

**Institut National de la
Recherche Agronomique**

Station de Bioclimatologie, Avignon

**Laboratoire d'Etudes et
de Recherches en Télédétection
Spatiale, Toulouse**

**Université Paul Sabatier
Toulouse**

Thèse

présentée
pour obtenir le titre de :

Docteur de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

discipline: "Astrophysique, Geophysique et Techniques Spatiales"
spécialité: "Télédétection Spatiale"

**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**

par

Jean – Pierre Wigneron

Soutenu le 8 Avril devant le Jury composé de :

MM. Vedrenne Gilbert
Perrier Alain
Seguin Bernard
Pinty Bernard
Kerr Yann

Professeur à l'UPS, Toulouse
Professeur à l'INA Paris-Grignon
Directeur de Recherche, INRA, Avignon
Professeur à l'Université B. Pascal, Cl-Ferrand
Ingénieur CNES, Toulouse

Président
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Rapporteurs :

MM. Perrier Alain
Pinty Bernard
Schmugge Thomas

Professeur à l'INA Paris-Grignon
Professeur à l'Université B. Pascal, Cl-Ferrand
USDA-ARS, Hydrology Laboratory, Beltsville (USA)

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

Avant-Propos

Ce travail a été réalisé au LERTS, Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale à Toulouse et à la Station de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon. Sans pouvoir citer tous les noms, je tiens à en remercier l'ensemble des permanents et stagiaires, qui ont tous contribué à une excellente ambiance de travail et d'encouragement, au cours de mon travail de thèse.

Je remercie en particulier, Alain Baille, directeur de la Station de Bioclimatologie lors de mon arrivée à Avignon, pour son accueil et sa confiance.

Toute ma reconnaissance va particulièrement à Bernard Seguin et Yann Kerr, qui ont guidé ce travail. Un seul mot, de tout coeur: Merci.

Je remercie pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail de thèse, Alain Perrier qui en tant que chef du département de Bioclimatologie avait initié cette étude avec B. Seguin, ainsi que Bernard Pinty et Tom Schmugge, tous trois rapporteurs de la thèse. Je remercie également Guy Vedrenne qui a accepté de participer au jury, malgré son emploi du temps fourni.

Cette thèse a bénéficié du constant soutien, scientifique et amical, de André Chanzy, Albert Oliosio et Jean-Christophe Calvet. Un grand merci à tous les trois, leur apport à ce travail est très important.

Je remercie également Eric Mougin, Armand Lopes (CESR, Toulouse), Ya Qiu Jin (Université de Shanghai), Laurent Prévot, pour leur aide précieuse dans le développement des modèles et Gérard Guyot, Olivier Grojean et l'équipe instrumentation du CNES, Eric Vanderschmidt, Patrick Bertuzzi, Claudine Orlando, qui ont contribué directement à enrichir le jeu de données.

Un grand merci à Jeanine Batlle, Christine Faure, Odile Lusa, Claude Rias, Roselyne Olivier, Mme Delmas, Claude Sarrouy, aux deux génies du micropross Phillipe (Chichi) et Phillipe (PCL), à Alberte, Sophie, Phillipe, Laurent, Gérard, Ramata, Sylvie, François, Valery, Nadine, Martine, Jean-François, Jean-Pierre, Valérie, Hervé, Xing-Fa, Stéphane, Loïc, qui m'ont tous aidé dans la réalisation de ce travail et avec qui il m'a toujours été agréable de discuter ou travailler.

Et puis, comment de pas évoquer le grand moment du solstice d'été, le sommet de la saison bioclimatologique à Avignon, le cadeau de vacance de mon directeur de thèse: le Mont Ventoux à bicyclette, versant Nord et versant Sud. Merci à tous les courageux pour les bons moments passés sur les pentes, et que la fête continue! Dans l'ordre d'arrivée ou de départ selon le mistral: Benoit, Bernard, Elisabeth, Albert, Nadia, Jamil, Marie-Laure, André, Panos, Francesco, Frédéric, Richard...

Enfin, merci de tout coeur à Cécile pour sa compréhension et son soutien.

Titre:

"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"

Résumé:

Dans le cadre des observations spatiales de la surface terrestre, l'intérêt des mesures radiométriques hyperfréquences pour le suivi des caractéristiques d'un couvert végétal est analysé dans ce travail. La mesure micro-onde passive présente l'avantage d'une faible sensibilité aux effets atmosphériques et solaires et d'une sensibilité élevée à un large éventail de paramètres de la couverture végétale et du sol, de façon différenciée en fonction de la fréquence et de la polarisation du signal émis.

Deux modèles physiques "continu" et "discret" ont été développés pour entreprendre cette analyse. Les deux modèles se fondent sur une résolution identique des équations de transfert radiatif dans une strate de végétation. Dans l'approche continue, la diffusion au sein du couvert végétal est reliée aux fluctuations diélectriques intrinsèques du milieu. De façon très complémentaire, l'approche discrète prend en compte les caractéristiques diélectriques et géométriques fines des diffuseurs végétaux en termes de permittivité, dimension, forme et distribution d'orientation.

Les données simulées par ces deux approches sont comparées à des mesures acquises sur couvert de soja. En se fondant sur l'étude conjointe des données mesurées et simulées, les potentialités et les configurations optimales de la radiométrie hyperfréquence pour estimer les paramètres de surface (teneur en eau du sol et de la végétation, biomasse, température...) sont analysées.

Enfin, une approche de synthèse couplant le modèle micro-onde discret et un modèle de simulation des échanges de masse et d'énergie d'un couvert végétal, a été conduite. L'évolution de l'émission micro-onde d'une culture de soja, en fonction des caractéristiques du couvert et de données météorologiques, a été analysée à l'échelle horaire et journalière. Le modèle couplé est également un outil intéressant pour analyser la synergie entre les mesures effectuées dans les différents domaines du spectre.

Title:

Modeling of microwave emission from vegetation canopies – Relation between passive microwave measurements and the energy and water exchanges of a soybean crop.

Abstract:

In the field of spatial observations of the earth surface, the interest of the passive microwave measurements to monitor vegetation is analysed in this work. The passive measurements are weakly sensitive to the atmospheric and solar illumination effects and highly sensitive to many geophysical parameters of the land surface, depending on the frequency and polarization of the radiation.

Two physical models, 'continuous' and 'discrete', have been developed to study the microwave emission of vegetation. The two models are based on similar radiative transfer equations, solved inside a vegetated layer. In the continuous approach, scattering is related to the dielectric fluctuations inside the medium. The discrete approach takes into account accurate dielectric and geometric characteristics of the vegetation scatterers, in terms of permittivity, size, shape and distribution of orientation.

Simulated data are compared with radiometric measurements acquired over a soybean field. Based on both simulated and measured data, potentialities and optimal configurations of the radiometer to assess surface parameters (soil and vegetation water content, biomass, temperature...) are discussed.

Finally, a synthetic approach relating the discrete microwave model with a model simulating vegetal canopy energy and water exchanges, has been carried out. The evolution of a soybean crop microwave emission, as a function of canopy characteristics and meteorological data, has been analysed at a hourly and daily temporal scale. Also, the coupled model is an interesting tool to investigate the synergy between measurements in the different spectral domains.

Table des Matières

Introduction générale

1. Emission hyperfréquence et Télédétection
2. Définition des objectifs et présentation de l'étude

PREMIERE PARTIE: MODELISATION DE L'EMISSION MICRO-ONDE: ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre 1 Interaction de l'onde électromagnétique avec la matière	7
1.1 Nature du rayonnement	7
1.1.1 L'onde électromagnétique – équations de Maxwell	7
1.1.2 Polarisation d'une onde plane	9
1.1.2.1 Composante verticale et horizontale d'une onde plane	9
1.1.2.2 Onde polarisée et lumière naturelle	9
1.1.3 Interface plane	10
1.1.4 Longueur d'absorption de l'onde électromagnétique	11
1.2 Intensité du rayonnement	12
1.2.1 Diffusion de l'onde électromagnétique	12
1.2.1.1 Coefficient bistatique de diffusion	12
1.2.1.2 Domaines de diffusion	12
1.2.2 Émissivité	13
1.2.2.1 Loi de Planck et émissivité	13
1.2.2.2 Coefficient bistatique et émissivité: relation entre les domaines micro-ondes passif et actif	14
Chapitre 2 Modélisation de l'émission du couvert végétal: éléments bibliographiques	17
2.1 Approches semi-empiriques de la modélisation	17
2.1.1 Transfert radiatif simplifié	17
2.1.1.1 Equations de transfert radiatif	17
2.1.1.2 Modélisation simplifiée de la température de brillance	19
2.1.1.3 Approximation Delta-Eddington et discussion	20
2.1.2 Approches expérimentales de la modélisation	21
2.2 Approches physiques de la modélisation de l'émission d'un couvert	21
2.2.1 Diffusion de volume: approche cohérente et incohérente	22
2.2.1.1 Approche cohérente de la diffusion de volume	22
2.2.1.2 Approche incohérente de la diffusion de volume	24
2.2.2 Modélisation du milieu	29
2.2.2.1 Approche continue	29
2.2.2.2 Approche discrète	30
2.2.3 Discussion	30
2.2.3.1 Modélisation hyperfréquence: bref état de l'art	30
2.2.3.2 Architecture du couvert végétal et modèles en télédétection	31
2.2.3.3 Discussion	32
Chapitre 3 Modélisation des paramètres physiques et biologiques du milieu	35
3.1 Le couvert végétal	35
3.1.1 Permittivité et teneur en eau de la végétation	35
3.1.1.1 L'eau dans la plante	35

3.1.1.2 Propriétés diélectriques de la végétation	36
3.1.2 Structure du couvert végétal	38
3.1.2.1 Densité des éléments du couvert végétal	38
3.1.2.2 Orientation et dimension des éléments du couvert	39
3.1.3 Température du couvert	39
3.1.3.1 Estimation et simulation de la température du couvert	39
3.1.3.2 Estimation de la température de surface par radiométrie micro- onde	40
3.2 Le sol	40
3.2.1 Permittivité et teneur en eau du sol	41
3.2.2 Rugosité de surface	41
3.3 L'atmosphère	43
3.3.1 Caractérisation des effets atmosphériques	43
3.3.2 Influence de l'atmosphère sur la mesure de température de brillance .	43

DEUXIEME PARTIE: MODELISATION CONTINUE ET DISCRETE

Chapitre 4 Modèles continu et discret	3
4.1 Résolution des équations de transfert radiatif	3
4.1.1 Résolution du système linéaire différentiel des équations homogènes	3
4.1.2 Calcul de la température de brillance du couvert	6
4.1.2.1 Solution particulière des équations de transfert radiatif	6
4.1.2.2 Conditions aux limites aux interfaces sol-végétation et végétation-atmosphère	6
4.1.2.3 Calcul de la température de brillance du couvert	7
4.2 Milieu continu: calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase.	8
4.3 Milieu discret: calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase	10
4.3.1 Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des feuilles du couvert végétal	10
4.3.2 Calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase	11
4.4 Structure générale des modèles continu et discret – Données d'entrée et de sortie des simulations	12
4.5 Modèle discret de rétrodiffusion radar	13
Chapitre 5 Etude de sensibilité des modèles continu et discret	15
5.1 Etude de sensibilité du modèle discret	15
5.1.1 Fondement et Méthode	15
5.1.2 Résultats et discussion	16
5.1.2.1 Influence des caractéristiques de la végétation sur l'émission du couvert	16
5.1.2.2 Influence de la distribution en inclinaison des feuilles sur l'émission du couvert	17
5.1.2.3 Influence de l'humidité du sol sur l'émission du couvert	17
5.2 Etude de sensibilité du modèle continu	18
5.2.1 Influence des longueurs de corrélation sur l'émission du couvert	18
5.2.1.1 Fondement et Méthode	18
5.2.1.2 Résultats et discussion	18
5.2.2 Influence des caractéristiques de la végétation sur l'émission du couvert	19
5.2.2.1 Fondement et Méthode	19
5.2.2.2 Résultats et discussion	20

TROISIEME PARTIE: MESURES ET SIMULATIONS DES DONNEES MICRO-ONDES

Chapitre 6	Expérimentation PORTOS-1991 sur couvert de soja	3
6.1	Mesures des caractéristiques du milieu observé	3
6.1.1	Caractéristiques thermiques du milieu	4
6.1.2	Caractéristiques du sol	4
6.1.3	Caractéristiques du couvert végétal	4
6.1.3.1	Protocole des mesures	4
6.1.3.2	Caractéristiques générales du couvert	5
6.1.3.3	Caractéristiques de structure des diverses composantes du couvert	6
6.2	Mesures radiométriques de PORTOS	7
6.2.1	Caractéristiques de PORTOS	7
6.2.1.1	Présentation générale de l'instrument	7
6.2.1.2	Modes de fonctionnement du radiomètre	7
6.2.1.3	Technologie et performance des antennes	8
6.2.2	Mise en oeuvre des mesures radiométriques avec PORTOS	8
6.2.2.1	Etalonnage des données radiométriques	8
6.2.2.2	Déroulement des mesures radiométriques	9
6.2.3	Résultats des mesures radiométriques	10
6.2.3.1	Description du jeu de données radiométriques	10
6.2.3.2	Contribution du couvert végétal à l'émission	11
6.2.3.3	Contribution du sol à l'émission	12
6.2.4	Conclusions	12
Chapitre 7	Confrontation des données micro-ondes mesurées et simulées	15
7.1	Confrontation des mesures radiométriques avec les simulations du modèle discret	15
7.1.1	Méthode	15
7.1.2	Résultats	16
7.1.2.1	Evolution de l'émissivité en fonction de l'angle d'incidence	16
7.1.2.2	Evolution de l'émissivité en fonction de la fréquence	16
7.1.3	Discussion	17
7.2	Confrontation des mesures radiométriques avec les simulations du modèle continu	18
7.2.1	Méthode générale	18
7.2.2	Rugosité et teneur en eau du sol	18
7.2.3	Evolution temporelle des longueurs de corrélation l_z et l_p	19
7.2.3.1	Méthode	19
7.2.3.2	Résultats	19
7.2.4	Confrontation directe entre les données simulées et mesurées	20
7.2.5	Inversion des paramètres de la surface: teneur en eau du sol m_v et fraction volumique de la végétation f_v	21

7.2.6 Discussion	21
7.3 Discussion et Perspectives	22
7.3.1 Mesures micro-ondes sur sol nu et couvert végétal	22
7.3.2 Approches discrète et continue	22
Chapitre 8 Couplage de l'approche discrète avec un modèle de simulation des échanges d'énergie au sein d'un couvert végétal	25
8.1 Présentation et principe de l'étude	25
8.2 Analyse du couplage entre le modèle micro-onde et le modèle de fonctionnement du couvert végétal	26
8.2.1 Description du modèle de fonctionnement du couvert végétal (modèle ALB)	26
8.2.1.1 Présentation générale du modèle ALB	26
8.2.1.2 Calcul des conductances de surface du sol et de la végétation ..	27
8.2.2 Description des différents termes du couplage	28
8.2.2.1 Architecture générale du couplage (modèle discret-ALB)	28
8.2.2.2 Prise en compte de la teneur en eau du sol et de la végétation ..	28
8.3 Simulations de données par les modèles couplés	29
8.3.1 Aspects méthodologiques	29
8.3.1.1 Description des simulations	29
8.3.1.2 Relations analytiques entre paramètres caractéristiques du milieu	29
8.3.2 Résultats	31
8.3.2.1 Evolution du signal micro-onde simulé au cours de la campagne SOJA-1990	31
8.3.2.2 Emission micro-onde du couvert végétal pour les quatre configurations LAMB du milieu	32
8.4 Conclusion	34
8.4.1 Mesures micro-ondes sur couvert végétal	34
8.4.2 Perspectives	35

Conclusion générale

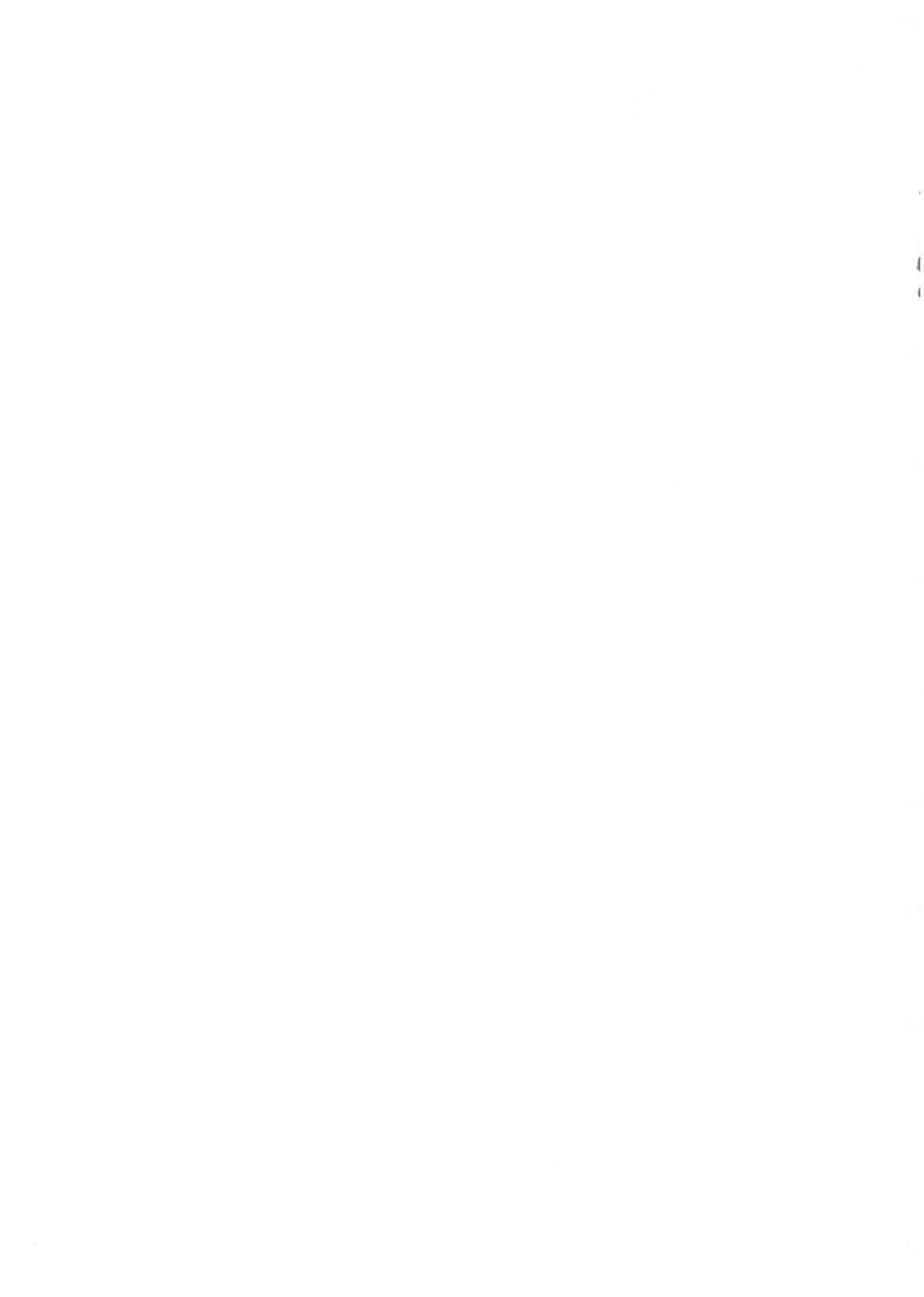
Annexe 1: Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des feuilles: Relations géométriques entre le repère de référence et le repère local lié à la feuille.

Annexe 2: Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des ellipsoïdes dans le repère local et dans le repère de référence.

Annexe 3: Paramètres d'entrée et de sortie des modèles de simulation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal – Modèles continu et discret.

Annexe 4: Mesure de la teneur en eau gravimétrique mv sur différentes couches de surface du sol, sous le couvert de soja (Méthode de pesée, Expérimentation PORTOS-1991).

Annexe 5: Tableau synthétique des potentialités des mesures micro-ondes passives dans l'estimation des paramètres de surface (sol et végétation).



Liste des Symboles et Abréviations

- α, β, γ angles d'Euler décrivant l'orientation d'un solide dans l'espace
 a_1, a_2 (m) demi-axes des feuilles (assimilées à des ellipsoïdes)
 a_3 (m) demi-épaisseur de la feuille
 a_p coefficient d'absorption d'un corps
- B_s, B_f (kg/m²) biomasse sèche et biomasse fraîche de la végétation
- c vitesse de la lumière (3.10⁸ m.s⁻¹)
 C coefficient reliant température de brillance T_{Bp} (K) et Luminance spectrale L_f (Wm⁻²sr⁻¹Hz⁻¹),
 $C=2k/\lambda^2$
 C_p capacité calorifique de l'air
- 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 un milieu
 d (m) hauteur du couvert végétal
- e_q pression de vapeur d'eau à la surface des feuilles (q=f) et du sol (q=s)
 e_q^* pression de vapeur d'eau saturante à la surface des feuilles (q=f) et du sol (q=s)
 e_p émissivité micro-onde du couvert (p= v ou h pour une polarisation verticale ou horizontale)
 ϵ, μ permittivité électrique et perméabilité magnétique du milieu
 ϵ_r, μ_r permittivité électrique et perméabilité magnétique *relatives* du milieu (ϵ_r est aussi appelée constante diélectrique du milieu avec $\epsilon=\epsilon_r \epsilon_0$)
 ϵ_0, μ_0 permittivité et perméabilité 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
 ep_f (m) épaisseur foliaire ($ep_f=2.a_3$)
 E, B champ électrique et magnétique de l'onde
E. M. : Electromagnétique
- ϕ angle d'azimuth
 f (GHz) fréquence de la mesure (ou fréquence de la radiation électromagnétique)
 f_v (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_p constante psychrométrique
 γ_{pq} coefficient bistatique de diffusion (p,q=v,h)
 $\gamma_{pq}^f, \sigma_{pq}^f$ coefficient de rétrodiffusion radar ($\gamma_{pq}^f = \sigma_{pq}^f$) et section efficace de rétrodiffusion
 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
 g_v conductance de surface de la végétation
 g_f conductance stomatique d'une feuille du couvert
- h constante de Planck (6.63.10⁻³⁴J)
 h_r, Q paramètres de rugosité (réflectivité de Fresnel modifiée selon Wang et Choudhury, 1981)

h_s, h_v coefficient d'échange aérodynamique du sol et de la végétation

(H) polarisation Horizontale de l'onde E. M.

H_T, H_P hauteur des tiges et des pétioles du soja

H_p (kg/kg) humidité pondérale de la végétation

H_s, H_v flux de chaleur sensible du sol et de la végétation

I_{vn}, I_{hn}, U_n, V_n paramètres de Stokes modifiés

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 (nepers.m⁻²) coefficient d'absorption du milieu

k_s (nepers.m⁻²) coefficient de diffusion

k_e (nepers.m⁻²) coefficient d'extinction ($k_e = k_a + k_s$)

λ (m) longueur d'onde (période spatiale)

l_a (m) longueur d'absorption de l'onde E. M. dans un milieu

l_G (m) longueur de corrélation de rugosité de la surface du sol

l_z et l_p (m) longueurs de corrélation diélectrique verticale et horizontale du milieu continu

LAI (m²/m²) Indice Foliaire (Leaf Area Index)

LE_s, LE_v flux de chaleur latente du sol et de la végétation

$\mu = \cos\theta$ (cosinus de l'angle d'incidence)

(μ, ν) paramètres de la fonction beta d'orientation des feuilles (Goël et Strebel, 1984)

m indicateur de rugosité (*rms surface slope*)

m_v (m³/m³) teneur en eau volumétrique du sol

M_g (kg/kg) teneur en eau gravimétrique de la matière végétale

M_v (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

Ψ_f, Ψ_l (MPa) potentiel hydrique des feuilles

$p_\beta(\beta), p_\alpha(\alpha), p_\gamma(\gamma)$ fonctions densité de probabilité d'orientation des feuilles (inclinaison, azimuth, rotation autour de l'axe foliaire).

P matrice de phase constituée des éléments (p, q') ($p, q=v, h$)

PD_p différence de polarisation modifiée ($PD_p=(T_{Bv}-T_{Bh}) \cdot T_{Bp}$), $p=v, h$)

θ angle d'incidence mesuré par rapport à la normale à la surface

Q paramètre de dépolarisation lié à la rugosité de surface (Cf h_r)

Q_p éclaircissement photosynthétiquement actif reçu par le couvert (PAR)

ρ masse volumique de l'air

ρ_λ reflectance spectrale du couvert

ρ_b (g/cm³) masse volumique de la matière sèche du sol

ρ_s (g/cm³) densité de la matière végétale sèche

r_a rapport des demi-axes de la feuille (assimilée à un ellipsoïde, $r_a=a_1/a_2$)

r_s résistance de surface du sol à l'évaporation

R rapport de polarisation ($R=(T_{Bv}-T_{Bh})/(T_{Bv}+T_{Bh})$)

R_p, T_p ($p=v, h$) coefficients de Fresnel en réflexion et en transmission

R_T, R_P demi-épaisseur des tiges et des pétioles du soja

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

S, C (%) fraction en sable et argile du sol

τ épaisseur optique du milieu

T_2 et T_1 (K) température du sol ($T_2=T_s$) et de la végétation ($T_1=T_v$)

T_{1sup} , T_{1inf} température 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.

$T_{Bp}(\theta_i)$ (K) température de brillance du milieu ($p=v, h$)

T_{sky} (K) composante atmosphérique descendante

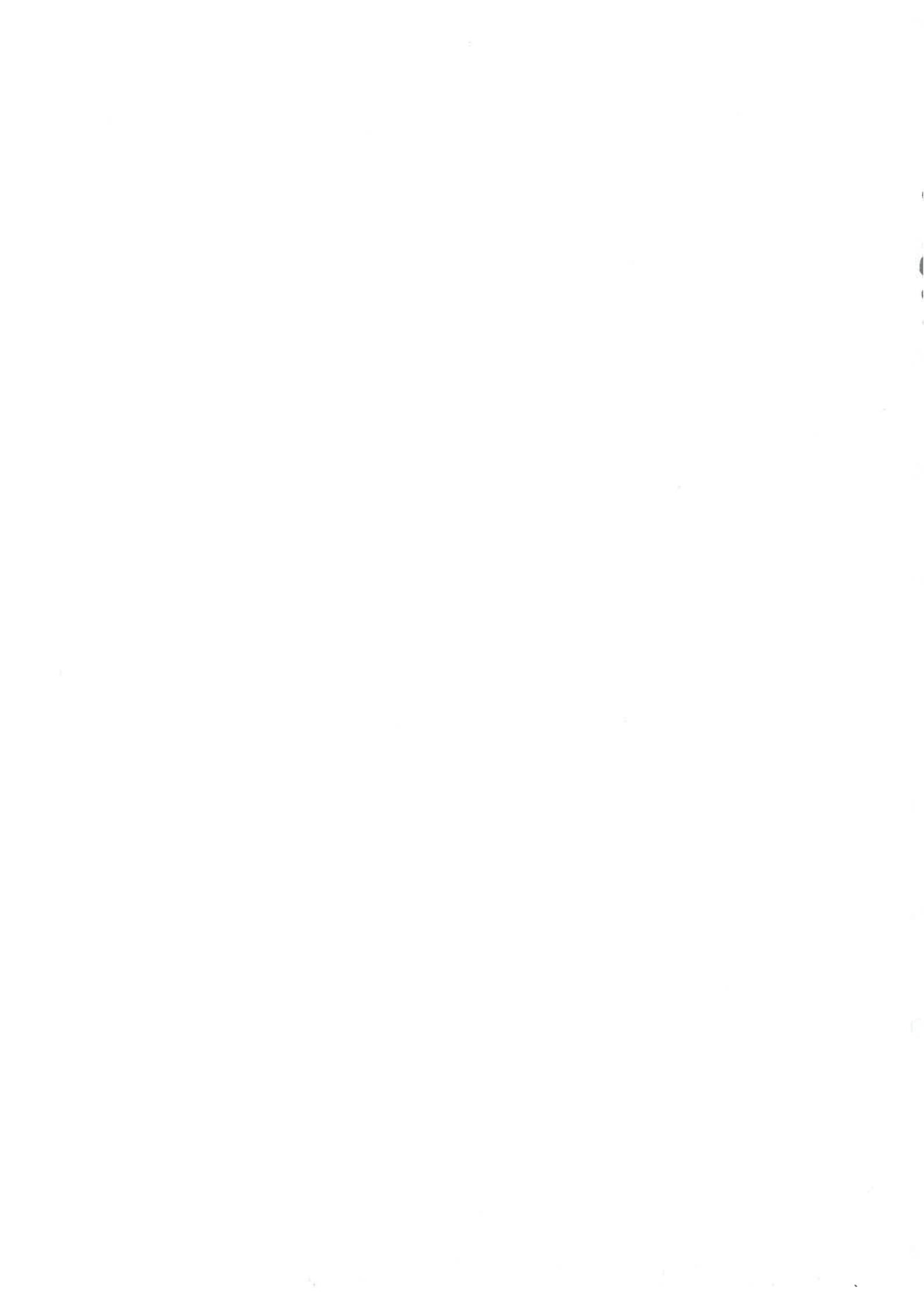
T. R. : Transfert Radiatif

(V) polarisation Verticale de l'onde E. M.

ω albedo de simple diffusion (single scattering albedo)

ω_c, f, T pulsation, fréquence, période temporelle de l'onde E. M.

W_v (m^3/m^2) contenu global en eau de la végétation



Introduction

Que ce soit dans le cadre du suivi de la biosphère ou celui du couvert végétal à l'échelle de la parcelle, la télédétection est un outil efficace pour estimer les paramètres de surface qui interviennent dans les échanges énergétiques à l'interface terre-atmosphère. L'intérêt de la mesure télédéteectée se fonde sur la coïncidence, en terme spatial et temporel, entre les échelles caractéristiques des processus observés et les échelles d'analyse de l'observation spatiale. La spécificité de la télédétection est donc liée à sa capacité de mesure sur le plan:

- de l'échelle spatiale et temporelle de l'acquisition satellitaire,
- des paramètres de surface accessibles par l'utilisation des différents domaines spectraux: visible, proche infrarouge, infrarouge thermique, hyperfréquence.

