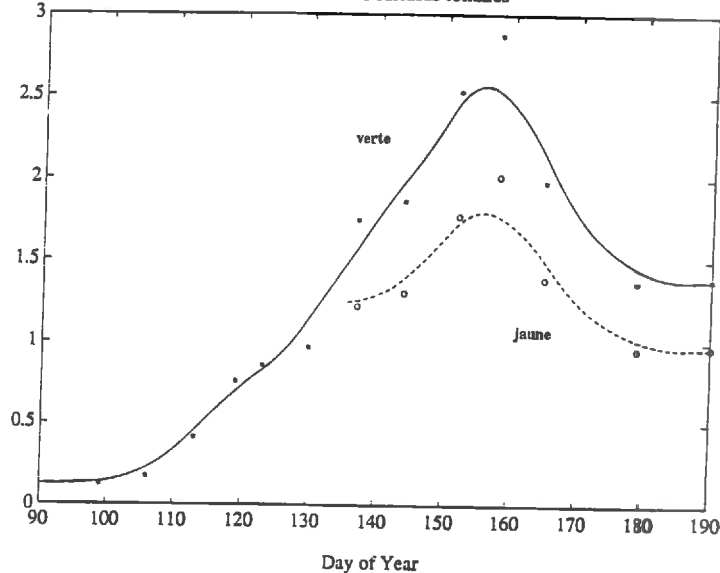
Evolution de la largeur des feuilles de ble



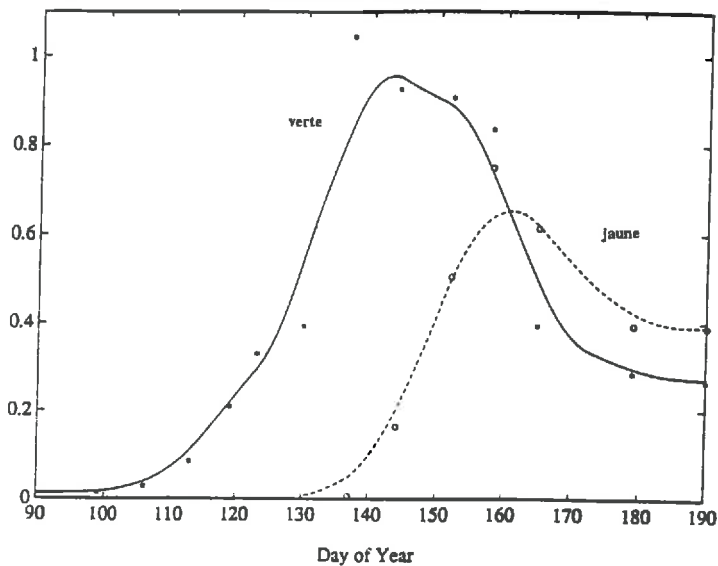
Evolution de Eq. des feuilles



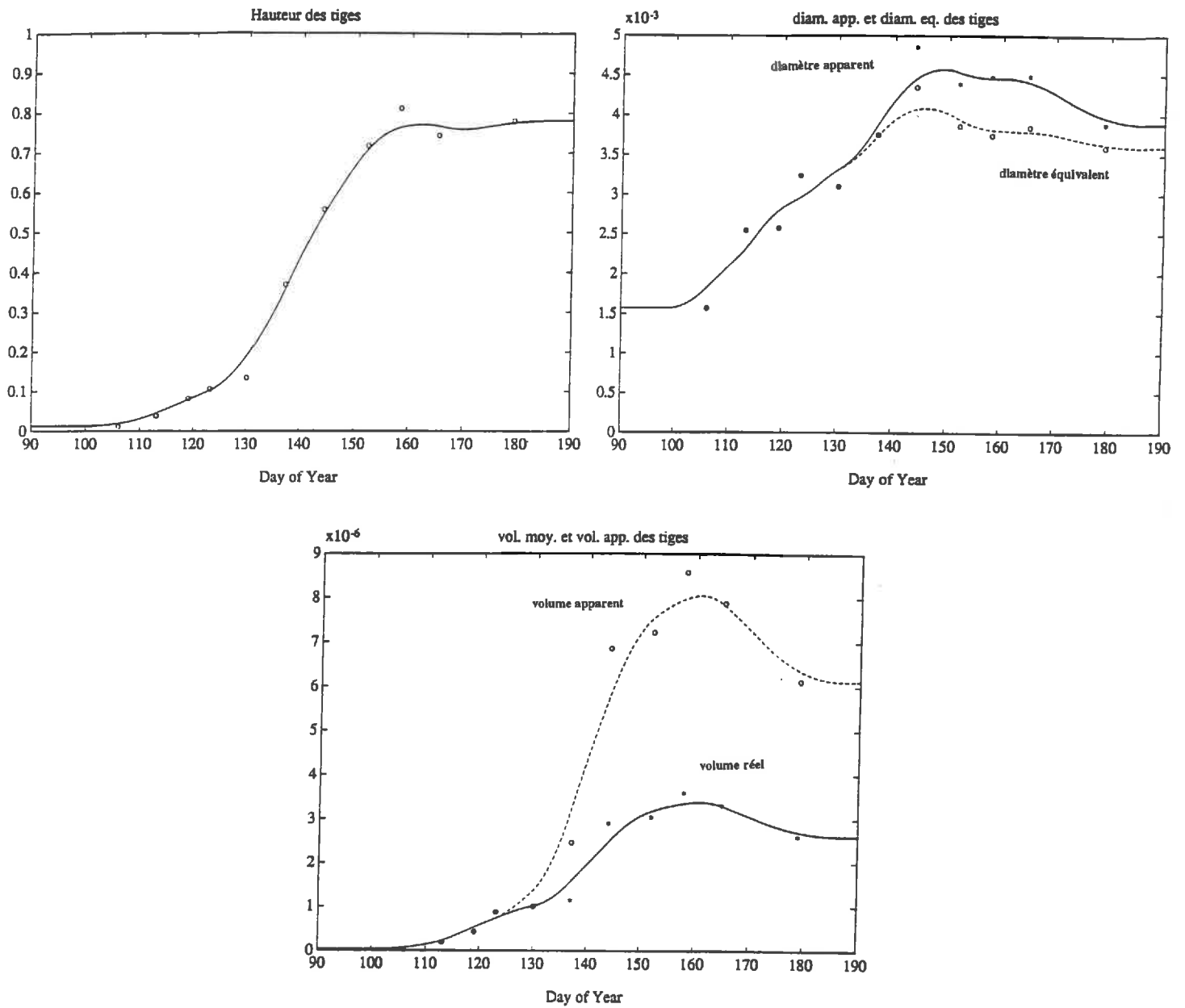
Evolution des surfaces foliaires



Evolution du volume foliaire

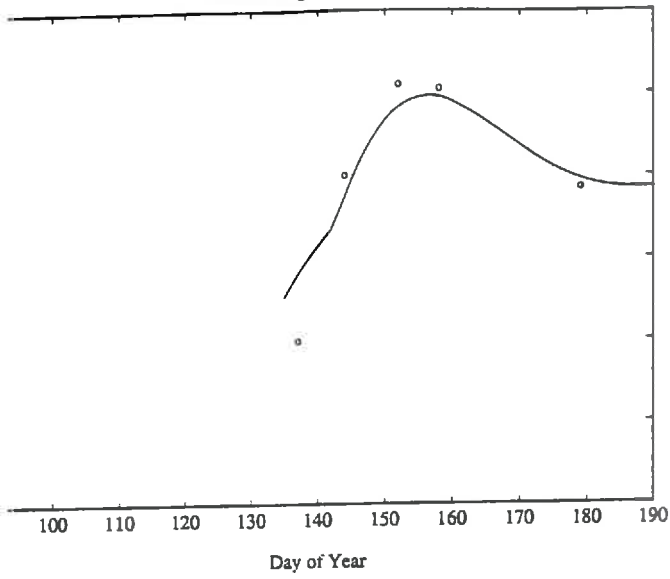


(1) caractérisation des dimensions (longueur, largeur, épaisseur équivalente (m)), de la surface (m²) et du volume (m³ feuille / m² sol) des feuilles de blé.

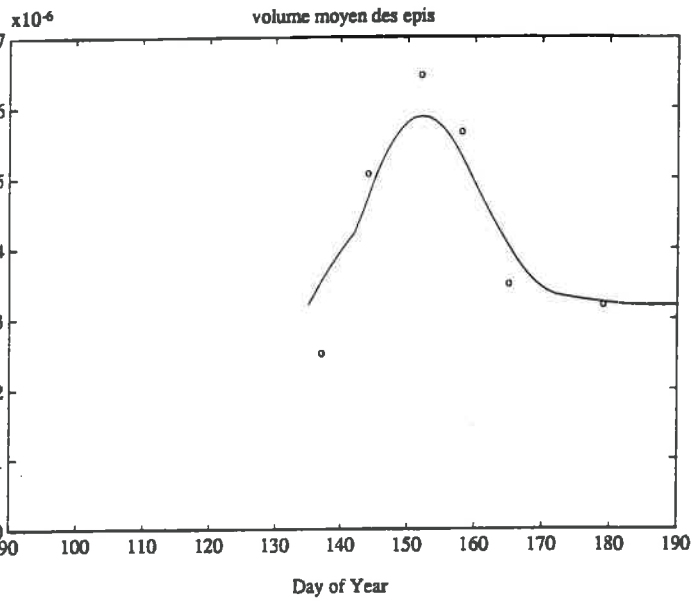
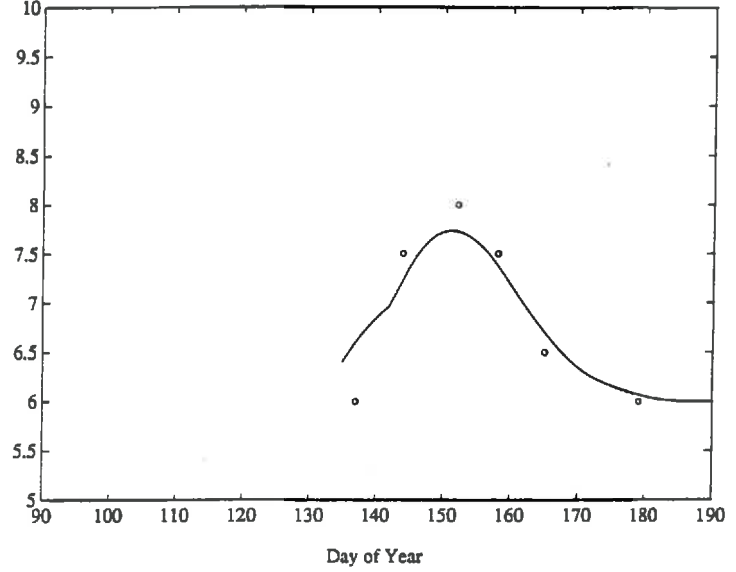


(2) caractérisation de la hauteur (m), du diamètre apparent (m), du diamètre équivalent (diamètre d'une tige assimilée à un cylindre plein (m)) et du volume réel et apparent d'une tige (m³).

Hauteur de grain sur les épis



Section moyenne des épis (carre) $\times 10^{-3}$



(3) caractérisation de la section carrée (m), de la hauteur de grains (m), et du volume approximatif des épis ($m^3 / \text{épis}$)

ANNEXE N° 5

ESTIMATION DE LA DENSITE DE MATIERE SECHE DES ELEMENTS DU BLE

le calcul de la densité de matière sèche a été fait sous l'hypothèse du *shrinking-model*

hypothèses :

- Volume total d'un organe = Volume d'eau + Volume de matière sèche
- On néglige les inclusions d'air contenues dans la plante car elles servent de refuge à l'eau (parenchyme lacuneux des feuilles, vaisseaux lignifiés et creux des tiges de graminées, enveloppes des grains...)

Paramètres :

- Volume total de chaque éléments = V_t (cm^3 / m^2)
- Poids frais : P_f (g / m^2)
- Poids sec : P_s (g / m^2)
- Densité de l'eau ρ_0 (1 g/cm^3)

Formule :

$$\rho_{ms} = \left(1 + (\rho_0 \cdot V_t - P_f) / P_s\right)^{-1}$$

Résultats :

Feuilles vertes : $\rho_{ms} = 0.47 \text{ g/cm}^3$

Feuilles sèches : $\rho_{ms} = 0.15 \text{ g/cm}^3$

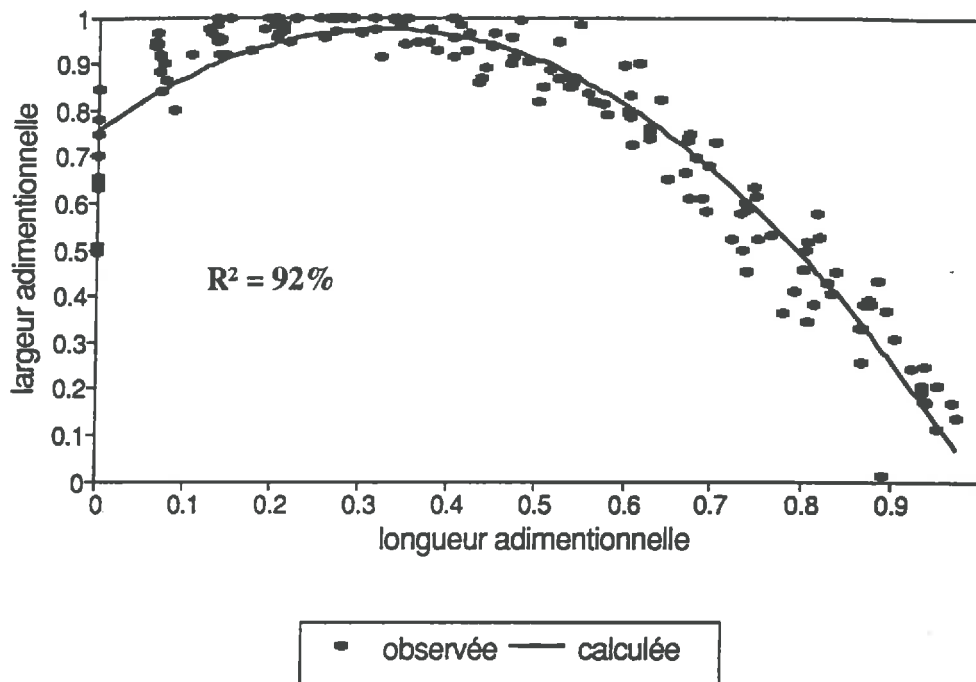
Tiges : $\rho_{ms} = 0.22 \text{ g/cm}^3$

Epis : $\rho_{ms} = 1.60 \text{ g/cm}^3$

Moyenne pour le couvert : $\rho_{ms} = 0.28 \text{ g/cm}^3$

ANNEXE N° 6

REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA RELATION LIANT LA LARGEUR
D'UNE FEUILLE DE BLE A SA LONGUEUR



L : longueur sur la feuille (à partir de la base du limbe)
l : largeur de la feuille de blé (considérée pour la longueur L)

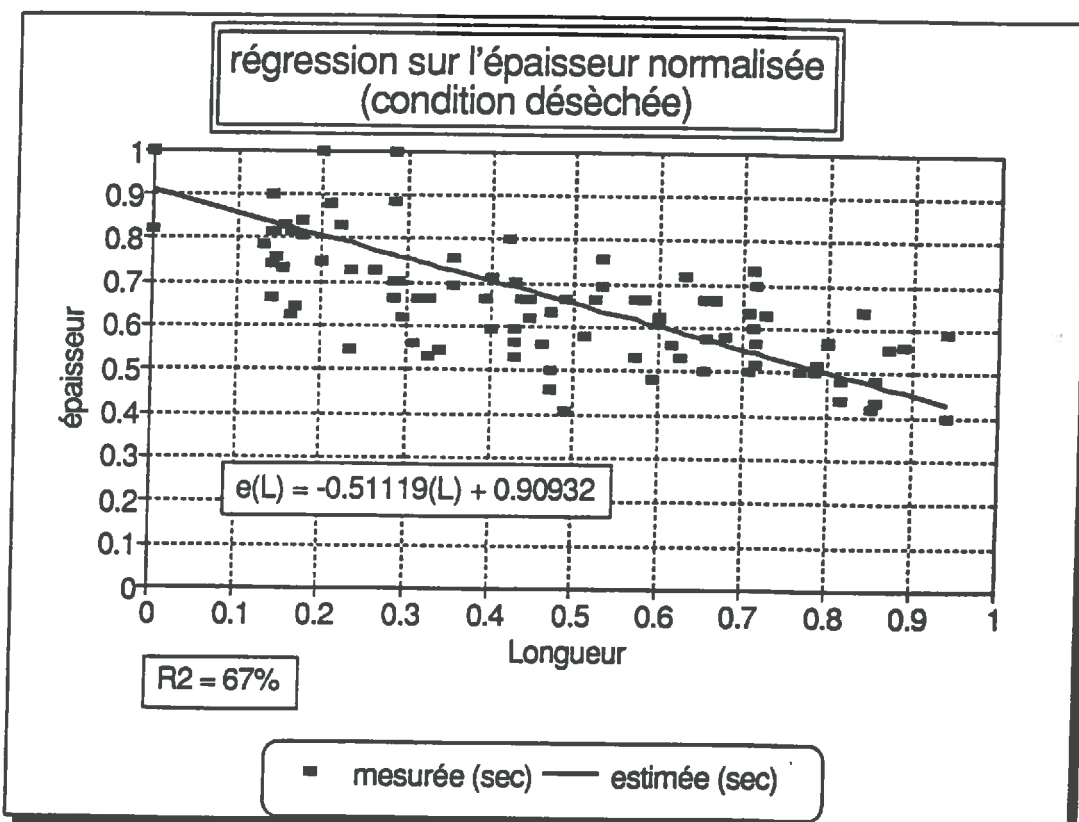
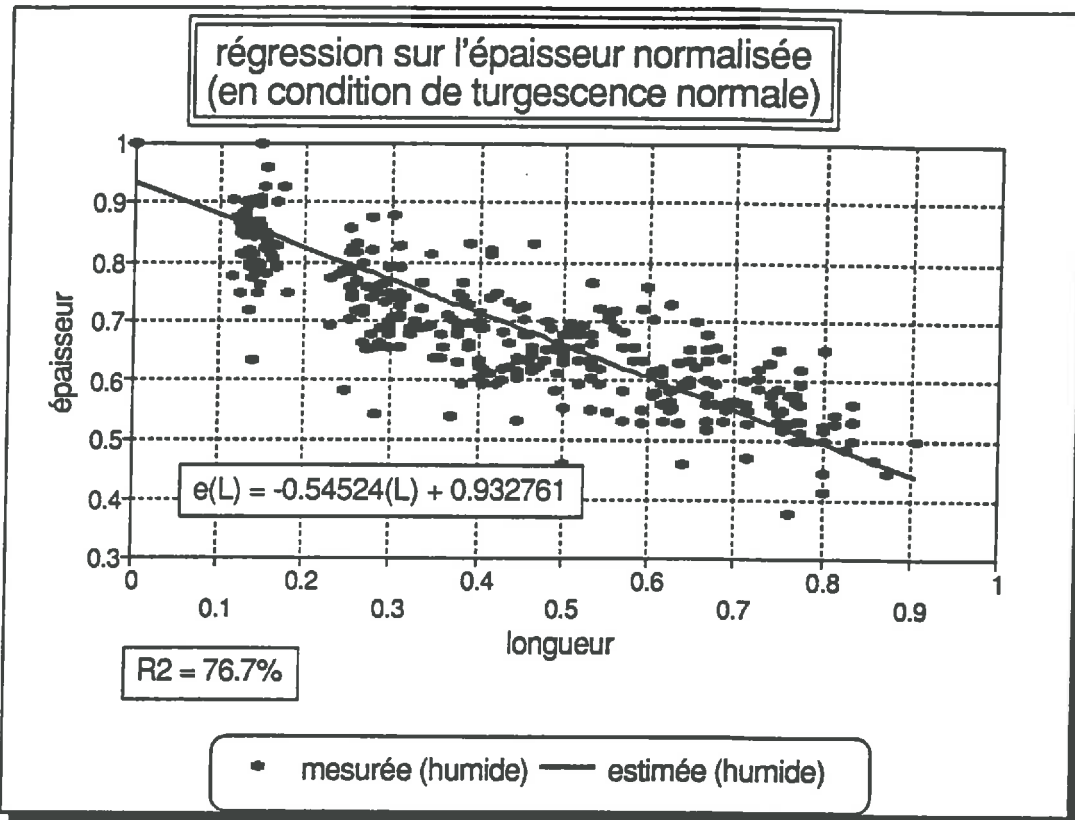
$$l(L) = -2.13494(L^2) + 1.365262(L) + 0.757307$$