Actuellement, l'intérêt grandissant pour une meilleure appréciation du fonctionnement et de l'évolution de la biosphère à l'échelle globale dynamise les travaux de recherche en télédétection. Les grands axes de ces études portent sur le développement des capteurs et des algorithmes de correction des données acquises, sur l'analyse physique de la mesure et sur son utilisation opérationnelle pour quantifier les processus énergétiques de surface. Notre étude s'inscrit dans cette dynamique et vise à préciser les relations entre la mesure hyperfréquence passive sur couverts végétaux et les paramètres de surface. Nous décrivons dans cette partie introductive le "contexte hyperfréquence" qui est à l'origine du plan de recherche que nous avons suivi.

1. Emission hyperfréquence et Télédétection

Cette étude, "Modélisation hyperfréquence de l'émission d'un couvert végétal", s'inscrit dans le contexte suivant:

- intérêt croissant pour des mesures couplées dans les différents domaines de longueur d'ondes;
- attente souvent citée pour des études détaillant l'influence des paramètres du couvert végétal sur l'émission hyperfréquence d'une surface;
- développement récent par le CNES et Matra-Marconi-Espace d'un radiomètre micro-onde multifréquence de technologie très avancée.

L'observation planétaire par les techniques de télédétection cherche à diversifier ses moyens d'investigation. La complémentarité des mesures effectuées dans les différents domaines de longueur d'ondes paraît seule permettre l'évaluation et le suivi de l'évolution climatique, biologique et physique de l'environnement terrestre. Dans ce cadre, de nombreux travaux mettent l'accent sur l'intérêt des mesures hyperfréquences passives. Leur faible sensibilité à l'opacité de l'atmosphère réduit la nécessité de corrections précises et permet un suivi satellitaire régulier des sites d'études même sous couvert nuageux. Par ailleurs, de multiples facteurs influençant la mesure micro-onde sont susceptibles d'être estimés par des techniques d'inversion, dans la gamme de fréquence de 1 à 100GHz qui est le cadre de cette étude. De nombreux travaux portent sur l'estimation de l'humidité des sols (Jackson et Schmugge, 1989; Schmugge, 1991; Chukhlantsev *et al.*, 1989), de caractéristiques hydrologiques des surfaces (Giddings et Choudhury, 1989; Famiglietti et Wood, 1991; Reutov and Shutko, 1992), des caractéristiques du couvert végétal (Choudhury, 1990; Mätzler, 1990; Paloscia et Pampaloni, 1992), du contenu en eau des nuages (Alishouse *et al.*, 1990), de l'intensité des pluies (Jin et Isaacs, 1987), de la température de surface continentale ou océanique (McFarland *et al.*, 1990), des caractéristiques de la neige et glace océanique, polaire ou continentale (Maslanik *et al.*, 1989; Surdyk et Fily, 1991; Srivastav et Singh, 1991), de la vitesse du vent au dessus de l'océan (Goodberlet *et al.*, 1990). Cette variété tient en particulier à la différence de sensibilité aux paramètres de surface de la radiation hyperfréquence, en fonction de sa polarisation (verticale ou horizontale) et de sa fréquence. Les mesures radiométriques hyperfréquences, quelque peu délaissées au profit des mesures "actives" du fait de leur faible résolution

spatiale, sont de nouveau d'actualité. En effet, la phase relativement complexe de traitement du signal des mesures radar, l'accroissement progressif de la résolution radiométrique (actuellement 15kmx13km à 85GHz sur le capteur SSM/I et dans le futur un gain par un facteur 10 par des techniques d'interférométrie (Thibaut *et al.*, 1990)), l'intérêt croissant pour des radiomètres de terrain ou aéroportés (Kerr, 1992), des sensibilités aux paramètres de surface différenciées (Saatchi et Wegmüller, 1992), mettent en valeur la large complémentarité des domaines micro-ondes passif et actif.

D'autre part la mesure radiométrique apparaît très pertinente en tant qu'outil d'investigation et de suivi du fonctionnement d'un couvert végétal. Son intérêt pour estimer les paramètres de biomasse (Choudhury, 1990; Paloscia et Pampaloni, 1992), de teneur en eau de la végétation (Mätzler, 1990), des caractéristiques de structure et du type de peuplement (Hallikainen *et al.*, 1988; Neale *et al.*, 1990) et d'humidité de surface du sol, est à l'origine des thèmes de recherches de diverses équipes dans le monde. Cependant ces travaux s'appuient pour la plupart sur une modélisation simplifiée des interactions entre le rayonnement électromagnétique et les éléments du couvert. Actuellement dans le cadre des micro-ondes passives, seul le modèle développé par Choudhury et Wang (1990) se fonde sur des formulations précises de matrices de phase, dans le domaine des "moyennes" fréquences (37GHz). Le domaine des "basses" fréquences (1-25GHz) qui est le cadre de travaux approfondis dans l'actif (Ulaby *et al.*, 1990; Karam *et al.*, 1992), n'est pour l'instant, pris en compte que par des modèles du type "continu". Ces approches théoriques, par ailleurs, ne font l'objet que de rares tentatives de validation par des mesures radiométriques. Aussi les données acquises sur couverture de végétation par des radiomètres de terrain, aéroportés (Schmugge *et al.*, 1991), ou embarqués sur satellite (Choudhury, 1989) sont-elles le plus souvent difficiles à interpréter. Pour les maîtres d'oeuvre de ces recherches, le développement d'une meilleure compréhension physique des caractéristiques de l'émission du couvert par des modélisations rigoureuses s'impose.

Pour ce qui est des capteurs radiométriques d'observation des surfaces (hormis les instruments météorologiques aux fréquences élevées, supérieures à 100GHz), des développements importants ont vu le jour ou sont en cours. A la suite de SMMR embarqué sur Nimbus 7 et fonctionnel jusqu'en Octobre 1987, SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) fut lancé en Juin de la même année à bord du DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Il comporte 4 canaux "moyennes fréquences" à 19.3, 22.2, 37.0 et 85.5 GHz. Les caractéristiques de son orbite circulaire et de son faisceau conique permettent une couverture globale de la planète en 24h (Hollinger *et al.*, 1990). Le sondeur micro-onde ATSR/M (23.8 et 36.5GHz) fait partie de la charge d'observation de ERS-1 lancé en 1991 (Windsor and Charlton, 1991). Concernant le domaine des basses et moyennes fréquences, le très prometteur MIMR (Multifrequency Imaging Microwave Radiometer) est actuellement développé par l'Agence Spatiale Européenne. Ce radiomètre aura des caractéristiques similaires au SMM/I avec en outre des fréquences plus basses (6.8, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5 et 90GHz). Il doit être embarqué sur la plate-forme Polaire EOS (Earth Observing System) de la NASA, dont le lancement est prévu vers la fin de cette décennie (Kerr, 1991). Toujours dans le cadre de EOS, un système de radiométrie micro-onde multifréquence à haute résolution (HMMR) est en cours de développement sous la responsabilité de la NOAA et la NASA. Ce système comprend trois instruments qui doivent permettre un suivi régulier du cycle hydrologique des terres émergées, des caractéristiques de l'atmosphère (profil de température et de teneur en eau) et des océans (Le Vine *et al.*, 1989). Ce système témoigne Outre-Atlantique du vif regain d'intérêt porté aux techniques micro-ondes passives, dans une perspective de meilleure compréhension des processus fondamentaux qui gouvernent l'environnement terrestre à l'échelle globale. Par ailleurs, divers instruments aéroportés sont utilisés pour la caractérisation des surfaces continentales à une échelle plus locale. Le PBM (Pushbroom microwave radiometer, 1.4GHz) 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 90GHz), développé par le CNES 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 (réseau de cup-dipôle à 5.05GHz et cornet focalisé par une lentille à 10.65, 23.8 et 36.5GHz) en font un instrument d'investigation de premier rang pour la communauté scientifique. Encore en période de mise au point, il a été mis à la disposition de l'INRA (Station de Sciences du sol & Bioclimatologie – Avignon) durant l'été 1991. Il a participé à la campagne HAPEX SAHEL 1992 en configuration aéroportée. Sont également prévues diverses expériences sur couverts agricoles (INRA Avignon-1993), sur la neige et sur la caractérisation de l'atmosphère. Les mesures de terrain constituent également un atout pour la radiométrie micro-onde. De nombreux instruments européens, nord-américains ou russes sont à l'origine de travaux mettant en valeur l'intérêt de la radiométrie hyperfréquence sur couverts végétaux: à 2.7 et 5.1 GHz, Brunfeldt et Ulaby (1986); entre 1 et 15GHz, Chukhlantsev *et al.* (1989); à 1.4 et 5GHz, Lang *et al.* (1989), Jackson et O'Neill (1988); à 4.9, 10.4, 21, 35, 94GHz, Mätzler (1990); à 10 et 36GHz, Paloscia et Pampaloni (1992).

L'ensemble de ces grands traits font de la radiométrie micro-onde un outil de télédétection prometteur dont les caractéristiques originales sont complémentaires d'autres techniques. Elle a un rôle important à jouer dans une perspective de synergie entre les mesures effectuées dans les différents domaines de longueur d'ondes qui est de plus en plus à l'ordre du jour (Ulaby *et al.*, 1983a; Becker and Choudhury, 1988; Townshend *et al.*, 1990; Becker et Li, 1991; Kruse and Dietz, 1991, Olioso, 1992).

2. Définition des objectifs et présentation de l'étude

Le cadre et les objectifs de cette étude découlent de l'analyse que nous venons de faire. La modélisation physique de l'émission micro-onde du couvert végétal devra permettre une analyse fine de l'influence des divers paramètres de la végétation: structure, teneur en eau, biomasse, température. Elle devra s'insérer dans une logique d'inversion des données télédéteectées, et de synergie avec les mesures effectuées dans les autres domaines de longueur d'ondes. Le domaine fréquentiel sélectionné est celui des "basses" fréquences (1 – 25GHz). L'influence atmosphérique y est davantage réduite qu'à (30-40GHz). Ce domaine fréquentiel est le cadre d'un découplage entre les effets sol (très marqués vers 1GHz) et les effets végétation (prédominants à 25GHz). Quatre des six canaux de PORTOS s'y trouvent inclus (1.4, 5.05, 10.65 et 23.8GHz). Ce domaine bénéficie par ailleurs des travaux très avancés de modélisation de Karam *et al.* (1988, 1989, 1992) en hyperfréquence active. La validation est menée sur des données expérimentales acquises par PORTOS en juillet-Septembre 1991 sur un couvert de soja. Ce couvert est bien connu grâce aux précédentes campagnes de mesures sur le plan de son bilan hydrique et énergétique (Brisson, 1989; Olioso, 1992). La structure de la plante, en tiges relativement rectilignes et feuilles elliptiques, la rend particulièrement adaptée aux approches de modélisation du type "milieu discret", les plus avancées actuellement (Ulaby *et al.*, 1990; Choudhury et Wang, 1990; Karam *et al.*, 1992).

Dans une première partie, nous présentons les fondements physiques sur lesquels s'appuient les différents travaux dans le domaine des hyperfréquences. L'analyse des diverses approches de modélisation de l'émission des couverts végétaux met en valeur les performances et la complémentarité des modèles discret et continu dans le cadre du transfert radiatif. Ils apparaissent répondre aux objectifs précisés en introduction à ce paragraphe. Les paramètres d'entrée de ces modèles représentent les caractéristiques de la végétation, du sol et de l'atmosphère. Partie intégrante de la modélisation, leur analyse est menée à la suite.

La deuxième partie est consacrée à la description des approches discrète et continue, dont le développement bénéficie des travaux et de la collaboration de E. Mougin et A. Lopes (CESR-Toulouse), M. Karam (Université du Texas, USA) pour le modèle discret et Y. Q. Jin (Université de Shangai, Chine) pour le modèle continu. L'analyse de sensibilité de ces deux approches permet de préciser l'influence détaillée des paramètres du couvert et du sol dans leur contribution à l'émission

micro-onde globale mesurée sur couvert de végétation. Elle constituera le fondement de l'interprétation des données de simulation.

La troisième partie concerne l'utilisation des modèles dans une perspective d'estimation des paramètres de surface. Dans un premier temps les données simulées sont confrontées aux données acquises par PORTOS sur couvert de soja. L'expérimentation PORTOS 1991 fut le cadre d'un suivi temporel de l'émission hyperfréquence de la végétation, et d'une caractérisation précise des paramètres du couvert et du sol (Chanzy et Wigneron, 1992). La problématique de l'inversion est mise en oeuvre avec le modèle continu qui se fonde sur une description statistique très dépouillée de la structure de la végétation (Wigneron *et al.*, 1992b). Dans un deuxième temps le modèle discret, davantage explicatif (Wigneron *et al.*, 1992a), est couplé avec un modèle de réflectance et de température de surface, s'appuyant sur le bilan d'énergie du couvert de soja (Oliosio, 1992). Cette étude s'inscrit dans la double perspective de *synergie* entre les mesures dans les domaines spectraux du visible, proche infrarouge, infrarouge thermique et hyperfréquences (passives et actives) et d'*estimation des flux* qui interviennent dans le bilan d'énergie au sein du couvert.

Partie I

Modélisation de l'émission micro-onde: éléments bibliographiques

Chapitre 1

Interaction de l'onde électromagnétique avec la matière

Les fondements physiques sur lesquels s'appuie la caractérisation des ondes électromagnétiques (ondes E.M.) et la modélisation de l'émission micro-onde, sont présentés dans ce chapitre. L'onde électromagnétique caractérise la propagation d'une perturbation du champ électrique (E) et du champ magnétique (B). La nature de cette radiation est fondée sur les équations de Maxwell dont découle l'équation d'onde. Après avoir décrit les caractéristiques générales de l'onde E.M., nous nous intéresserons aux relations onde-milieu physique qui sont à l'origine de l'émission micro-onde à la surface de la Terre. L'interaction de l'onde avec la matière fait intervenir différents processus physiques: diffusion, diffraction, absorption et réflexion (Ishimaru (1978), Ulaby *et al.* (1981), Laug (1980) et Rees (1990)). Les notions de transmission et de réflexion sont introduites pour décrire l'interaction de l'onde avec des surfaces planes (surface des feuilles, du sol). La notion d'absorption permet de décrire l'atténuation que subit l'onde lors de sa propagation dans un milieu. La diffusion concerne l'interaction de l'onde avec des objets diffuseurs de dimensions très variables: aérosols dans l'atmosphère, grains de sable, feuilles et branches... La diffusion s'accroît généralement avec la taille relative de l'objet. La diffraction intervient surtout dans le domaine des très hautes fréquences. Ces différents processus se combinent le plus souvent et leur importance relative varie en fonction de la fréquence de la radiation. En effet sur un plan purement physique, une surface est vue d'autant plus plane et un objet d'autant plus petit que la longueur de l'onde est plus grande. Ces considérations interviennent pour préciser le domaine de validité des différentes approches de modélisation.

1.1 Nature du rayonnement

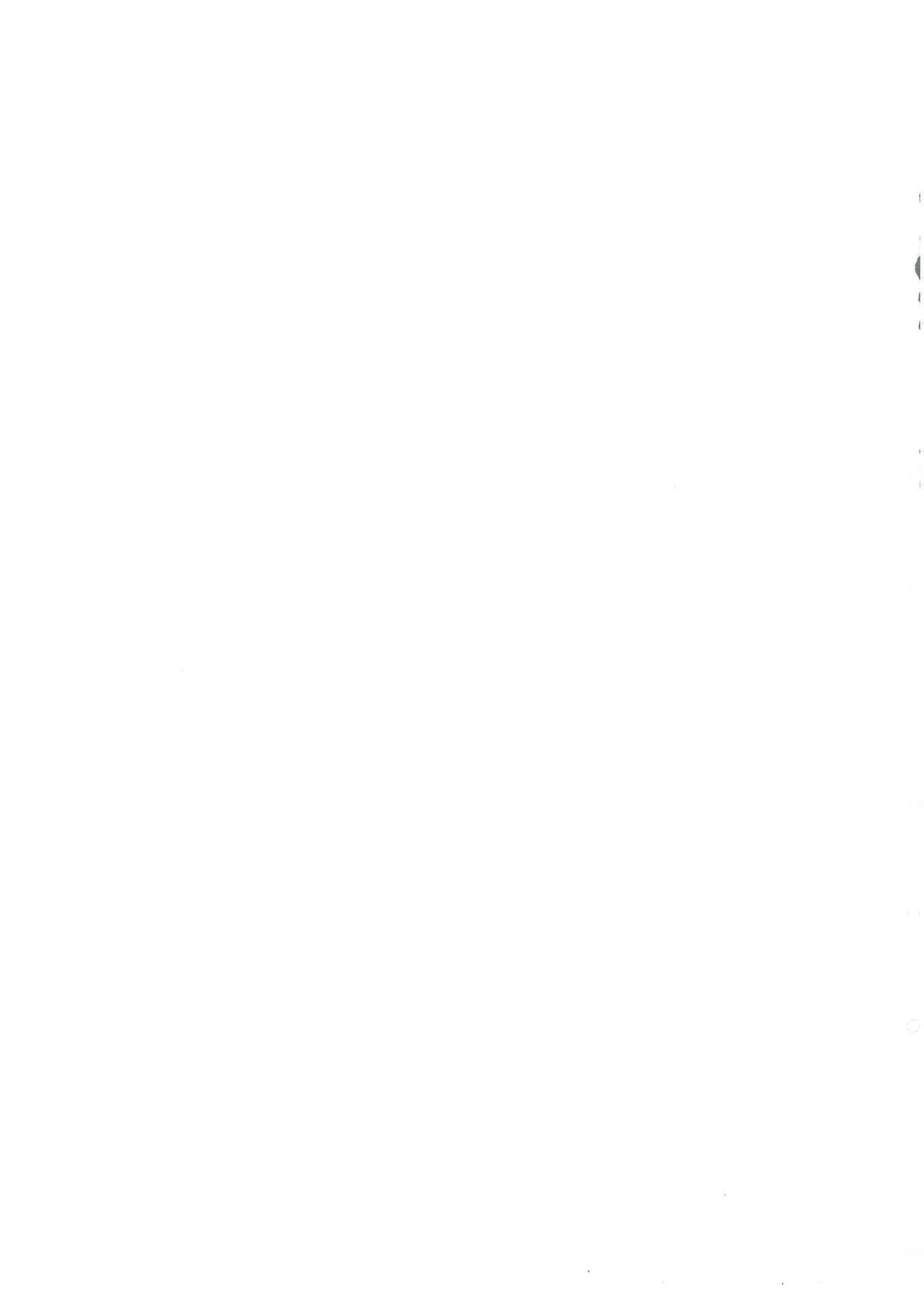
Les principaux résultats découlant des équations de Maxwell seront présentés dans cette partie. Ils concernent les caractéristiques spatiales et temporelles de la propagation, les phénomènes de réflexion, réfraction et absorption de l'onde E. M.

1.1.1 L'onde électromagnétique – équations de Maxwell

Les relations spatio-temporelles, qui caractérisent la propagation de l'onde E.M., sont décrites succinctement dans ce paragraphe. Les milieux naturels (atmosphère, sol, végétation...) sont le cadre de ce travail et certaines propriétés de nature électromagnétique seront supposées acquises: absence de charges, milieu non conducteur ($\sigma=0$) et milieu non magnétique ($\mu_r=1$).

Les radiations visibles, infrarouges, micro-ondes sont des ondes de nature électromagnétique et donc régies par les équations de Maxwell qui s'écrivent (V désigne l'opérateur nabla):

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} + (\delta \mathbf{B} / \delta t) = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} - \mu_r \epsilon_r / c^2 (\delta \mathbf{E} / \delta t) = 0 \end{array} \right. \quad (1-1)$$



avec:

E, B : champ électrique et magnétique de l'onde

ϵ_r, μ_r : permittivité électrique et perméabilité magnétique relatives du milieu dans lequel l'onde se propage (ϵ_r est aussi appelée constante diélectrique du milieu)

ϵ_0, μ_0 : permittivité et perméabilité du vide

ϵ, μ : permittivité et perméabilité du milieu

c : vitesse de la lumière (3.10^8 m.s^{-1})

et

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0; \mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1-2)$$

$$c = (\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{1/2} \quad (1-3)$$

Des équations de Maxwell sont déduites les équations d'ondes qui caractérisent la propagation de la radiation dans le milieu:

$$\begin{cases} \nabla^2 E - \mu\epsilon/c^2 \delta^2 E/\delta t^2 = 0 \\ \nabla^2 B - \mu\epsilon/c^2 \delta^2 B/\delta t^2 = 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

Sans perte de généralité une onde solution de ces équations et qui se propage le long de l'axe des z peut s'écrire:

$$E_x = E_0 \cdot \cos(\omega_c \cdot t - k \cdot z) \quad (1-5)$$

Des équations (1-1) et (1-5) on déduit la relation de base reliant les pulsations spatiale et temporelle de l'onde:

$$\omega_c/k = 1/(\epsilon \cdot \mu)^{1/2} \quad (1-6)$$

avec

ω_c, f, T : pulsation, fréquence, période temporelle de l'onde

k : nombre d'onde (pulsation spatiale)

λ : longueur d'onde (période spatiale)

soit

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$\omega_c = 2\pi/T = 2\pi \cdot f \quad (1-7)$$

La vitesse de propagation de l'onde est appelée vitesse de phase V_ϕ . Ce paramètre reliant la variables d'espace z et la variable de temps t , est calculé en posant que le terme de phase de l'onde est constant, soit:

$$\begin{cases} \phi = \omega_c \cdot t - k \cdot z \\ d\phi = 0 \end{cases} \Rightarrow V_\phi = dz/dt = \omega_c/k \quad (1-8)$$

Dans le cas particulier du vide la vitesse de phase de l'onde est la vitesse de la lumière c :

$$V_\phi = \omega_{c0}/k_0 = 1/(\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{1/2} = c \quad (1-9)$$

Ces équations permettent de relier la longueur d'onde dans le milieu où la radiation se propage à celle dans le vide:

$$\lambda = 2\pi/k = 2\pi/(\omega_c \cdot (\epsilon \cdot \mu)^{1/2}) = 2\pi/(\omega_c \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0)^{1/2}) = \lambda_0/(\epsilon_r)^{1/2} \quad (1-10)$$

$$\text{soit } \lambda = \lambda_0/(\epsilon_r)^{1/2} \text{ et } k = k_0 \cdot (\epsilon_r)^{1/2} \quad (1-11)$$

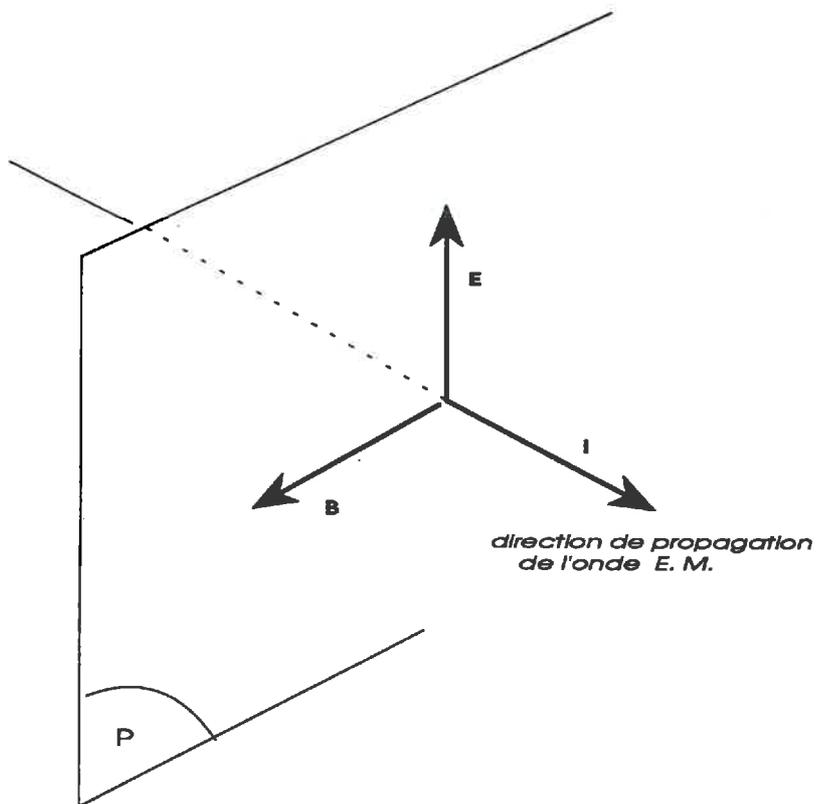


Figure 1-1: Description du plan de polarisation (P) d'une onde plane.

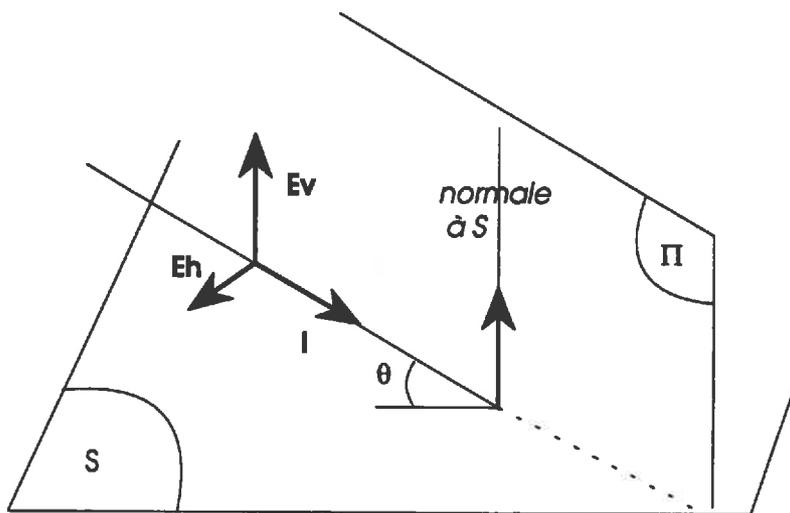


Figure 1-2: Définition du plan d'incidence (π) d'une radiation électromagnétique incidente sur une surface plane (S).

Dans ces conditions l'indice de réfraction n du milieu, qui intervient en particulier dans le calcul des coefficients de Fresnel, s'écrit:

$$n=c/v_{\phi}=(\epsilon\mu/(\epsilon_0\mu_0))^{1/2}=\epsilon_r^{1/2} \quad (1-12)$$

1.1.2 Polarisation d'une onde plane

1.1.2.1 Composante verticale et horizontale d'une onde plane

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 très simple dérive directement des équations de Maxwell. Par ailleurs il est toujours possible de décomposer un problème radiatif linéaire 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 reste alors aussi dans ce même plan (P), dit plan de polarisation, qui est orthogonal à la direction de propagation de l'onde. Dans ce plan, B et E sont eux-mêmes orthogonaux (figure 1-1).

La notion de polarisation verticale ou horizontale découle de cette structure très particulière de l'onde plane. Cette notion n'est pas intrinsèque à l'onde: elle 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) (figure 1-2), le plan d'incidence (π) contient par définition les deux directions (n) et (i). Le champ E est orthogonal à la direction d'incidence (car l'onde est plane). Il peut donc être décomposé vectoriellement selon 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 somme de deux composantes:

$$E = E_{\perp} + E_{//} \quad (1-13)$$

La composante parallèle $E_{//}$ est contenue dans le plan (π) et la composante orthogonale E_{\perp} est orthogonale au plan (π). Dans le cadre de cette étude, la surface d'incidence (S) est représentée par la surface terrestre: le sol ou un couvert végétal. Les composantes parallèle et orthogonale de l'onde sont aussi appelées composantes verticale et horizontale.

1.1.2.2 Onde polarisée et lumière naturelle

Les radiations naturelles d'origine solaire sont non polarisées. Cependant après interaction avec des surfaces planes naturelles (les feuilles d'un couvert, le tronc d'un arbre, le sol...), l'onde peut devenir partiellement polarisée. Ce caractère mérite d'être précisé car la prise en compte de l'aspect polarimétrique de l'onde, surtout étudié dans les domaines radar (Mead et McIntosh, 1991; Tsang, 1992), visible et proche-infrarouge (Rondeaux et Guyot, 1990), permet d'obtenir des informations complémentaires souvent reliées à la structure du milieu observé.

Dans le cas général, une onde plane polychromatique de largeur de bande $d\omega_c$ peut être décrite par ses composantes parallèles et verticales selon:

$$\begin{cases} E_{//} = E_x \cdot \cos(\omega_c t + \phi_1(t) - k \cdot z) \\ E_{\perp} = E_y \cdot \cos(\omega_c t + \phi_2(t) - k \cdot z) \end{cases} \quad (1-14)$$

Les amplitudes E_x et E_y ainsi que la différence $\phi(t)$ entre les deux fonctions de phase ($\phi(t) = \phi_2(t) - \phi_1(t)$) varient lentement dans les limites de la largeur de bande $d\omega_c$. Dans le cas particulier où $\phi_1(t)$, $\phi_2(t)$, $E_{//}$ et E_{\perp} sont constants, l'onde est monochromatique pure (une fréquence unique). Si la

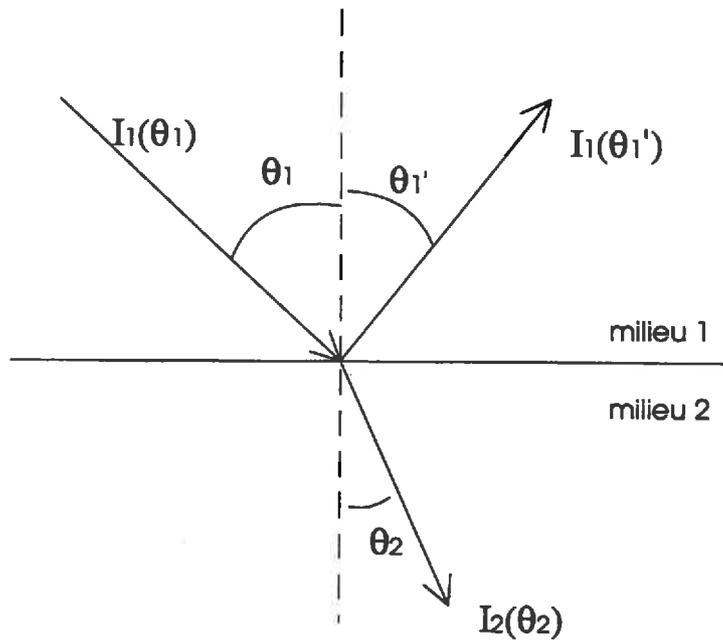


Figure 1-3: Loi de Snell-Descartes: réfraction ($I_2(\theta_2)$) et réflexion ($I_1(\theta_1')$) d'une onde plane ($I_1(\theta_1)$) incidente à l'interface de 2 milieux (1) et (2).

différence de phase est nulle, le champ E garde une direction constante: l'onde est dite linéairement polarisée; sinon le champ E ($E = E_{\perp} + E_{\parallel}$) décrit une ellipse dans le plan de polarisation et l'onde est dite elliptiquement polarisée.

Dans le cas de la lumière naturelle qui est non polarisée, la différence de phase $\varphi(t)$ est aléatoire: il n'y a aucune corrélation entre les fluctuations temporelles des composantes E_v (ou E_{\parallel}) et E_h (ou E_{\perp}) de la radiation. Ce que l'on peut formuler par (Ishimaru, 1978):

$$\langle E_v \cdot E_h^* \rangle = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} U = 2 \cdot \text{Re} \langle (E_v \cdot E_h^*) \rangle / (\eta \cdot d\Omega) = 0 \\ V = 2 \cdot \text{Im} \langle (E_v \cdot E_h^*) \rangle / (\eta \cdot d\Omega) = 0 \end{cases} \quad (1-15)$$

Avec $I_h = \langle |E_h|^2 \rangle / (\eta \cdot d\Omega)$ et $I_v = \langle |E_v|^2 \rangle / (\eta \cdot d\Omega)$, U et V constituent les paramètres de Stokes souvent utilisés pour caractériser une onde électromagnétique se propageant à travers l'angle solide $d\Omega$ dans un milieu d'impédance intrinsèque η ($\eta = (\mu/\epsilon)^{1/2}$), $\langle \rangle$ désignant un moyennage temporel. Dans le domaine des hyperfréquences passives qui prennent en compte l'émission thermique naturelle, deux des quatre paramètres de Stokes sont ainsi négligés, ce qui simplifie notablement les équations de propagation de l'onde. Ce n'est pas le cas en hyperfréquence active où l'émetteur radar impose le caractère polarisé de l'onde émise puis rétrodiffusée. Notons que Tsang (1991) montre sur la base de simulations, que pour certaines configurations asymétriques des diffuseurs discrets (l'effet de rang pour un couvert agricole par exemple) les paramètres de couplage U et V entre les deux polarisations ne sont pas négligeables. Exprimés en terme de température de brillance, U et V peuvent avoir un ordre de grandeur de 60K et contenir une information utile sur les caractéristiques du milieu observé. Cet aspect polarimétrique des radiations micro-ondes ne sera pas abordé dans le cadre de ce travail, mais il fait partie des thèmes d'investigation prometteurs en hyperfréquence.

1.1.3 Interface plane

Le cas particulier où l'onde entre au contact d'une interface plane est régit par des lois de portée très générale puisqu'elles permettent de décrire l'interaction des éléments du couvert (feuilles, branches...) avec les radiations hyperfréquences. Elles sont aussi à la base de la modélisation de l'émission des sols et des milieux stratifiés (neige et glace (Surdyk et Fily, 1991)).

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 réfraction. Les deux lois de Descartes relient la direction des ondes planes réfléchie $I_1(\theta'_1)$ et réfractée $I_2(\theta_2)$ à celle de l'onde incidente $I_1(\theta_1)$ pour une interface plane (figure 1-3):

$$\begin{aligned} \theta'_1 &= \theta_1 \\ k_2 \sin \theta_2 &= k_1 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (1-16)$$

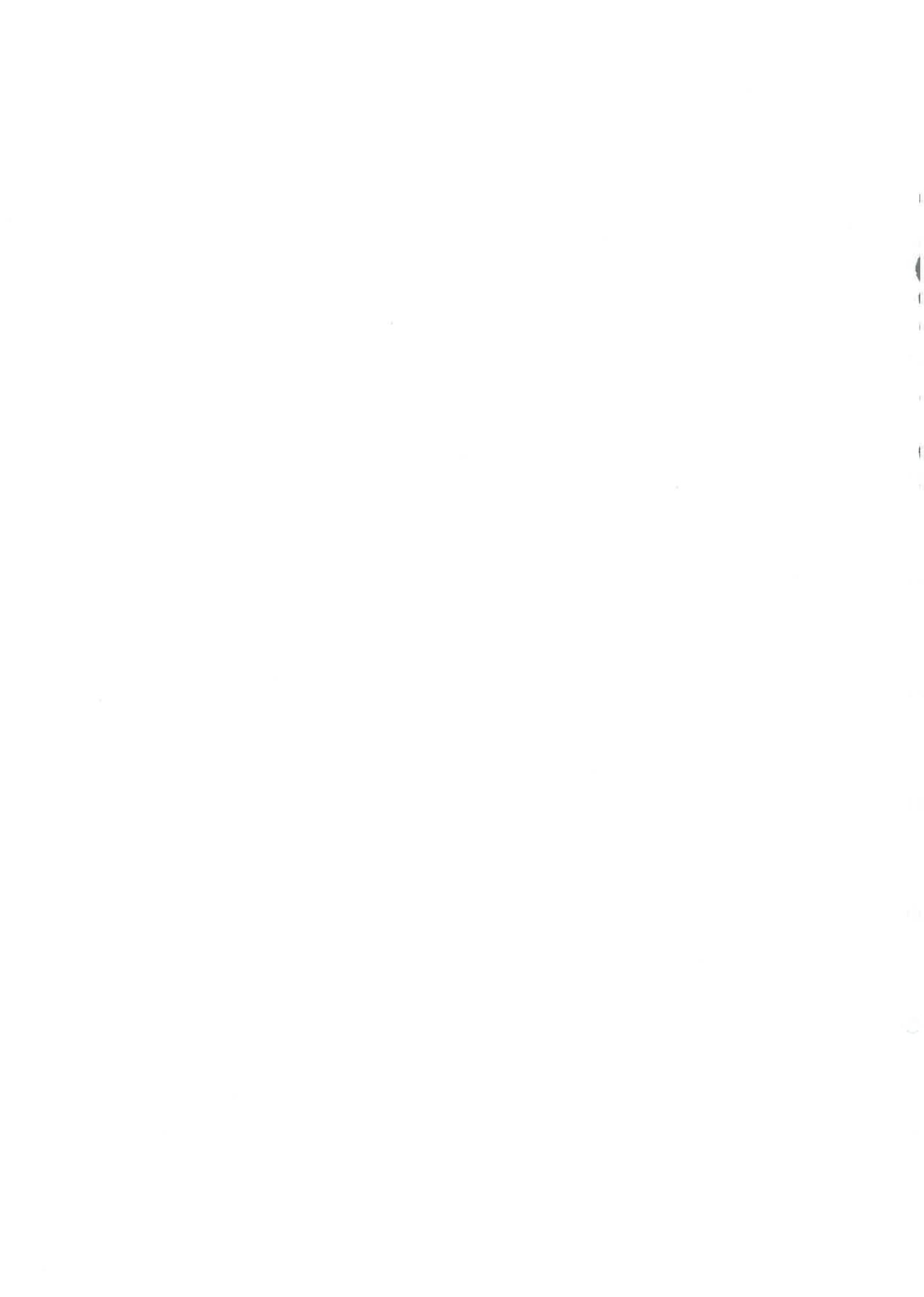
Les coefficients de Fresnel R_p et T_p sont les rapports respectifs des champs réfléchis et transmis (après réfraction) sur le champ incident; p désignant la polarisation verticale (v) ou horizontale (h):

$$\begin{cases} R_v = (n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2) / (n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2) \\ T_v = (2 \cdot n_1 \cos \theta_1) / (n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2) \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} R_h = (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2) \\ T_h = (2 \cdot n_1 \cos \theta_1) / (n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2) \end{cases} \quad (1-17)$$

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 et sont donc couramment utilisées en transfert radiatif où seule



l'intensité de l'onde est prise en compte. Γ et γ sont donc définies en fonction des puissances incidente P_i , réfléchie P_r et transmise P_t :

$$\left| \begin{array}{ll} \Gamma_{12p}(\theta_1) = P_{rp}(\theta_2)/P_{ip}(\theta_1) & \text{reflectivité} \\ \gamma_{12p}(\theta_2) = P_{tp}(\theta_2)/P_{ip}(\theta_1) & \text{transmittivité} \end{array} \right. \quad (1-18)$$

Γ et γ s'expriment aussi en fonction des coefficients de Fresnel selon:

$$\left| \begin{array}{ll} \Gamma_{12p}(\theta_1) = |R_{12p}(\theta_1)|^2 \\ \gamma_{12p}(\theta_2) = |T_{12p}(\theta_2)|^2 \end{array} \right. \quad (1-19)$$

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

$$\Gamma_{12p}(\theta_1) = 1 - \gamma_{12p}(\theta_2) \quad (1-20)$$

1.1.4 Longueur d'absorption de l'onde électromagnétique

Parallèlement aux processus de réflexion et de transmission qui apparaissent au niveau d'une interface, l'absorption intervient lors de la propagation de l'onde dans un milieu. Cette notion sous-tend les autres notions de profondeur de pénétration (hyperfréquence active) et de profondeur effective d'émission d'un milieu (hyperfréquence passive); notions qui seront largement utilisées par la suite. Le paramètre l_a (longueur d'absorption), dont la formulation découle des postulats de Maxwell, permet d'évaluer ces pertes par absorption.

Considérons une onde plane, caractérisée par son champ électrique E , se propageant dans la direction z :

$$E = E_0 \exp(i(\omega_c t - k \cdot z)) \quad (1-21)$$

$$\text{avec} \quad k = 2\pi/\lambda = 2\pi(\epsilon_r)^{1/2}/\lambda_0 \text{ et } \epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (1-22)$$

Si l'on suppose que les pertes par absorption sont relativement faibles, ϵ'' sera très petit devant ϵ' . Dans ces conditions:

$$(\epsilon_r)^{1/2} = (\epsilon')^{1/2}(1 + i\epsilon''/2\epsilon') \quad (1-23)$$

$$\text{soit} \quad E \approx E_0 \exp(i(\omega_c t - (2\pi/\lambda_0)(\epsilon')^{1/2}z)) \cdot \exp(-(\pi/\lambda_0)(\epsilon''/(\epsilon')^{1/2})z) \quad (1-24)$$

L'onde apparaît ainsi atténuée par le facteur exponentiel $\exp(-(\pi/\lambda_0)(\epsilon''/(\epsilon')^{1/2})z)$. La longueur d'absorption l_a est la distance pour laquelle le champ électromagnétique subit une atténuation de l'ordre de 63% (soit $\exp(-(\pi/\lambda_0)(\epsilon''/(\epsilon')^{1/2})l_a) = 1/e$).

$$\text{d'où} \quad l_a = \lambda_0 \cdot (\epsilon')^{1/2} / (\pi \cdot \epsilon'') \quad (1-25)$$

L'atténuation de l'onde dans le couvert sera d'autant plus intense (longueur d'absorption très faible) 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 ($\delta_p = l_a/2$).

Ces formulations sont riches d'enseignement sur un plan théorique, mais seront peu utilisées car leur domaine de validité est restreint (milieu très homogène à faible absorption et sans perte par conduction).

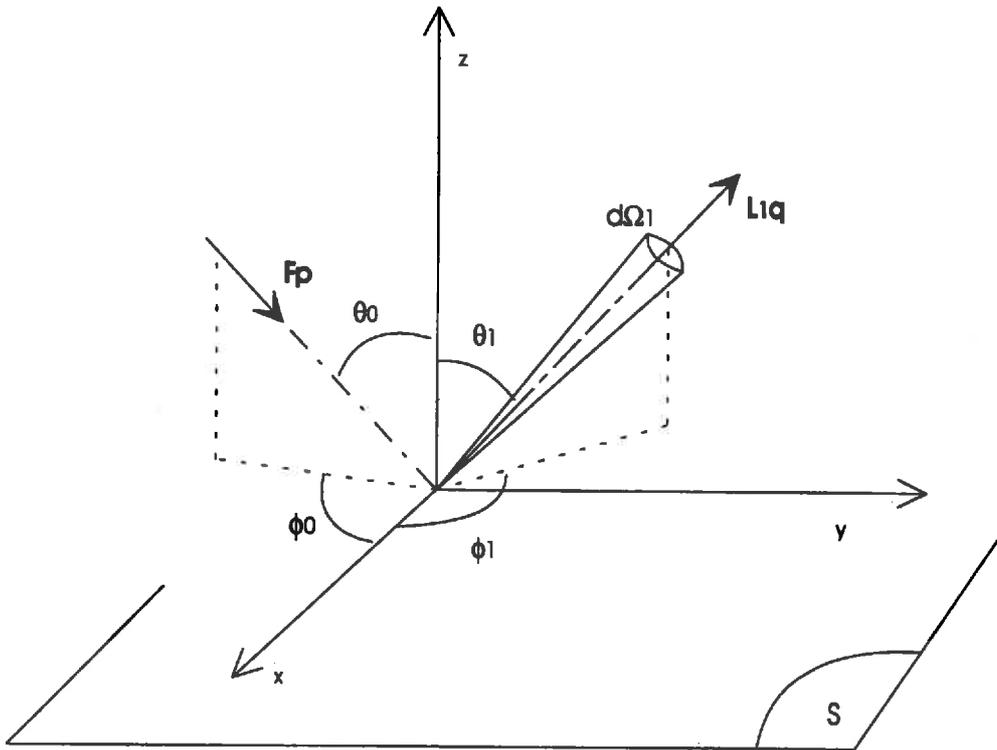


Figure 1-4: Caractérisation du coefficient bistatique: diffusion d'une radiation de densité de flux F_p par une surface (S), dans un angle solide $d\Omega_1$.

1.2 Intensité du rayonnement

Après avoir discuté la nature physique du rayonnement E.M., nous nous intéressons dans cette partie aux paramètres qui permettent d'estimer l'intensité du rayonnement à travers les notions de diffusion de l'onde par un objet et d'émission par un corps.

1.2.1 Diffusion de l'onde électromagnétique

1.2.1.1 Coefficient bistatique de diffusion

Le coefficient bistatique de diffusion joue un rôle central dans la paramétrisation de l'intensité d'un rayonnement diffusé, rétrodiffusé (hyperfréquence active) ou émis naturellement.

Pour préciser sa définition, considérons une radiation de densité de flux F_p ($W.m^{-2}$) de polarisation p , incidente sur une surface S , avec un angle d'incidence θ_0 et d'azimut ϕ_0 . Elle est diffusée avec une luminance L_{1q} ($W.m^{-2}.sr^{-1}$) de polarisation q dans un angle solide $d\Omega_1$ de direction (θ_1, ϕ_1) (figure 1-4). Dans ces conditions l'éclairement E_p ($W.m^{-2}$) reçu par la surface vaut $E_p = F_p \cdot \cos\theta_0$.

La fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) R_b et le coefficient bistatique de diffusion γ (sans unité) sont définis selon:

$$R_{bpq} = L_{1q} / E_p \quad (1-26)$$

$$\gamma_{pq}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1) = 4 \cdot \pi \cdot \cos\theta_1 \cdot L_{1q} / E_p \quad (1-27)$$

La relation (1-27) équivaut à celle donnée par Peake (1959):

$$\gamma_{pq}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1) = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot I_1 / (I_0 \cdot S \cdot \cos\theta_0) \quad (1-28)$$

où I_0 , et I_1 ($I_0 = E_p / \cos\theta_0$, $I_1 = L_{1q} \cdot d\Omega_1 = L_{1q} \cdot (S \cdot \cos\theta_1 / R^2)$) désignent les densités des flux ($W.m^{-2}$) incident et diffusé par la surface à une distance R , R et S étant supposés très grands. Similairement, la surface efficace de diffusion σ_s d'un objet est définie selon $\sigma_s = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot (I_1 / I_0)$.

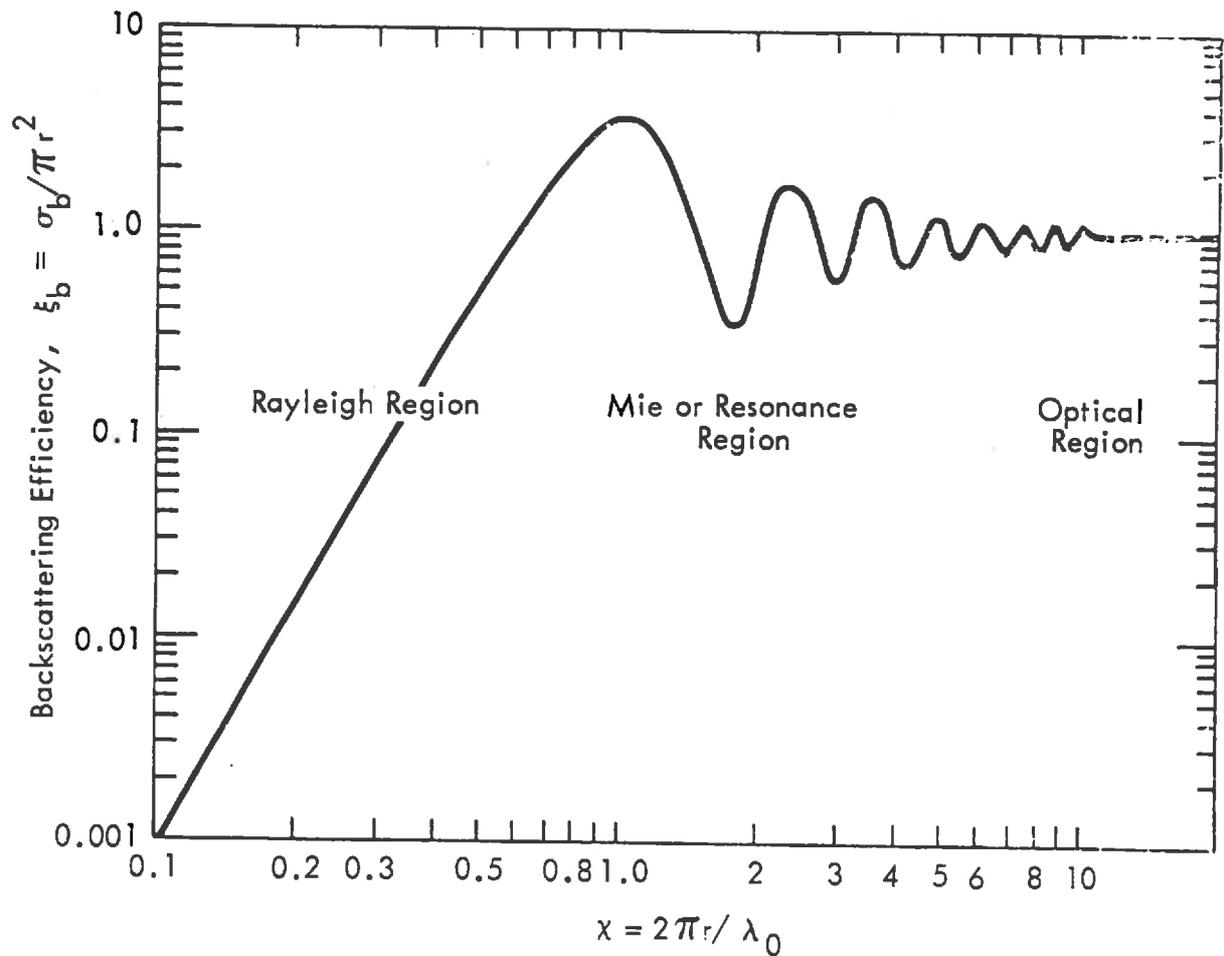
Le coefficient de rétrodiffusion radar γ_{pq}^r et la section efficace de rétrodiffusion σ_{pq}^r , utilisés dans le domaine des hyperfréquences actives, se déduisent du coefficient bistatique par les relations:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{pq}^r = \gamma_{pq}(\pi - \theta_0, \phi_0, \theta_1 = \theta_0, \phi_1 = \phi_0 + \pi) \\ \sigma_{pq}^r = \cos\theta_0 \cdot \gamma_{pq}(\pi - \theta_0, \phi_0, \theta_1 = \theta_0, \phi_1 = \phi_0 + \pi) \end{array} \right. \quad (1-29)$$

1.2.1.2 Domaines de diffusion

Il existe des formulations analytiques de la section efficace de diffusion dans le cas simple des diffuseurs sphériques (Ishimaru, 1978; Ulaby *et al.*, 1981). Le calcul de ces sections révèle trois grands domaines de diffusion délimités par le paramètre $k \cdot a$ (produit du rayon a de la particule et du nombre d'onde k): le domaine de Rayleigh, le domaine de Mie et le domaine optique (figure 1-5). Le domaine de Rayleigh est celui des particules de taille très réduite, d'un ordre de grandeur $a \leq 0.05\lambda$. La section efficace de diffusion est alors proportionnelle au carré du volume V de la particule et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde λ ($\sigma_s \propto V^2 / \lambda^4$). Dans le domaine de résonance de Mie, la particule sphérique et la longueur d'onde sont du même ordre de grandeur. Le domaine optique est celui des hautes ou très hautes fréquences ($a \gg \lambda$).

Pour un couvert végétal, les radiations hyperfréquences ont des longueurs d'onde du même ordre de grandeur que les diffuseurs végétaux (feuilles, fruits, branches). Les plus basses fréquences (à 1GHz, $\lambda = 30cm$) sont proches du domaine de diffusion de Rayleigh tandis que les hautes fréquences (à 90GHz,



Radar backscattering efficiency as a function of χ for a metal sphere of radius r (Skolnik, 1980).

Figure 1-5: Grands domaines de diffusion d'une onde électromagnétique (d'après Ulaby et al. (1981)).

$\lambda=3.33\text{mm}$) sont proches du domaine optique. Ainsi, sur la base de simulations entre 1 et 12GHz, Karam *et al.* (1992) délimitent le domaine de Rayleigh en deçà de 4GHz, le domaine de résonance entre 4 et 8GHz, au delà de 8GHz les propriétés de diffusion sont spécifiques à chacun des constituants et sont fonctions de leur taille en particulier. Par ailleurs, aucune formulation physique ne permet de couvrir l'ensemble de la gamme des fréquences: la limite supérieure pour les formulations du domaine basse fréquence (approximation de Rayleigh-Gans généralisée, Karam et Fung (1989)) est de l'ordre de 20GHz et Choudhury *et al.* (1990) utilise des formulations du domaine optique à 37GHz.

1.2.2 Emissivité

La notion d'émissivité d'un corps est introduite dans cette partie par l'intermédiaire de deux approches: en utilisant la loi de Planck pour préciser la notion de température de brillance et à travers l'approche de Peake qui relie émission et diffusion.

1.2.2.1 Loi de Planck et émissivité

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 toute les ondes incidentes sur sa surface et n'en réfléchit aucune. L'émission du corps noir dans la bande de fréquence df est paramétrisée par sa luminance spectrale L_f ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$). Elle est fonction de sa température T et de la fréquence f de l'onde émise selon la loi de Planck (figure (1-6)):

$$L_f = 2hf^3/c^2 \cdot (\exp(hf/kT) - 1)^{-1} \quad (1-30)$$

avec

h: constante de Planck ($6.63 \cdot 10^{-34}\text{J}$)

k: constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}\text{J.K}^{-1}$)

L'analyse de la figure (1-6) montre que l'émission radiative tellurique ($T=300\text{K}$) est très réduite en comparaison avec l'émission solaire ($T=6000\text{K}$). Elle est également fortement décalée vers les grandes longueurs d'ondes. La radiométrie micro-onde et infrarouge thermique (IRT) se fondent sur ces particularités. Les capteurs sont a même de mesurer des luminances spectrales de l'ordre de $10^{-18}\text{W.m}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Les radiations solaires reçues par la Terre sont contenues dans un angle solide $d\Omega$ très réduit ($d\Omega = \pi(3.6/150 \cdot 10^3)^2 \text{sr}$). Aussi, en dehors des conditions de visée directe, l'émission solaire peut être négligée dans le domaine des grandes longueurs d'ondes (micro-ondes et IRT).

La loi de Rayleigh Jeans est une approximation de la loi de Planck dans le domaine basse fréquence des micro-ondes ($hf/kT \ll 1$). Pour un corps de température de l'ordre de 300K et pour une fréquence inférieure à 117GHz cette approximation est correcte avec une erreur inférieure à 1% (Ulaby *et al.*, 1981). Cette loi énonce que l'émission micro-onde d'un corps noir (n) est proportionnelle à sa température T_n selon:

$$L_{fn} = 2kT_n/\lambda^2 = C \cdot T_n \quad (1-31)$$

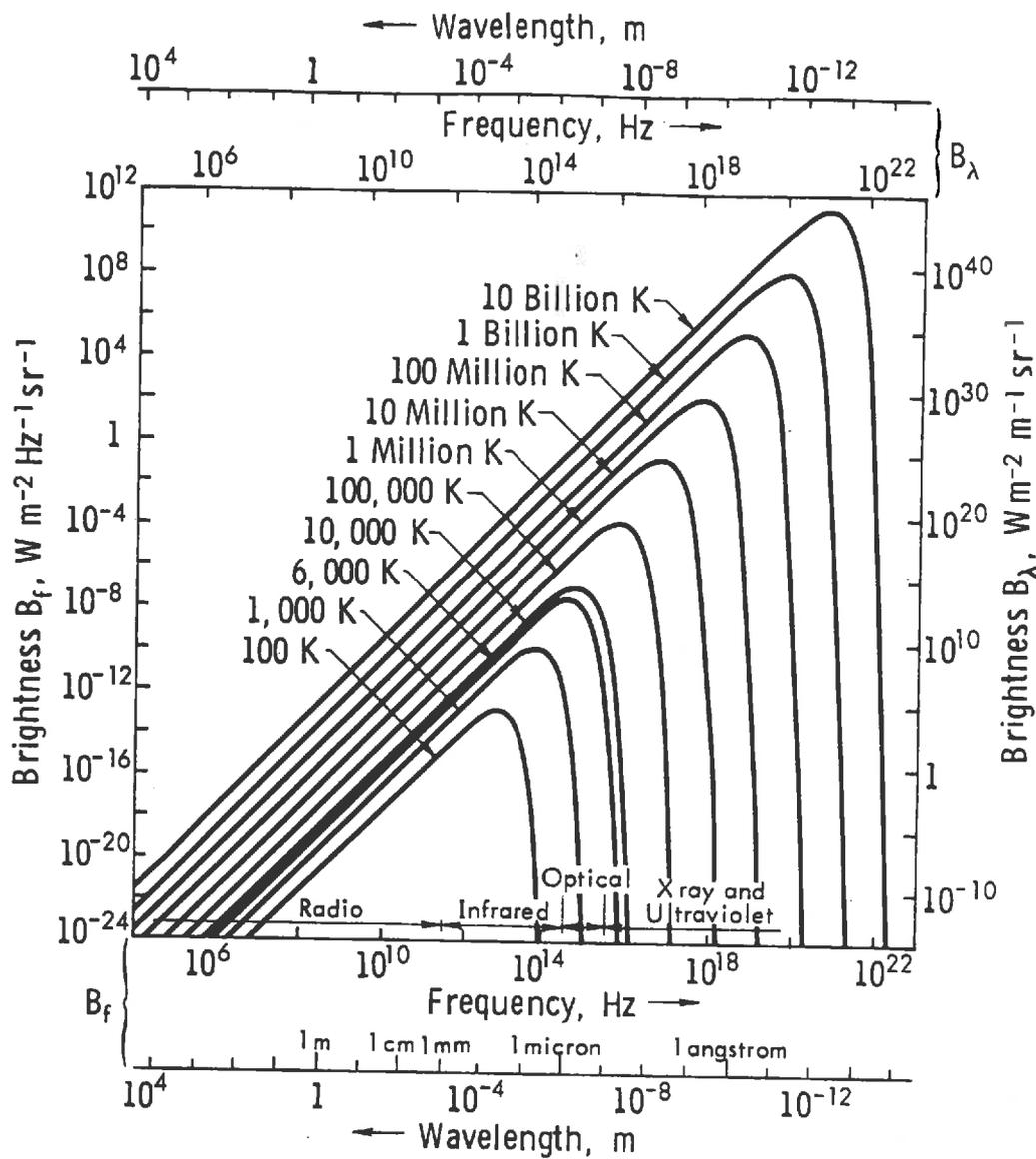
avec

$$C = 2k/\lambda^2 \quad (1-32)$$

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

$$T_B = L_f/C \quad (1-33)$$

d'où pour un corps noir:



Planck radiation-law curves (adapted from Kraus, 1966).

Figure 1-6: Emission du corps noir selon la loi de Planck (d'après Ulaby et al., 1981).

$$T_{Bn} = T_n \quad (1-34)$$

La notion de température de brillance fournit donc un ordre de grandeur de l'émission davantage concret: le niveau d'émission d'un corps quelconque peut être aisément comparé avec celui d'un corps noir de même température.

La notion d'émissivité est introduite pour généraliser la relation (1-34). Pour un corps de température T, son émissivité e est définie selon:

$$T_B = e.T \quad (1-35)$$

En particulier, l'émissivité e_n du corps noir vaudrait 1. Il suffit de transformer l'équation (1-35) en $e = T_B/T$ pour définir précisément l'émissivité du corps comme le rapport de sa température de brillance T_B par la température de brillance T_{Bn} d'un corps noir ayant même température T ($T_{Bn}=T$).