Erreur standard de l'estimation de l : 0.071
Erreur standard de l'estimation du coefficient de L^2 : 0.073
Erreur standard de l'estimation du coefficient de L : 0.071

Pourcentage "expliqué" : $R^2 = 92\%$

Nombre d'observations : 170
Degré de liberté : 167

REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RELATIONS LIANT L'ÉPAISSEUR
DU LIMBE FOLIAIRE À LA LONGUEUR DE LA FEUILLE
POUR DEUX ETATS DE TURGESCE

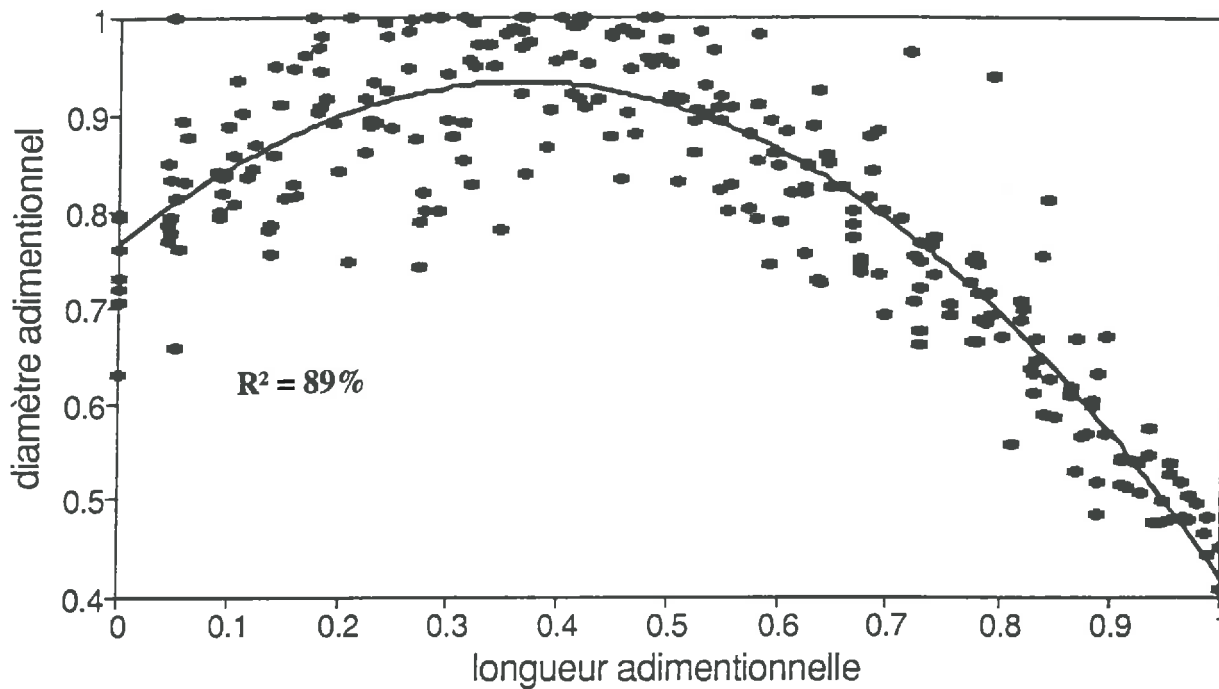


ANNEXE N° 8

REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA RELATION LIANT LE DIAMETRE APPARENT D'UNE TIGE A SA LONGUEUR

régression sur le diamètre apparent

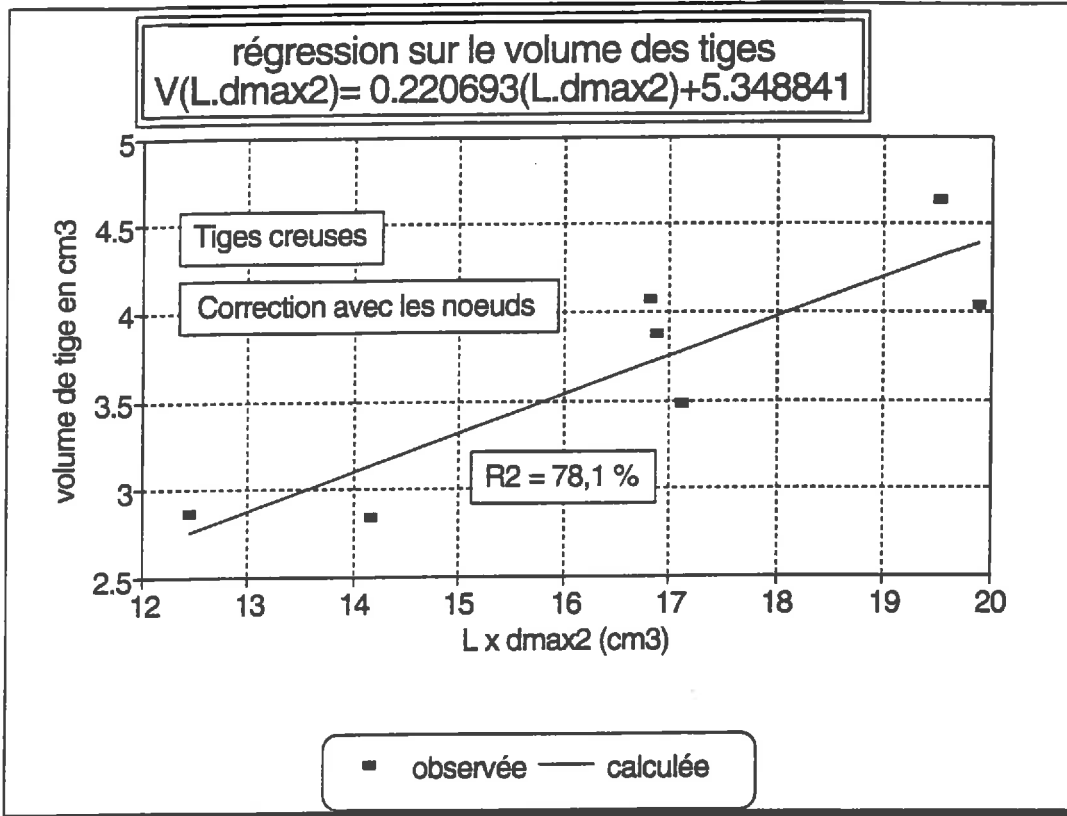
$$d(x) = -1.26929(x^2) + 0.923394(x) + 0.764765$$



• observée — calculée

ANNEXE N° 9

REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA RELATION LIANT
LE VOLUME REEL D'UNE TIGE A $L \cdot D_{\max}^2$



L : longueur totale de la tige (en cm)

D_{max} : diamètre maximum de la tige mesuré au premier tiers inférieur (en cm)

V : volume réel de la tige en cm³ (avec les creux des entre noeuds)

$$V(L \cdot D_{\max}^2) = 0.220693 (L \cdot D_{\max}^2) + 5.348841$$

Erreur standard de l'estimation de V : 0.341

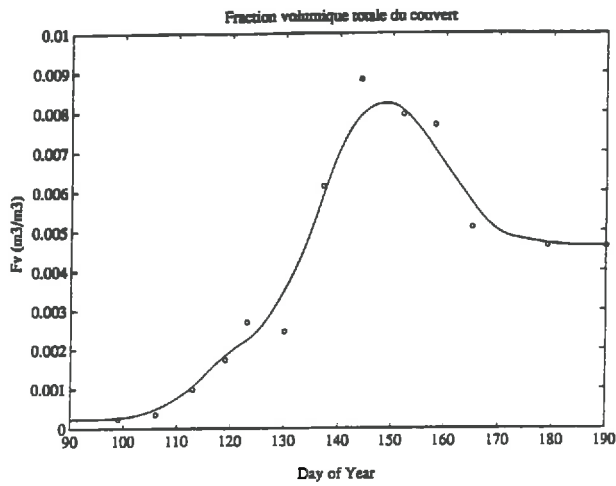
Erreur standard de l'estimation du coefficient de $L \cdot D_{\max}^2$: 0.097

Pourcentage "expliqué" : $R^2 = 78.1\%$

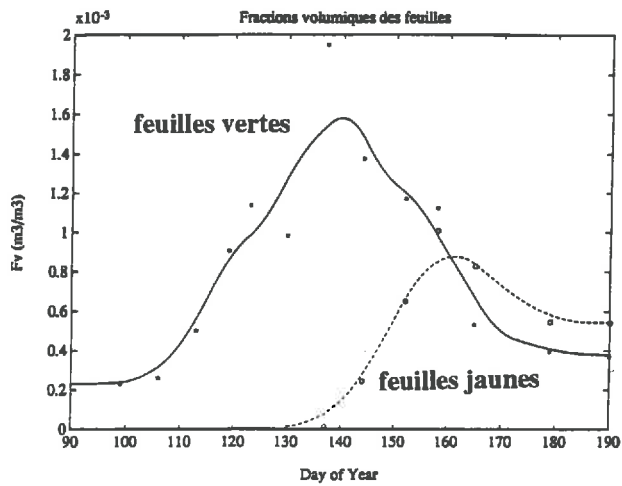
Nombre d'observations : 7

Degré de liberté : 5

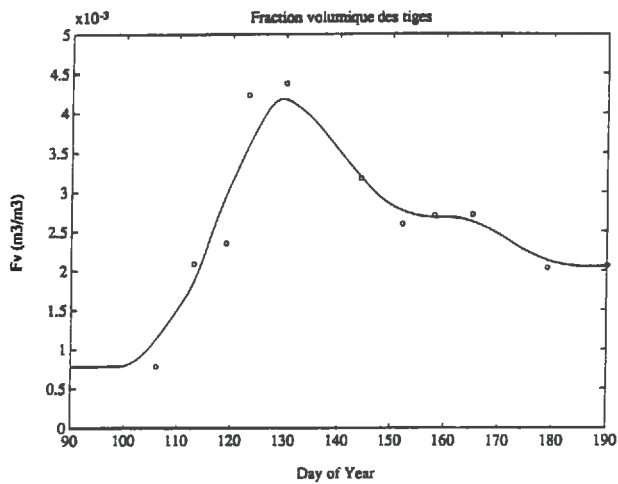
REPRESENTATION GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION TEMPORELLE DE LA FRACTION VOLUMIQUE DE VEGETATION DU COUVERT, ET DE CHAQUE ELEMENTS VEGETAUX



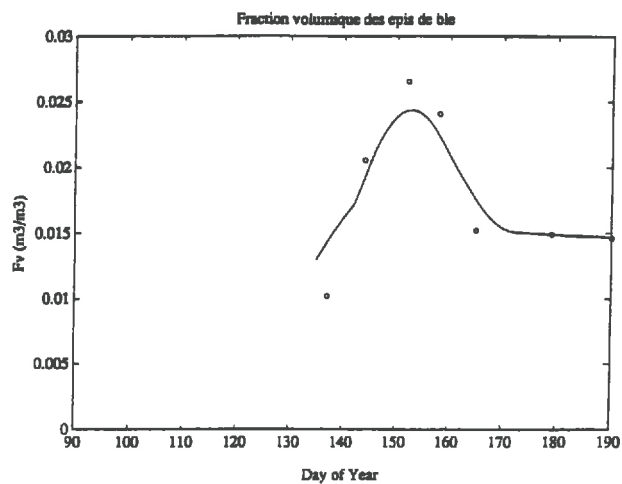
(1) calculée pour tout le couvert



(2) calculée pour la strate de feuilles



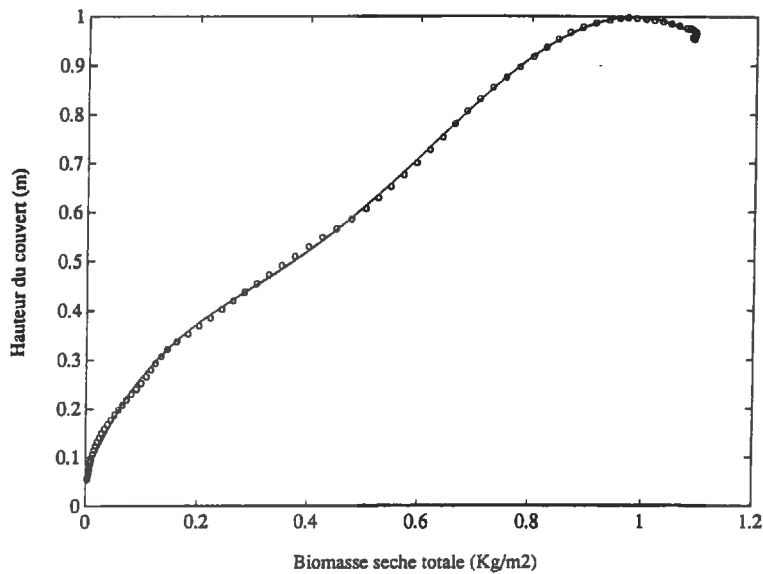
(3) calculée pour la strate de tiges



(4) calculée pour la strate d'épis

rq : chaque fraction volumique a été calculée pour une strate de végétation particulière, ce qui explique notamment les valeurs élevées de la fraction volumique des épis (la strate d'épis est localisée sur 15 cm seulement)

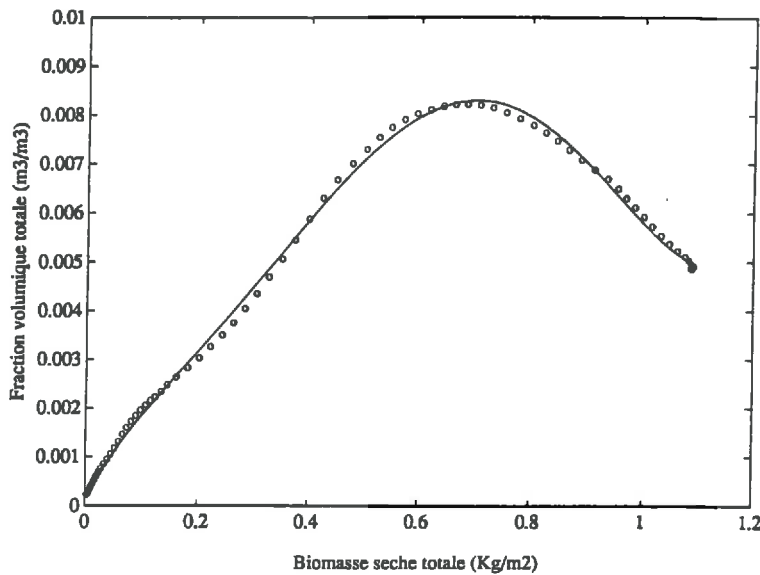
**PARAMETRISATION DE LA HAUTEUR TOTALE DU COUVERT "d"
ET DE LA FRACTION VOLUMIQUE DE VEGETATION "Fracv"
EN FONCTION DE LA BIOMASSE SECHE TOTALE DU COUVERT "Bst"**



x = Bst (en Kg/m²)

d = hauteur totale du couvert (en m)

$$d = 3.557(x^5) - 13.360(x^4) + 16.808(x^3) - 8.816(x^2) + 2.745(x) + 0.0634$$



x = Bst (en Kg/m²)

Fracv = Fraction volumique de végétation du couvert entier (en m³/m³)

$$Fracv = 0.0709(x^5) - 0.1742(x^4) + 0.1318(x^3) - 0.0420(x^2) + 0.0190(x) + 2.356e^{-4}$$

**REPRESENTATION DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE BRILLANCE
EN FONCTION DE LA BIOMASSE SECHE TOTALE "Bst"
ET DE L'HUMIDITE DU COUVERT "Mg"**

Les graphiques suivants représentent l'évolution de "TB" pour le modèle continu "composite" et le modèle continu "simple".

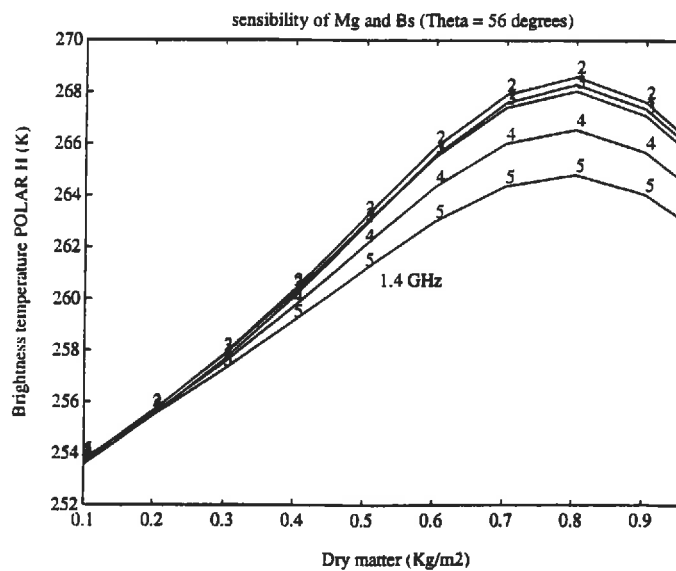
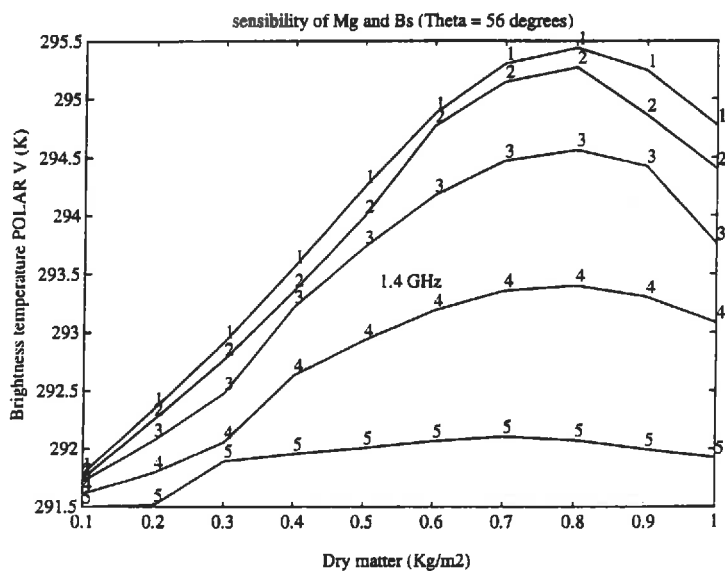
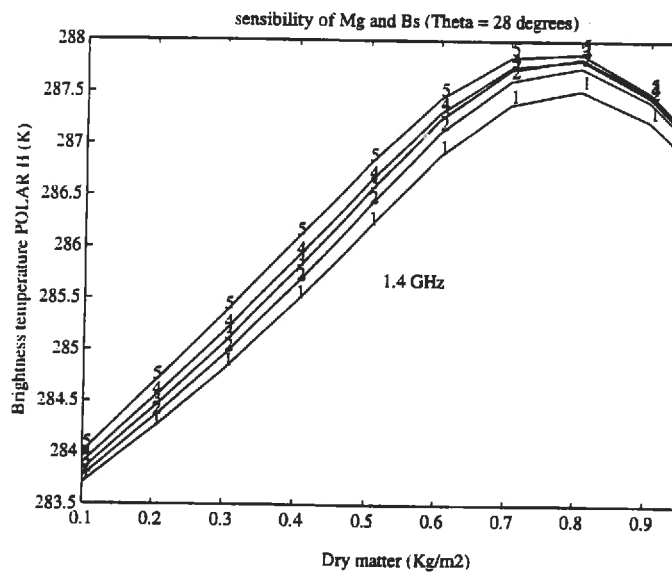
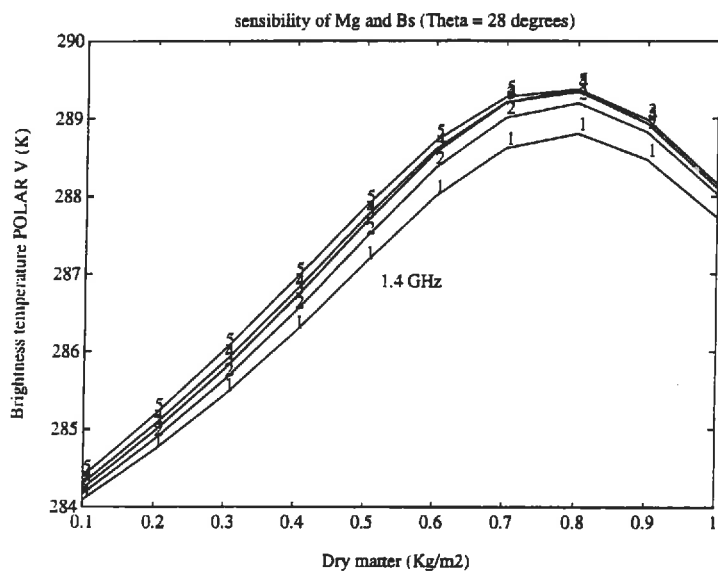
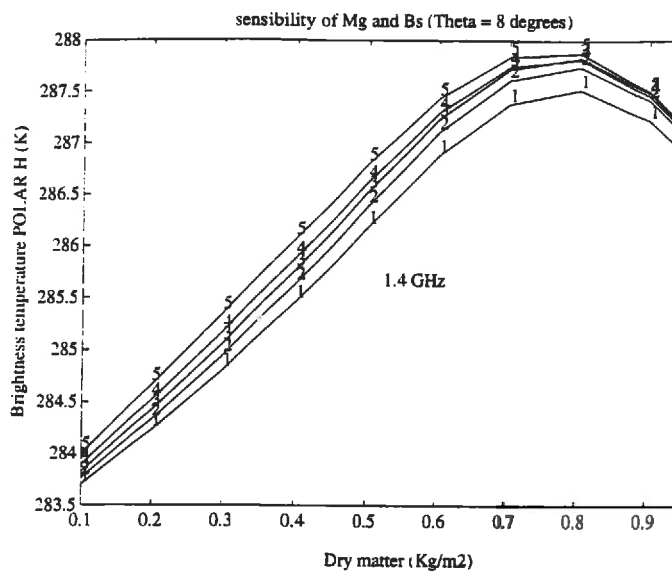
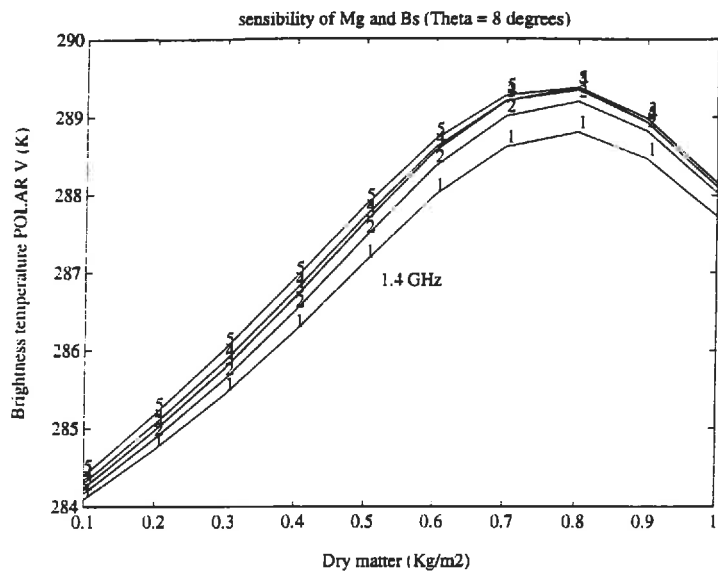
On a fait varier la biomasse sèche totale (Bst en Kg/m², variation de 0.1 à 1 Kg/m²) et la teneur en eau du couvert (Mg en Kg / Kg, variation de 50% à 90%).

L'humidité volumique du sol a été respectivement fixée à 1% (sol sec) puis à 30% (sol humide).

L'évolution de la TB a été représentée pour 3 fréquences (1.4, 5.05 et 10.65 GHz), dans les deux polarisation (H & V), pour trois angles d'incidence particuliers (angles de Gauss, propres aux modèles).

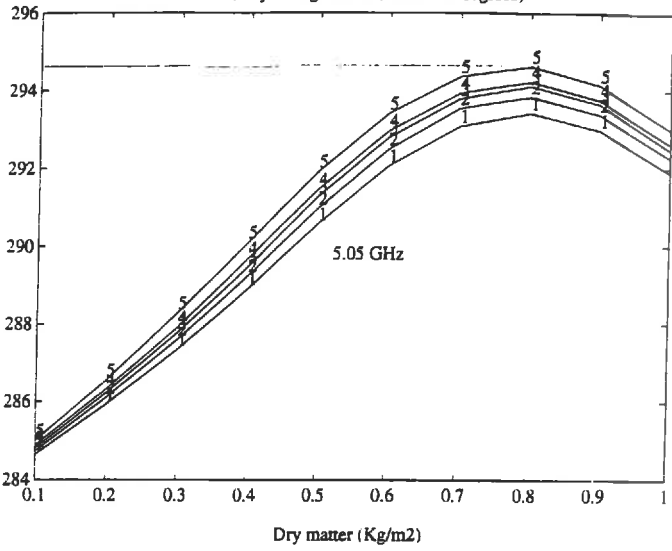
Les numéros associés aux courbes représentent le niveau d'humidité du couvert (1 = Mg à 50% jusqu'à 5 = Mg à 90%), de façon à pouvoir distinguer l'effet de la teneur en eau sur les simulations de températures de brillance

(1) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 1% - 1.4 GHz

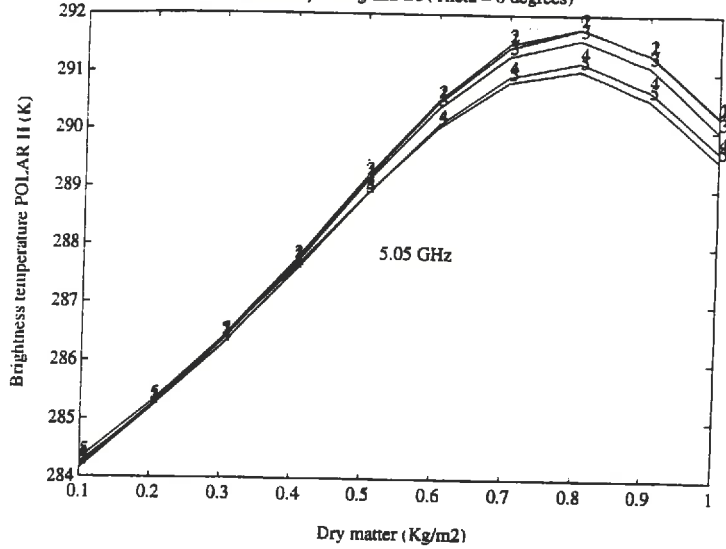


(2) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 1% - 5.05 GHz

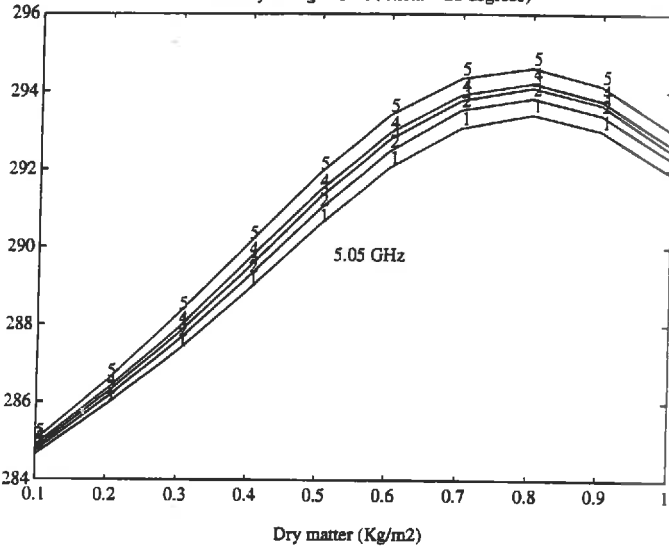
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



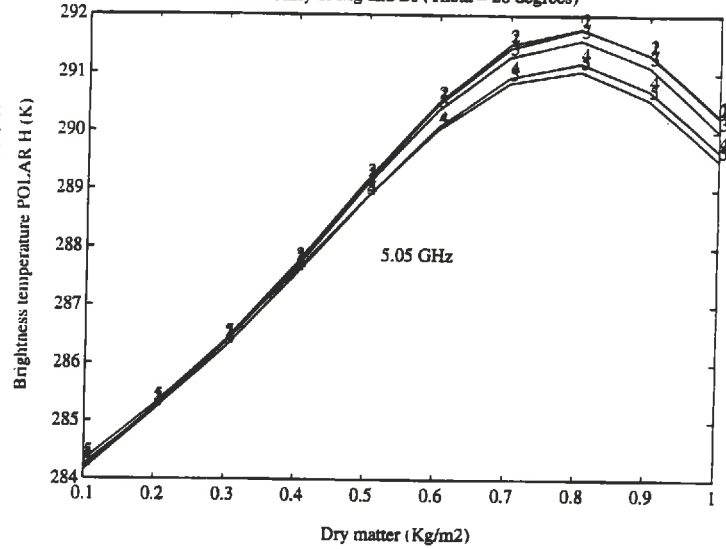
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



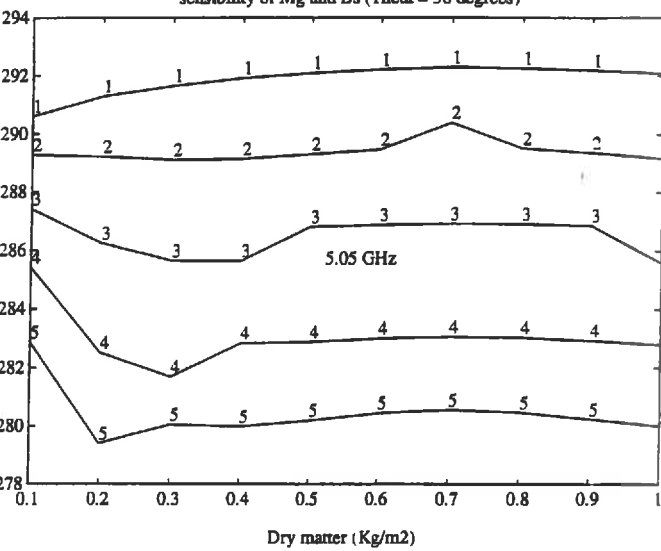
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



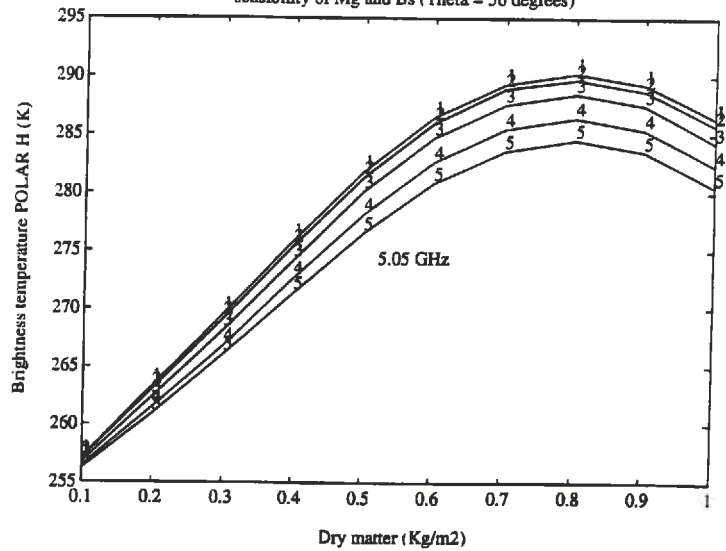
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