1.2.2.2 Coefficient bistatique et émissivité: relation entre les domaines micro-ondes passif et actif

Peake (1959) relie coefficient bistatique de diffusion et émissivité par une loi fondamentale, qui est encore souvent utilisée pour modéliser l'émission. Considérons l'albédo $A(\theta_0, \phi_0)$, qui est le rapport de la puissance incidente sur la puissance diffusée. Avec les notations du 2.1, $A(\theta_0, \phi_0)$ s'écrit:

$$A(\theta_0, \phi_0) = \int_{4\pi} L_1 \cos\theta_1 d\Omega_1 / E = 1/4\pi \int_{4\pi} \gamma.d\Omega_1 \quad (1-36)$$

En prenant en compte la polarisation de l'onde E.M. cette expression s'écrit (Peake, 1959):

$$A_p(\theta_0, \phi_0) = 1/4\pi \int [\gamma_{pp}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1) + \gamma_{pq}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1)] d\Omega_1 \quad (1-37)$$

Si l'on néglige la transmission de l'onde E.M. au travers de la surface, l'énergie incidente est soit absorbée, soit diffusée. Le coefficient d'absorption a_p est donc relié directement à l'albédo selon:

$$a_p(\theta_0, \phi_0) + A_p(\theta_0, \phi_0) = 1 \quad (1-38)$$

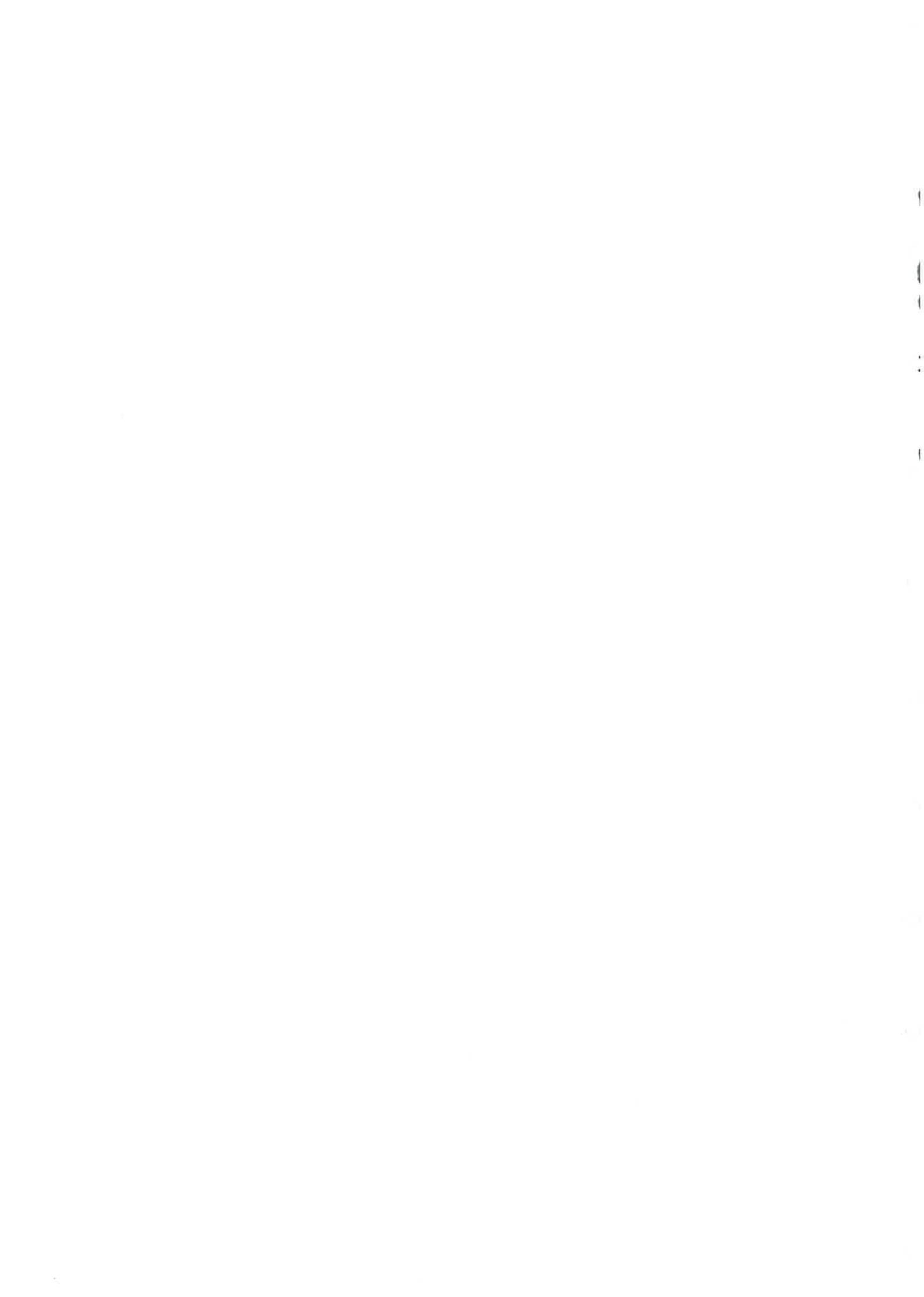
Peake généralise la loi de Kirshoff pour une onde E.M. polarisée. Il démontre tout d'abord que l'émissivité e_p peut être déduite de l'intégration des coefficients bistatiques de diffusion selon:

$$e_p(\theta_0, \phi_0) = 1 - 1/4\pi \int_{4\pi} [\gamma_{pp}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1) + \gamma_{pq}(\theta_0, \phi_0, \theta_1, \phi_1)] d\Omega_1 \quad (1-39)$$

Il déduit alors des équations (1-37), (1-38), (1-39) que l'émissivité et le coefficient d'absorption de la surface ont même valeur.

La relation (1-39) à laquelle nous nous référerons par "expression de Peake" est souvent mise en oeuvre pour relier les domaines hyperfréquences passif et actif. En effet, à partir du calcul du coefficient bistatique de diffusion il est possible de déduire directement le coefficient de rétrodiffusion (relation (1-29)) et l'émissivité par intégration (relation (1-39)). Ces relations sont utilisées dans divers travaux (Tsang *et al.*, 1982; Lee et Kong, 1985; Lang *et al.*, 1989; Ferrazzoli *et al.*, 1992), le plus souvent pour déduire très simplement l'émission à partir de modèles actifs. Les limites de cette approche viennent de ce que l'expression de Peake est développée pour l'émission d'une surface. Sa validité semble discutable pour des "surfaces composites" végétation-sol où les phénomènes de transmission sont importants. En particulier cette expression ne peut rendre compte des gradients thermiques à l'intérieur d'un milieu (sol, neige, glace, végétation), ni des contrastes thermiques entre

les différentes strates d'un couvert (entre le sol et la végétation par exemple). Par contre, cet aspect pourra être pris en compte par la résolution des équations de transfert radiatif dans des milieux multicouches. Une telle résolution, qui sépare les strates sol et végétation, est utilisée dans les approches de modélisation développées dans ce travail (Cf chapitre 4).



Chapitre 2

Modélisation de l'émission du couvert végétal: éléments bibliographiques

L'analyse des travaux menés en hyperfréquence passive au cours des vingt dernières années, permet de scinder les approches de modélisation de l'émission en deux voies complémentaires: les approches semi-empiriques fondées sur des équations simplifiées du transfert radiatif, et les approches physiques. Les premières sont plus faciles à relier à la mesure micro-onde, ce qui facilite leur utilisation. Cependant ces approches sont ajustées par l'intermédiaire de paramètres de calage. Il s'agit de paramètres synthétiques de structure et de diffusion du couvert qui varient en fonction du type de couvert végétal, ou même au cours du développement de la culture. Ces approches sont "explicatives" mais de portée peu générale. Par contre les modèles physiques intègrent une description précise du couvert pour simuler l'interaction de l'onde E.M. et du milieu. Ils permettent une analyse détaillée des différentes contributions à l'émission. Cependant, surtout développés en hyperfréquence active, peu de références font mention de validation ou de confrontation avec les données radiométriques micro-ondes.

2.1 Approches semi-empiriques de la modélisation

Au cours des années 1980, la plupart des travaux de modélisation de l'émission d'un couvert végétal se sont fondés sur des approches simplifiées du transfert radiatif (Mo *et al.*, 1982; Ulaby *et al.*, 1983b; O'Neill *et al.*, 1984; Brunfeldt et Ulaby, 1984, 1986; Pampaloni et Paloscia, 1986; Choudhury, 1989). Ces approches sont plus proches des données expérimentales et en permettent une interprétation directe bien qu'imprécise. Les termes d'épaisseur optique τ du milieu et d'albedo de simple diffusion ω , que nous définissons dans cette section, sont à la base de ces différentes analyses.

2.1.1 Transfert radiatif simplifié

2.1.1.1 Equations de transfert radiatif

Dans le cadre de la modélisation par le transfert radiatif, le milieu physique est le plus souvent représenté comme homogène, plan et infiniment étendu, pour permettre une résolution numérique ou itérative des équations ((figure 2-1)). Il est représenté par une ou plusieurs strates de végétation délimitées au sommet par une interface végétation-atmosphère et à la base par une interface sol-végétation. Considérons la radiation d'intensité I se propageant dans le couvert végétal (milieu (1)) avec un angle d'incidence θ (avec $\mu = \cos\theta$). Le sol (milieu (2)) et l'atmosphère (milieu (0)) délimitent la végétation aux cotes $z=0$ et $z=d$. Les équations de transfert radiatif représentent un bilan de l'énergie radiative (ou de nombre de photons) dans un élément de volume infinitésimal où l'on prend en compte les effets d'absorption et de diffusion. Elles s'écrivent le plus généralement (Chandrasekhar, 1960; Tsang *et al.*, 1985; Ulaby *et al.*, 1985):

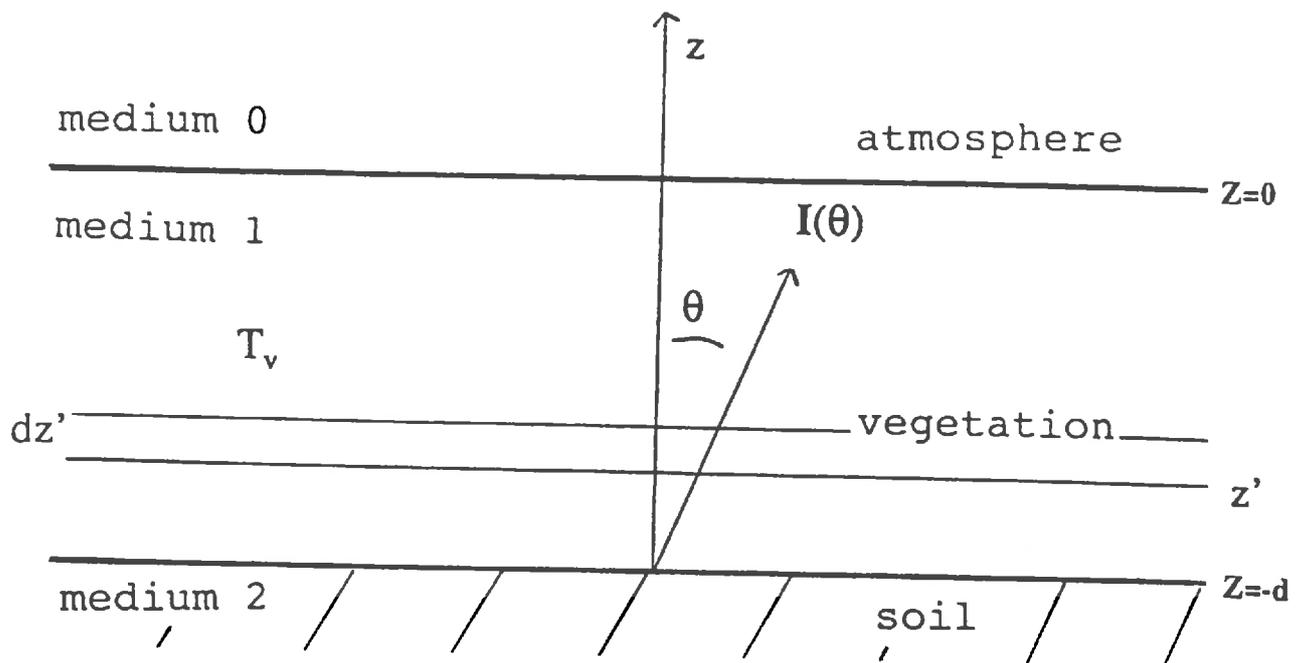


Figure 2-1: Configuration géométrique du milieu.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu \cdot dI_v(\mu, z)/dz = k_a CT(z) - k_{ev}(\mu) \cdot I_v(\mu, z) + \int_{-1}^1 ((v, v') \cdot I_v(\mu', z) + (v, h') \cdot I_h(\mu', z)) d\mu' \\ \mu \cdot dI_h(\mu, z)/dz = k_a CT(z) - k_{eh}(\mu) \cdot I_h(\mu, z) + \int_{-1}^1 ((h, v') \cdot I_v(\mu', z) + (h, h') \cdot I_h(\mu', z)) d\mu' \end{array} \right. \quad (2-40)$$

Trois termes interviennent dans ces équations de bilan radiatif de la propagation de l'onde E.M.:

* $k_a \cdot C \cdot T$ est le terme d'émission thermique propre du milieu dans lequel se propage l'onde électromagnétique, aussi appelé fonction source d'absorption.

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} T: \text{ température physique du milieu} \\ k_a: \text{ coefficient d'absorption (nepers.m}^{-2}\text{)} \\ C = 2k_0/\lambda^2 \end{array} \right.$$

Nous savons que les niveaux d'émission et d'absorption hyperfréquence d'un corps sont égaux sous des conditions d'équilibre thermodynamique. Aussi le coefficient d'absorption k_a est considéré comme équivalent à k_{em} , le coefficient d'émission intrinsèque au milieu qui est sous-entendu dans le terme $k_a \cdot C \cdot T$.

* $k_{ep} \cdot I_p$ est le terme d'extinction: l'onde incidente perd de l'énergie à travers les phénomènes d'absorption et de diffusion dans le milieu (indice $(p=v)$ pour la polarisation verticale et $(p=h)$ pour l'horizontale). Soit:

$$k_e = k_a + k_s \quad (2-42)$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} k_e \text{ coefficient d'extinction (Np.m}^{-2}\text{)} \\ k_s \text{ coefficient de diffusion (Np.m}^{-2}\text{)} \end{array} \right.$

* $\int_{-1}^1 ((p, p') \cdot I_p(\mu', z) + (p, q') \cdot I_q(\mu', z)) d\mu'$ est le terme source par diffusion. Les coefficients de couplage $(p(\mu), q'(\mu'))$, désignent la fraction de l'onde incidente de direction μ' ($\mu' = \cos\theta'$) et de polarisation q qui sera diffusée dans la direction μ ($\mu = \cos\theta$) avec une polarisation p . La matrice des termes de couplage (p, q') , avec $p, q = v, h$; est appelée matrice de phase P . Par ailleurs deux termes caractéristiques du milieu (1) sont définis simplement en fonction des paramètres que nous venons de décrire:

- l'albedo ω de simple diffusion (single scattering albedo) qui quantifie l'importance de la diffusion par rapport à l'absorption dans le milieu.

$$\omega = k_s/k_e \quad (2-43)$$

- l'épaisseur optique du milieu τ , produit du trajet vertical d'une onde dans un couvert de hauteur d et du coefficient d'extinction:

$$\tau = k_e \cdot d \quad (2-44)$$

Il n'existe pas de formulation analytique des solutions du système d'équations intégrées-différentielles (2-40) et (2-41). Les modèles physiques sélectionnent des techniques relativement précises de résolution itérative ou numérique. Par contre, le transfert radiatif, dit "simplifié" dans cette étude, consiste à négliger les termes de la matrice de phase P et conduit à une expression analytique simple de l'émission d'un couvert.

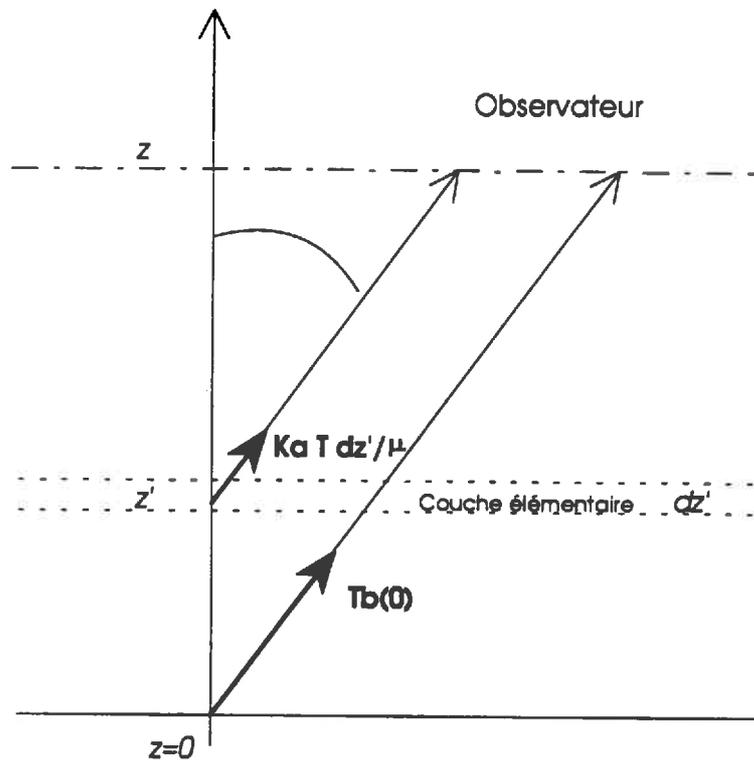


Figure 2-2: Transfert radiatif simplifié: configuration géométrique du problème de l'émission.

2.1.1.2 Modélisation simplifiée de la température de brillance

a) Equations simplifiées de transfert radiatif

Si l'on néglige les termes de la matrice de phase, les équations (2-40) et (2-41) prennent une forme identique pour les deux polarisations horizontale ($p=h$) et verticale ($p=v$). Elles s'écrivent simplement:

$$\mu \cdot dI/dz = k_a \cdot C \cdot T - k_e \cdot I \quad (2-45)$$

En terme de température de brillance T_B l'équation (2-45) se réécrit (avec $I=C \cdot T_B$):

$$\mu \cdot dT_B/dz = k_a \cdot T - k_e \cdot T_B \quad (2-46)$$

On obtient après intégration entre les cotes $z'=z$ et $z'=0$, en supposant k_a , k_e , k_s et T constants:

$$T_B(z) = T_B(0) \cdot \exp(-z \cdot k_e/\mu) + \int_0^z (k_a \cdot T \cdot dz'/\mu) \cdot \exp(-(z-z') \cdot k_e/\mu) \quad (2-47)$$

Dans cette dernière équation, $T_B(z)$ s'écrit comme somme de deux termes (figure 2-2):

* $T_B(0) \cdot \exp(-z \cdot k_e/\mu)$: la température de brillance pour $z=0$ est atténuée le long du trajet par le facteur d'extinction $\exp(-z \cdot k_e/\mu)$.

* $\int_0^z (k_a \cdot T \cdot dz'/\mu) \cdot \exp(-(z-z') \cdot k_e/\mu)$: chaque couche du milieu d'épaisseur dz' émet une radiation thermique $(k_a \cdot T \cdot dz'/\mu)$ atténuée par le facteur d'extinction $\exp(-(z-z') \cdot k_e/\mu)$, où $(z-z')/\mu$ est égal au trajet de l'onde entre la couche d'épaisseur dz' et l'observateur situé à la hauteur z .

L'équation (2-47) s'écrit après intégration:

$$T_B(z) = T_B(0) \cdot \exp(-z \cdot k_e/\mu) + k_a/k_e (1 - \exp(-z \cdot k_e/\mu)) \cdot T \quad (2-48)$$

$$\text{soit } T_B(z) = T_B(0) \cdot \gamma + (1-\omega)(1-\gamma) \cdot T \quad (2-49)$$

Cette dernière équation est la base du transfert radiatif "simplifié" avec:

$$1-\omega = k_a/k_e \quad (2-50)$$

$$\gamma = \exp(-z \cdot k_e/\mu), \text{ facteur d'atténuation par la végétation} \quad (2-51)$$

b) Modélisation de la température de brillance T_B

A partir de l'approche simplifiée de l'équation de transfert radiatif 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 de l'émission naturelle atmosphérique et cosmique est négligée. Trois émissions contribuent alors à l'émission globale du couvert (figure 2-3):

T_{B1} : Emission directe de la végétation

T_{B2} : Emission de la végétation réfléchiée par le sol et atténuée par le couvert végétal

T_{B3} : Emission du sol, atténuée par la végétation

Nous désignerons par Γ_v et Γ_s les réflectivités respectives entre l'air et le couvert, et entre le couvert et le sol. En première approximation, l'indice de réfraction moyen de la strate de végétation est peu

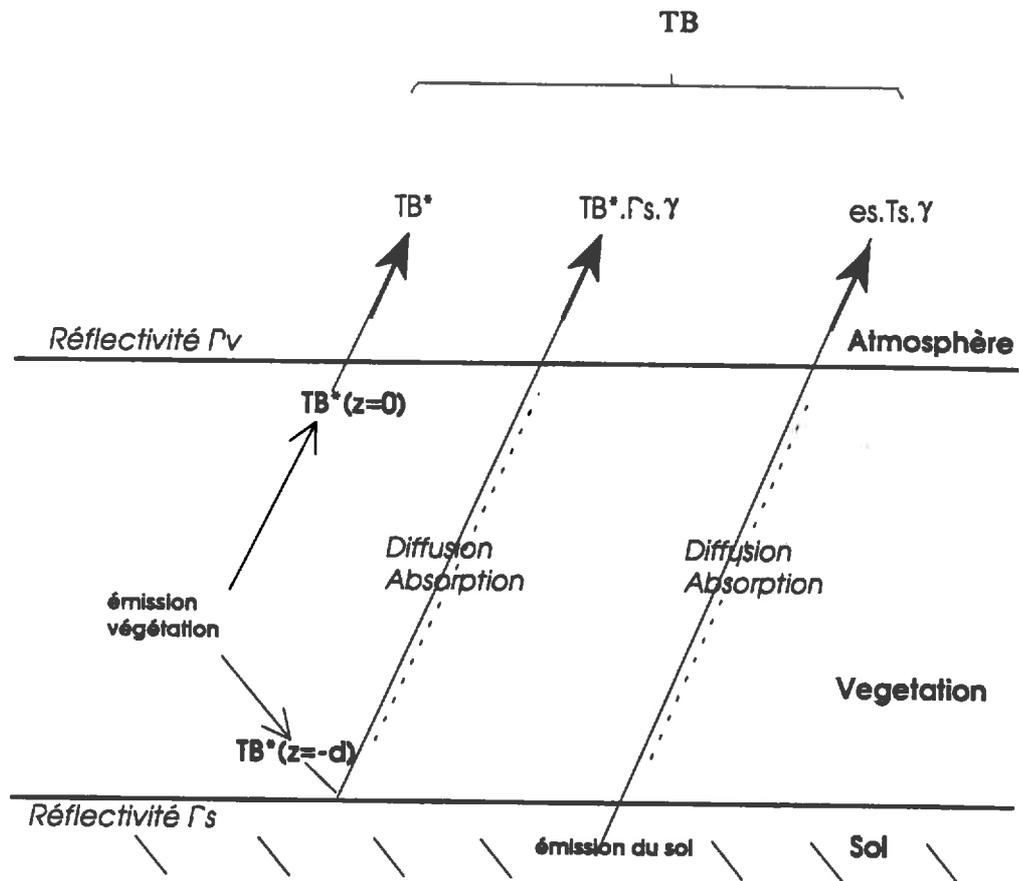


Figure 2-3: Principales contributions à l'émission globale T_B du couvert.

différent de celui de l'air, aussi la réflectivité Γ_v est négligeable. Notons que lorsque la transmission dans la végétation est très faible (pour des fréquences élevées), l'émissivité e_v de cette strate est très proche de l'unité:

$$\Gamma_v \approx 0 \quad \text{soit} \quad e_v \approx (1 - \Gamma_v) \approx 1 \quad (2-52)$$

Nous désignerons par T_B^* le niveau de température de brillance provenant de l'émission naturelle de la végétation et mesuré à la cote $z = d^-$ ou à la cote $z = 0^+$; en effet cette émission étant isotropique nous avons:

$$T_B^* = T_B(z = d^-) = T_B(z = 0^+) \quad (2-53)$$

L'équation simplifiée du transfert radiatif (2-49) permet d'estimer T_B^* en fonction de l'albedo de simple diffusion ω , et du facteur d'atténuation γ :

$$T_B^* = (1 - \omega)(1 - \gamma) \cdot T_v \quad (2-54)$$

Et après transmission à l'interface végétation – atmosphère:

$$T_{B1} = (1 - \Gamma_v) \cdot T_B^* \approx (1 - \Gamma_v)(1 - \omega)(1 - \gamma) \cdot T_v \quad (2-55)$$

On déduit similairement les expressions de T_{B2} et T_{B3} :

$$T_{B2} = T_B^* \cdot \Gamma_s \cdot \gamma \quad (2-56)$$

$$T_{B3} = e_s \cdot T_s \cdot \gamma = (1 - \Gamma_s) \cdot T_s \cdot \gamma \quad (2-57)$$

où e_s désigne l'émissivité du sol ($e_s \approx (1 - \Gamma_s)$).

Aussi en terme de température de brillance, l'émission naturelle du milieu végétation-sol s'écrit dans le cadre du transfert radiatif "simplifié" (2-49):

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} \quad (2-58)$$

$$\text{soit} \quad T_B = T_B^* \cdot (1 + \Gamma_s \cdot \gamma) + (1 - \Gamma_s) \cdot \gamma \cdot T_s \quad (2-59)$$

Et en reportant l'équation (2-54) on obtient l'équation simplifiée de l'émission d'un couvert, p désignant la polarisation verticale ($p=v$) ou horizontale ($p=h$):

$$T_{Bp} = (1 - \omega)(1 - \gamma)(1 + \Gamma_{sp} \cdot \gamma) \cdot T_v + (1 - \Gamma_{sp}) \cdot \gamma \cdot T_s \quad (2-60)$$

2.1.1.3 Approximation Delta-Eddington et discussion

L'équation de base (2-60) est très souvent utilisée pour interpréter des mesures radiométriques micro-ondes sur couverts végétaux. Or, le fait de négliger le terme source par diffusion est une hypothèse très forte. L'erreur occasionnée, négligeable à très basse fréquence, devient très significative si la fréquence dépasse quelques GHz. Cependant si l'on suppose que le terme de phase s'écrit comme somme d'une fonction de dirac δ dans la direction d'incidence et d'un terme isotropique, la formulation générale du transfert radiatif (2-40) et (2-41) prend la forme de l'équation simplifiée (2-60), en appliquant l'approximation Delta-Eddington (Joseph *et al.*, 1976). Ceci, à condition de remplacer les coefficients, épaisseur optique τ ($\gamma = \exp(-\tau/\mu)$) et albedo de simple diffusion ω par respectivement τ^* et ω^* , avec:

$$\tau^* = (1 - \alpha) \cdot \tau \quad (2-61)$$

$$\omega^* = (1 - \alpha) \omega / (1 - \alpha \cdot \omega) \quad (2-62)$$



où α représente la fraction d'intensité diffusée dans la direction d'incidence.

Aussi dans le cas où le couvert présenterait une diffusion-avant forte (dans la direction de l'onde incidente) l'équation simplifiée (2-60) permettrait de prendre en compte le terme source par diffusion dans une approximation à l'ordre 0 (Mo *et al.*, 1982; Pampaloni et Paloscia, 1986; Calvet et Kerr, 1991). Cependant aucune étude approfondie ne permet d'évaluer la validité de l'hypothèse de diffusion-avant intense. Par ailleurs τ^* , ω^* ou α sont des paramètres ajustés à partir de mesures radiométriques, ce qui rend difficile la validation des simulations. Notons aussi que Choudhury (1989) et Kerr et Njoku (1990) introduisent dans ces équations, un terme de fraction de couverture du sol par la végétation pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des surfaces naturelles.

2.1.2 Approches expérimentales de la modélisation

De nombreux travaux s'appuient sur la formulation simplifiée (2-60) de l'émission pour estimer, à partir de mesures expérimentales, les valeurs de τ et ω . L'objectif étant de modéliser l'influence des caractéristiques du couvert sur la température de brillance. Les résultats pouvaient avoir des implications sur l'estimation, soit de l'humidité des sols observés au travers de couverts végétaux (Jackson *et al.*, 1982), soit sur l'estimation directe de paramètres de la végétation, sa teneur en eau en particulier (Pampaloni et Paloscia, 1986; Mätzler, 1990).