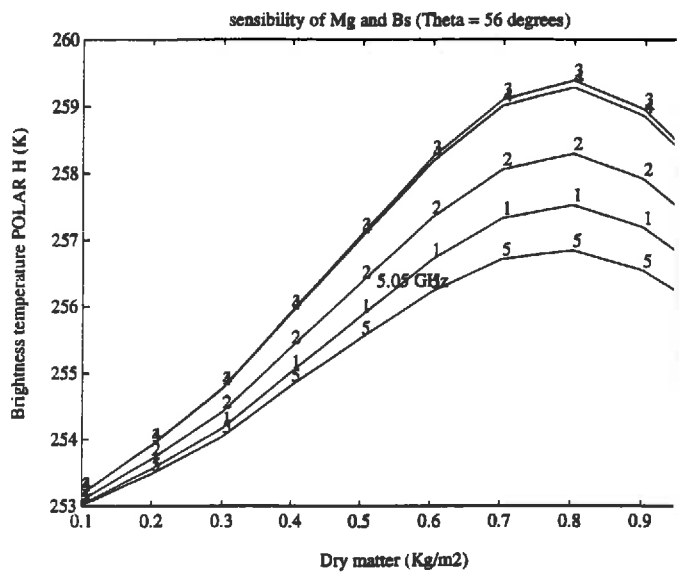
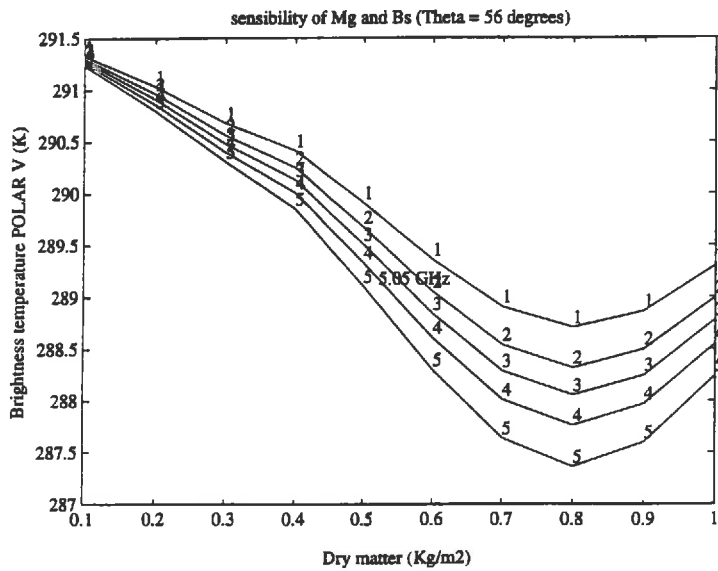
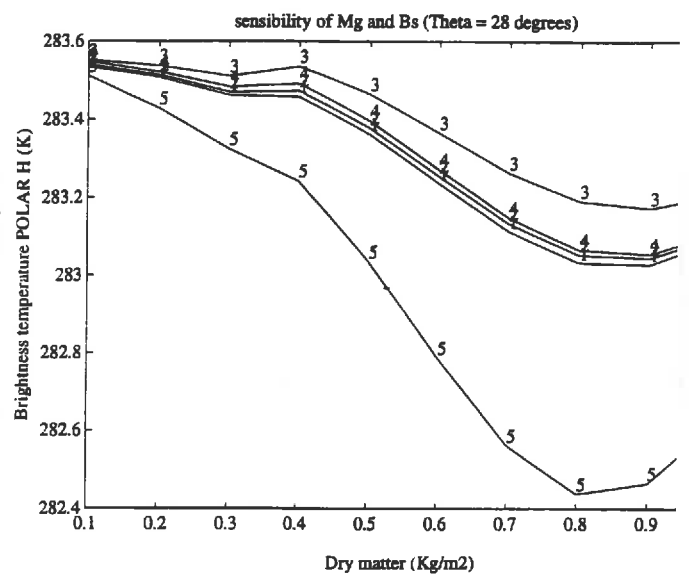
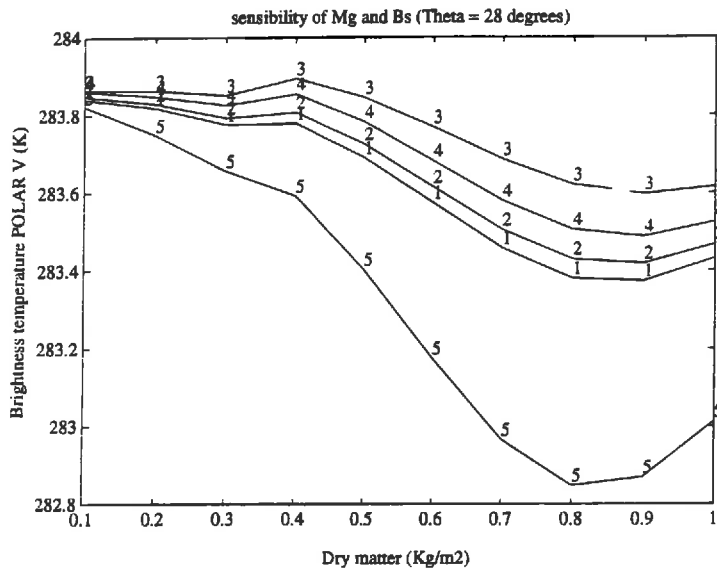
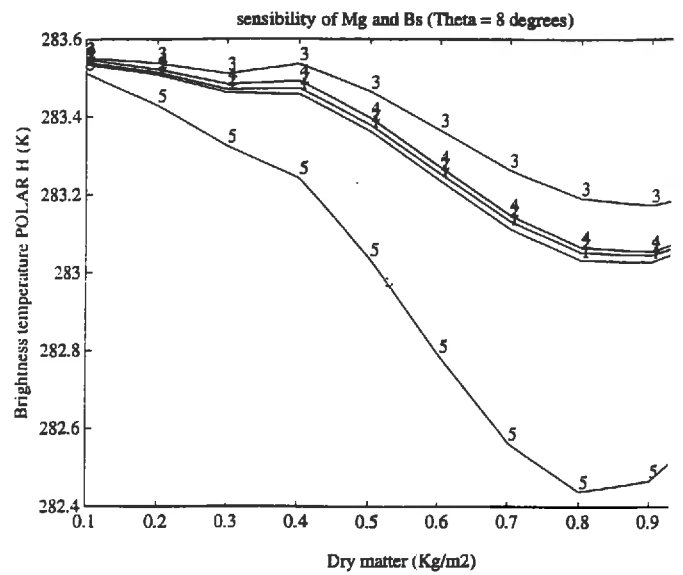
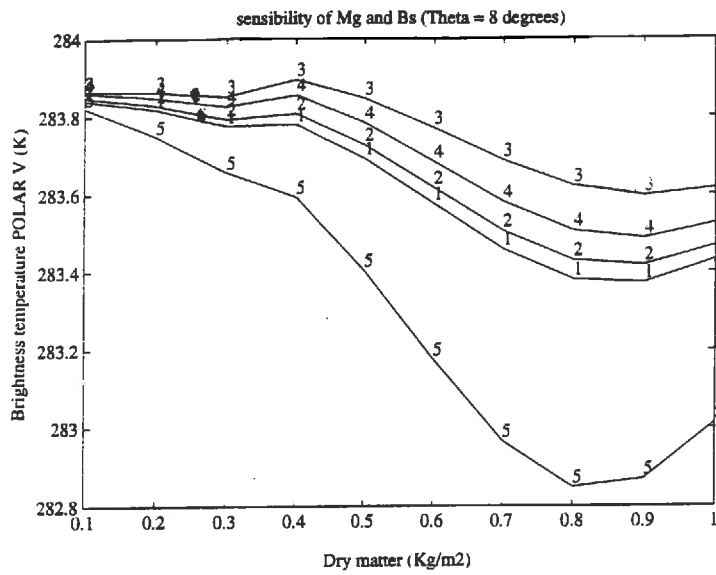
sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)



sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)

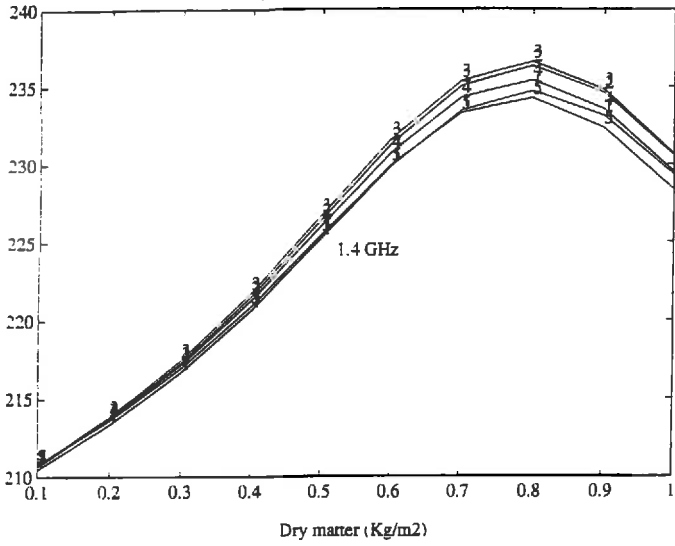


(3) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 1% - 10.65 GHz

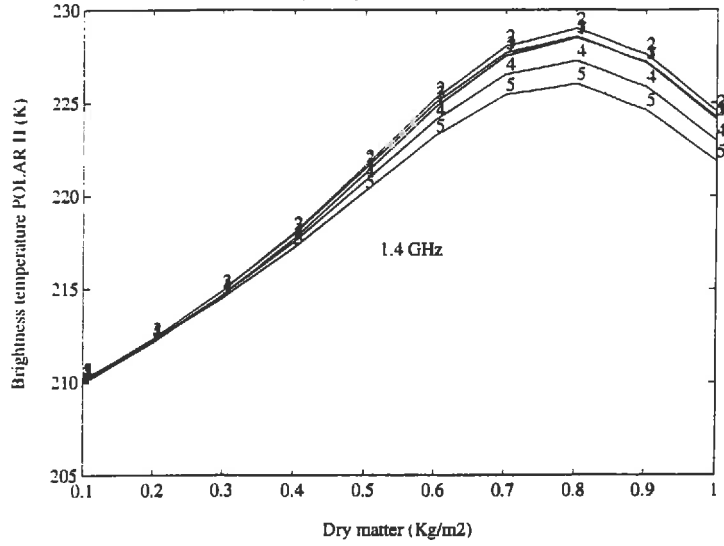


(4) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 30% - 1.4 GHz

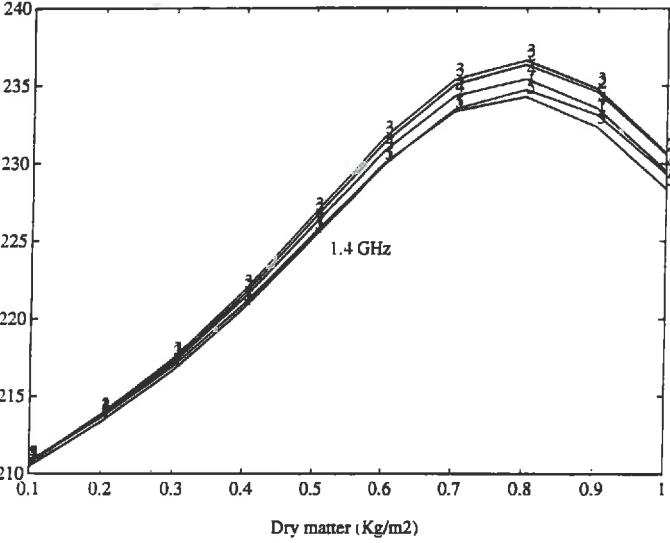
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



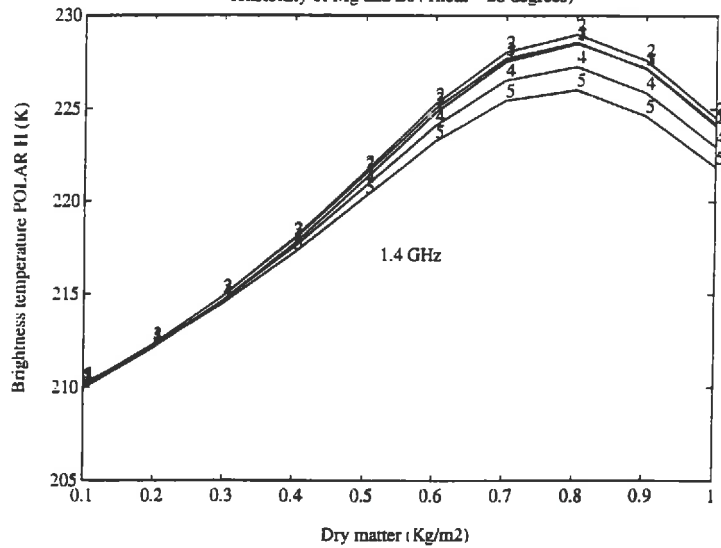
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



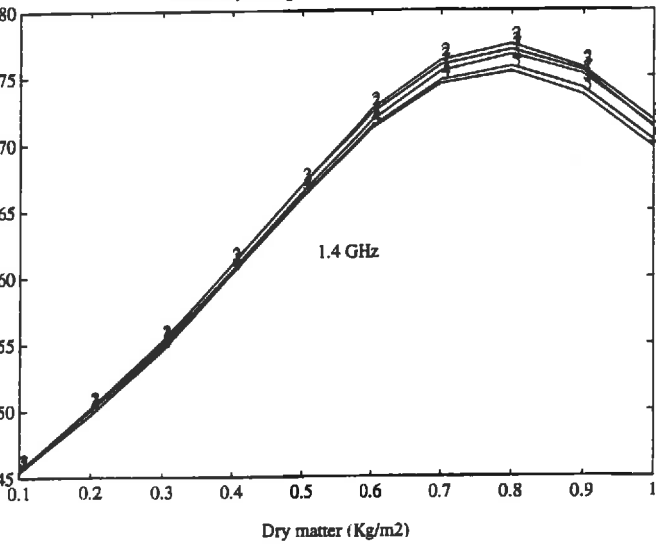
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



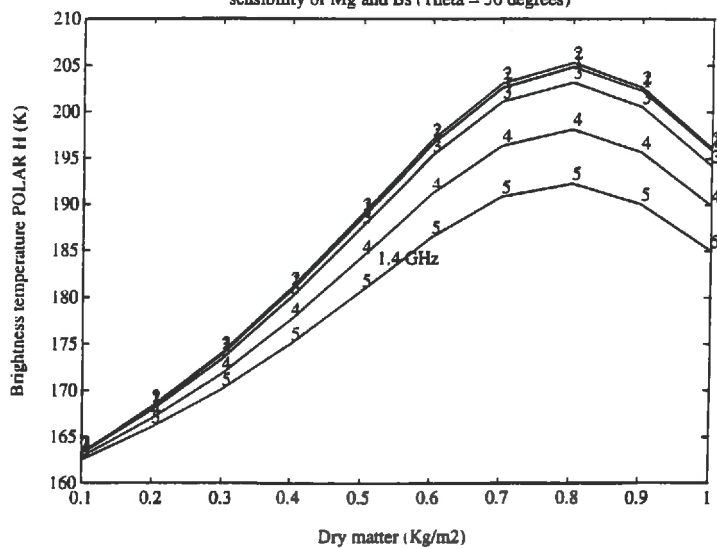
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



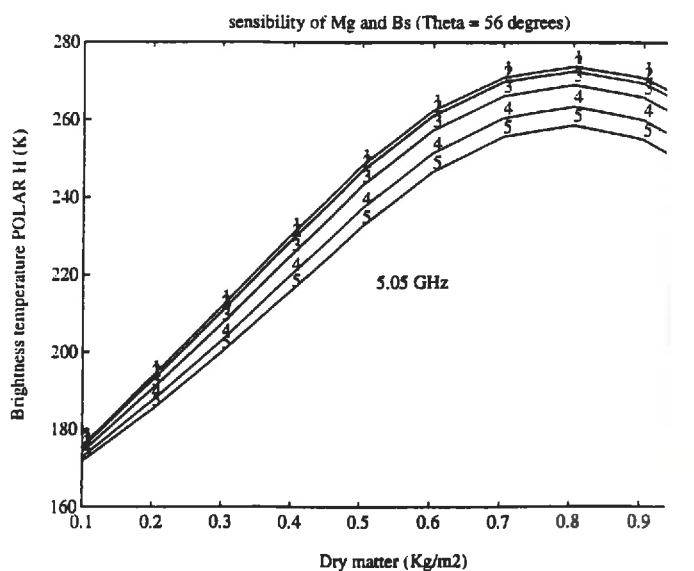
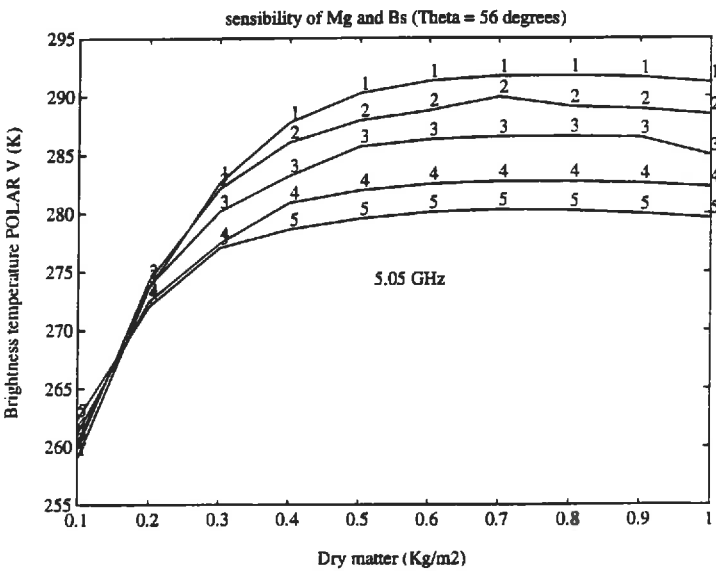
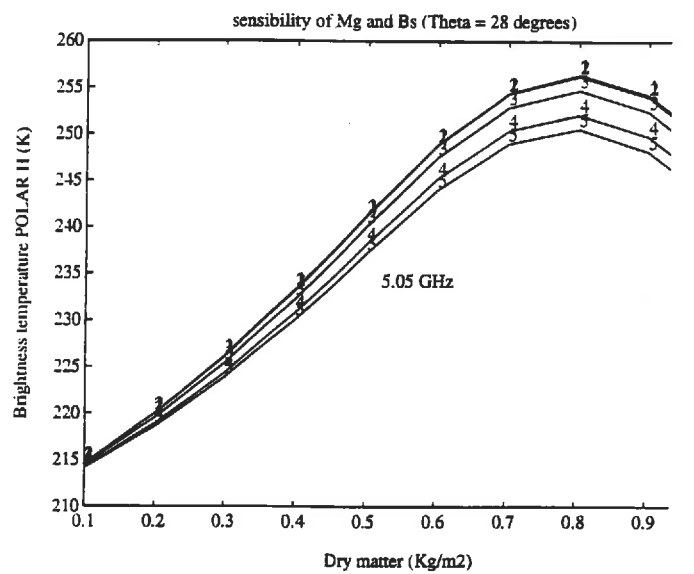
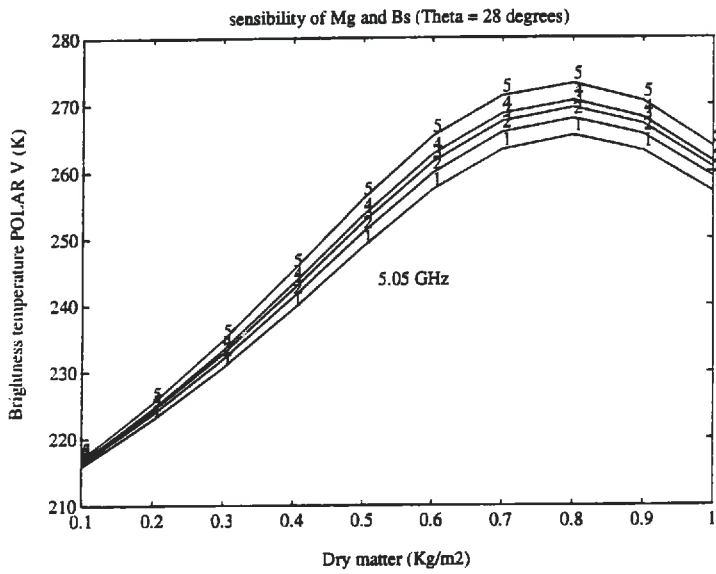
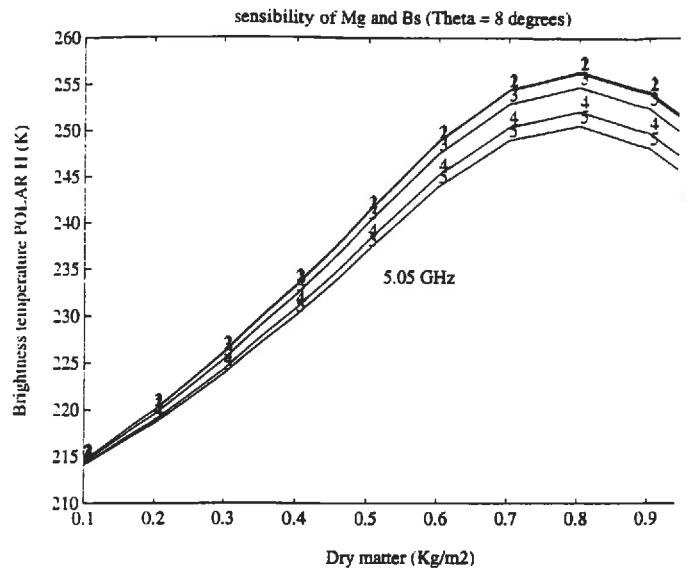
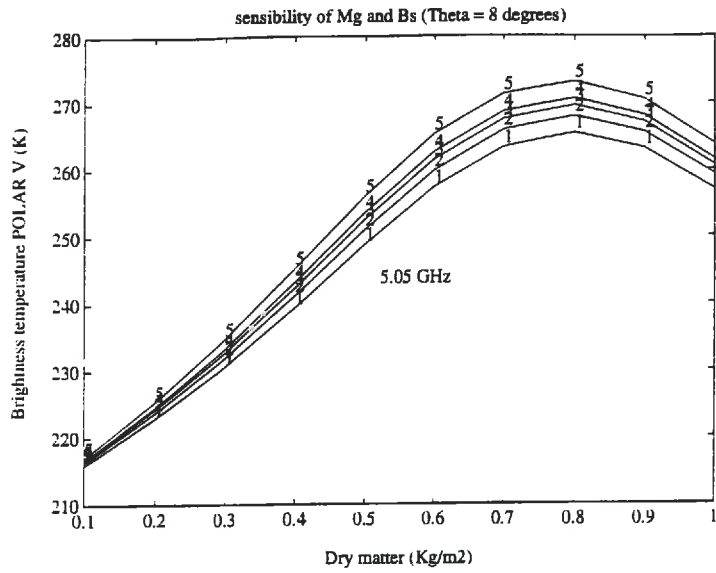
sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)



sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)

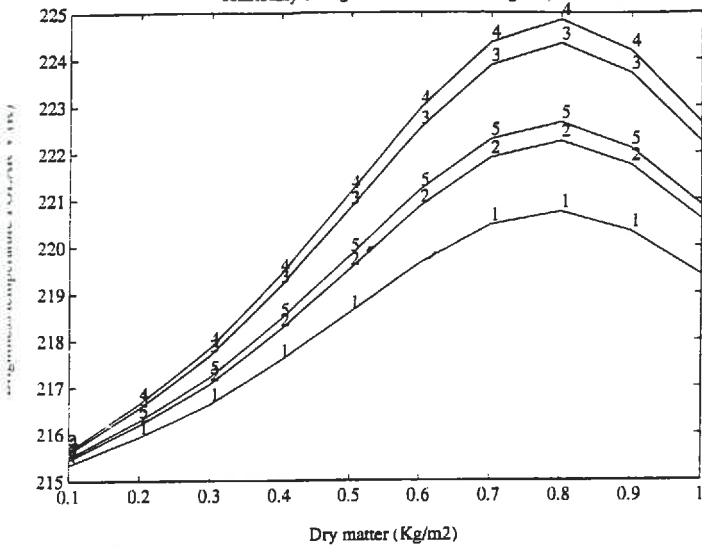


(5) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 30% - 5.05 GHz

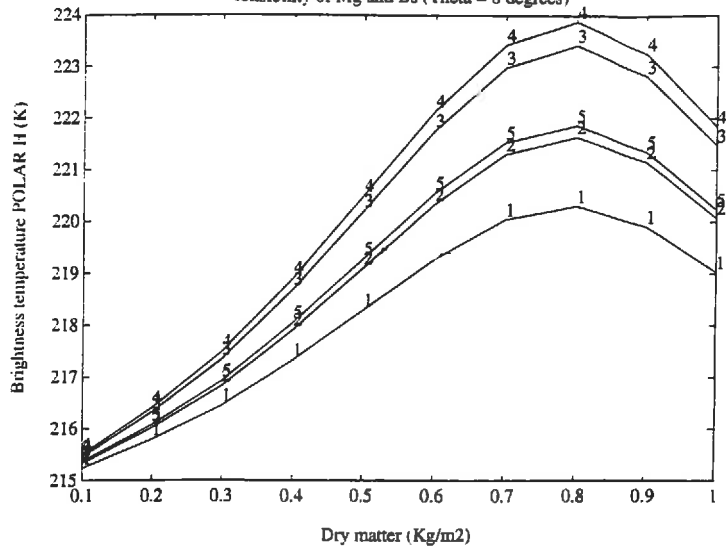


(6) - Modèle composite - Humidité volumique du sol = 30% - 10.65 GHz

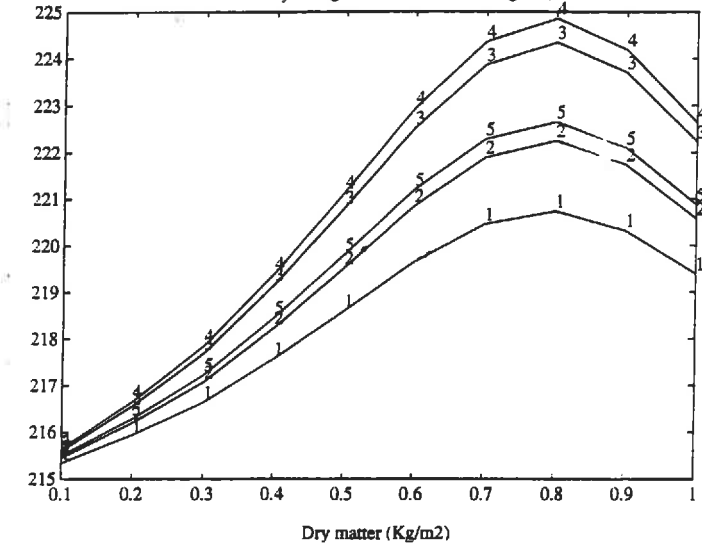
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



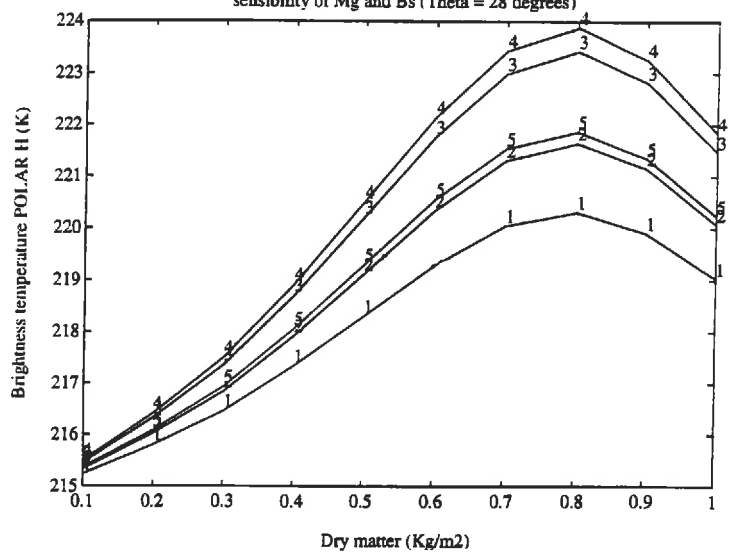
sensibility of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



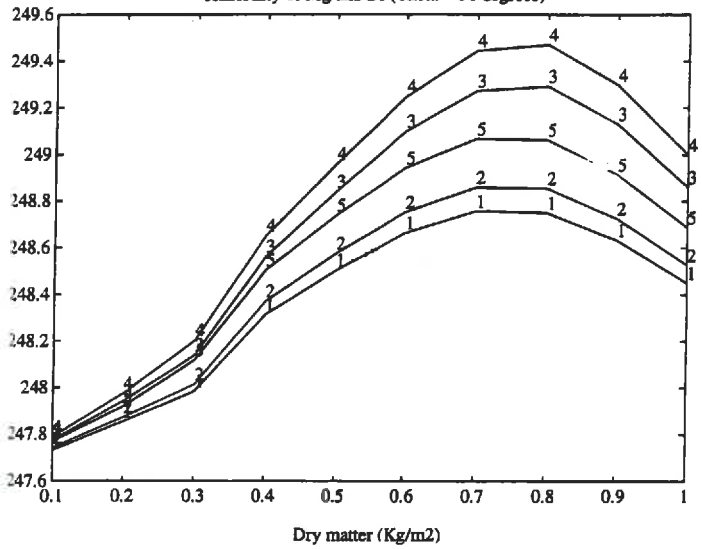
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



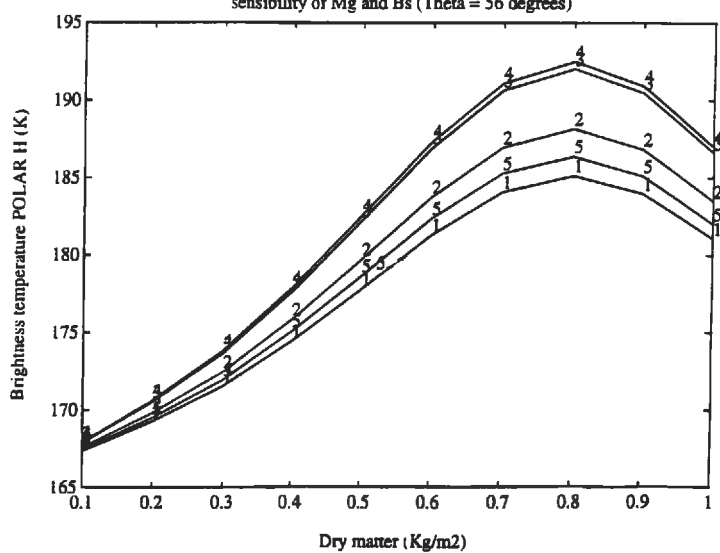
sensibility of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



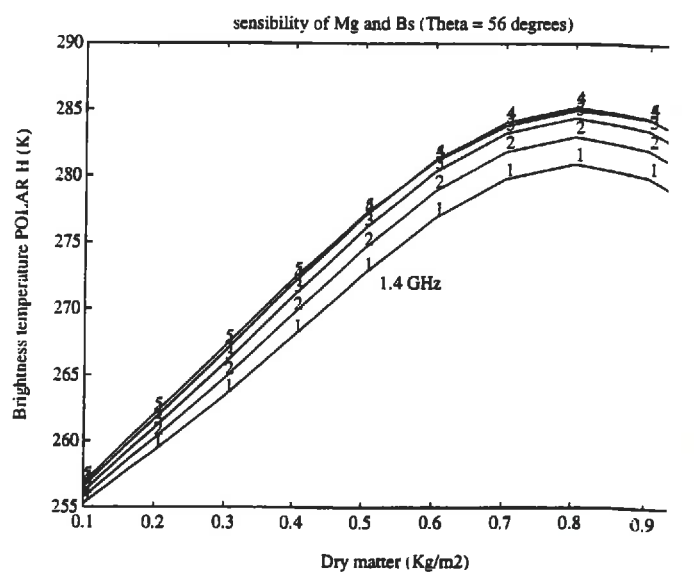
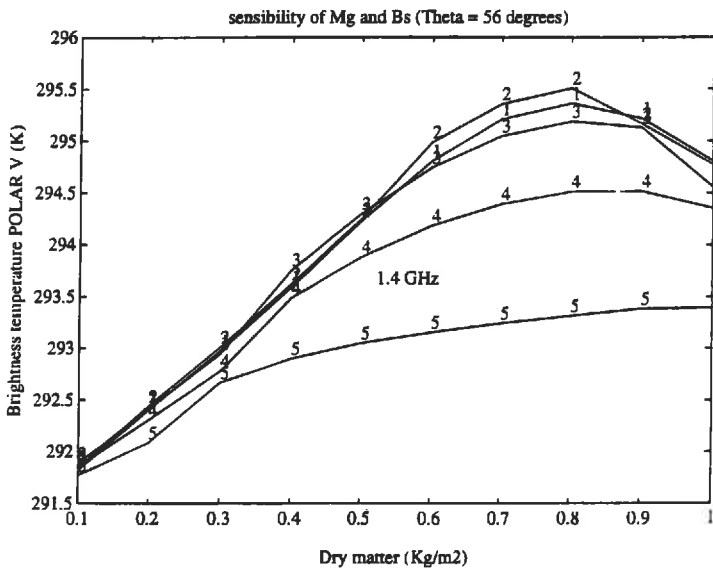
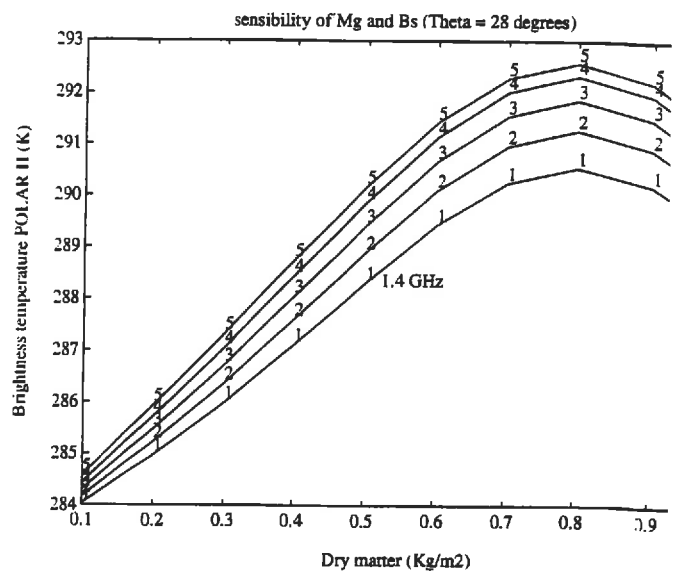
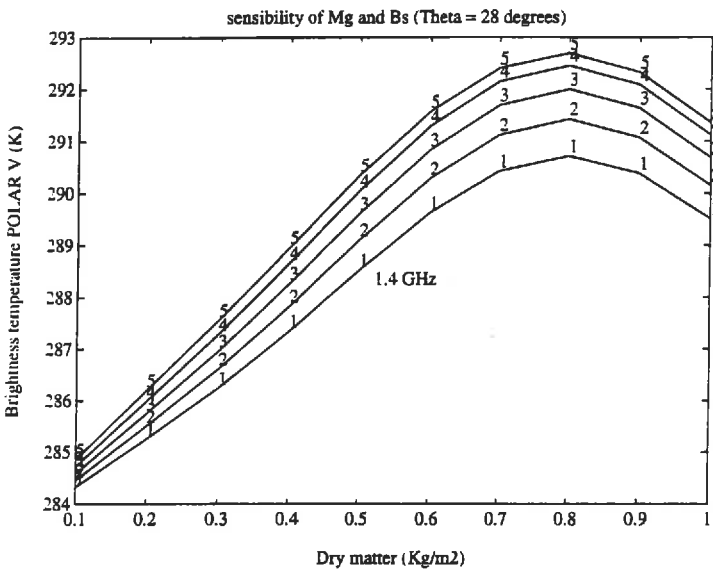
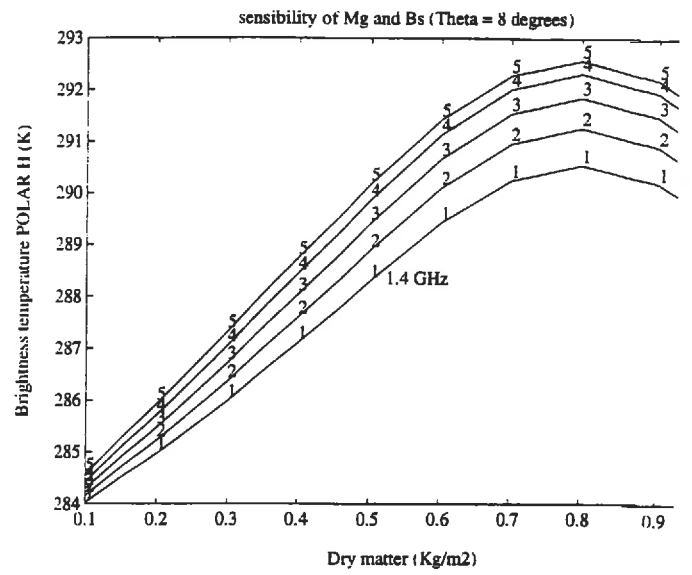
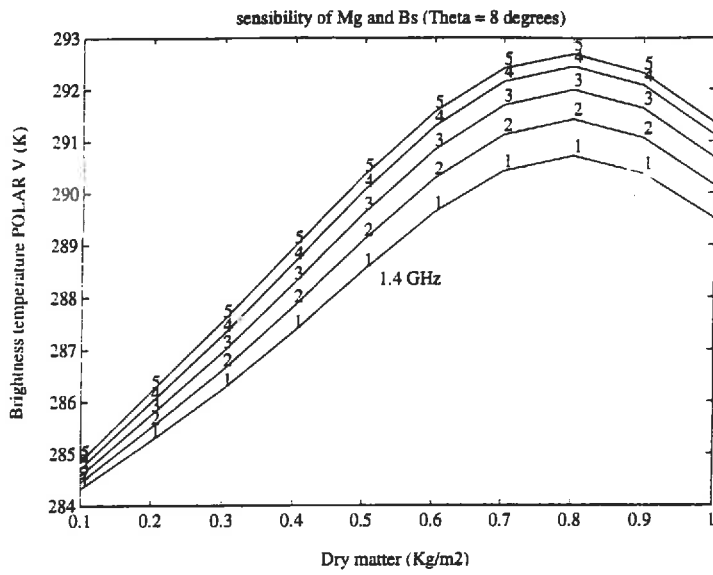
sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)



sensibility of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)