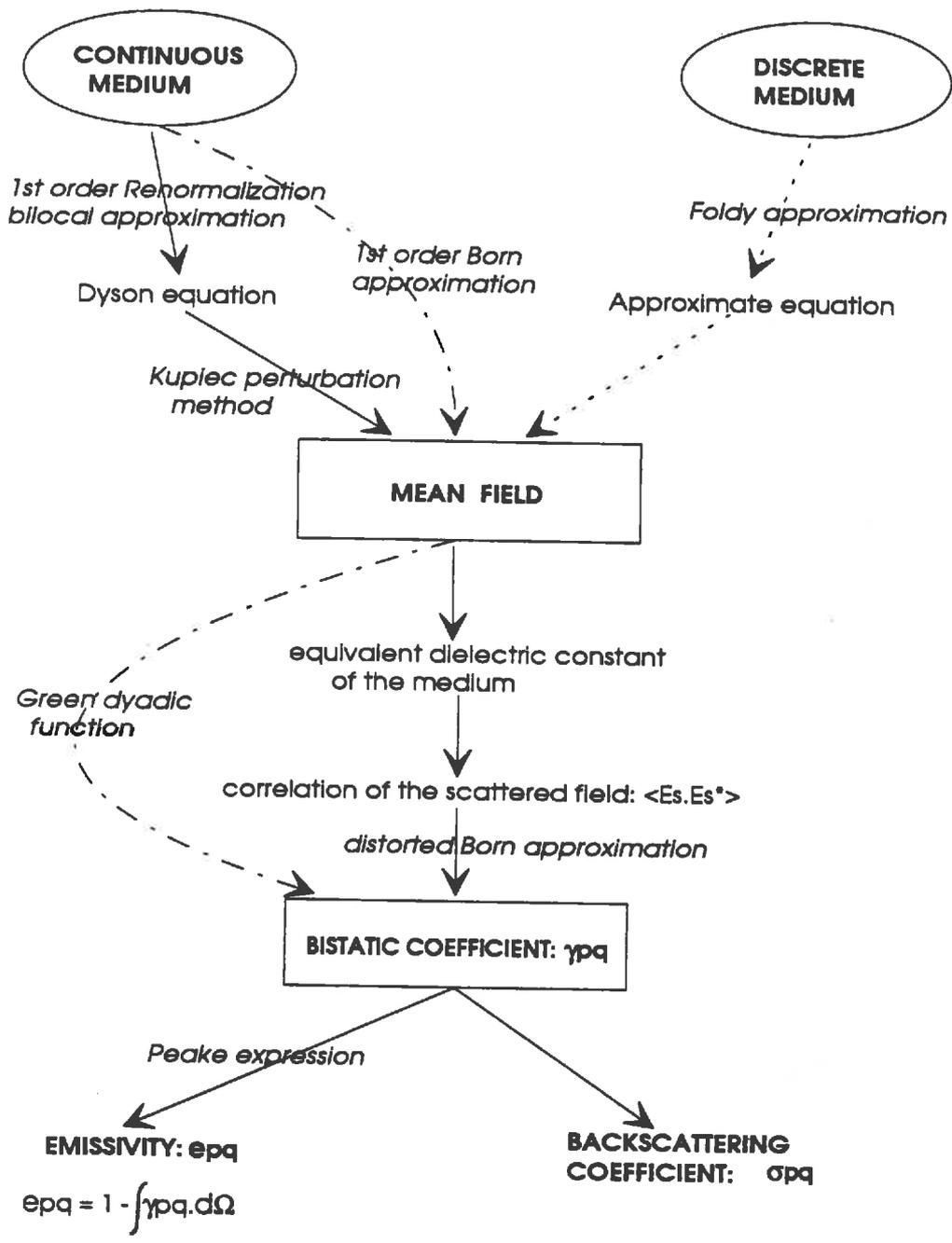
L'épaisseur optique τ du couvert est reliée par Kirdiashev *et al.* (1979) puis Jackson *et al.* (1982) au contenu en eau du couvert végétal W selon:

$$\tau = t.A.W.\varepsilon''/f/\cos\theta \quad (2-63)$$

où A désigne un coefficient lié à la géométrie du couvert, t est un facteur de proportionnalité, W est le contenu en eau intégré sur toute la hauteur de la végétation (kg.m^{-2}), ε'' est la partie imaginaire de la constante diélectrique de l'eau saline contenue dans le végétal, f désigne la fréquence de mesure du radiomètre. Par la suite, de nombreux travaux portent sur la nature de la relation entre τ et W sur des couverts agricoles: linéaire (Mo *et al.*, 1982), logarithmique (Pampaloni et Paloscia, 1986), ou de la relation entre τ et la structure du couvert (Ulaby *et al.*, 1983b; Ulaby et Wilson, 1985; Ulaby *et al.*, 1987). L'ensemble de ces études montre la forte variabilité des paramètres τ et α en fonction des caractéristiques structurelles et diélectriques du couvert et de la configuration du radiomètre (angle d'incidence, polarisation et fréquence). L'intérêt d'une modélisation physique fine de l'interaction onde E.M.-couvert est de relier directement des paramètres mesurables à l'émission hyperfréquence du couvert. Une telle approche est indispensable pour analyser et mieux comprendre les mécanismes de l'émission.

2.2 Approches physiques de la modélisation de l'émission d'un couvert

Un modèle physique d'émission micro-onde d'un couvert végétal rend compte des différents processus d'interaction de l'onde E.M. avec le milieu physique. Ceci concerne essentiellement les processus de diffusion et d'absorption (ou d'émission) par les feuilles, branches, fruits, etc. à l'intérieur du couvert, ainsi que les processus d'interface entre les différentes strates du milieu: sol, strates de végétation, atmosphère. Dans cette étude, seule la diffusion de volume dans la strate de végétation sera prise en compte. L'aspect de diffusion de surface à l'interface sol-végétation sera abordée dans le chapitre suivant. La modélisation de l'émission résulte d'une combinaison de différentes variantes dans le choix de l'approche (cohérente ou incohérente) de description de la diffusion de volume, du type de milieu (discret ou continu), du mode de résolution des équations (itératif, numérique...). Ces différents aspects sont abordés dans cette section. Plus récemment de nouvelles approches prenant mieux en compte la



- - - - - Zuniga and Kong (1980), Lee and Kong (1985)
 Lang et al (1981, 1983)
 ——— Strogryn (1974), Fung and Fung (1977), Fung and Ulaby (1978)
 Tsang and Kong (1981), Jin et Kong (1984)

Figure 2-4: Approche cohérente de la diffusion de volume.

variabilité dans l'architecture du couvert sont développées dans les différents domaines de longueur d'ondes. Citons entre autres, les modèles optiques-géométriques (Li et Strahler, 1986), la *radiosity method* (Borel *et al.*, 1991), les modèles de Monte Carlo (Ross et Marshak, 1987) dans le domaine du visible et proche-infrarouge; le *branching model* (Yueh *et al.*, 1992), et la méthode de Monte Carlo (Chuah et Tan, 1990) dans le domaine de la rétrodiffusion radar. L'essor de ces approches est lié à l'efficacité du traitement algorithmique des données par l'informatique. Leur principe théorique est également applicable dans le domaine micro-onde passif. Aussi une analyse de l'ensemble de ces différentes approches est faite dans le paragraphe 3 de cette section.

2.2.1 Diffusion de volume: approche cohérente et incohérente

La modélisation du signal hyperfréquence dans un milieu (végétation, neige, glace...) prend en compte la diffusion de volume, qui décrit l'interaction de l'onde électromagnétique avec les objets diffusants (feuilles, tiges, cristaux de glace..) aléatoirement répartis dans l'épaisseur de la strate. Deux types d'approches sont utilisées:

–l'approche cohérente (Wave approach) qui prend en compte à la fois l'amplitude et la phase de l'onde E.M. qui interagit avec le milieu dans lequel elle se propage. La variable qui intervient dans les équations est généralement l'amplitude complexe $\langle E \rangle$ du champ E.M. ($\langle \rangle$ désignant un moyennage temporel).

–l'approche incohérente qui s'appuie uniquement sur l'amplitude de l'onde. La variable dans les équations est l'éclairement (*irradiance*) $I = \langle |E|^2 \rangle$. La justification de cette approche se fonde sur le fait que le milieu comprend un grand nombre de diffuseurs, de dimensions comparables à la longueur d'onde. Ces diffuseurs distribués au hasard, produisent des écarts de phase aléatoires sur les différentes composantes de l'onde E.M.. "La propagation devient un processus incohérent décrit uniquement par la densité de puissance de l'onde (l'irradiance)" (Ulaby, 1981 p238).

En résumé (Laug, 1980), le milieu de propagation est linéaire vis à vis:

- des amplitudes complexes $\langle E \rangle$ en approche cohérente
- des éclaircements $\langle |E|^2 \rangle$ en approche incohérente

2.2.1.1 Approche cohérente de la diffusion de volume

La figure (2-4) présente le principe général de l'approche cohérente. Que ce soit pour un milieu discret (*discrete medium*) ou continu (*continuous medium*), le coefficient bistatique γ_{pq} est calculé après estimation du champ moyen se propageant dans le milieu. L'émission est déduite des coefficients γ_{pq} par l'approche de Peake.

a) champ moyen dans le milieu

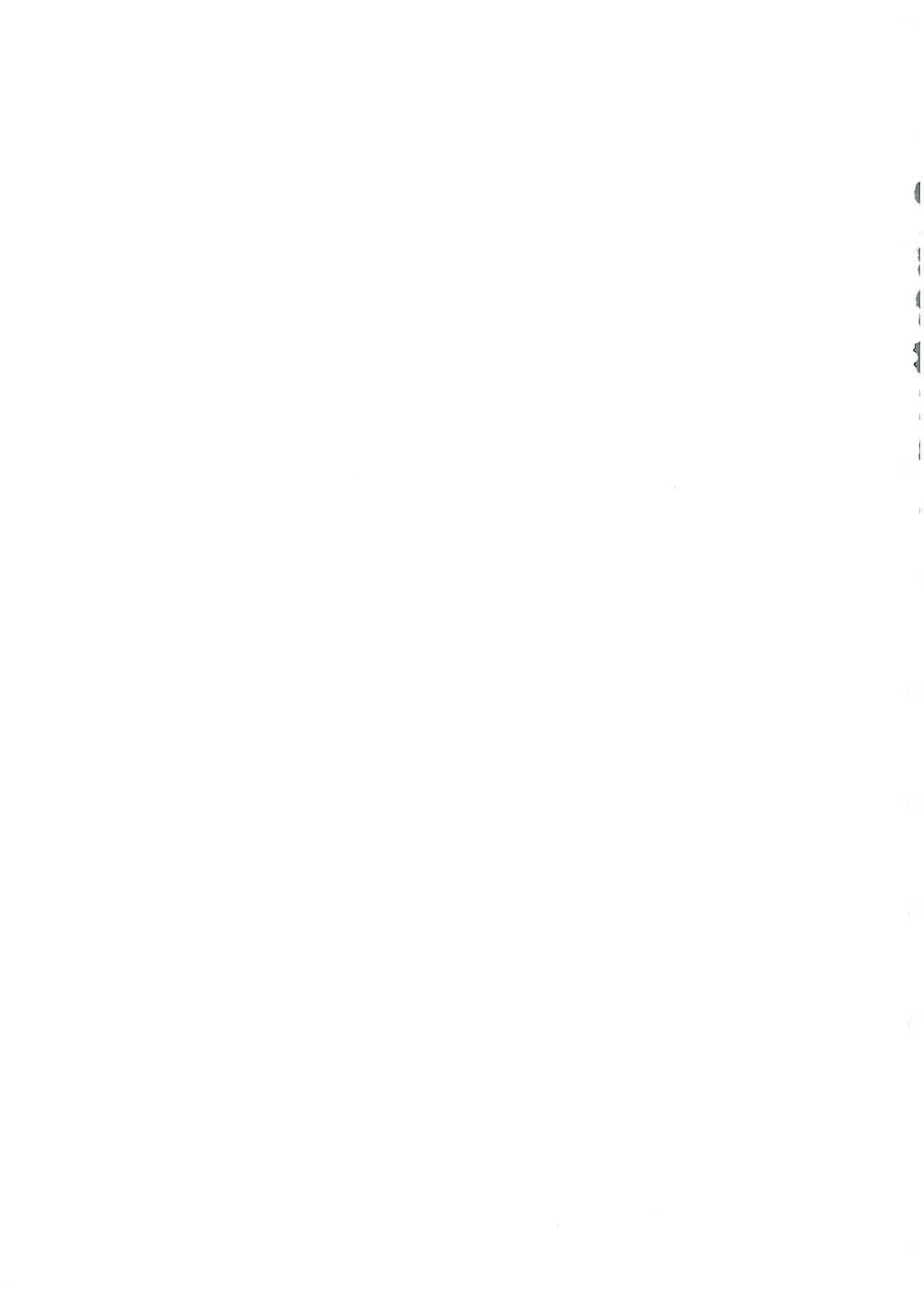
Pour introduire la notion de champ moyen, considérons une onde plane se propageant dans un milieu (0), polarisée horizontalement et caractérisée par l'expression de son champ électrique E:

$$E = h \cdot \exp(-ik_0 \sin \theta + ik_0 \cos \theta) \quad (2-64)$$

Elle est incidente sur un milieu (1) inhomogène de permittivité ϵ , avec:

$$\epsilon = \epsilon_a + \epsilon_f \quad (2-65)$$

et $\langle \epsilon \rangle = \epsilon_a$ permittivité moyenne du milieu
 ϵ_f partie spatialement fluctuante de ϵ ($\langle \epsilon_f \rangle = 0$)



k_0 nombre d'onde dans le vide
 k_a nombre d'onde dans le milieu (1)

Le champ électrique satisfait l'équation d'onde dans le milieu (1), soit:

$$\nabla \times \nabla \times E - k_a^2 E = k_0^2 \epsilon_f E = k_a^2 (\epsilon_f / \epsilon_a) E \quad (2-66)$$

La résolution de l'équation d'onde passe par l'estimation d'un terme équivalent à une source de courant ($k_a^2 (\epsilon_f / \epsilon_a) E$) et donc, du champ moyen électrique E se propageant dans le milieu (1).

b) Approximation de Born et méthode de renormalisation

Deux approximations sont fréquemment mises en oeuvre pour estimer le champ moyen E : l'approximation de Born et la méthode de renormalisation du premier ordre.

L'approximation au premier ordre de Born consiste à faire l'hypothèse que ce champ moyen est le champ transmis dans un milieu moyen, c'est à dire caractérisé simplement par sa permittivité diélectrique constante ϵ_a .

soit

$$\begin{cases} E = E_t \\ \nabla \times \nabla \times E_t - k_a^2 E_t = 0 \end{cases} \quad (2-67)$$

Le champ diffusé E_s satisfait alors l'équation déduite de (2-66):

$$\nabla \times \nabla \times E_s - k_a^2 E_s = k_0^2 \epsilon_f E_t \quad (2-68)$$

La résolution de cette équation (Ishimaru (1978, p15), Ulaby *et al.* (1981, p1067) fait intervenir la fonction dyadique de Green G selon:

$$E_s = -k_a^2 \int_V \epsilon_f(r') \cdot G(r, r') \cdot E_t(r') \cdot dV(r') \quad (2-69)$$

avec

$$G = (I + \nabla \nabla / k_a^2) \cdot g \quad (2-70)$$

où $G(r, r')$, fonction dyadique de Green s'exprime en fonction de g , fonction scalaire de Green et solution de l'équation d'onde scalaire:

$$(\nabla^2 + k_a^2)g = \delta(r - r') \quad (2-71)$$

où $\delta(r - r')$ est la fonction delta de Dirac. Soit:

$$g = -\exp(-ik_a |r - r'|) / (4\pi |r - r'|) \quad (2-72)$$

Zuniga et Kong (1980), Lee et Kong (1985) mettent en oeuvre cette approche et en dérivent à partir du calcul de la fonction dyadique de Green, les coefficients bistatiques de diffusion.

Quant à la méthode de renormalisation du premier ordre, elle fait l'hypothèse que le champ moyen se propage dans un milieu équivalent ou effectif, et satisfait à l'équation de Dyson. Cette équation estime les pertes de propagation liées à la fois à la diffusion et à l'absorption, alors que l'approximation de Born prend en compte uniquement les phénomènes d'absorption (par l'intermédiaire du nombre d'onde k_a de l'équation (2-68)). Cette approche est également fréquemment mise en oeuvre (Fung et Fung, 1977; Tsang et Kong, 1981; Y.Q.Jin, 1984) pour des milieux continus. Dans une approche de type milieu discret, l'approximation de Foldy permet d'écrire l'équation du champ moyen (Lang, 1981).

c) Calcul de l'émission

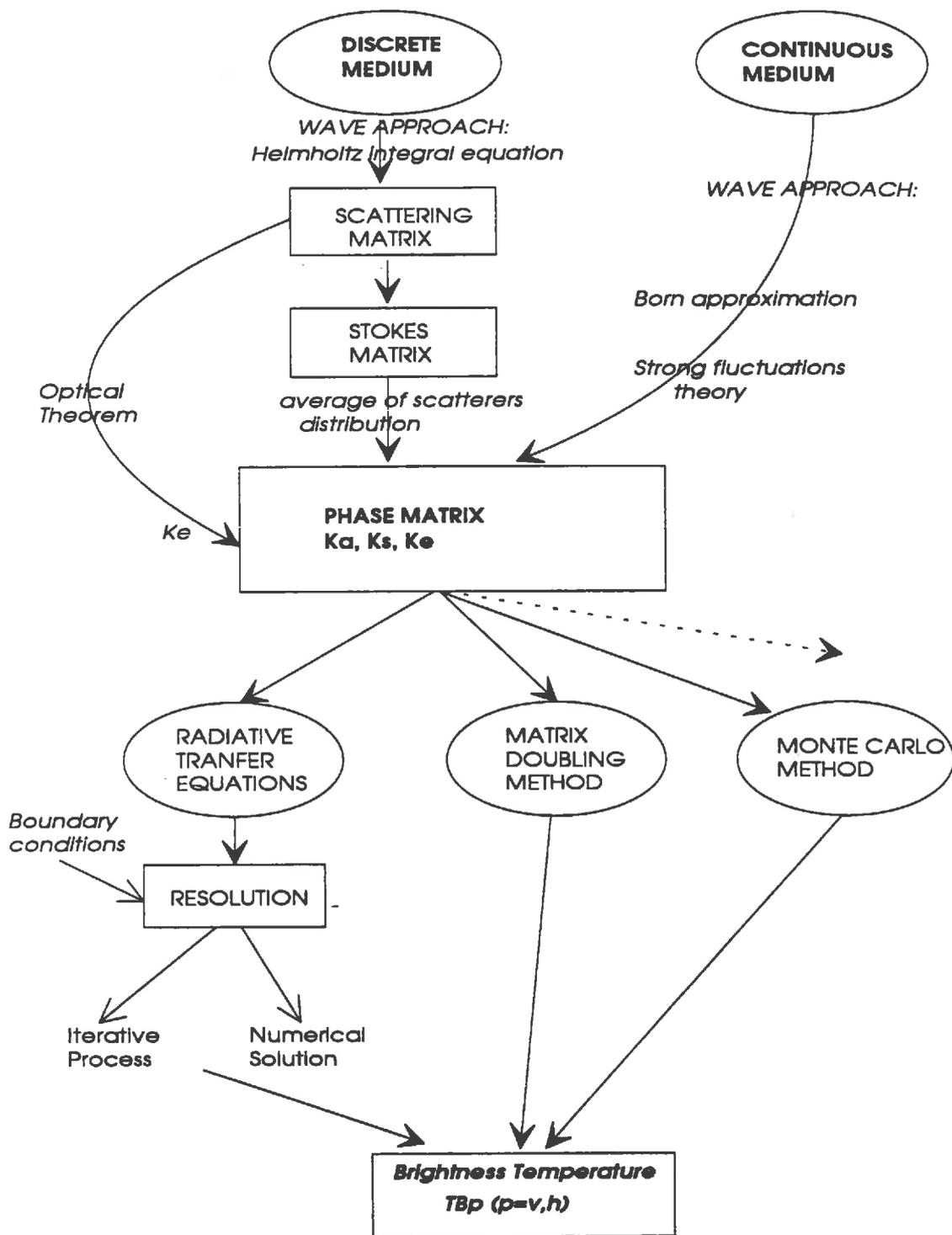


Figure 2-5: Approche incohérente de la diffusion de volume.

A la suite du calcul du champ moyen, la démarche de ces différentes approches (Born, renormalisation, Foldy...) est sensiblement commune. Les coefficients bistatiques de diffusion sont déduits de la fonction d'autocorrélation du champ diffusé à partir de la distorted Born approximation (Ulaby *et al.*, 1981). L'émission micro-onde du milieu se calcule à partir des coefficients bistatiques par l'approche de Peake.

Sur un plan théorique l'approche cohérente permet de mieux prendre en compte le phénomène de diffraction. Par contre, les approximations de Born et de renormalisation supposent de faibles fluctuations diélectriques dans le milieu. Cette hypothèse est non vérifiée dans la plupart des cas (végétation, neige, glace...). De plus, lors du calcul de l'émission, l'expression de Peake rend très difficile la prise en compte de milieux stratifiés où chaque couche est caractérisée par des caractéristiques de températures et de diffusion qui lui sont propres. L'approche de Lang à travers l'approximation de Foldy est valable uniquement pour une distribution de diffuseurs discrets de faible densité, elle est complexe et néglige tout terme de corrélation entre la position des différents diffuseurs (Tsang et Kubacsi, 1981).

Il ressort de la littérature que cette approche qui aboutit à l'estimation des coefficients bistatiques, est pertinente pour relier et comparer des mesures hyperfréquences dans les deux domaines, passif et actif. Ainsi Lang *et al.* (1989), décrivent l'émissivité d'un champ de soja à partir de ses propres travaux dans l'actif. De même Lee et Kong (1985) reprennent les résultats de Zuniga et Kong (1980) dans l'actif pour les étendre au domaine passif dans le cas d'une dépendance azimuthale du tenseur de permittivité.

2.2.1.2 Approche incohérente de la diffusion de volume

A la base de l'approche incohérente, résumée dans la figure (2-5), subsiste l'approche d'onde qui intervient dans le calcul de la matrice de diffusion (scattering matrix), que ce soit pour un milieu continu ou un milieu discret. La matrice de phase P qui se déduit de la matrice de diffusion, peut être considérée comme le point de transition entre l'approche cohérente (qui prend en compte les interactions de phases de l'onde) et l'approche incohérente (qui permet de calculer les termes de diffusion multiple). Les composantes de P estiment la fraction d'intensité provenant d'une direction (θ', ϕ') qui sera diffusée dans la direction (θ, ϕ) par un élément diffusant. Cet élément est un objet discret (feuille, branche, particule de glace..) dans l'approche discrète, un élément volumique caractérisé diélectriquement, dans l'approche continue. A partir de cette matrice de phase et des coefficients d'absorption et de diffusion du milieu, différentes méthodes de résolution des échanges radiatifs sont possibles: par résolution des équations du transfert radiatif, par la technique de Monte Carlo, par la méthode du matrix doubling, etc.

a) Calcul de la matrice de phase

Pour un "milieu continu", où l'on pose *a priori* la valeur de la fonction d'autocorrélation de la permittivité, la matrice de phase est calculée dans le cadre de l'approximation de Born (Tsang et Kong, 1976). Pour un "milieu discret", la matrice de phase de chaque type de diffuseur discret (feuille, branche, tronc etc. pour un couvert végétal) est prise en compte. Cette matrice se déduit du calcul successif de la matrice de diffusion et de la matrice de Stokes de l'élément diffusant (Tsang et Kong, 1985 p131). Nous décrivons ici ces différentes étapes.

a1) Matrice de diffusion d'un diffuseur discret

Considérons une onde plane incidente sur un objet. La matrice de diffusion S relie les composantes du champ $E_s(E_{vs}, E_{hs})$ de l'onde sphérique diffusée, aux composantes du champ incident $E_i(E_{vi}, E_{hi})$ selon

$$E_s = (\exp(ik_0 r)/r).S.E_i \quad (2-73)$$

avec
$$S = \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix}$$
 matrice de diffusion (scattering matrix)

où r désigne la distance entre l'objet diffusant et le point d'observation du champ diffusé. Cette formulation dénote le caractère implicitement sphérique de l'onde diffusée, à travers le terme de phase, $\exp(-ik.r)/r$.

Pour certains diffuseurs particuliers: ellipsoïdes, cylindres.. il est possible d'estimer analytiquement S . Le calcul se fait en deux étapes:

-L'estimation du champ interne au diffuseur E_{in} , se fait à partir de l'approximation, de Rayleigh pour un diffuseur de dimensions très réduites par rapport à la longueur d'onde λ (Chandrasekhar, 1960), de Rayleigh-Gans (Tsang *et al.*, 1981; Karam et Fung, 1983) ou de Rayleigh-Gans-généralisé pour un diffuseur possédant au moins une longueur caractéristique D très réduite par rapport à λ (Karam et Fung, 1989, 1992):

$$E_{in}(r') = a^* \cdot E_i \quad (2-74)$$

avec E_i : champ incident sur le diffuseur

a^* : tenseur de polarisabilité du diffuseur

a^* s'exprime en fonction des facteurs de démagnétisation g_t et g_n caractéristiques du diffuseur discret considéré (disque mince, ellipsoïde..).

-L'équation intégrale d'Helmoltz relie le champ diffusé "lointain" au champ interne au diffuseur (Karam et Fung, 1989):

$$E_s = (\exp(-ik_0 r)/r) (k_0^2/4\pi) (I - s \wedge s) \cdot \int \int \int_V (\epsilon_r - 1) \cdot E_{in}(r') \cdot \exp(ik_0 r') dr' \quad (2-75)$$

L'intégration se fait sur le volume V du diffuseur, ϵ_r désigne sa constante diélectrique relative, I désigne la matrice unité et $s \wedge s$ désigne le carré du vecteur direction de la diffusion s en terme de produit tensoriel. La substitution de l'équation (2-74) dans (2-75) fournit l'expression de la matrice de diffusion d'amplitude S (équation (2-73)).

a2) Matrice de Stokes et matrice de phase d'un diffuseur discret

La matrice de Stokes M relie les paramètres de Stokes $I_s(I_{vs}, I_{hs}, U_s, V_s)$ de l'onde diffusée à ceux $I_i(I_{vi}, I_{hi}, U_i, V_i)$ de l'onde incidente selon:

$$I_s = (1/r^2) \cdot M \cdot I_i \quad (2-76)$$

On rappelle que les paramètres de Stokes modifiés I_{vn} , I_{hn} , U_n , et V_n , ($n=i$ ou $n=s$) permettent une caractérisation exhaustive de l'état d'une onde elliptiquement polarisée, η désignant l'impédance intrinsèque du milieu:

$$\begin{cases} I_{vn} d\Omega = \langle |E_{vn}|^2 \rangle / \eta \\ I_{hn} d\Omega = \langle |E_{hn}|^2 \rangle / \eta \\ U_n d\Omega = 2 \cdot \text{Re} \langle (E_{vn} \cdot E_{hn}^*) \rangle / \eta \\ V_n d\Omega = 2 \cdot \text{Im} \langle (E_{vn} \cdot E_{hn}^*) \rangle / \eta \end{cases} \quad (2-77)$$

Dans l'approche hyperfréquence passive, les radiations considérées sont émises naturellement. Il n'y a pas de corrélation entre les composantes verticale et horizontale du champ E.M., aussi $U = V = 0$. Dans

ces conditions les composantes de la matrice de Stokes M se déduisent de celles de la matrice de diffusion S à partir des équations (2-73) et (2-77):

$$M_{\text{passif}} = \begin{bmatrix} |S_{vv}|^2 & |S_{vh}|^2 \\ |S_{hv}|^2 & |S_{hh}|^2 \end{bmatrix} \quad (2-78)$$

Finalement, pour relier l'intensité totale diffusée à l'intensité incidente sur la particule, la notion de matrice de phase est introduite. Si l'on fait l'hypothèse d'addition incohérente des ondes et donc des paramètres de Stokes diffusés, ce qui est le cadre de ce paragraphe, la matrice de phase P s'exprime comme la moyenne de la matrice de Stokes M en fonction des distributions de taille, forme et orientation des diffuseurs discrets.

$$P(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = n \cdot \int \int_{\alpha, \beta, \gamma, a, b, c} p(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma) \cdot M(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \theta, \phi) da db dc d\alpha d\beta d\gamma \quad (2-79)$$

avec

$$P = \begin{bmatrix} (v, v') & (h', v) \\ (v', h) & (h', h) \end{bmatrix} \quad (2-80)$$

où n désigne nombre de diffuseurs discrets par unité de volume, $p(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$ est la fonction densité de probabilité des distributions de dimension (a, b, c) et d'orientation (α, β, γ) des diffuseurs. Les composantes (p', q) de la matrice de phase P , où p et q désignent les polarisations verticale et horizontale, sont des termes de couplage entre les radiations incidentes et diffusées.

b) Coefficient d'absorption, de diffusion et d'extinction du milieu

Avec la matrice de phase, les coefficients de diffusion et d'absorption sont nécessaires pour caractériser le milieu émetteur, dans une approche incohérente.

La perte dI subie par une onde E.M. par absorption au cours de son trajet sur une distance dr est proportionnelle à son intensité I , selon:

$$dI = k_a I dr \quad (2-81)$$

où k_a ($N_p \cdot m^{-2}$) désigne le coefficient d'absorption du milieu. On caractérise similairement le coefficient de diffusion k_s , et d'extinction k_e qui prend en compte les pertes par absorption et diffusion. Nous précisons dans cette partie les différentes approches utilisées pour estimer ces coefficients.

b1) Diffusion

Considérons une onde caractérisée par un vecteur de Poynting unitaire de densité de puissance et une polarisation p , incidente sur un objet (O). La surface efficace σ_{sp} ($p=v$ ou h) de diffusion de (O) est définie comme la surface qui produirait une puissance totale diffusée équivalente à celle effectivement diffusée par l'objet. Elle permet de relier k_s aux composantes de la matrice de diffusion ou de phase (Ulaby *et al.*, 1981 p1088), Tsang *et al.*, 1985 p269):

$$\text{soit} \quad \sigma_{sp} = 1/4\pi \int_{4\pi} \sigma_p d\Omega_s = \int_{4\pi} \langle |S_{vp}|^2 + |S_{hp}|^2 \rangle d\Omega_s$$

avec $k_s = n \cdot \sigma_{sp}$ (2-82)

ou encore

$$\begin{cases} K_{sv}(\theta) = \int_0^\pi \sin\theta' [(v',v) + (h',v)] d\theta' \\ K_{sh}(\theta) = \int_0^\pi \sin\theta' [(v',h) + (h',h)] d\theta' \end{cases} \quad (2-83)$$

où (p,q') , $(p, q = v \text{ ou } h)$ sont les composantes de la matrice de phase de l'objet considéré.

b2) Absorption

*Le coefficient d'absorption est parfois calculé sommairement selon (Tsang et Kong, 1975):

$$k_a = 2k_0 |\text{Im}((\epsilon_1)^{1/2})| \quad (2-84)$$

ce qui s'écrit aussi: $k_a = 2 \cdot k_1''$ (2-85)

avec k_1'' : partie imaginaire du nombre d'onde dans le milieu (1)
 k_0 : nombre d'onde dans l'espace libre
 ϵ_1 : permittivité relative moyenne du milieu (1)

*L'approche la plus classique exprime la surface efficace d'absorption σ_a en fonction du champ $E_{in}(r')$ interne au diffuseur (Ishimaru, 1978 p17):

$$\sigma_a = \int_V k_0 \epsilon_r''(r') |E_{in}(r')|^2 dV' \quad (2-86)$$

L'intégration porte sur le volume interne V du diffuseur et ϵ_r'' désigne la partie imaginaire de sa constante diélectrique.

Similairement (Eom et Fung, 1984):

$$\sigma_a = k_0 \epsilon_r''(r') |A \cdot E_{in}(r')|^2 \cdot \pi \cdot a^2 l \quad (2-87)$$

et $\begin{cases} k_{av} = nk_0 \epsilon_r''(r') \pi \cdot a^2 l \cdot \langle |A \cdot v_i|^2 \rangle \\ k_{ah} = nk_0 \epsilon_r''(r') \pi \cdot a^2 l \cdot \langle |A \cdot h_i|^2 \rangle \end{cases} \quad (2-88)$

v_i et h_i sont les vecteurs de polarisation du champ E_i incident sur l'objet; a et l désignent respectivement le grand axe et l'épaisseur de l'objet assimilé à un ellipsoïde, $\langle \rangle$ désigne un moyennage temporel. A est le tenseur de polarisabilité du diffuseur défini par $E_{in} = A \cdot E_i$.

b3) Extinction

*La première approche consiste à exprimer k_e en fonction k_a et k_s , calculés par une des méthodes exposées ci-dessus:

$$k_{ep} = k_{ap} + k_{sp} \quad (2-89)$$

*Une autre approche met en oeuvre le théorème optique (théorème de diffusion-avant) qui relie la surface efficace d'extinction σ_e aux composantes de la matrice de diffusion, calculées dans la direction d'incidence e_i (forward-direction : $s=i$) (Tsang *et al.*, 1985 p135):

$$\sigma_e = 4\pi/k_0 \text{Im}\{ e_i \cdot F \cdot e_i \} \quad (2-90)$$

où F désigne la matrice de diffusion et $\text{Im}\{ \}$ la partie imaginaire.

$$\text{soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ev}(k_i) = 4\pi/k_0 \text{Im}\{ |f_{vv}(k_i, k_i)| \} \\ \sigma_{eh}(k_i) = 4\pi/k_0 \text{Im}\{ |f_{hh}(k_i, k_i)| \} \end{array} \right. \quad (2-91)$$

$$\text{avec} \quad k_{ep} = n \cdot \langle \sigma_{ep} \rangle \quad (2-92)$$

où n désigne le nombre de diffuseurs par unité de volume; $\langle \rangle$ désigne la moyenne spatiale sur les distributions de dimension, forme et orientation des diffuseurs. Karam *et al.* (1992) précisent que dans le cadre des approximations basses fréquences ce théorème ne prend en compte que l'absorption. Aussi, ils ajoutent un terme de diffusion au coefficient donné par l'équation (2-91), provenant du théorème optique.

*Dans l'approche hyperfréquence active l'émission (équivalente à l'absorption) n'est pas prise en compte. Seule la matrice d'extinction K_E intervient dans les équations d'échanges radiatifs, et k_s et k_a n'apparaissent plus (Ulaby *et al.*, 1990). K_E s'exprime en fonction des coefficients M_{mn} avec (Tsang *et al.*, 1985 p.139):

$$M_{mn} = i2\pi n/k_0 \langle S_{mn}(\theta, \phi, \theta, \phi) \rangle \quad (2-93)$$

où S est la matrice de diffusion, m et n désignent la polarisation v ou h.

c) Résolution des équations d'échanges radiatifs.

Dans un premier temps, le milieu est caractérisé par la matrice de phase des diffuseurs discrets qu'il contient (feuilles, tiges, troncs...) et de ses différents coefficients d'échanges radiatifs k_a , k_s , k_e . Dans ce cadre, plusieurs approches permettent de résoudre les équations décrivant l'interaction de l'onde E.M. et du couvert. Les équations du transfert radiatif sont les plus classiques et les plus souvent mises en oeuvre. Deux autres méthodes, la technique de Monte Carlo (Chuah et Tan, 1990) et la méthode du matrix-doubling (Eom et Fung, 1984) ont été utilisées dans des modèles de rétrodiffusion de couverts végétaux.

c1) Le transfert radiatif

De nombreuses méthodes de résolution des équations intégral-différentielles de transfert radiatif sont proposées dans la littérature en fonction du degré de complexité et de précision de la modélisation. Les méthodes numériques sont fondées sur des techniques de transformation d'équations: représentation de Fourier, discrétisation des ordonnées (méthodes de Gauss), méthodes des éléments finis... (Gerstl et Borel, 1992). La résolution peut également se faire de manière itérative (solution à l'ordre zéro, un ou deux) qui fournit une solution approchée et qui prend mal en compte les effets de diffusion multiple (Ulaby *et al.*, 1981 p1101). Cette technique est mise en oeuvre dans les modèles de rétrodiffusion radar actuels: au premier ordre (Ulaby *et al.*, 1990) et récemment au second ordre (Karam, 1992). Dans le domaine micro-onde passif, où l'aspect polarimétrique de l'onde E.M. est réduit, les méthodes de résolution numérique s'appliquent bien (méthode de Gauss en particulier (Tsang et Kong, 1980)).

c2) Autres techniques de résolution

Deux autres approches, utilisant la matrice de phase pour caractériser la diffusion par les éléments du couvert, sont décrites dans ce paragraphe.

La méthode du matrix doubling qui s'appuie sur les travaux de Twomey *et al.* (1966) est mise en oeuvre par Eom et Fung (1984) puis Alphonse (1988) pour calculer le coefficient de rétrodiffusion radar d'un couvert végétal. Ferrazzoli *et al.* (1992) étend simplement cette modélisation au domaine passif, par l'intermédiaire de l'expression de Peake qui relie le coefficient bistatique à l'émissivité du couvert. Le principe de cette méthode consiste à exprimer la matrice de diffusion d'une double couche en fonction des matrices de diffusion des deux couches élémentaires qui la constituent. Cette approche permet l'extension du calcul de la diffusion à toute la strate du couvert. Cette méthode serait efficace pour des milieux ayant une épaisseur optique importante. Elle ne présente pas d'intérêt évident par rapport au transfert radiatif. Par contre elle paraît peu adaptée à la modélisation des couverts multistrates et sa mise en oeuvre est relativement complexe.

Plus prometteuse, la technique de Monte Carlo est mise en oeuvre par Chuah et Tan (1990) en hyperfréquence active. Dans cette approche les mécanismes de diffusion sont considérés comme des chaînes de collisions entre les photons du rayonnement incident et les diffuseurs discrets du couvert. L'intérêt de cette méthode réside dans sa prise en compte réaliste, de l'effet de la diffusion multiple, et de l'architecture complexe du couvert végétal. Comme précédemment, l'expression de Peake permettrait de déduire l'émission d'un couvert à partir des résultats de Chuah et Tan.

2.2.2 Modélisation du milieu

L'approche continue et l'approche discrète sont les deux types d'approches qui permettent de décrire "la structure diélectrique" d'un couvert; structure qui détermine les processus de diffusion et d'absorption. Ces deux descriptions physiques du milieu sont complétées par une approche de la diffusion qui peut être indifféremment cohérente ou incohérente.

2.2.2.1 Approche continue

Dans l'approche continue, la végétation est caractérisée par les fluctuations aléatoires dans l'espace de sa permittivité ϵ_1 . Elle se fonde donc sur une description statistique des caractéristiques diélectriques du couvert où $\epsilon_1(r)$ prend la forme (Tsang et Kong, 1976):

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_1(r) = \epsilon_{1m} + \epsilon_{1f}(r) \end{array} \right. \quad (2-94)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{1m} = \epsilon'_{1m} + i\epsilon''_{1m} \text{ avec } \epsilon''_{1m} \ll \epsilon'_{1m} \end{array} \right. \quad (2-95)$$

où r est le vecteur position dans l'espace, ϵ_{1m} et ϵ_{1f} sont respectivement les parties moyenne et fluctuante de $\epsilon_1(r)$.

Dans l'approche d'onde, il est nécessaire de connaître ou de faire des hypothèses sur la fonction d'autocorrélation R_ϵ de $\epsilon_1(r)$, pour estimer le champ diffusé par l'approximation de Born. La forme la plus classique de R_ϵ est donnée par Fung et Fung (1977) pour un milieu continu:

$$R_\epsilon(r_1, r_2) = \langle \epsilon_f(r_1) \epsilon_f^*(r_2) \rangle = \delta \cdot \epsilon'_{1m} \exp(-[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] / l_p^2 - |z_1 - z_2| / l_z) \quad (2-96)$$

où δ désigne la variance de la fonction de corrélation et l_z , l_p sont appelées longueurs de corrélation, respectivement dans le plan vertical et horizontal. Selon cette formulation, la fonction d'autocorrélation est à symétrie cylindrique. Elle est gaussienne dans le plan horizontal et exponentielle dans le plan vertical.

L'émission d'un couvert est décrite selon cette approche par Tsang et Kong (1976, 1980) pour un milieu 'demi-espace' (une seule strate très profonde) puis pour un couvert à trois couches (le sol et deux strates de végétation par exemple). Tsang et Kong (1981) calculent les coefficients de rétrodiffusion d'un milieu à fortes fluctuations diélectriques. L'approche "fortes fluctuations" serait

bien adaptée à la modélisation des couverts végétaux qui présentent de forts contrastes diélectriques entre ses diffuseurs (feuilles et branches) et l'air ambiant. Dans ce même cadre, Jin (1989a) calcule les matrices de phase qui permettent une modélisation de l'émission par le transfert radiatif.

L'approche continue permet de modéliser de nombreux types de milieux observés depuis l'espace: surface des océans, glace, neige sèche et mouillée, sol, végétation..., avec un minimum de paramètres en entrée (Isaacs *et al.* (1989), Jin (1989b), Calvet *et al.* (1992), Wigneron *et al.* (1992)). Seules deux longueurs de corrélation paramétrisent la structure interne, physique et diélectrique, du milieu.

Dans le cadre des couverts végétaux, Jin (1989b) considère que ces longueurs (de l'ordre du mm ou du cm) sont reliées à la structure physique de la végétation (à la dimension des diffuseurs en particulier). Ulaby *et al.* (1981) estime que L_z est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des feuilles et dépend de leur orientation. Comme aucune technique ne permet de mesurer ces paramètres, les longueurs de corrélation sont estimées par ajustement des mesures hyperfréquences et des simulations du modèle.

2.2.2.2 Approche discrète

L'approche discrète prend en compte la contribution à la diffusion des différents diffuseurs discrets du milieu (feuilles, branches...). Au cours du développement de la modélisation discrète, la description de la diffusion des éléments du couvert est devenue de plus en plus précise: depuis le diffuseur ponctuel jusqu'au diffuseur ellipsoïdal ou cylindrique qui simule respectivement la feuille et la branche. Ainsi England (1975) résout les équations de transfert radiatif d'un milieu "demi-espace" contenant des diffuseurs particuliers à diffusion de Rayleigh pour estimer son émission hyperfréquence. Tsang et Kong (1977) résolvent ces mêmes équations pour des diffuseurs sphériques et utilisent des fonctions de phase de diffusion de Mie. La diffusion de disques (approximation de Rayleigh Gans) ou de cylindres aléatoirement orientés est étudiée par Karam et Fung (1983) pour modéliser le coefficient de rétrodiffusion d'un couvert végétal. Choe et Tsang (1983) modélisent l'émission d'un couvert végétal qui présente les mêmes caractéristiques. Karam et Fung (1988) calculent la matrice de diffusion des disques et des cylindres sous les approximations respectives de Rayleigh Gans généralisé et du cylindre infini, qui élargissent le domaine de validité en fréquence de la modélisation micro-onde de la végétation.

La matrice de diffusion est ensuite moyennée en fonction des paramètres descriptifs des éléments du couvert. La matrice de phase qui en est déduite, prend ainsi en compte des caractéristiques de diffusion moyenne, pour les feuilles, les branches, les troncs.. (dans le cas d'un couvert végétal). L'approche discrète impose donc une caractérisation précise de chacun des éléments du couvert en terme de forme, dimension, orientation et permittivité.

2.2.3 Discussion

Nous tentons de préciser dans cette partie "discussion", les approches qui nous paraissent bien adaptées pour répondre aux objectifs présentés en introduction. Pour cela nous nous appuyons sur une analyse de l'évolution des différentes approches de la modélisation dans le domaine hyperfréquence.

2.2.3.1 Modélisation hyperfréquence: bref état de l'art

Les travaux de modélisation hyperfréquence passif ont été intenses dans la période 1975-1983 (Tsang et Kong, 1975, 1976, 1980; Choe et Tsang, 1983). Ces travaux menés par l'école "Kong", portent sur une modélisation cohérente ou incohérente de milieux continus le plus souvent. L'évolution des travaux se fait vers une prise en compte plus précise de l'architecture du couvert (accroissement du nombre de strates du couvert (Tsang et Kong, 1980), description tridimensionnelle avec dépendance



Figure 2-6: Couvert de maïs généré par l'approche stochastique des L-systèmes (d'après Goël et al. (1991a)).

azimuthale du tenseur de permittivité (Lee et Kong, 1985) et vers une description affinée de la diffusion dans le couvert (passage de l'approximation de Born à la méthode de renormalisation (Fung et Fung, 1977; Jin et Kong, 1984), théorie des fortes fluctuations diélectriques (Tsang et Kong, 1981; Jin, 1989a), résolution numérique des équations de transfert radiatif (Tsang et Kong, 1980; Choe et Tsang, 1983). Dans l'actif, les travaux de modélisation (en particulier de milieux discrets par le transfert radiatif) prennent le relai dès le début des années 1980, en relation sans doute avec la meilleure résolution spatiale du radar (Tsang *et al.*, 1981; Karam et Fung, 1983; Karam *et al.*, 1988; Ulaby *et al.*, 1990; Choudhury et Wang, 1990). L'évolution est similaire: meilleure prise en compte de l'architecture du couvert (milieux multistratifiés, diffuseurs circulaires, ellipsoïdaux, cylindriques), description affinée de la diffusion (précision accrue des matrices de phase et des méthodes de résolution des équations de T.R.). Tsang *et al.* (1985) développent des méthodes numériques de résolution, fondées sur la transformée de Fourier des matrices de phase des sphéroïdes et des cylindres. Le modèle de Ulaby *et al.* (1990) utilise une résolution itérative du 1^o ordre des équations de T.R.. La résolution se fonde sur l'hypothèse de forte diffusion-avant et assimile la matrice de phase à une fonction de Dirac. Karam *et al.* (1988, 1992) mettent en oeuvre l'approximation de Rayleigh Gans généralisée pour les diffuseurs ellipsoïdaux (domaine 1-20GHz). Ils décrivent, en parallèle avec Tsang et Ding (1991), une résolution itérative du 2^o ordre, qui prend mieux en compte la diffusion multiple et les termes de polarisation croisée. La résolution se fonde sur la diagonalisation de la matrice d'extinction K_E .

2.2.3.2 Architecture du couvert végétal et modèles en télédétection

La précision requise dans la description de l'architecture du couvert végétal est une des caractéristiques fondamentales du modèle de l'émission micro-onde. Ainsi la modélisation continue du milieu ne requiert qu'une description très simple de la structure du couvert. Sur ce plan, les termes de fraction volumique de la végétation, de hauteur de la strate végétale et les deux longueurs de corrélation suffisent pour caractériser la structure milieu continu. Dans le cadre de l'approche discrète, les équations de la physique de la diffusion se résolvent analytiquement pour des éléments géométriques aux formes simples: sphère, disque, ellipsoïde, cylindre. La matrice de Stokes de ces éléments est moyennée sur leur distribution de dimension et d'orientation ce qui fait disparaître la structure discrète de chacun des composants du couvert (Gerstl et Borel, 1992). La méthode de résolution du transfert radiatif impose la structure en strates homogènes, aux interfaces horizontales et infiniment étendues. L'architecture du modèle discret en découle naturellement. Les disques, les ellipsoïdes très allongés, les cylindres simuleront respectivement des feuilles, des aiguilles de conifères, et des branches (Lang and Sidhu, 1983; Karam and Fung, 1988; Chuah and Tan 1990; Lopes and Mougin, 1990; Ulaby *et al.*, 1990; Yueh and Kong, 1992). Ces éléments se distribuent aléatoirement dans des strates superposées où ils ont des distributions de taille, d'orientation et de densité bien définies. Cependant dans l'approche discrète comme dans l'approche continue, la résolution du transfert radiatif se fonde sur des caractéristiques moyennes de structure de la végétation, dans des strates horizontales et homogènes. Actuellement, les résolutions itératives ou numériques du T.R. ne peuvent donc rendre compte précisément de l'agencement spatial des diffuseurs végétaux, dans le plan horizontal en particulier. Ainsi le transfert radiatif induit des limitations importantes dans la description de la structure du couvert. Par exemple, la structure en rang d'un couvert agricole induit des effets, au niveau des interfaces verticales végétation-atmosphère, de la succession de discontinuités du couvert dans le plan horizontal, des termes cohérent liés à la périodicité de la structure, qui échappent à l'approche classique du T.R. Aussi d'autres méthodes ont été développées récemment pour mieux prendre en compte l'architecture naturellement variée et hétérogène des couverts végétaux. Deux problèmes se posent: décrire la structure complexe d'un couvert végétal et proposer une prise en compte des échanges radiatifs compatible avec cette description.

La représentation fine du couvert, en terme d'organisation géométrique et spatiale des organes végétaux, se fonde généralement sur une caractérisation numérique de l'architecture (computational method). La modélisation de l'architecture se fait selon diverses techniques à caractère, "botanique", "géométrique", "mathématique". Les modèles "botanistes" se fondent sur une caractérisation statistique des mécanismes biologiques de croissance et de développement de la plante (Halle, 1978; de Reffye *et al.*, 1988; Dauzat et Hauteceur, 1991). Les modèles "géométriques" sont calés à partir de données collectées sur un important échantillon de plantes et les caractéristiques du couvert sont modélisées par des figures géométriques ou des formulations empiriques (Aries *et al.*, 1992). Les modèles "mathématiques" se fondent sur des algorithmes théoriques (les fractals, les L-systèmes..) qui génèrent des structures tridimensionnelles similaires aux architectures végétales (figure 2-6, Goel *et al.*, 1991a). La prise en compte des échanges radiatifs dans de tels couverts est surtout décrite dans le domaine des longueurs d'ondes du visible et proche-infrarouge: technique de Monte-Carlo, de lancer de rayons, de la radiosité (Goel N. S., 1988; Borel *et al.*, 1991; Goel *et al.*, 1991a, Aries *et al.*, 1992). Dans le domaine hyperfréquence, le couplage entre ces descriptions fines de l'architecture végétale et les régimes de diffusion spéculaire multiple par les éléments végétaux est d'une complexité qui s'accroît encore. Les études qui en font état sont encore prospectives; par exemple le "Branching model" de Yueh *et al.* (1992) incorpore les termes d'interaction cohérente de l'onde E.M. avec des tiges de soja. Parallèlement, Tsang *et al.* (1993) ont développé une approche étendue du T.R., basée sur la diffusion collective d'un amas de diffuseurs (cluster effect), qui prend en compte les interactions de phase liées à l'effet de groupement des diffuseurs (feuilles groupées sur une tige par exemple). Des perspectives sont également évoquées dans le cadre de la radiosité (Goel *et al.*, 1991b).

2.2.3.3 Discussion

L'approche d'onde, qui prend en compte les interactions cohérentes entre les radiations, convient surtout pour des milieux faiblement diffusants, ou à basses fréquences (quelques GHz). Inversement, le transfert radiatif s'est imposé dans la modélisation micro-onde des couverts végétaux car il permet de prendre en compte les mécanismes de diffusion multiple entre les composants du couvert, fortement contrastés diélectriquement avec l'air ambiant (Ulaby *et al.*, 1990). Par ailleurs, il est possible d'utiliser une méthode de résolution du T.R. identique, que la nature du milieu soit discrète ou continue (seule la matrice de phase change). Cette résolution est généralement bien adaptée à la description de milieux multistratifiés.

Sur le plan de la modélisation physique du milieu, les descriptions continues et discrètes du milieu apparaissent fortement complémentaires. La modélisation discrète est un outil d'investigation des mécanismes physiques de l'interaction onde électromagnétique – couvert végétal. Elle permet l'analyse précise des différentes contributions des composants du couvert et de leur caractéristiques biophysiques à l'émission hyperfréquence. Le milieu continu apparaît compatible avec les faibles résolutions spatiales des radiomètres micro-ondes (de l'ordre de plusieurs dizaines de km). Il semble également bien adapté à l'inversion des données télédéteectées, la description de la structure interne du milieu étant limitée à trois paramètres: la densité volumique des diffuseurs (f_v) et les longueurs de corrélation l_z et l_p . Les méthodes qui s'appuient sur une caractérisation numérique de l'architecture du couvert permettent de prendre en compte l'hétérogénéité du couvert, dans le plan horizontal en particulier. Actuellement elles sont encore du domaine de la prospection en hyperfréquence. Leur complexité les rend par contre peu explicative. De plus l'abondance des données descriptives de l'architecture du couvert qu'elles nécessitent les rendent incompatibles avec une problématique d'inversion de données télédéteectées.

Ainsi la modélisation par le transfert radiatif de milieux à structure discrète et continue apparaît bien correspondre à nos objectifs d'analyse, d'interprétation et d'inversion des mesures radiométriques hyperfréquences sur un couvert végétal. Deux modèles continu et discret, utilisant une résolution

identique des équation du T.R. par discrétisation des ordonnées, ont été développés dans le cadre de ce travail. Leur analyse est faite dans le chapitre 4.

Chapitre 3

Modélisation des paramètres physiques et biologiques du milieu

Le milieu se compose dans le cadre de cette étude d'un couvert végétal encadré par deux 'demi-espaces': le sol et l'atmosphère. Les échanges radiatifs micro-ondes qui s'opèrent dans ces différents milieux font intervenir des approches de modélisation différentes. La diffusion de volume caractérise ces échanges au sein du couvert végétal; les effets de surface jouent un rôle prépondérant au niveau du sol; les phénomènes d'absorption et de diffusion de Rayleigh prédominent dans l'atmosphère. Les caractéristiques physiques et biologiques de ces différents milieux interviennent en tant que paramètres d'entrée des modèles de l'émission. Elles sont analysées dans ce chapitre.

3.1 Le couvert végétal

L'émission hyperfréquence de la végétation est une émission de volume qui intègre les gradients verticaux du couvert végétal. Aussi le couvert est-il scindé en strates horizontales relativement homogènes. Ces différentes strates seront caractérisées par des paramètres de nature *thermique*, l'émission d'un corps étant proportionnelle à sa température; de nature *diélectrique* et *structurelle*, l'agencement dans l'espace, la forme et la permittivité des éléments de la strate déterminant les phénomènes d'interaction avec l'onde E.M..

3.1.1 Permittivité et teneur en eau de la végétation

Les deux précédents chapitres montrent que les propriétés de diffusion et d'absorption d'un milieu sont directement reliées à ses fluctuations diélectriques internes. Ainsi le couvert végétal, comme le sol et l'atmosphère, est un milieu fortement hétérogène et la nature variée de ses composants engendre les contrastes diélectriques. Les éléments du couvert (feuilles, fruits, branches..) sont épars dans l'air qui représente plus de 99% du volume de la strate de végétation. Ces éléments, constitués d'eau saline plus ou moins liée à la matière végétale, sont également fortement hétérogènes. Ainsi l'eau par sa teneur élevée dans le matériau végétal, et par son très fort contraste diélectrique avec les autres composants du milieu (rapport des constantes diélectriques de l'ordre de 1/80 et de 1/20 avec l'air et le sol (Jackson et Schmugge, 1989)) est l'élément déterminant des caractéristiques diélectriques du couvert végétal.

3.1.1.1 L'eau dans la plante

Trois 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, la teneur en eau relative et le potentiel hydrique (Perrier, 1989; Cruizat, 1992):

-L'humidité pondérale H_p est le rapport de la masse d'eau P_e d'un échantillon et de sa masse sèche P_s :

$$H_p = P_e / P_s \quad (3-97)$$

*La teneur en eau gravimétrique M_g est le rapport du poids d'eau sur le poids total de l'échantillon:

$$M_g = P_e / (P_s + P_e) \quad (3-98)$$

M_g et H_p sont reliés par la relation simple:

$$M_g = H_p / (H_p + 1) \quad (3-99)$$

Ces caractéristiques pondérales sont mesurées selon des techniques simples de pesée de la matière végétale fraîche puis desséchée dans une étuve (105°C pendant 24^H).

*La teneur en eau volumique M_v est le paramètre utilisé dans les calculs de permittivité diélectrique de 'mélange', qui se fondent sur la fraction volumique des différents composants d'un milieu. M_v est reliée à M_g , par le *shrinking model* (Ulaby et El-Reyes, 1987). Cette relation fait l'hypothèse que les variations de volume dans l'échantillon de végétation équivalent au volume de l'eau qu'il acquiert ou qu'il perd. On obtient dans ces conditions:

$$M_v = M_g \rho_{ms} / [1 - M_g (1 - \rho_{ms})] \quad (3-100)$$

La densité massique ρ_{ms} de la végétation sèche ($g.cm^{-3}$) est le rapport masse/volume de la matière sèche. Les techniques de mesure du volume de l'échantillon de végétation sont imprécises et peu de travaux font état d'estimations de ρ_s . Aussi la valeur $\rho = 0.33g.cm^{-3}$ estimée pour un couvert de maïs (Ulaby et El-Reyes, 1987) est-elle utilisée dans la plupart des modèles de permittivité de la végétation (Mougins, 1989). Aucune étude ne fait état de la variabilité interspécifique ou temporelle (au cours du développement du couvert végétal) de ce paramètre.

-La teneur en eau relative RWC (Relative Water Content) est le rapport de la masse d'eau de l'échantillon sur la masse maximale P_m qu'il peut contenir, en état de 'pleine turgescence':

$$RWC = P_e / P_m \quad (3-101)$$

-Le potentiel hydrique ψ est une grandeur reliée à 'l'état énergétique' de l'eau (Katerji, 1992). Ce paramètre intervient sur le plan physiologique (processus de croissance, développement, etc) et physique du fonctionnement de la plante (il régit en particulier le sens et l'intensité des flux hydriques dans le continuum Sol-Plante-Atmosphère). Pour les plantes non ligneuses, ψ se décompose selon:

$$\psi = P + \pi \quad (3-102)$$

où P est le potentiel de turgescence qui quantifie les forces de pression hydrostatique exercées par les membranes cellulaires sur l'eau interne et π est le potentiel osmotique qui quantifie les forces de liaison eau-molécule.

De nombreux travaux font état de relations empiriques ou bio-physiques entre ces grandeurs pour des couverts agricoles (soja, maïs...), principalement entre RWC et ψ (Davies, 1977; Zur et Jones, 1981; Kovalik et Turner, 1983). Ces relations sont relativement imprécises. En particulier le régime de flux d'eau dans la plante est non conservatif (Katerji *et al.*, 1983, 1992) et provoque des hystérésis caractéristiques si l'on suit l'évolution de la relation au cours de la journée (Vanderschmidt, 1993). Elles varient en fonction du type de couvert étudié et évoluent au cours du développement de la culture. Cependant ces relations empiriques sont parfois riches d'enseignement. Elles permettent aussi de pallier ponctuellement à l'insuffisance des approches explicatives de l'état hydrique de la végétation sur les plans physiologique, morphologique ou biochimique (Cruizat, 1992).

3.1.1.2 Propriétés diélectriques de la végétation

L'estimation de la permittivité moyenne du couvert végétal nécessite une description en terme de structure et de permittivité de ses différents composants (feuilles, branches...). Que l'on considère le

couvert végétal ou la matière végétale des feuilles ou des branches, le milieu est hétérogène. Il sera modélisé sous forme de milieu hôte contenant diverses inclusions, d'eau, d'air, de matière végétale (Ulaby *et al.*, 1981).

a) Permittivité de la matière végétale

Les mesures de permittivité de la matière végétale sont réalisées au laboratoire, par des techniques de mesure de transmission de l'échantillon de végétation dans un guide d'onde (El-Reyes et Ulaby, 1987). Récemment un dispositif transportable a été mis au point (Brunfeldt, 1987; Dobson, 1988). Il permet un suivi des variations spatiales et temporelles de la constante diélectrique ϵ_v des composants végétaux (Mougin, 1989). Ces mesures ont permis le calage de modèles multiphasés empiriques ou semi-empiriques. Ulaby et Jedlicka (1984) proposent diverses formulations. La végétation reste modélisée par un milieu hôte constitué du tissu végétal contenant des inclusions d'eau et d'air. Le modèle dit "réfractif" s'écrit simplement:

$$(\epsilon_v)^{1/2} = (1 - M_v)(\epsilon_b)^{1/2} + M_v(\epsilon_w)^{1/2} \quad (3-103)$$

où M_v désigne la fraction volumique de l'eau dans l'échantillon de matière végétale, ϵ_v , ϵ_w et ϵ_b sont respectivement les constantes diélectriques relatives de l'échantillon, de l'eau, et du tissu végétal. Dans des approches similaires de modèles de mélange à 2 phases, les inclusions peuvent être également assimilées à des aiguilles ou des disques. Ils décrivent aussi des milieux multi-composants, où la permittivité apparaît comme somme des contributions des différents composants du matériau végétal: air, eau et tissu végétal, pondérés par leur fraction volumique.

Une telle approche à trois composants est reprise par Ulaby et El-Reyes (1987). Le domaine fréquentiel de la modélisation est 0.2-20GHz et M_v paramétrise quantitativement l'eau dans la plante. Ils distinguent le tissu végétal résiduel (non-dispersive residual component), l'eau libre et un composant tissu végétal-eau liée. En effet la molécule d'eau est assimilable à un dipole diélectrique 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 (Mougin, 1989). Ainsi les caractéristiques diélectriques du matériau végétal vert sont fonction de l'état énergétique de l'eau qu'il contient. McDonald *et al.* (1990), considérant sans doute que cet état est pris en compte par le potentiel hydrique ψ , ajustent les fluctuations diélectriques journalières de branches de noyer sur celles du potentiel hydrique. Cette approche mérite de plus amples approfondissements. En effet, alors que la teneur en eau M_v est souvent difficile à interpréter, la relation $\epsilon(\psi)$ apparaît comme un couplage naturel, en terme "d'énergie de l'eau", entre la physique hyperfréquence et la biologie des végétaux. Elle est encore purement hypothétique mais semble prometteuse. Elle permettrait de relier la mesure micro-onde à la dynamique des flux d'énergie dans un couvert végétal.