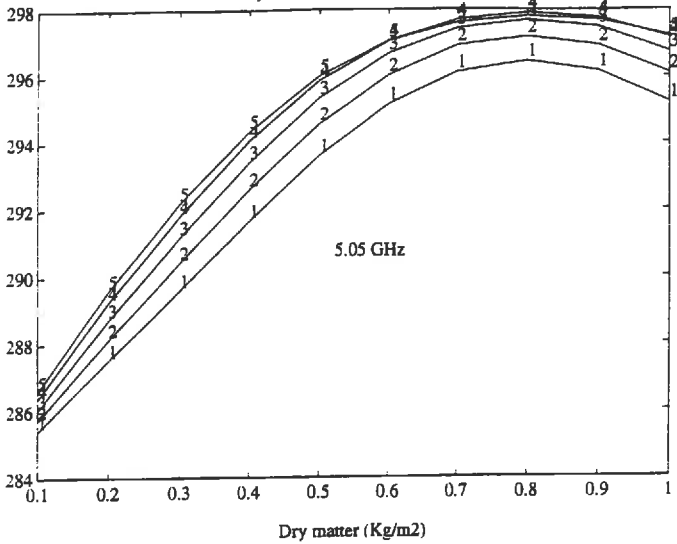


(7) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 1% - 1.4 GHz

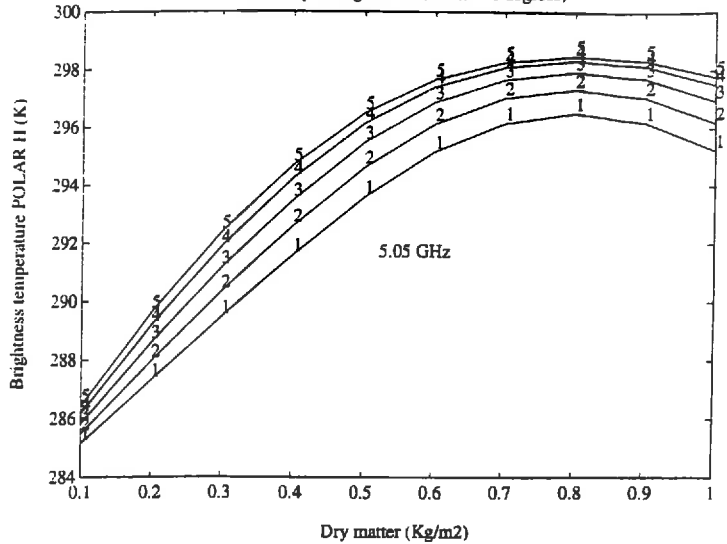


(8) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 1% - 5.05 GHz

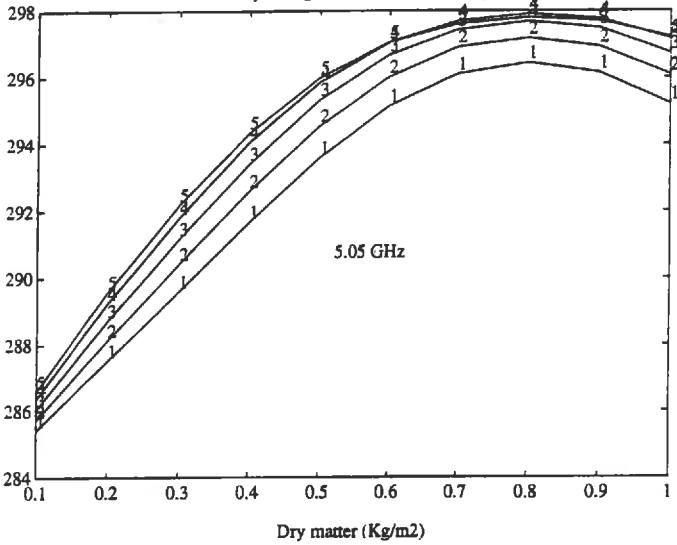
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



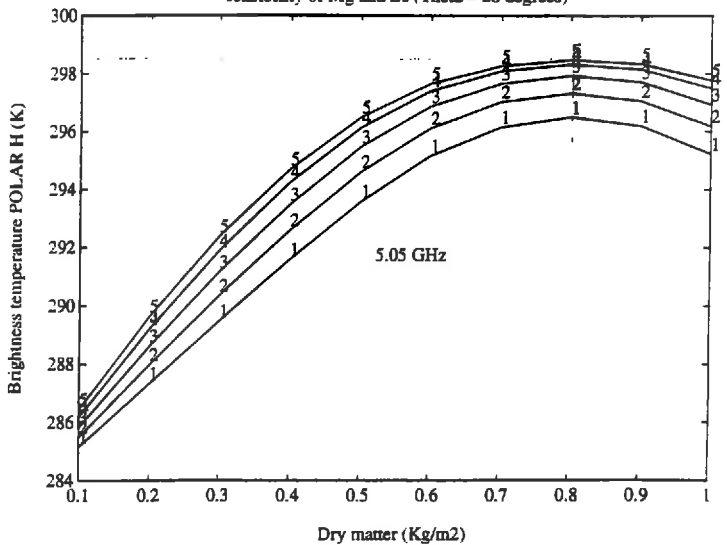
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 8 degrees)



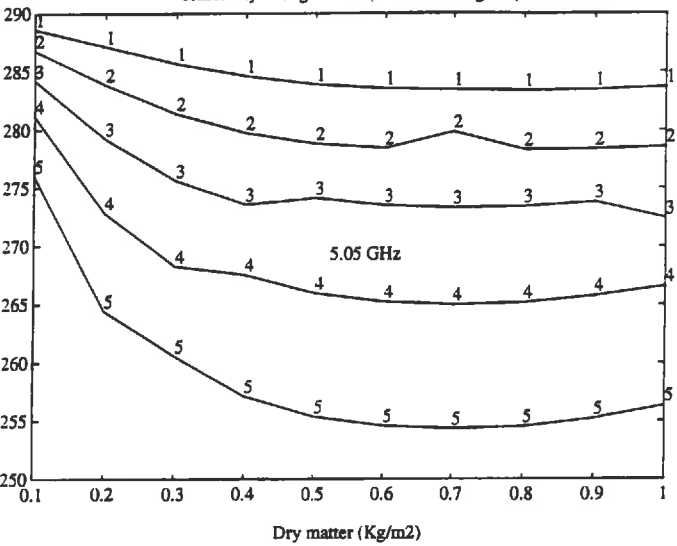
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



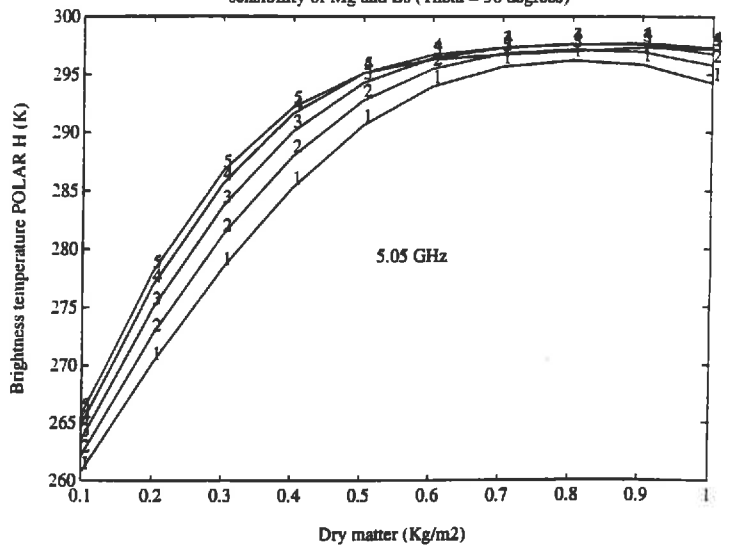
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 28 degrees)



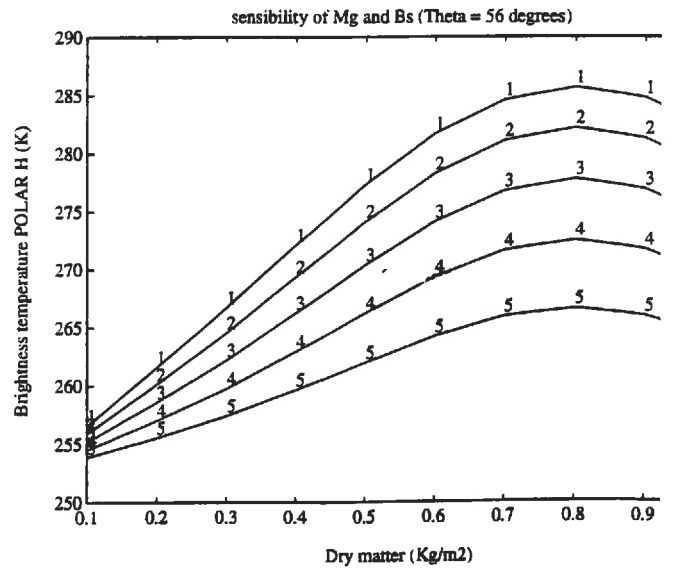
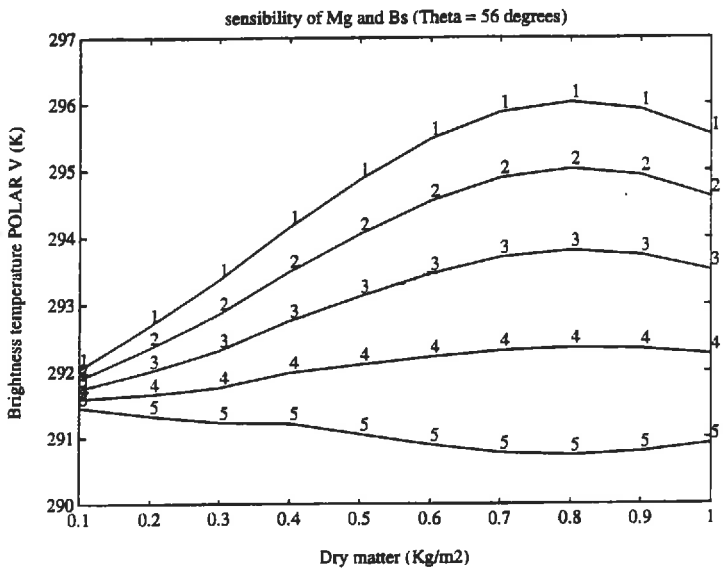
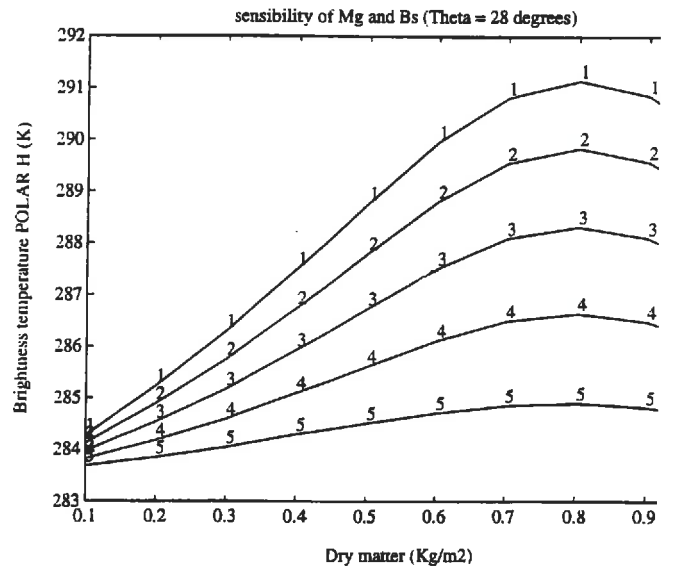
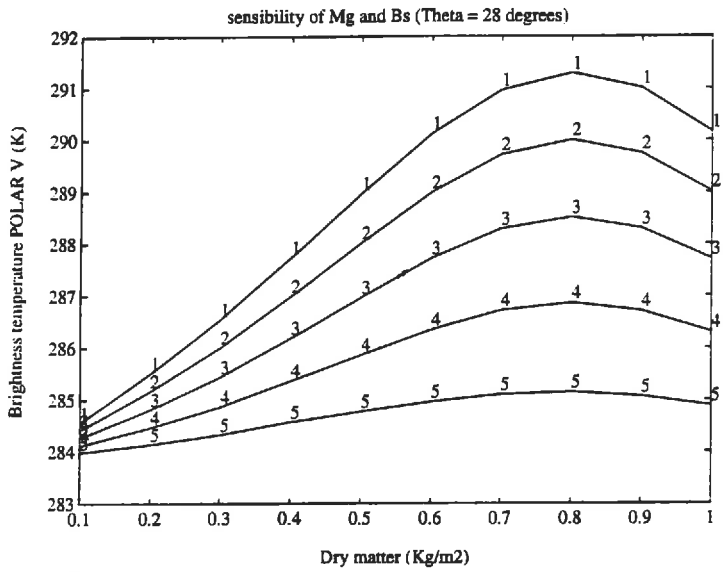
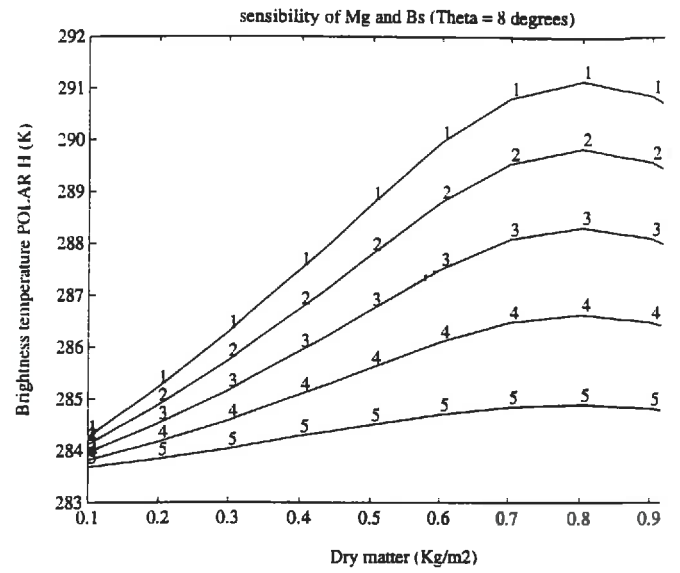
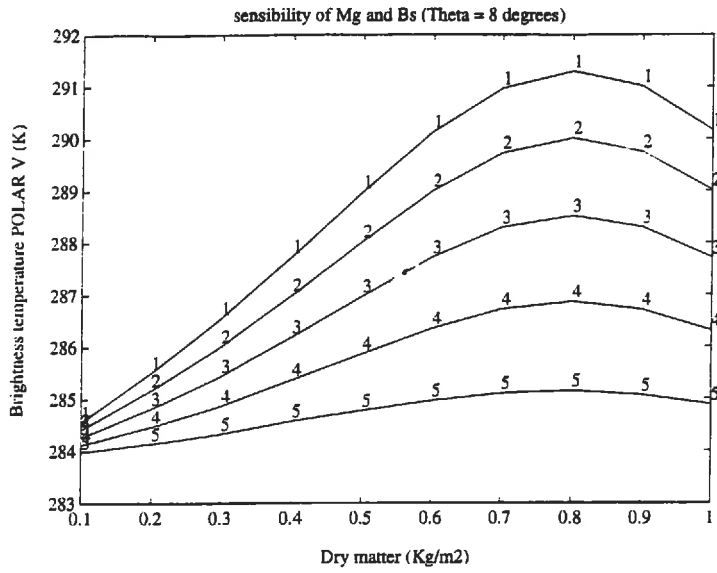
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)