Choudhury (1990) étend la formulation de Ulaby et El-Reyes à 36.5GHz sans justification. Par contre, Mätzler et Sume (1989) vérifient que cette extension conduit à des valeurs incorrectes au delà de 20GHz. Ils proposent une formulation utilisable sur un domaine en fréquence très étendu, de quelques GHz à 90GHz.

Les aspects énergétique et fréquentiel de la permittivité diélectrique de la matière végétale semblent donc prioritairement à développer.

b) permittivité du couvert végétal

Le couvert végétal est constitué d'un milieu hôte, l'air, et d'inclusions d'éléments végétaux dispersés et orientés aléatoirement en première approximation. La permittivité moyenne ϵ_1 du couvert intervient à

deux niveaux dans la modélisation. ϵ_1 est directement reliée à l'absorption au sein du couvert (section 1.1.4). ϵ_1 intervient également dans la prise en compte des phénomènes de réfraction aux interfaces sol-couvert et couvert-atmosphère (calcul des termes de réflectivité Γ).

Il est possible d'estimer directement ϵ_1 ou indirectement à partir du calcul du coefficient d'absorption moyen du milieu (k_a). Le calcul direct de ϵ_1 provient de formules de permittivité pour milieux hétérogènes (Tsang et Kong, 1981). La formule de Polder-Van Santen/de Loor en particulier (Ulaby *et al.*, 1981 p.2031), permet de modéliser la permittivité d'un milieu hôte (l'air) contenant des inclusions ellipsoïdales d'orientation aléatoire (des feuilles ou des aiguilles de conifères par exemple). Ce type d'approche est mis en oeuvre par Jin (1992) dans le modèle continu. Indirectement, ϵ_1 peut être déduite de la modélisation physique du coefficient d'absorption k_a , par le modèle discret en particulier.

La validation *in situ* de ces approches est une étape insuffisamment développée. La validation repose en effet sur la mesure expérimentale de l'atténuation ou de la constante de propagation d'un couvert. Cette mesure est difficile à mettre en oeuvre et nécessite un appareillage important et spécifique (Ulaby *et al.*, 1983b; Ulaby et Wilson, 1985; Ulaby *et al.*, 1987a). De plus, les résultats obtenus pour un type de couvert donné sont difficiles à généraliser à des structures végétales variées.

3.1.2 Structure du couvert végétal

L'analyse des paramètres caractéristiques de la structure des couverts et des méthodes de mesure est approfondie dans divers travaux (Prévoit, 1985; Cihlar *et al.*, 1987; Mougín, 1989). Nous nous intéressons dans ce paragraphe à la structure de la végétation telle qu'elle est prise en compte par les modèles de transfert radiatif discret (les plus précis actuellement dans le domaine hyperfréquence). Dans ce cadre, les strates du couvert végétal contiennent des éléments diffuseurs caractérisés sur le plan de la structure, en termes de densité, dimension et orientation.

3.1.2.1 Densité des éléments du couvert végétal

Différents paramètres permettent une caractérisation de la densité des éléments du couvert, feuilles, tiges, pétioles, fruits. La densité n_e (m^{-3}) d'un élément est le nombre N_e d'éléments présents dans un volume unitaire V_0 ($V_0=1m^3$) du couvert végétal:

$$n_e = N_e / V_0 \quad (3-104)$$

Pour les éléments foliaires, l'indice des surfaces foliaires (LAI: Leaf Area Index) est le rapport de la surface totale S_f des feuilles des plantes prélevées sur une surface de $1m^2$. En terme de volume, la fraction volumique f_{ve} d'un élément est le volume occupé par cet élément rapporté au volume global du couvert. On déduit simplement f_{ve} en fonction de la densité n_e et du volume moyen $\langle V_e \rangle$ de l'élément dans la strate:

$$f_{ve} = N_e \cdot \langle V_e \rangle / V_0 \quad (3-105)$$

et pour les éléments foliaires d'un couvert homogène étendu:

$$f_{ve} = LAI \cdot \langle ep_f \rangle / d \quad (3-106)$$

où $\langle ep_f \rangle$ désigne l'épaisseur moyenne des feuilles et d la hauteur du couvert végétal. L'estimation de f_{ve} peut donc se faire selon deux approches. La première consiste à mesurer directement le volume de l'élément (par plongée dans des liquides: huile..). La seconde consiste à estimer séparément l'indice foliaire par planimétrie (Cihlar *et al.*, 1987), et l'épaisseur moyenne des feuilles (mesurée par observation microscopique ou par des capteurs de déplacement). La précision de ces mesures est principalement affectée par l'évolution rapide dans le temps, après récolte des échantillons, des caractéristiques d'épaisseur des diffuseurs (épaisseur des feuilles, diamètre des tiges).

formulation mathématique

par Goël & Strebel (1984):

- distribution érectophile: prédominance d'éléments verticaux,
de fonction de densité: $p(\theta) = 2(1+\cos 2\theta)/\pi$;

- distribution planophile: prédominance d'éléments horizontaux,
avec : $p(\theta) = 2(1-\cos 2\theta)/\pi$;

- distribution plagiophile: inclinaison centrée sur 45 degrés,
avec : $p(\theta) = 2(1-\cos 4\theta)/\pi$;

- distribution extrémophile: inclinaisons obliques plus
fréquentes avec : $p(\theta) = 2(1+\cos 4\theta)/\pi$;

- distribution "uniforme": $p(\theta) = 2/\pi$;

- distribution sphérique: $p(\theta) = \sin\theta$.

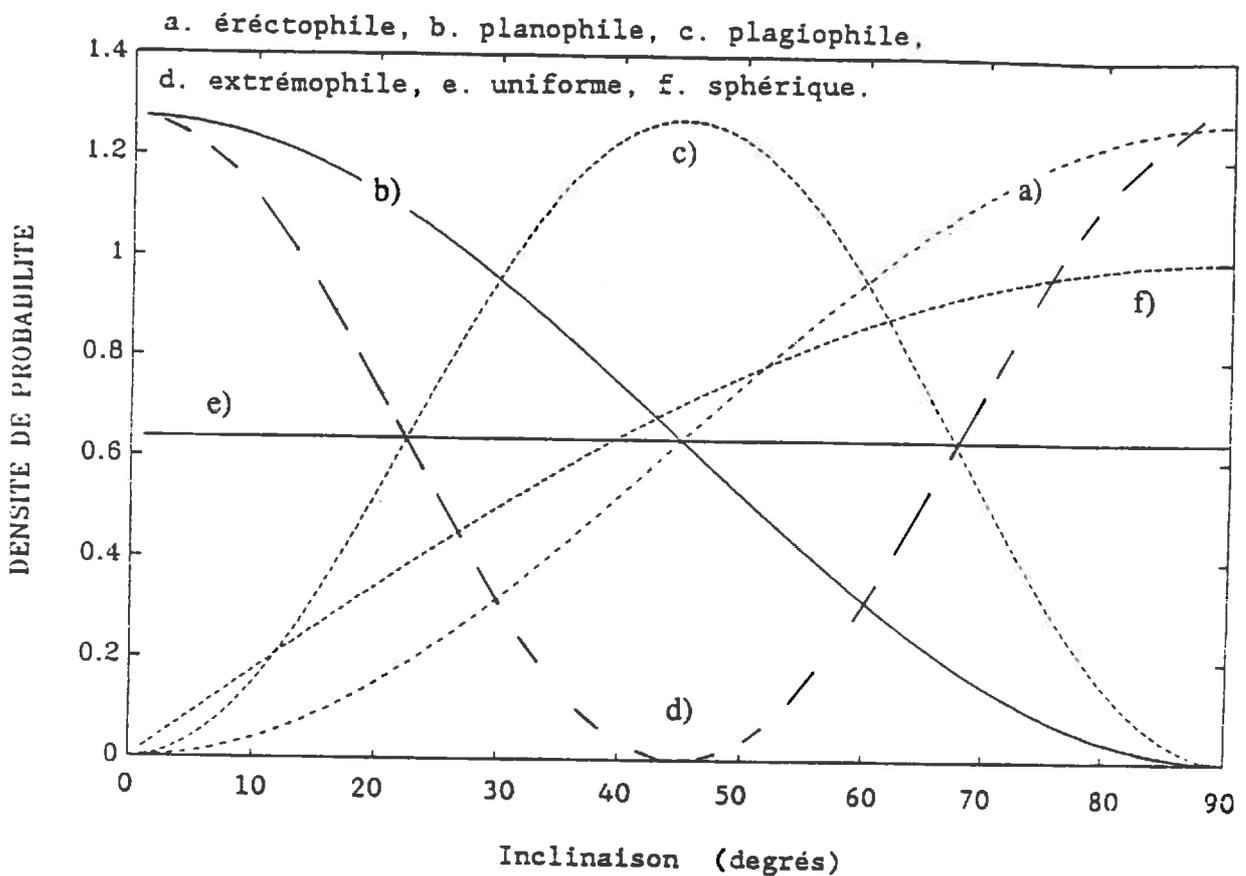


Figure 3-1: Différents types de fonction de distribution de l'inclinaison des feuilles (d'après Mougin (1989)).

3.1.2.2 Orientation et dimension des éléments du couvert

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 and Kirchner, 1983; Goel and Strebel, 1984; Ehleringer and Hammond, 1987; Usti *et al.*, 1991). D'autre part que, dans tous les domaines de longueurs d'onde, la nature de ces distributions jouent un rôle important dans la modélisation des échanges radiatifs (Lang and Saleh, 1985; Verstraete, 1987; Karam and Fung, 1989; Dickinson *et al.*, 1990). Aussi, une représentation précise de la fonction de distribution de l'orientation doit être sélectionnée. Elle doit être à la fois précise et simple pour permettre respectivement une validation efficace et l'inversion des paramètres de la représentation. Diverses formulations sont proposées.

Goel and Strebel (1984) proposent une représentation Béta, à deux paramètres μ et ν . La densité de probabilité $p(\beta)$ de cette fonction ne contient qu'un seul extremum dans son domaine de représentation [$\beta=0^\circ, \beta=90^\circ$] pour les distributions d'inclinaison et [$\beta=0^\circ, \beta=360^\circ$] pour les distributions en azimuth (figure 3-1). Campbell (1990) décrit une représentation ellipsoïdale à deux paramètres. Karam *et al.* (1992) proposent une représentation à cinq paramètres:

$$\begin{aligned} p(\beta) &= A \cdot \cos^n(\pi/2 \cdot [(\beta - \beta_m)/(\beta_0 - \beta_m)]) \text{, avec } \beta_1 < \beta < \beta_2 \\ p(\beta) &= 0 \text{, sinon} \end{aligned} \quad (3-107)$$

où A est un facteur de normalisation, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_m$ et n sont des paramètres d'ajustement.

Aucune de ces représentations n'est universelle. Elles doivent être sélectionnées en testant la correspondance représentation-mesure sur le couvert végétal étudié. L'influence de la distribution en taille et forme des éléments du couvert sur le signal hyperfréquence a également été prise en compte dans plusieurs travaux (Lang and Saleh, 1985; Karam and Fung, 1989).

3.1.3 Température du couvert

Dans le chapitre 1 nous avons vu que schématiquement, la température de brillance micro-onde du couvert T_{Bp} ($p=v$ ou $p=h$) peut s'exprimer comme le produit de l'émissivité de surface e_p et de la température effective du couvert T_{ec} ($T_{Bp} = e_p \cdot T_{ec}$). La température effective T_{ec} intègre le profil thermique vertical du milieu observé, en fonction de la fréquence en particulier (Choudhury *et al.*, 1982). En première approximation, le gradient thermique vertical du milieu est le plus souvent supposé réduit (de l'ordre de quelques degrés K) et la température T_{ec} est assimilée à la température de surface du couvert. En opposition avec le domaine hyperfréquence radar, la mesure radiométrique micro-onde apparaît ainsi sensible à la température du milieu observé. Cela peut être considéré comme une complication, si l'on s'intéresse aux paramètres reliés à l'émissivité, ou comme une possibilité complémentaire aux mesures dans l'infrarouge thermique (IRT), pour accéder à la température de la surface observée. Cette distinction est reprise dans les deux paragraphes qui suivent.

3.1.3.1 Estimation et simulation de la température du couvert

Si l'on cherche à suivre les paramètres de surface reliés au terme d'émissivité e_p , la température doit être estimée par une approche menée en parallèle.

Ainsi, la température des éléments du couvert végétal résulte de l'équilibre s'opérant entre les divers termes de flux de masse et d'énergie au sein du couvert végétal: contributions du rayonnement net (termes radiatifs), du flux de chaleur sensible dans l'air, du flux de chaleur latente dans l'air (terme d'évaporation) et du flux de chaleur dans le sol (Seguin, 1987; Chanzy, 1991; Olioso, 1992). Ces différentes contributions évoluent au sein du couvert dans le plan horizontal en fonction de

l'hétérogénéité de la couverture végétale (Boissard, 1987) et dans la direction verticale. Ainsi, un gradient vertical des températures de l'air dans le couvert est souvent observé (Perrier, 1979; Baldocchi *et al.*, 1983). Le gradient thermique entre le sommet et la base du couvert est de l'ordre de quelques degrés Kelvin. Il sera plus ou moins marqué en fonction des caractéristiques du sol, de la végétation (structure, régulation biologique de la plante liée à sa disponibilité en eau), et des conditions climatiques.

Pour simuler l'émission IRT ou micro-onde d'un couvert végétal, l'estimation de la température des composantes végétales (feuilles en particulier) doit donc s'appuyer sur la caractérisation des termes de flux de masse et d'énergie au sein du milieu. Cette caractérisation permet de rendre compte du profil thermique au sein de la végétation (Brunet *et al.*, 1991) ou plus simplement des contrastes thermiques sol - végétation (Olios, 1992). C'est dans ce cadre que l'étude du chapitre 8 est conduite. L'influence relative des termes d'émissivité et de température sur l'émission micro-onde d'un couvert de soja sera analysée, à l'échelle horaire et à l'échelle journalière.

Dans une perspective plus appliquée d'observations aéroportées ou satellitaires, l'estimation de la température du couvert pourrait être déduite de mesures dans l'IRT, couplées aux mesures micro-ondes. Divers problèmes spécifiques au couplage doivent être résolus ou du moins pris en compte; en particulier sur le plan de la simultanéité temporelle et de la concordance des échelles spatiales des mesures IRT et micro-ondes.

3.1.3.2 Estimation de la température de surface par radiométrie micro-onde

L'intérêt de l'estimation de la température par radiométrie micro-onde porte sur deux aspects. D'une part la mesure hyperfréquence est faiblement sensible aux effets atmosphériques, contrairement à la mesure IRT. Ainsi au travers d'un manteau nuageux, même léger, l'émission IRT de la surface terrestre est totalement atténuée et ne peut être mesurée par un capteur satellitaire. La mesure hyperfréquence pourrait donc permettre d'accroître la périodicité temporelle du suivi de la température de surface. Cependant, dans le temps et dans l'espace, les variations d'émissivité micro-onde du milieu sont importantes. Elles rendent difficiles l'extraction du terme température à partir de la seule mesure radiométrique hyperfréquence. Aussi peu de travaux portent encore sur le sujet, bien qu'il reste prometteur (Lambert et McFarland, 1987; McFarland *et al.*, 1990). D'autres travaux exploratoires sont menés dans ce cadre par Calvet (Météo France), sur les bases de données EFEDA 1991 (Bolle et Streckenbach, 1992) et Hapex-Sahel 1992.

D'autre part, la mesure hyperfréquence intègre plus ou moins en fonction de la fréquence, le profil thermique vertical au sein du milieu; contrairement à la mesure dans l'IRT qui est davantage une mesure des caractéristiques de surface (particulièrement pour un milieu dense et continu). Aussi la combinaison de mesures radiométriques micro-ondes multifréquences peut permettre d'accéder au gradient thermique dans le couvert végétal ou au contraste thermique sol - végétation. Une telle approche a été menée par Calvet *et al* (1992) sur la forêt d'Amazonie. Les températures au sommet et à la base du couvert, et la teneur en eau de la végétation sont inversées simultanément à partir de données micro-ondes multifréquences SMMR. Les résultats sont en accord avec les mesures de profil thermique de l'air dans le couvert, et avec les simulations issues d'un modèle de fonctionnement de la végétation (Noilhan et Calvet, 1993).

3.2 Le sol

L'émission du sol contribue avec une intensité variable à l'émission globale mesurée au dessus du couvert végétal. Cette contribution est fonction en particulier du taux de couverture végétal, de

l'humidité du sol, de la fréquence de mesure. Sa modélisation fait intervenir la diffusion de volume sur une profondeur d'au plus quelques cm (Wang, 1987; Jackson et Schmugge, 1989). Des approches cohérentes (Njoku et Kong, 1977; Wilheit, 1978) ou incohérentes (Burke *et al.*, 1979) prennent en compte la stratification thermique et surtout diélectrique au sein du sol. L'étude comparative menée par Schmugge et Choudhury (1980) montre que les résultats de ces différentes approches sont assez similaires sur une variété de profils d'humidité du sol. L'inclusion de la diffusion de surface dans la modélisation est apparue vite essentielle pour prendre en compte les effets parfois marqués de la rugosité des sols (Schmugge, 1976; Choudhury *et al.*, 1979; Tsang and Newton, 1982; Newton *et al.*, 1982; Wang *et al.*, 1983). La modélisation de l'émission du sol est abordée dans cette partie à travers les termes prépondérants de permittivité diélectrique et de rugosité.

3.2.1 Permittivité et teneur en eau du sol

La permittivité diélectrique du sol est principalement fonction de sa teneur en eau. Cette caractéristique fait de la mesure micro-onde sur sol nu, un très bon indicateur d'humidité. Elle est à l'origine de nombreux travaux (Njoku and O'Neill, 1982; Schmugge *et al.*, 1986; Wang, 1987; Jackson and Schmugge, 1989, Reutov et Shutko, 1992). Les calculs de la permittivité se fondent sur des formulations de mélange faisant intervenir, matière solide, air et eau. Comme dans le cas de la matière végétale il est important de distinguer l'eau libre et l'eau liée, qui est adsorbée à la surface des particules. Deux modèles de permittivité diélectrique du sol font référence: Wang et Schmugge (1980) et Dobson *et al.* (1985). Ces deux approches conceptuellement similaires se distinguent au niveau du calcul des fractions libre et liée de l'eau dans le sol. L'approche empirique de Wang et Choudhury (1980) considère une humidité de transition W_T en dessous de laquelle l'eau est fortement liée à la surface du sol. L'approche davantage physique de Dobson *et al.* (1985) relie surface spécifique du sol (qui dépend surtout de la fraction argileuse du sol) et eau liée. L'analyse comparée de ces deux modèles, conduite par Jackson et O'Neill (1986), révèle des comportements assez différents aux faibles valeurs d'humidité. L'absence de validation effective par des mesures expérimentales ne leur permet pas de conclure précisément. D'autre part, l'école "russe" fait confiance à la formulation réfractive, plus simple à mettre en oeuvre à l'échelle aéroportée ou satellitaire (Reutov et Shutko, 1992). Comme dans le cas des végétaux, ces différentes études sont conduites à basses fréquences (<18GHz). Le domaine (20GHz-40GHz) en particulier est rarement évoqué. England *et al.* (1992) proposent une approche simplifiée à 37 et 85.5GHz négligeant l'influence des paramètres de porosité du sol:

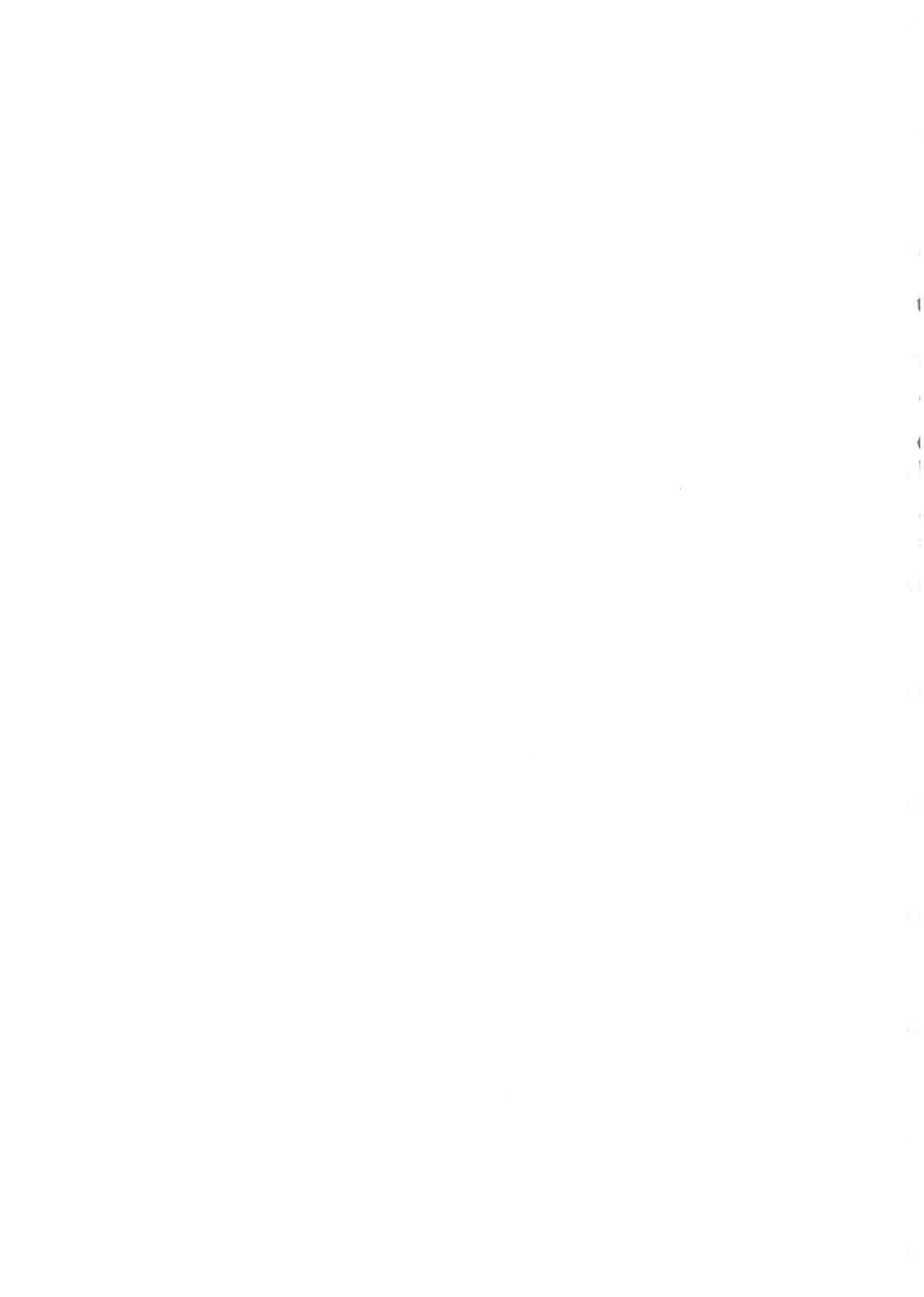
$$\epsilon_2 = \epsilon_{7\%} + m_v \cdot \epsilon_w \quad (3-108)$$

où m_v et ϵ_w désignent respectivement la fraction volumique et la constante diélectrique de l'eau libre du sol. La constante diélectrique $\epsilon_{7\%}$ du sol à 7% d'humidité est estimée ou mesurée. Isaacs *et al.* (1989), considérant que la constante diélectrique de l'eau liée et de la matière solide varient peu avec la fréquence, et que la formule de Debye reste valable pour l'eau libre, étendent la formulation de Wang et Schmugge à 35GHz.

Par ailleurs, Jackson et O'Neill (1986, 1987, 1990) étudient les effets de la structure (agrégats du sol), de la salinité et de la matière organique sur l'émission des sols. Au travers de ces travaux, il apparaît que l'influence de ces divers paramètres sur la permittivité du sol reste limitée dans la plupart des applications.

3.2.2 Rugosité de surface

Différentes approches physiques permettent de rendre compte de la rugosité du sol. Leur domaine de validité est fonction de la fréquence de la mesure et des paramètres caractéristiques de rugosité,



classiquement l'écart type des variations de hauteur σ , la longueur de corrélation de surface l_σ et le *rms surface slope* m , définis pour une fonction de corrélation gaussienne par $m=(2)^{1/2}\sigma/l_\sigma$. Ces derniers paramètres décrivent la variation statistique de la composante aléatoire de hauteur de surface du sol (Ulaby *et al.*, 1981 p.822).

Dans un premier temps, trois approches théoriques ont été utilisées pour décrire l'interaction d'une surface rugueuse avec une onde E.M. (Ulaby *et al.*, 1981):

- le modèle géométrique-optique (GO) (modèle de Kirchhoff dans l'approximation de phase stationnaire).

- le modèle physique-optique (PO) (modèle de Kirchhoff dans l'approximation scalaire).

- le modèle des faibles perturbations (SPM).

Initialement, l'approche de Kirchhoff fut introduite pour estimer l'émission des surfaces par Fung et Eom (1981). Parallèlement, Tsang et Newton (1982), se fondent sur la théorie de Kirchhoff, pour intégrer dans le calcul de l'émission les termes de réflectivité cohérente et incohérente; alors que le modèle géométrique-optique prend seulement en compte la réflectivité incohérente. Tsang et Newton relient les coefficients bistatiques à l'émissivité par l'intermédiaire de l'expression de Peake.

Le domaine de validité des trois approches SPM, PO et GO a été évalué par Ulaby *et al.* (1990) et par Oh *et al.* (1992) dans l'espace délimité par les variables $k_0\sigma$ et k_0l_σ . En confrontant ces modèles avec des mesures radar acquises pour des conditions variées d'humidité et de rugosité de surface, Oh *et al.* constatent en particulier que: (i) certaines surfaces naturelles tombent hors du domaine de validité des modèles (ii) aucun de ces modèles ne s'accorde bien avec les données mesurées, en particulier pour des incidences supérieures à 40°.

Faisant suite aux modèles de Kirchhoff, d'autres approches théoriques ont été développées. Elles recherchent un domaine de validité en fréquence plus étendu: méthode des moments, Integral Equation Model (I.E.M.) (Fung et Pan, 1987; Chen *et al.*, 1989; Fung *et al.*, 1992), Unified Perturbation Model (UPM) (Kim et Rodriguez, 1992). Ces approches s'inter-valident sur des surfaces de simulation (Gaussienne à une ou deux dimensions..). Elles sont complexes et difficiles à valider (Jackson and Schmugge, 1989).

Cherchant à répondre aux problèmes de mise en oeuvre et de validation des modèles théoriques, diverses approches empiriques ou semi-empiriques ont été décrites. Dans l'actif, Oh *et al.* (1992) s'appuient sur un important jeu de données expérimentales, pour développer un modèle de diffusion empirique. Dans le passif, les approches semi-empiriques proviennent pour la plupart de l'expression de réflectivité modifiée $\Gamma^m(\theta,p)$, décrite par Choudhury *et al.* (1979):

$$\Gamma^m(\theta,p) = \Gamma^{sp}(\theta,p).\exp(-h_r \cos^2\theta) \quad (3-109)$$

où $\Gamma^{sp}(\theta,p)$ désigne la réflectivité spéculaire de Fresnel de polarisation p ($p=v$ ou $p=h$, pour vertical ou horizontal), θ est l'angle d'incidence de la radiation sur le sol. h_r est un paramètre qui serait relié à basses fréquences au nombre d'onde k_0 et à σ selon:

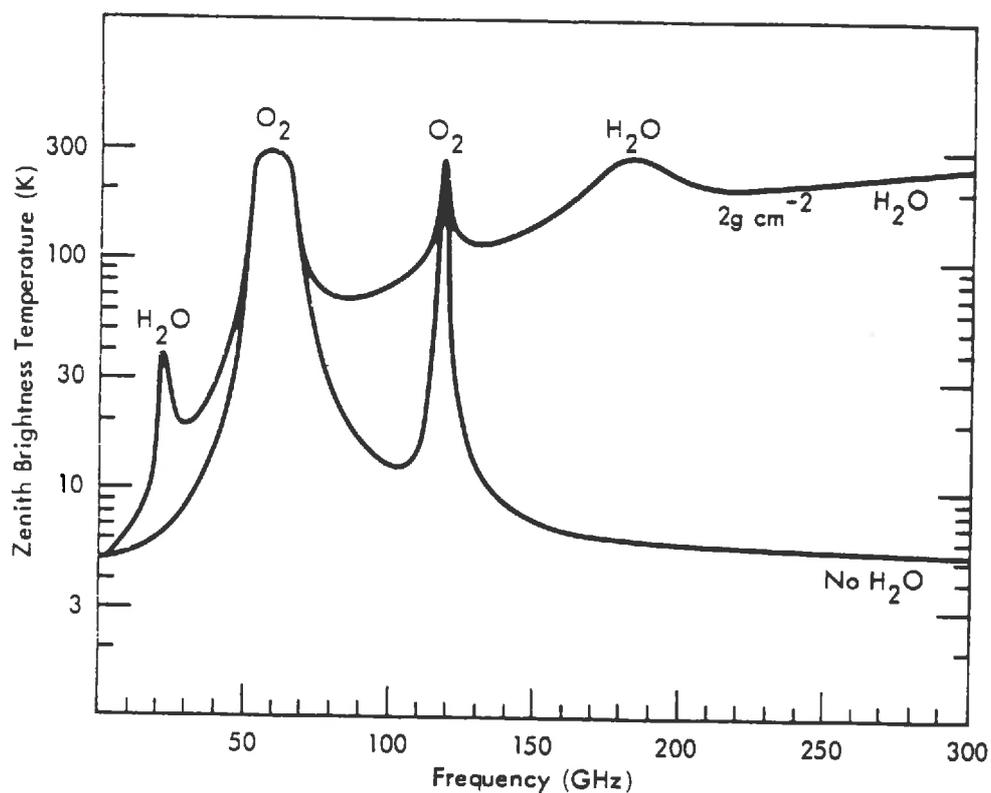
$$h_r = 4k_0^2\sigma^2 \quad (3-110)$$

En pratique c'est un paramètre ajusté pour assurer une bonne correspondance entre mesures et simulations. Wang et Choudhury (1981), complètent cette approche en introduisant un paramètre Q (*polarization-mixing parameter*):

$$\Gamma^m(\theta,p) = [(1-Q).\Gamma^{sp}(\theta,p) + Q.\Gamma^{sp}(\theta,q)].\exp(-h_r \cos^n\theta) \quad (3-111)$$

avec $n = 0, 1$ ou 2 .