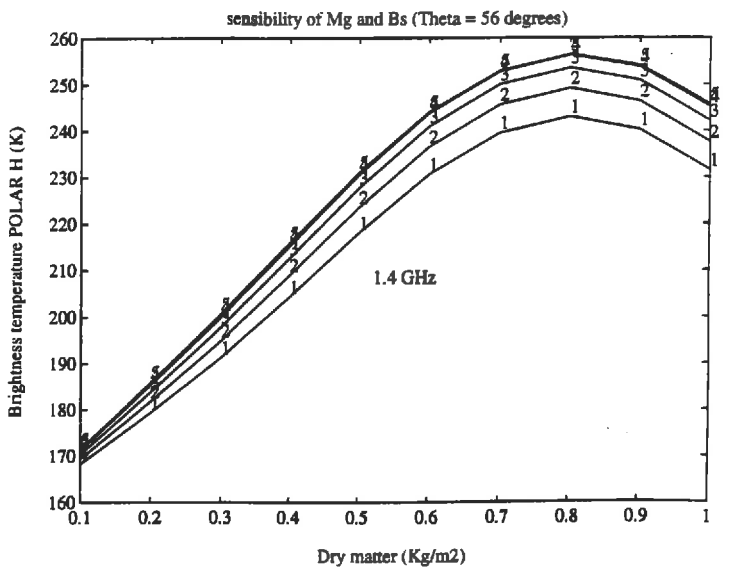
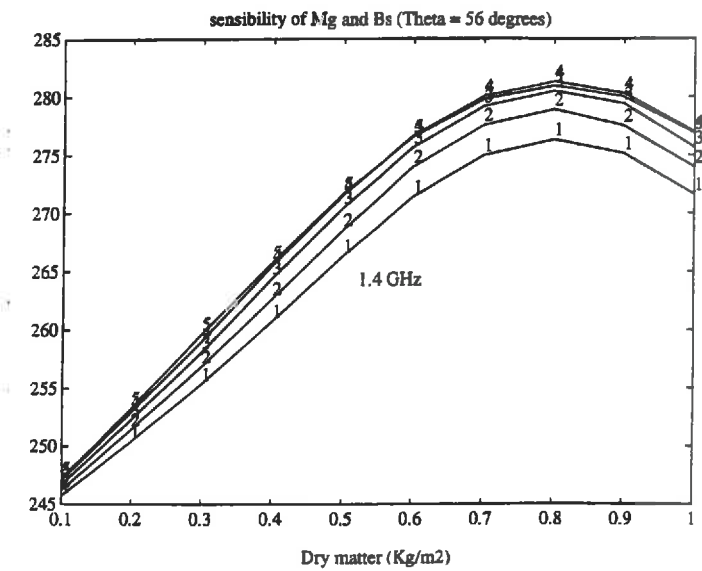
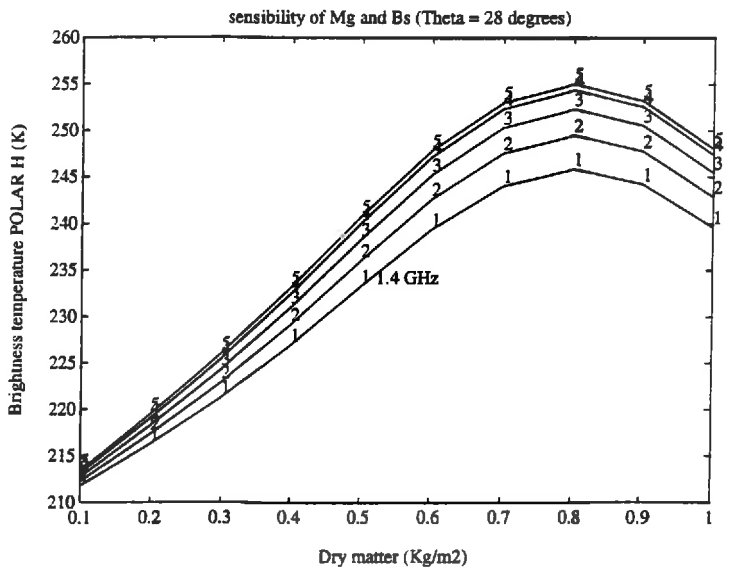
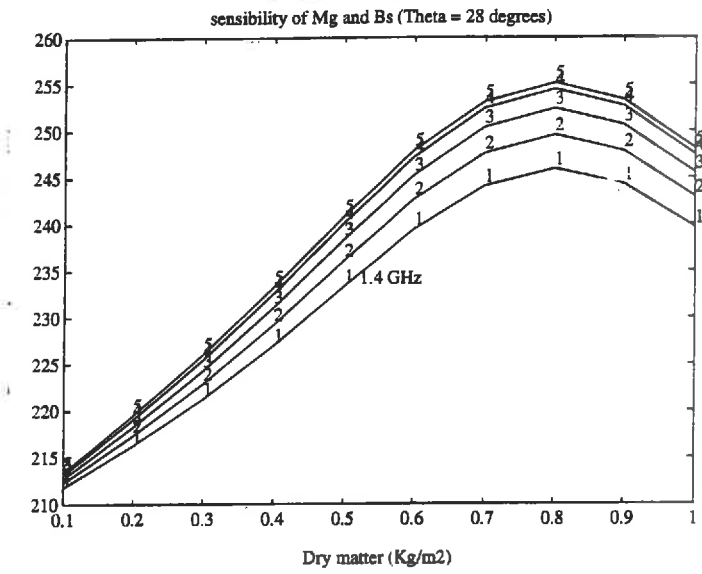
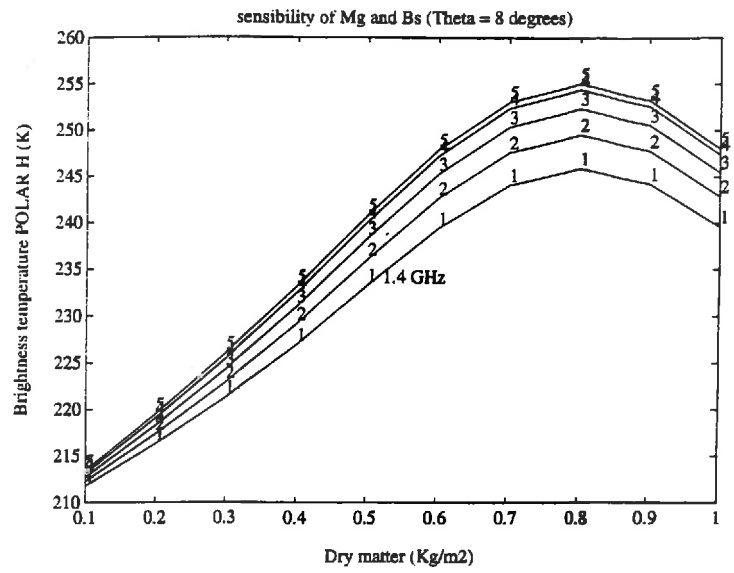
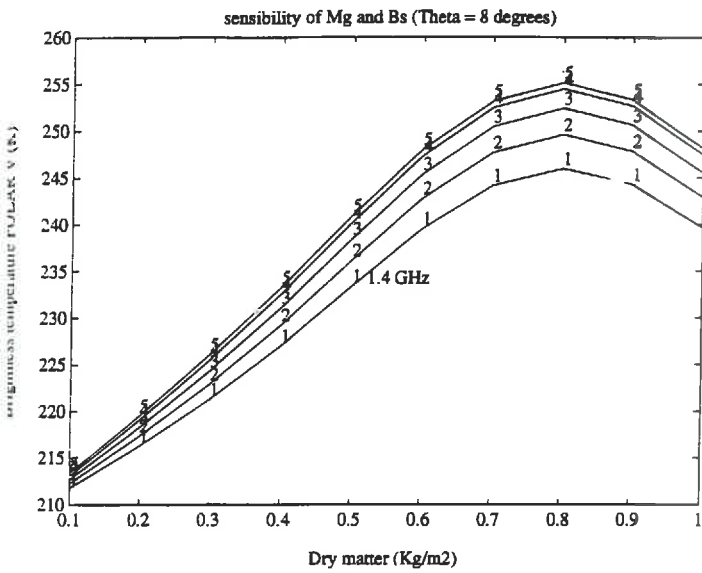
sensitivity of Mg and Bs (Theta = 56 degrees)



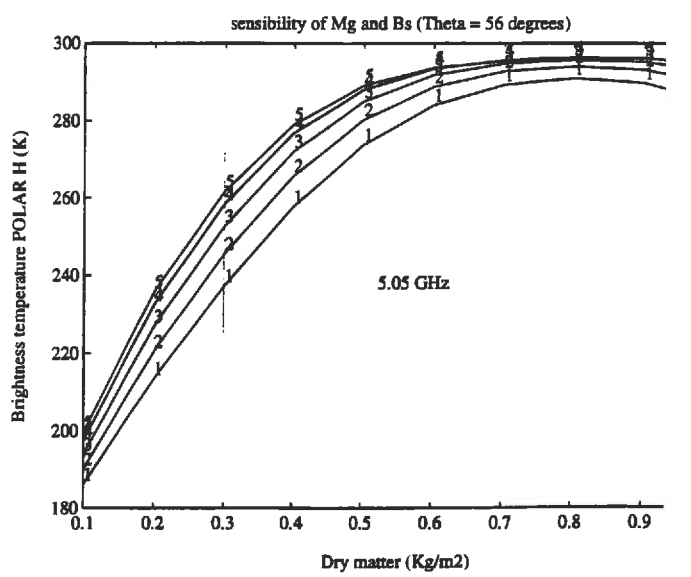
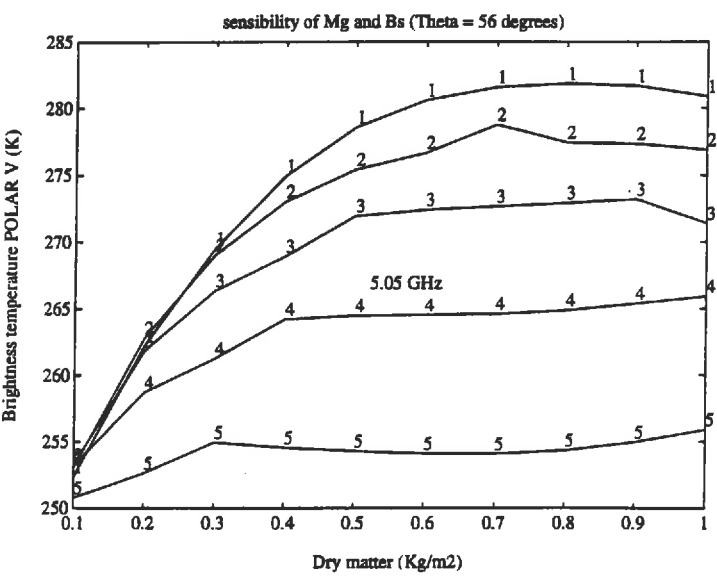
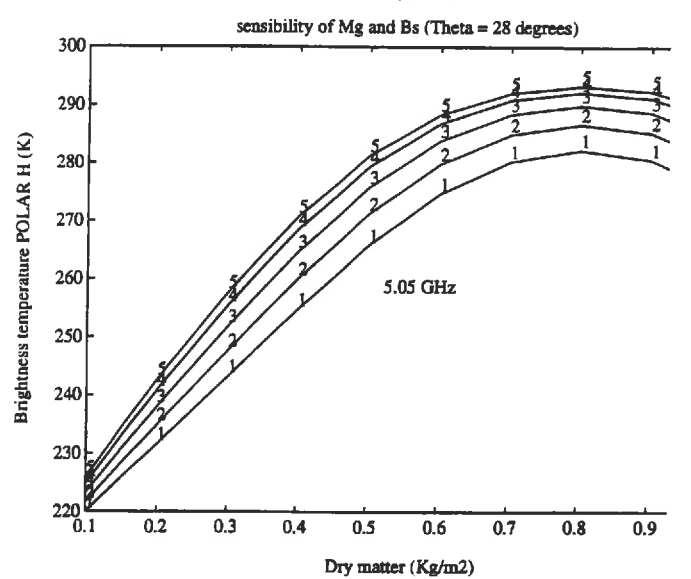
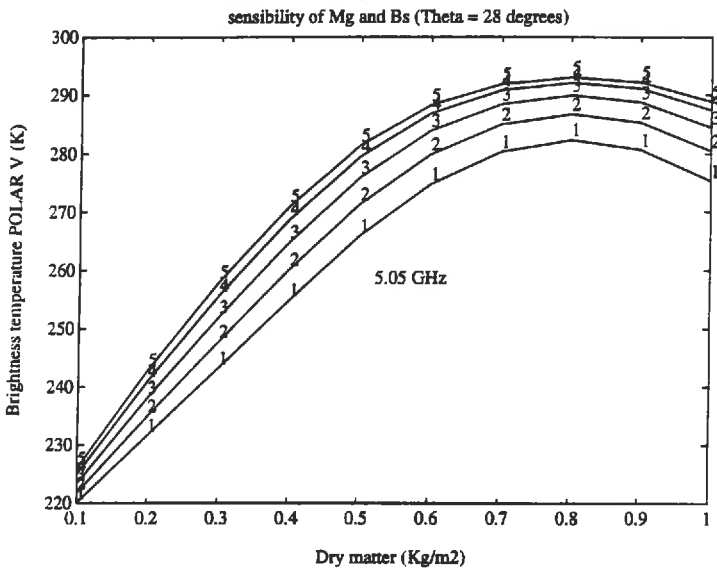
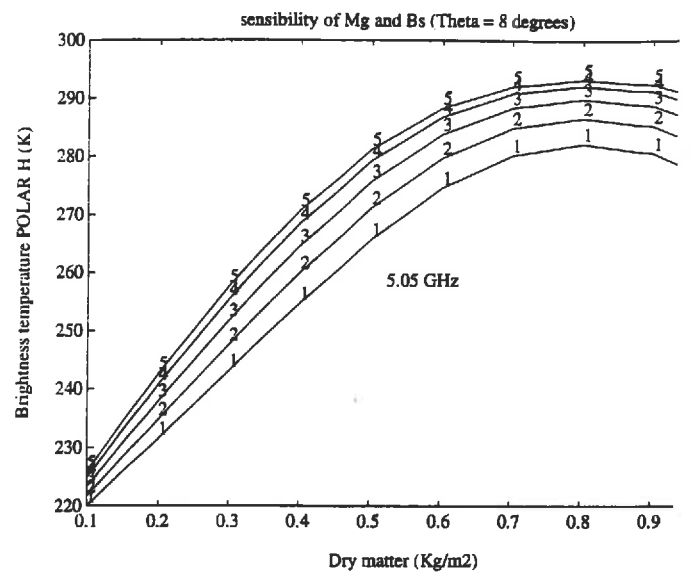
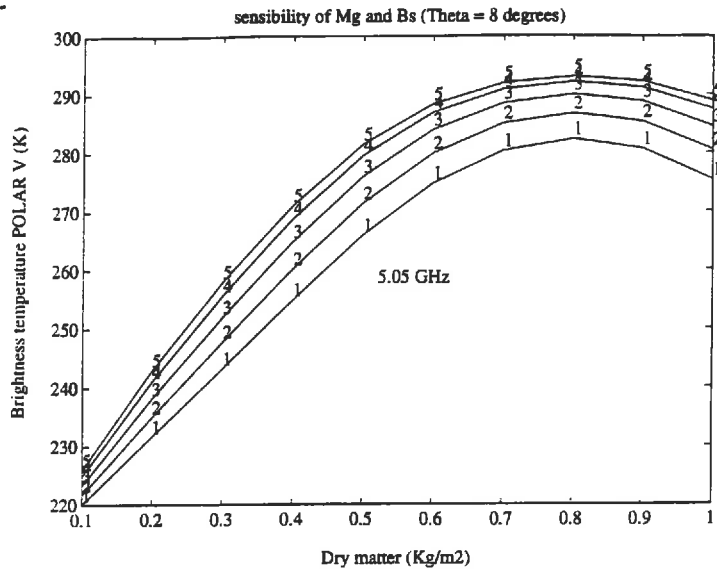
(9) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 1% - 10.65 GHz



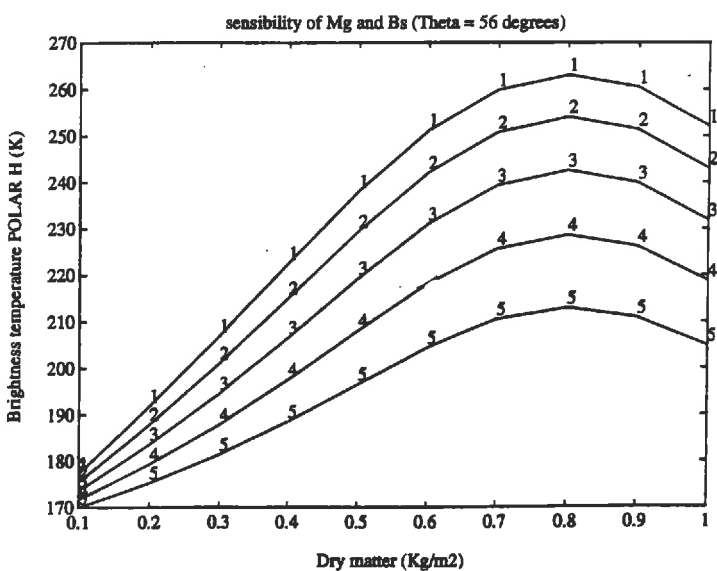
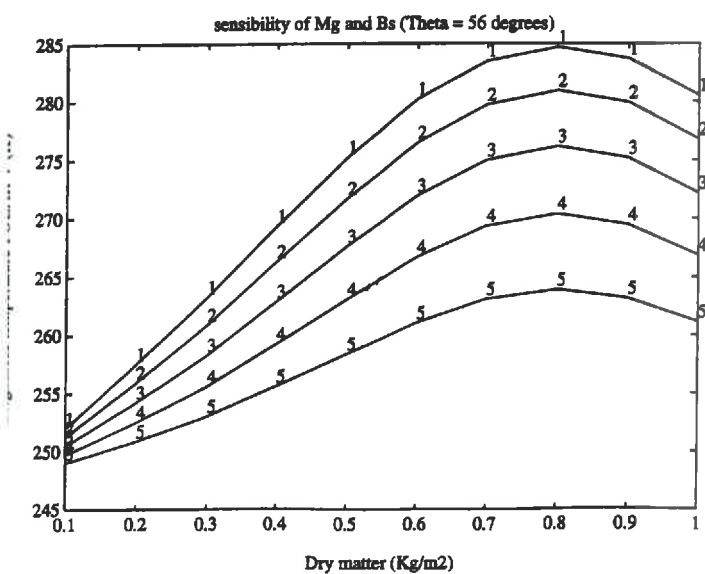
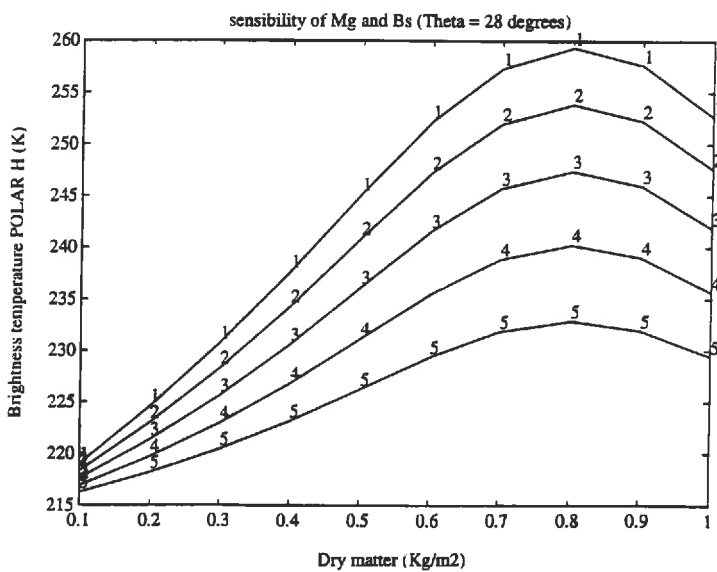
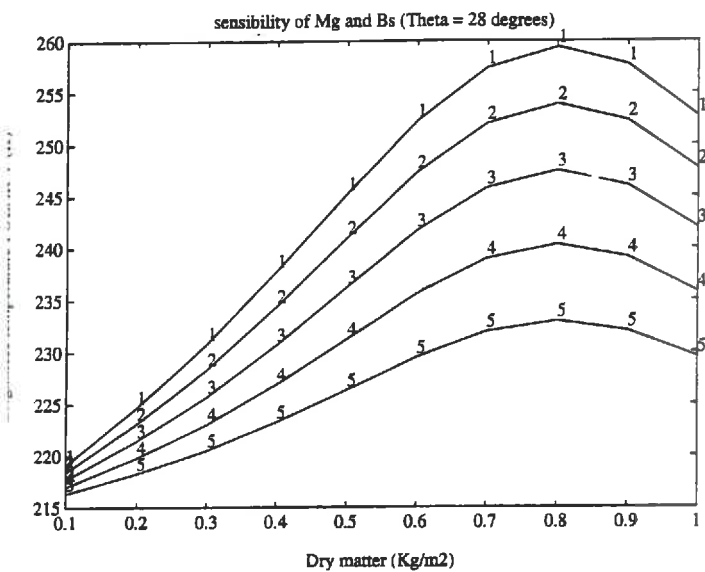
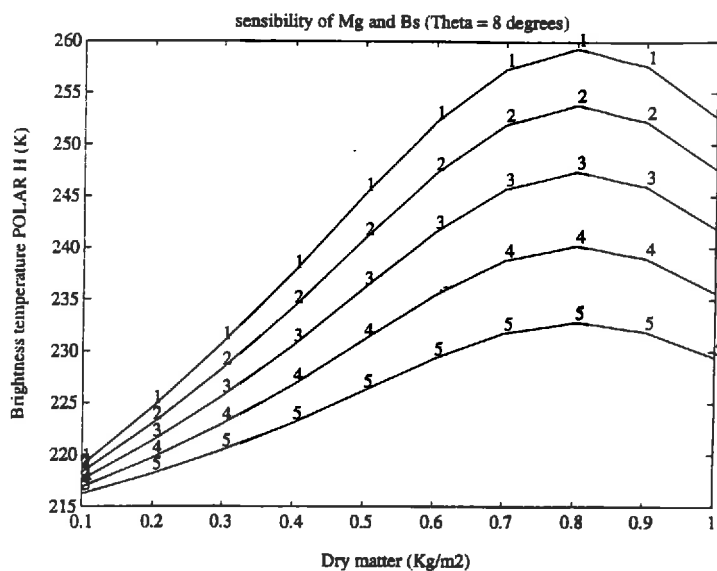
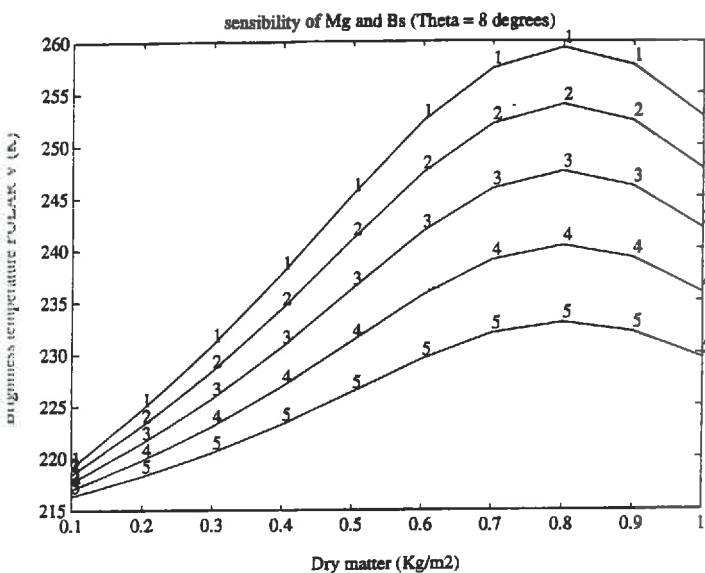
(10) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 30% - 1.4 GHz



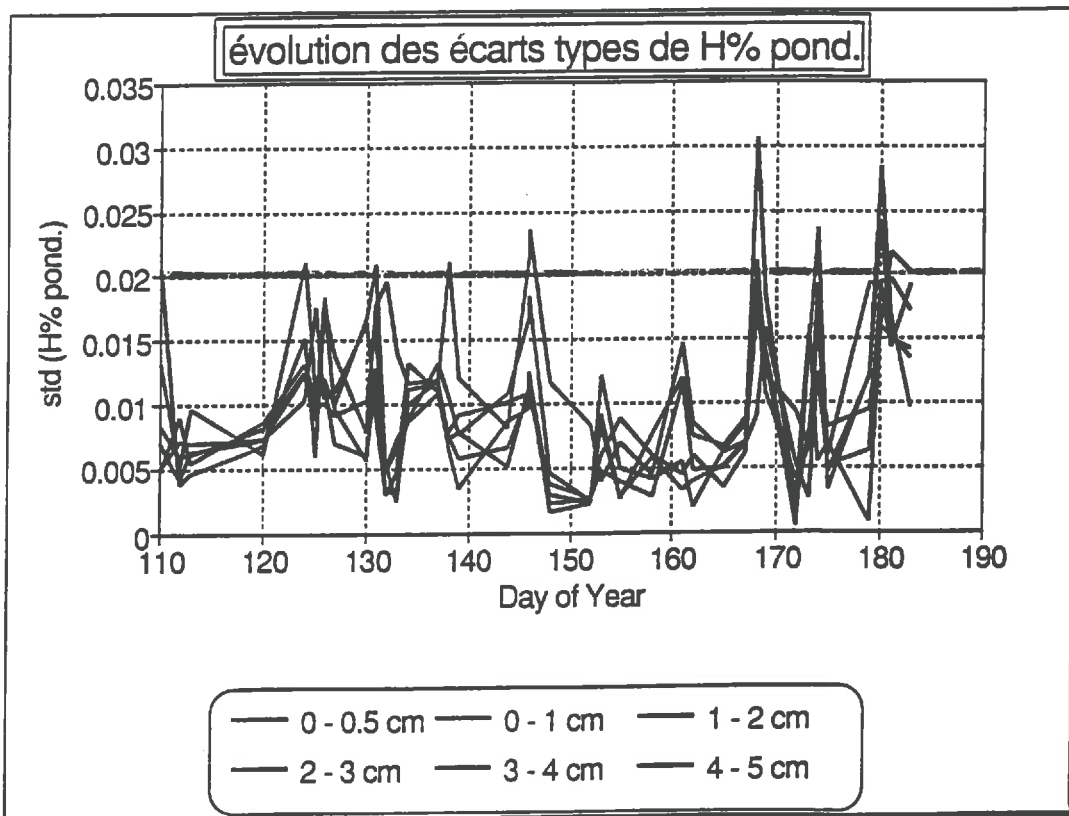
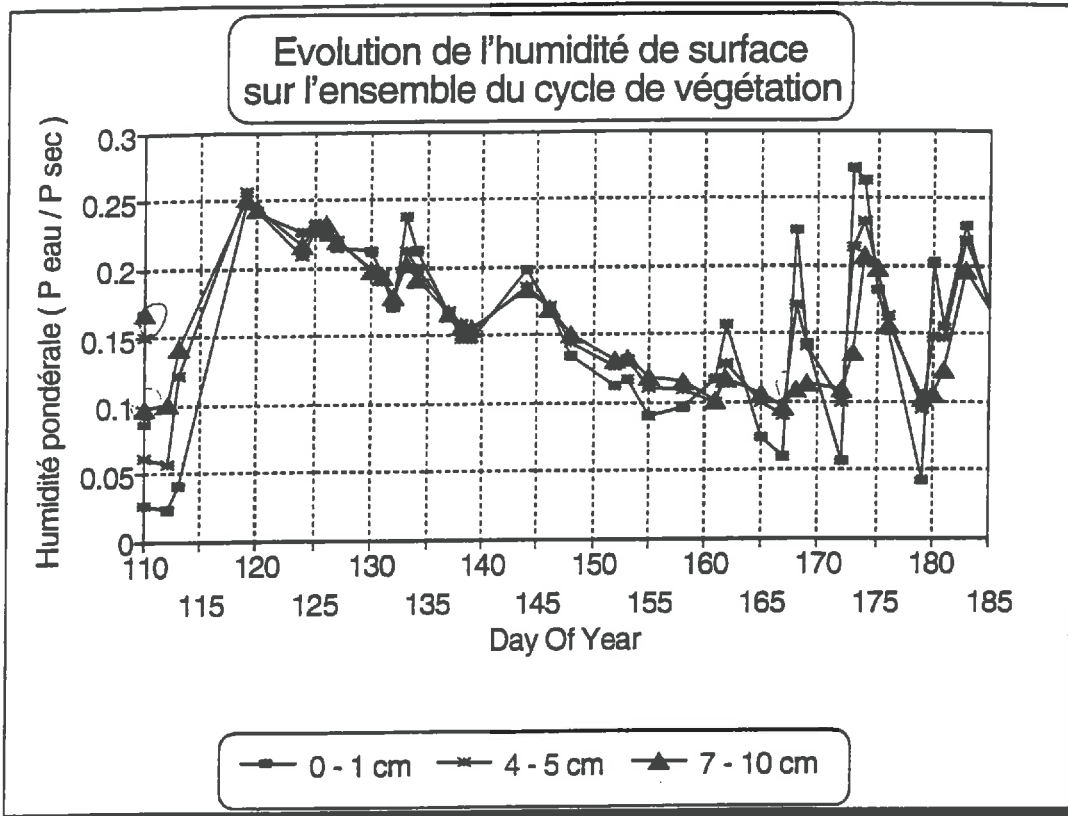
(11) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 30% - 5.05 GHz



(12) - Modèle simple - Humidité volumique du sol = 30% - 10.65 GHz



**EVOLUTION DE L'HUMIDITE DE SURFACE (Humidité pondérale)
AU COURS DE LA CAMPAGNE DE MESURES**



BIBLIOGRAPHIE

Bonn F. et Rochon G. (1992), "Précis de télédétection - Principes et méthodes", vol. 1, presses de l'Université du Québec / AUPELF, Québec, Canada: 23-148

Brunfeldt D. R. and F.T. Ulaby (1984), "Measured microwave emission and scattering in vegetation canopies", IEEE Trans. Geo. Rem. Sens. 22: 520-524

Brunfeldt D. R. and F.T. Ulaby (1986), "Microwave emission from row crops", IEEE Trans. Geosc. Remote Sens. Vol. 24 no 3 : p 353 - 359

Calvet J. C., J. P. Wigneron, E. Mougin, Y. H. Kerr and J. L. Brito (1992), "Use of passive microwaves over the amazon forest", Proceedings of the IGARS 92, Houston, Texas

Chanzy A., J.-P. Wigneron and T. J. Schmugge (1992), "Multyfrequency passive microwave measurements with Portos : experimental design and first results", Proceeding of Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote sensing Applications, Ed R. Westwater, Boulder.

Chukhlantsev A. A., Golovachev S. P. and A. M. Shutko (1989), "Experimental study of vegetable canopy microwave emission", Advanced Space research, Vol. 9 no1 : 317 - 321

Eastham J., Oosterhuis D. M. and Walker S. (1984), "Leaf growth of wheat - Leaf water and turgor potential threshold values for leaf growth of wheat", Agronomy journal, Vol. 76 : p 841 - 847

Ferrazzoli P., Guerriero L., Paloscia S. and P. Pampaloni (1992), "Modeling Polarization properties of emission from soil covered with vegetation", IEEE trans. geosc. remote sensing, Vol. 30 no1 : 157 - 165

Goel N. S. and Strebel D. E. (1984), "Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies", Agronomy Journal 76 : 800 - 802

Hallikainen M. T., P. A. Jolma and J. M. Hyypä (1988), "Satellite microwave radiometry of forest and surface types in Finland", IEEE trans. geosc. Remote sens. Vol. 26 no 5 : p 622 - 628

Hollinger J. P., J. L. Peirce and G. A. Poe (1990), "SSM/I instrument evaluation", IEEE trans. geosc. Remote sens. 28 : p 781 - 790

Jackson T. J. and T. J. Schmugge (1989), "Passive microwave remote sensing system for soil moisture: some supporting research", IEEE trans. geosc. Remote sensing, 27 : 225 - 235

Jin Y.-Q. (1989), "The radiative transfer equation for strongly-fluctuating continuous random media", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* , 42 : 529 - 537

Jin Y.-Q. (1992), "Numerical modeling of radiative transfer and multi-frequency measurement of thermal emission from crop canopies", *Int. J. of Remote sensing*, Vol. 13 no 15 : 2801 - 2812

Karam M. A., A. K. Fung, Lang R. H. and N. S. Chauhan (1992), "A microwave scattering model for layered vegetation", submitted for publication in *IEEE trans. Geosc. Remote sensing*.

Kerr Y. (1991), "Projet EOS", Rapport scientifique du laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection spatiale, période Juin 89 - Juin 91, LERTS, Toulouse

Kerr Y., Wigneron J.P. (1993), "Vegetation models and observations : a review", International workshop of passive microwave remote sensing research (11 - 15 janvier 1993), St Lary, France : 30 p

Kimes D. S. and J. A. Kirchner (1983), "Diurnal variations of vegetation canopy structure", *Int. J. Remote Sensing* 4 : 257 - 271

Mätzler C. and A. Sume (1989), "Microwave radiometry of leaves", *Microwave Radiomet. Remote sens. Appl.*, P. Pampaloni (Ed), p 133 - 148, VSP Utrecht, The Netherlands.

Mc Farland M.J., R.L. Miller and C. M. U. Neale (1990), "Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperature", *IEEE trans. geosc. Remote sens.* 28 : 477 - 491

Mead B. J. and R. E. McIntosh (1991), "Polarimetric backscatter measurements of deciduous and coniferous trees at 225 GHz", *IEEE trans. geosc. Remote sens.* Vol. 29 : p 21 - 28

Mougins E. (1989), "Télédétection de la végétation par micro-ondes - Mesures et modélisation des effets des paramètres du couvert sur la propagation et la rétrodiffusion des ondes radar", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse - CESR, Toulouse, 231 p.

Moule C. (1972), "Céréales", *Phytotechnie spéciale*, tome 2, la maison rustique, France : 235 p.

Olioso A. (1992), "Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal, dans le but de relier la photosynthèse aux mesures de réflectance et de température de surface", Thèse de Doctorat de l'Univ. des Sciences de Montpellier.

Paloscia S. and P. Pampaloni (1992), "Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops", *remote sens. environ.* 40 : 15-26

Pampaloni P. and S. Paloscia (1986), "Microwave emission and plant water content: a comparison between field measurements and theory", IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing GE-24: 900-905

Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., ten Berge H.F.M. and Bakema A. (1989), "Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops", Centre for Agricultural Publishing and documentation (Pudoc), Wageningen, Netherlands.

Pullianen J., Kärnä J.-P. and Hallikainen M. (1993), "Development of geophysical retrieval algorithms for the MIMR", IEEE trans. Geosc. Remote sensing, Vol. 31 no1 : p 268 - 277

Rees W.G. (1990), "Topics in remote sensing - Physical principles of remote sensing", Cambridge university press : p 115 - 130

Rondeaux G. et G. Guyot (1990), "Polarisation de la lumière par les couverts végétaux : possibilités d'applications agronomiques", J. Can. de Teled. 16 : 32 - 41

Shutko A. M. (1982), "Microwave radiometry of lands under natural and artificial moistening", IEEE trans. geosc. remote sensing, Vol. 20 no1 : p 18 - 31

Sinoquet H. and B. Andrieu (1993), "The geometrical structure of plant canopies : characterization and direct measurements methods", in Crop Structure and light microclimate - C. Varlet-Granchier, R. Bonhomme and H. Sinoquet - INRA Editions , p 131 - 158

Troufleau D. (1991), "Construction d'un modèle de fonctionnement du blé adapté à l'intégration de données de télédétection - cas du couplage à un modèle de bilan d'énergie pour l'obtention d'une température de surface du couvert instantanée", Thèse de Doctorat de l'INA - Paris Grignon, 50 p.

Tsang L. and J. A. Kong (1981), "Scattering of electromagnetic waves from random media with strong permittivity fluctuations", Radio Science. 16 : 303 - 320

Tsang L. (1991), "Polarimetric passive microwave remote sensing of random discrete scatterers and rough surface", J; of electr. Waves and Appl. 5 : 41 -57

Ulaby F. T., R. K. Moore and A. K. Fung (1981 - 1986), Microwave Remote sensing - Active and Passive, Addison-Westley Publishing Company, 1981-82 Vol. 1 & 2; Artech House, Vol. 3, 1986.

Ulaby F. T. and M. A. El-Reyes (1987), "Microwave dielectric spectrum of vegetation - Part 2: dual-dispersion model", IEEE trans. Geosc. Remote Sens. 25 : 550 - 557

Ustin S. L., S. N. Martens and V. C. Vanderbilt (1991), "Canopy architecture of a Walnut orchard", IEEE trans. Geosc. Remote sensing 29 : 843 - 851

Varlet-Grancher C., Bonhomme R. and Sinoquet H. (1993), "Crop structure and light microclimate - characterization and applications", INRA editions: 17-373

Wang J. R. and B. J. Choudhury (1981), "Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4 GHz frequency", J. Geophys. Res. 86 : 5277 - 5282

Wang J. R., P. E. O'Neill, T. J. Jackson and T. Engman (1983), "Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and roughness", IEEE trans. geosc. Remote sensing 21 : 44 - 51

Wang J. R. (1987), "Microwave emission from smooth bare fields and soil moisture sampling depth", IEEE trans. geosc. Remote sensing 25 : 616 - 622

Wegmüller U. (1990), "Remote sensing signature studies on agricultural fields with ground-based radiometry and scatterometry - IV Time variations of active and passive microwave data during the seasonal development of agricultural crops", Thèse de Doctorat de l'Université de Bern : p 4 - 12

Wegmüller U. (1993), "Signature research for crop classification by active and passive microwaves", Int. journ. of remote sensing, Vol 14 no 5 : p 871 - 883

Wegmüller U. and Mätzler C. (1993), "Canopy opacity models", ESA / NASA international workshop on passive microwave remote sensing research related to land-atmosphere interactions, Toulouse, France, 11 - 15 Janvier 1993.

Wigneron J.-P., J.-C. Calvet, Y.H. Kerr, A. Chanzy and A. Lopes (1993), "Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics", IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., Vol. 31 no 3 : 716 - 726

Wigneron J.-P., Y. H. Kerr, A. Chanzy and Y. Q. Jin (1993), "inversion of surface parameters from passive microwave measurements over a soybean field", Remote Sensing Environ., 46: 1-12

Wigneron J.-P. (1993), "Modélisation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal - Mise en relation de la mesure hyperfréquence passive avec les échanges énergétiques et hydriques d'une culture de soja", Thèse de Doctorat de l'INRA, bioclimatologie, Montfavet, France, 93 p.

Wigneron J.-P., Y. H. Kerr, F. Biard, N. Bruguier (1993), "Estimation de paramètres sol végétation à partir de mesures hyperfréquences passives", présentation soumise au 6ème Symposium Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, Val d'Isère, France, 17-21 Janvier 1994.

Windsor E. P. and J. E. Charlton (1991), "European development in microwave radiometry : 1978 - 1988", Int. Journal Remote sensing 12(8) : p 1741 - 1751