Le choix de la valeur de n est discutée dans de nombreux travaux (Wang et Choudhury, 1981; Wang *et al.*, 1983; Jin et Isaacs, 1987; Jackson et Schmugge, 1989). Aucun résultat n'est clairement établi à ce sujet, la valeur $n=2$ paraissant la plus pertinente pour reproduire les variations angulaires d'émissivité



Sky radiometric temperature that would be observed by an upward-looking radiometer. In the zenith direction for frequencies between 1 and 300 GHz: brightness temperature of the downwelling atmospheric radiation, T_{DN} , plus 3 K of cosmic radiation incident on the atmosphere from the top (Waters, 1976). The upper and lower curves correspond to $M_v = 2 \text{ g cm}^{-2}$ and 0 g cm^{-2} , respectively.

Figure 3-2: Niveaux d'absorption des radiations électromagnétiques par la vapeur d'eau et l'oxygène (d'après Ulaby et al. (1981)).

du sol. Ces approches semi-empiriques présentent les avantages de relative efficacité et de simplicité. Elles sont fréquemment mises en oeuvre dans des études confrontant données télédéteectées et simulations (Mo *et al.*, 1982; Jin and Isaacs, 1987; Kerr and Njoku, 1990) et sont recommandées par Jackson et Schmugge (1989) de préférence aux approches théoriques pour estimer l'humidité des sols. Mo et Schmugge (1987) et Mo *et al.* (1987) proposent un modèle composite combinant les approches théoriques et semi-empiriques. La réflectivité est décrite comme somme d'une composante cohérente donnée par l'équation (3-111) et d'une composante incohérente se fondant sur la théorie de Kirchhoff. Ils introduisent par ailleurs "l'effet d'ombre" d'une surface rugueuse.

L'ensemble de ces approches de la rugosité est trop rarement confronté à des données expérimentales précises, c'est à dire sous des conditions strictes d'étalonnage des radiomètres, de contrôle du profil d'humidité et de l'état des surfaces. Aussi l'appréciation de leur efficacité pour rendre compte de la rugosité des sols reste encore subjective.

3.3 L'atmosphère

Un des grands atouts des ondes hyperfréquences réside dans leur faible sensibilité aux effets de l'atmosphère. Encore cette affirmation doit-elle être relativisée car les hyperfréquences sont également de très bons outils de sondage de l'atmosphère. Les grands traits de la prise en compte des effets atmosphériques sur la mesure de température de brillance des couverts seront développés dans ce paragraphe.

3.3.1 Caractérisation des effets atmosphériques

Divers constituants de l'atmosphère interagissent avec le signal hyperfréquence. Leur influence dépend de la fréquence de la radiation. La figure (3-2) décrit les contributions de l'oxygène et de la vapeur d'eau à l'émission, et donc à l'absorption, dans la gamme des hyperfréquences. Les bandes de fréquence [1-15GHz] et [30-40GHz] constituent des fenêtres privilégiées d'observation de la terre, pour lesquelles l'absorption gazeuse est très limitée. Les bandes d'absorption liées à la résonance moléculaire de la vapeur d'eau (à 22.2 et 183.3GHz) et de l'oxygène (région de 50 à 70GHz et à 118.7GHz) sont couramment utilisées par les sondeurs de profil verticaux de température ou d'humidité, embarqués en particulier sur les satellites Nimbus 5-6 et 7 et TIROS-N (Ulaby *et al.*, 1981). La dimension des constituants atmosphériques détermine le type d'interaction entre la radiation E. M. et la matière. La diffusion de Rayleigh ou de Mie pour des particules sphériques, permet de prendre en compte l'interaction de l'onde E.M. avec les particules d'eau ou de glace. Les conditions atmosphériques de ciel clair ou de nuages (sans précipitations) satisfont au critère de Rayleigh dans le domaine de fréquence jusqu'à environ 50GHz (Tsang *et al.*, 1977). L'influence de l'absorption moléculaire de l'eau et de l'oxygène y est seule à considérer. Pour des particules de quelques millimètres de rayon, l'approximation de Rayleigh reste valable pour rendre compte des effets des précipitations ou des nuages de glace. Diverses formulations semi-empiriques et physiques modélisent précisément l'ensemble de ces effets, lorsque l'atmosphère est bien caractérisée en terme de contenu en eau, de hauteur des nuages ou d'intensité des précipitations (Crane, 1971; Waters, 1976; Hofer et Njoku, 1981; Ulaby *et al.*, 1981; Smith, 1982).

3.3.2 Influence de l'atmosphère sur la mesure de température de brillance

L'influence de l'atmosphère sur une mesure de température de brillance de la surface terrestre, observée depuis l'espace, est double. D'une part l'atmosphère contribue à l'émission, par une

composante atmosphérique descendante T_{ad} , réfléchi par la surface puis atténuée par l'atmosphère, et par une composante atmosphérique montante T_{am} . D'autre part, il affecte également l'émission terrestre T_{bp} , sujet de cette étude, qui est atténuée au cours de son trajet. L'émission globale T_{Bp} s'écrit en terme de température de brillance (Kerr and Njoku, 1990):

$$T_{Bp} = T_{bp} \cdot \exp(-\tau_{am}) + T_{am} + \exp(-\tau_{am}) \cdot (T_{ad} + T_{cos} \cdot \exp(-\tau_{ad})) \cdot r_p \quad (3-112)$$

où τ_{am} et τ_{ad} désignent l'épaisseur optique de l'atmosphère pour un trajet de la radiation respectivement montant et descendant, T_{cos} désigne l'émission cosmique et galactique, r_p est un terme de réflectivité au niveau de la surface, p désigne la polarisation ($p=v$ ou $p=h$). Les différents termes atmosphériques τ_{ad} , τ_{am} , T_{am} et T_{ad} se modélisent selon des approches référencées dans la partie précédente. L'influence de l'atmosphère sur la mesure a parfois été négligée. Kerr et Njoku (1991) montrent que, particulièrement pour les hautes fréquences, cette influence est très significative. A 37GHz la présence de nuages masque partiellement l'évolution du signal liée à l'émission de surface. Aussi la prise en compte précise des effets de l'atmosphère doit-elle être un trait marquant des études et modèles fondés sur des données satellitaires (Isaacs *et al.*, 1989; Kerr et Njoku, 1990; Choudhury *et al.*, 1990; Kerr et Njoku, 1992; Tucker, 1992; Calvet *et al.*, 1992). Ces corrections impliquent alors une caractérisation de l'atmosphère, proche géographiquement et temporellement des observations faites par télédétection.

Partie II

Modélisation continue et discrète

Chapitre 4

Modèles continu et discret

Dans le cadre de ce travail deux modèles de simulation de l'émission hyperfréquence d'un couvert végétal ont été développés. Pour prendre en compte la diffusion de volume au sein du couvert, ces modèles s'appuient sur une résolution identique des équations du transfert radiatif par la méthode de Gauss (Tsang et Kong, 1980). La modélisation des paramètres d'entrée de ces modèles (température de brillance du ciel et du sol; constante diélectrique de la végétation) est également commune. La partie distincte porte sur la modélisation physique du couvert, qui est conduite selon une approche soit discrète, soit continue. Cette approche détermine la nature des matrices de phase et des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction au sein du couvert. Les matrices de phase du milieu continu à fortes fluctuations diélectriques sont formulées par Jin (1989). Les matrices de diffusion des feuilles (ellipsoïdes) et des branches (cylindres) dans l'approche discrète proviennent des travaux de Karam *et al.* (1988, 1989, 1992) dans l'actif. Les principes et les équations sur lesquels est fondé la modélisation numérique de ces approches, sont étudiés précisément dans ce chapitre.

4.1 Résolution des équations de transfert radiatif

Le régime radiatif au sein du couvert est décrit par les équations du transfert radiatif (Chandrasekhar, 1960). Cette approche permet de rendre compte des effets de diffusion multiple, qui sont marqués dans un couvert végétal où les éléments diffusants (feuilles, branches, fruits..) présentent un fort contraste diélectrique avec l'air ambiant. La mise en oeuvre des méthodes de résolution itératives ou numériques impose la structuration du couvert végétal, en strates planes homogènes et infiniment étendues. S'appuyant sur les travaux sur l'atmosphère de Chandrasekhar (1960), Tsang et Kong (1980) et Jin et Isaacs (1987) proposent une résolution numérique du transfert radiatif dans un couvert à deux strates, encadré par deux demi-espaces: le sol et l'atmosphère. Le formalisme mathématique qu'ils décrivent, réduit la dimension des variables matricielles par un facteur 2, par rapport à l'approche classique (Ulaby *et al.*, 1981). Les modèles continu et discret que nous décrivons dans ce chapitre, ne comportent qu'une seule strate de végétation, et les équations sont déduites des références pré-citées. Le couvert végétal est délimité par deux interfaces avec le sol et l'atmosphère, aux cotes respectives $z=-d$ et $z=0$. Les indices 0, 1 et 2 se référeront respectivement au sol, à la végétation et à l'atmosphère (figure 4-1). Le système intégral-différentiel des équations de transfert radiatif est transformé en système vectoriel d'équations homogènes par la méthode de quadrature de Gauss. L'injection des conditions aux limites et d'une solution particulière dans les équations, permet d'exprimer la température de brillance du couvert.

4.1.1 Résolution du système linéaire différentiel des équations homogènes

Au sein du couvert végétal, les équations de transfert radiatif s'écrivent pour une radiation d'intensité T (exprimée en terme de température de brillance), se propageant dans la direction θ ($0 < \theta < \pi/2$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu \cdot dT_v(\theta, z)/dz = k_a T_1(z) - k_{e_v}(\theta) \cdot T_v(\theta, z) + \int_{-1}^1 ((v, v') \cdot T_v(\theta', z) + (v, h') \cdot T_h(\theta', z)) d\mu' \\ -\mu \cdot dT_v(\pi - \theta, z)/dz = k_a T_1(z) - k_{e_v}(\pi - \theta) \cdot T_v(\pi - \theta, z) + \int_{-1}^1 ((v(\pi - \theta), v') \cdot T_v(\theta', z) + (v(\pi - \theta), h') \cdot T_h(\theta', z)) d\mu' \end{array} \right. \quad (4-1)$$

où $\theta = \cos^{-1}(\mu)$ et $\theta' = \cos^{-1}(\mu')$; les indices v et h se réfèrent respectivement aux polarisations verticale et horizontale; k_a et k_e 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. Ces équations sont écrites pour une onde polarisée verticalement; elles seraient identiques pour la polarisation horizontale.

Par discrétisation de la variable θ , par la méthode de quadrature de Gauss (Choe et Tsang, 1983), les équations (4-1) et (4-2) deviennent:

$$\mu_j \cdot dT_{v_j}(\theta, z)/dz = k_a T_1(z) - k_{e_{v_j}}(\theta) \cdot T_{v_j}(\theta, z) + \sum_{k=1}^n a_k \cdot ((v_j, v_k) \cdot T_{v_k} + (v_j, v_{-k}) \cdot T_{v_{-k}} + ((v_j, h_k) \cdot T_{h_k} + (v_j, h_{-k}) \cdot T_{h_{-k}})) \quad (4-3)$$

$$\mu_{-j} \cdot dT_{v_{-j}}(\theta, z)/dz = k_a T_1(z) - k_{e_{v_{-j}}}(\theta) \cdot T_{v_{-j}}(\theta, z) + \sum_{k=1}^n a_k \cdot ((v_{-j}, v_k) \cdot T_{v_k} + (v_{-j}, v_{-k}) \cdot T_{v_{-k}} + ((v_{-j}, h_k) \cdot T_{h_k} + (v_{-j}, h_{-k}) \cdot T_{h_{-k}})) \quad (4-4)$$

où les $2n$ zeros μ_j et les $2n$ fonctions de poids de Christoffel a_j vérifient les relations ($j=1, 2, \dots, n$):

$$\begin{array}{l} -1 < \mu_j < 1, \\ \mu_j = -\mu_{-j} \\ a_j = a_{-j} \end{array}$$

Pour simplifier le formalisme mathématique de ces équations nous définissons les variables T_a et T_s selon:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{a_{v_j}} = T_{v_j} + T_{v_{-j}} \\ T_{s_{v_j}} = T_{v_j} - T_{v_{-j}} \end{array} \right. \quad (4-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{a_{v_j}} = T_{v_j} + T_{v_{-j}} \\ T_{s_{v_j}} = T_{v_j} - T_{v_{-j}} \end{array} \right. \quad (4-6)$$

Dans un premier temps nous résolvons le système d'équations homogènes, obtenu en l'absence du terme source $k_a T_1$. En combinant les équations (4-3), (4-4), (4-5) et (4-6), nous obtenons le système des équations homogènes:

$$\left\{ \begin{array}{l} MU \cdot dTs/dz = A \cdot Ta \\ MU \cdot dTa/dz = W \cdot Ts \end{array} \right. \quad (4-7)$$

avec $A = -Ke + F \cdot a + B \cdot a$

$$W = -Ke + F \cdot a - B \cdot a$$

$$MU = \text{diag}[\mu_1, \dots, \mu_n, \mu_1, \dots, \mu_n]$$

$$Ta = [Tv_1 + Tv_{-1}, \dots, Tv_n + Tv_{-n}, Th_1 + Th_{-1}, \dots, Th_n + Th_{-n}]^t$$

$$Ts = [Tv_1 - Tv_{-1}, \dots, Tv_n - Tv_{-n}, Th_1 - Th_{-1}, \dots, Th_n - Th_{-n}]^t$$

$$a = \text{diag}[a_1, \dots, a_n, a_1, \dots, a_n]$$

$$Ke = \text{diag}[Ke_{v_1}, \dots, Ke_{v_n}, Ke_{h_1}, \dots, Ke_{h_n}] \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned}
 F = & \begin{bmatrix} (v_1, v_1) \dots (v_1, v_n) & (v_1, h_1) \dots (v_1, h_n) \\ \vdots & \vdots \\ (v_n, v_1) \dots (v_n, v_n) & (v_n, h_1) \dots (v_n, h_n) \\ (h_1, v_1) \dots (h_1, v_n) & (h_1, h_1) \dots (h_1, h_n) \\ \vdots & \vdots \\ (h_n, v_1) \dots (h_n, v_n) & (h_n, h_1) \dots (h_n, h_n) \end{bmatrix} \\
 B = & \begin{bmatrix} (v_1, v_1) \dots (v_1, v_n) & (v_1, h_1) \dots (v_1, h_n) \\ \vdots & \vdots \\ (v_n, v_1) \dots (v_n, v_n) & (v_n, h_1) \dots (v_n, h_n) \\ (h_1, v_1) \dots (h_1, v_n) & (h_1, h_1) \dots (h_1, h_n) \\ \vdots & \vdots \\ (h_n, v_1) \dots (h_n, v_n) & (h_n, h_1) \dots (h_n, h_n) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4-9}$$

Les variables discrétisées sont maintenant décrites selon un formalisme vectoriel. La quadrature de Gauss a donc permis de transformer le système intégral-différentiel scalaire (4-1) et (4-2), en un système linéaire différentiel (4-7) à variables vectorielles. Ce système (4-7) d'équations homogènes est résolu par diagonalisation matricielle; le $j^{\text{ème}}$ vecteur propre Ta_j et la $j^{\text{ème}}$ valeur propre α_j sont solutions de l'équation aux $2.n$ valeurs propres:

$$(MU^{-1}.W.MU^{-1}.A - \alpha_j^2).Ta_j = 0 \tag{4-10}$$

Les valeurs et vecteurs propres de la $2.n$ matrice $MU^{-1}.W.MU^{-1}.A$ sont déterminés numériquement (procédure f02agf, NAG (1990)). Notons que les valeurs propres de cette matrice singulière sont toutes réelles et opposées deux à deux (soit λ_j ($j=1, \dots, n$) et $-\lambda_j$ ($j=1, \dots, n$)). La forme générale des solutions Ta et Ts du système (4-7) s'exprime en fonction de ces variables propres et des coefficients vectoriels x_0 et y_0 selon:

$$\begin{cases} Ta = 2.[E.D(z).x_0 + E.U(z+d)y_0] \\ Ts = 2.[Q.D(z).x_0 - Q.U(z+d)y_0] \end{cases} \tag{4-11}$$

où

$$\begin{aligned}
 Q &= MU^{-1}.A.E.\alpha^{-1} \\
 \alpha &= \text{diag}[\alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{2n}] \\
 E &= [Ta_1, \dots, Ta_j, \dots, Ta_{2n}] \quad (\text{matrice des vecteurs propres}) \\
 D(z) &= \text{diag}[\exp(\alpha_1.z), \dots, \exp(\alpha_j.z), \dots, \exp(\alpha_{2n}.z)] \\
 U(z) &= \text{diag}[\exp(-\alpha_1.z), \dots, \exp(-\alpha_j.z), \dots, \exp(-\alpha_{2n}.z)]
 \end{aligned} \tag{4-12}$$

Les valeurs de x_0 et y_0 sont déterminées en injectant les conditions aux limites dans le système linéaire matriciel (4-11).

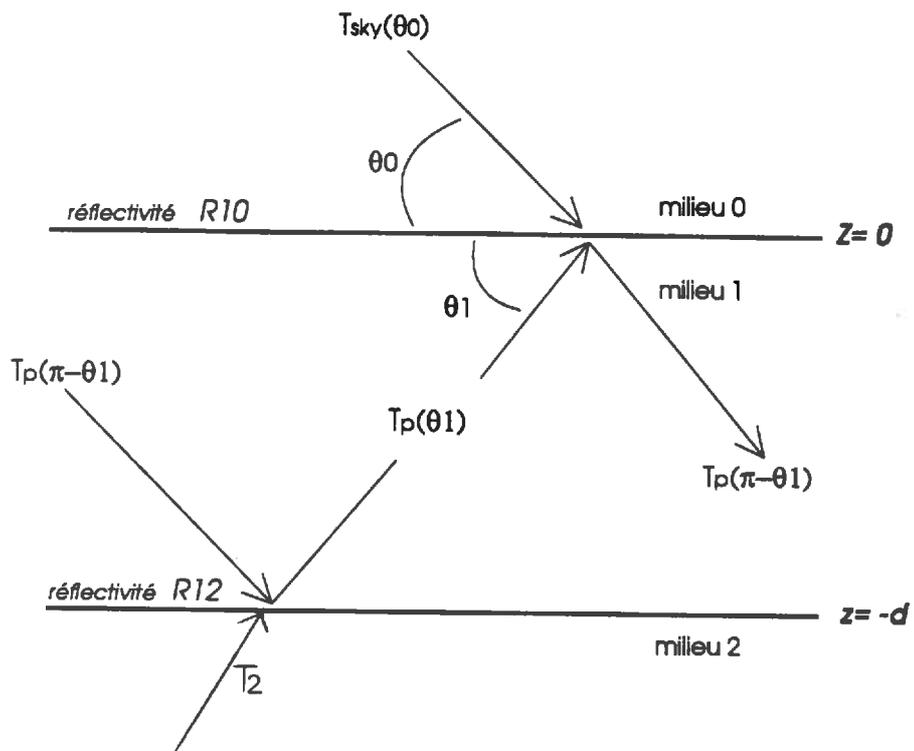


Figure 4-1: Géométrie du problème des conditions aux limites, à l'interface sol-végétation et végétation-atmosphère.

4.1.2 Calcul de la température de brillance du couvert

4.1.2.1 Solution particulière des équations de transfert radiatif

La solution générale du système d'équations (4-1) et (4-2) s'obtient en sommant les solutions (4-11) du système d'équations homogènes avec une solution particulière. Cette solution particulière peut se déterminer sous forme analytique simple lorsque le profil en température au sein du couvert ($T_1(z)$) est une fonction polynomiale de la hauteur (z) dans le couvert. Nous nous sommes limité dans un premier temps à la prise en compte d'un profil de température linéaire au sein de la végétation. $T_1(z)$ peut alors s'écrire:

$$T_1(z) = T_1^0 + (z+d) \cdot \Gamma_1 \quad (4-13)$$

où T_1^0 est la température de la végétation au niveau du sol, et Γ_1 désigne le gradient de température dans le couvert.

Dans ces conditions une solution particulière (T_{a0}, T_{s0}) du système d'équations (4-1) et (4-2) s'écrit:

$$\begin{cases} T_{a0} = 2[T_1^0 + \Gamma_1 \cdot (z+d)] \\ T_{s0} = -2\Gamma_1 [\mu/Ka] \end{cases} \quad (4-14)$$

En sommant cette solution particulière avec la solution des équations homogènes obtenue au paragraphe précédent, la solution générale des équations de transfert radiatif prend la forme:

$$\begin{cases} T_a = 2[T_1^0 + \Gamma_1(z+d) + E \cdot D(z) \cdot x_0 + E \cdot U(z+d) \cdot y_0] \\ T_s = 2[-\Gamma_1 \mu / Ka + Q \cdot D(z) \cdot x_0 - Q \cdot U(z+d) \cdot y_0] \end{cases} \quad (4-15)$$

avec

$$\begin{aligned} T_1^0 &= [T_1^0, \dots, T_1^0]^t \quad \text{et} \quad \Gamma_1 = [\Gamma_1, \Gamma_1, \dots, \Gamma_1]^t \\ \Gamma_1 \mu / Ka &= [\Gamma_1 \mu_1 / Ka_{v1}, \dots, \Gamma_1 \mu_n / Ka_{vn}, \Gamma_1 \mu_1 / Ka_{a1}, \dots, \Gamma_1 \mu_n / Ka_{an}]^t \end{aligned} \quad (4-16)$$

4.1.2.2 Conditions aux limites aux interfaces sol-végétation et végétation-atmosphère

Les conditions aux limites permettent la détermination des deux vecteurs x_0 et y_0 , seules inconnues du système d'équations (4-15). A l'interface sol-végétation, la radiation $T_p(\theta_1)$ se propageant vers le haut dans le couvert s'écrit comme somme de la radiation descendante $T_p(\pi-\theta_1)$ réfléchiée par le sol et de la radiation émise par le sol (figure 4-1). A l'interface végétation-atmosphère la radiation descendante $T_p(\pi-\theta_1)$ s'écrit comme somme de la radiation montante $T_p(\theta_1)$ réfléchiée à l'interface et de l'émission atmosphérique descendante et transmise à l'interface. Dans un premier temps, les phénomènes de réfraction et transmission seront modélisés selon l'approche de Fresnel, valide pour des interfaces planes. Les conditions aux limites s'écrivent alors:

$$\begin{aligned} \text{*pour } z=0: & \quad T_p(\pi-\theta_1) = (1-r_{10p}) \cdot T_{sky}(\theta_0) + r_{10p} \cdot T_p(\theta_1) \\ \text{*pour } z=-d: & \quad T_p(\theta_1) = r_{12p} \cdot T_p(\pi-\theta_1) + (1-r_{12p}) \cdot T_2 \end{aligned} \quad (4-17)$$

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

$$T_{jp} = (1-r_{10p}) \cdot T_{sky}(\theta_0) + r_{10p} \cdot T_{jp}$$

$$T_{jp} = r_{12p} \cdot T_{jp} + (1 - r_{12p}) \cdot T_2 \quad (4-18)$$

où θ_1 et θ_2 sont reliés par la loi de Snell-Descartes, p ($p = v$ ou h) désigne la polarisation de l'onde. En posant $p_{mnp} = 1 + r_{mnp}$ et $v_{mnp} = 1 - r_{mnp}$ ($m, n = 0, 1$ ou 2), les conditions aux limites deviennent pour les variables vecteurs Ta et Ts :

$$\begin{cases} V_{10} \cdot Ta - P_{10} \cdot Ts = 2 \cdot V_{10} \cdot Tsky \\ V_{12} \cdot Ta + P_{12} \cdot Ts = 2 \cdot V_{12} \cdot T_2 \end{cases} \quad (4-19)$$

avec

$$\begin{aligned} V_{12} &= \text{diag}[v_{v12}(\theta=\theta_1), \dots, v_{v12}(\theta=\theta_n), v_{h12}(\theta=\theta_1), \dots, v_{h12}(\theta=\theta_n)] \\ V_{10} &= \text{diag}[v_{v10}(\theta=\theta_1), \dots, v_{v10}(\theta=\theta_n), v_{h10}(\theta=\theta_1), \dots, v_{h10}(\theta=\theta_n)] \\ P_{12} &= 2 \cdot I - V_{12}, \quad P_{10} = 2 \cdot I - V_{10} \\ Tsky &= [Tsky_{1v}, \dots, Tsky_{nv}, Tsky_{1h}, \dots, Tsky_{nh}]^t \end{aligned} \quad (4-20)$$

4.1.2.3 Calcul de la température de brillance du couvert

Pour calculer l'expression de l'émission du couvert T_B en terme de température de brillance, nous substituons les conditions aux limites (4-19), dans le système global des équations de transfert radiatif (4-15). Nous obtenons:

$$\begin{cases} (V_{10}E - P_{10}Q)x_0 + (V_{10}E + P_{10}Q)U(d)y_0 = V_{10}(Tsky - T_1^0) - V_{10}\Gamma_1 d - P_{10}\Gamma_1 \mu / Ka \\ (V_{12}E + P_{12}Q)D(-d)x_0 + (V_{12}E - P_{12}Q)y_0 = V_{12}(T_2 - T_1^0) + P_{12}\Gamma_1 \mu / Ka \end{cases} \quad (4-21)$$

La résolution de ce système linéaire matriciel permet le calcul des deux inconnues x_0 et y_0 .

La valeur $T_{Bp}(\theta_0)$ de la température de brillance au sommet du couvert végétal est la somme de la composante $T_p(\theta_1)$ montante au sein du couvert et transmise à l'interface végétation-atmosphère, et de la composante atmosphérique descendante $Tsky(\theta_0)$ réfléchie par l'interface (figure 4-1). Elle s'écrit pour $z=0$:

$$\text{d'où} \quad \begin{cases} T_{Bp}(\theta_0) = v_{10p} \cdot T_p(\theta_1) + r_{10p} \cdot Tsky(\theta_0) \\ T_{Bjp} = v_{10p}(Ta_{jp} + Ts_{jp})/2 + r_{10p} \cdot Tsky_j \end{cases} \quad (4-22)$$

Le formalisme matriciel de cette équation s'écrit alors:

$$T_B = (1/2) \cdot V_{10}(Ta(z=0) + Ts(z=0)) + R_{10} \cdot Tsky \quad (4-23)$$

$$\text{avec} \quad T_B = [T_{Bv1}, \dots, T_{Bvn}, T_{Bh1}, \dots, T_{Bhn}]^t$$

En reportant la valeur de $Ta(z=0)$ et de $Ts(z=0)$ (équations (4-15)) dans l'équation (4-23), nous obtenons l'expression de la valeur de la température de brillance au sommet du couvert T_B :

$$T_B = V_{10} \cdot ((E+Q)x_0 + (E-Q)U(d)y_0) + V_{10}(T_1^0 + \Gamma_1 d - \Gamma_1 \mu / Ka) + R_{01} \cdot Tsky \quad (4-24)$$

La valeur de x_0 and y_0 provient de la résolution du système d'équations (4-21); chaque valeur du vecteur T_B correspond à un angle d'incidence $\theta_j = \cos^{-1} \mu_j$, pour les deux polarisations verticale ($j=1, 2, \dots, n$) et horizontale ($j=n+1, n+2, \dots, 2n$). L'expression des coefficients d'échanges radiatifs et de la

matrice de phase au sein du couvert, permet le calcul des matrices \mathbf{K}_e , \mathbf{F} et \mathbf{B} qui interviennent, de manière sous-jacente, dans cette formulation. Leur expression est propre à la modélisation physique du milieu qui peut être discrète ou continue, dans le cadre de cette étude.

4.2 Milieu continu: calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase.

Le milieu continu, est un milieu décrit par ses propriétés diélectriques, dont les fluctuations spatiales sont caractérisées sur un plan statistique (par la fonction d'autocorrélation de la permittivité R_ϵ). La permittivité diélectrique du milieu ϵ_1 se décompose dans l'espace selon une composante moyenne ϵ_{1m} et une composante aléatoire ϵ_{1f} de moyenne nulle (Tsang and Kong, 1976):

$$\epsilon_1(\mathbf{r}) = \epsilon_{1m} + \epsilon_{1f}(\mathbf{r}) \quad (4-25)$$

$$\epsilon_{1m} = \epsilon'_{1m} + i\epsilon''_{1m} \text{ avec } \epsilon''_{1m} \ll \epsilon'_{1m} \quad (4-26)$$

où \mathbf{r} désigne le vecteur position dans l'espace.

La "structure diélectrique" du milieu est caractérisée par la fonction de corrélation R_ϵ de la permittivité. R_ϵ peut être modélisée *a priori* selon diverses formulations dont la plus classique est gaussienne dans le plan horizontal et exponentielle dans la direction verticale:

$$R_\epsilon(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle \epsilon_f(\mathbf{r}_1) \epsilon_f^*(\mathbf{r}_2) \rangle = \delta \cdot \epsilon'_{1m} \exp(-[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] / l_p^2 - |z_1 - z_2| / l_z) \quad (4-27)$$

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 le terme de variance δ . Le calcul de la matrice de phase du milieu s'en déduit par l'approximation de Born. Tsang et Kong (1981) complètent cette approche en développant la théorie des fortes fluctuations dans le domaine hyperfréquence actif. Cette théorie ne requiert pas le critère de faible fluctuation $\delta \ll 1$, imposé par la précédente approche. Cette théorie permet ainsi de modéliser des milieux à forts contrastes diélectriques: en particulier la neige et les couverts végétaux où siègent un fort contraste entre la végétation et le milieu hôte (l'air ambiant). Jin (1989a) permet d'étendre cette approche au transfert radiatif en calculant la matrice de phase dans le cadre des fortes fluctuations.

Les composantes de la matrice de phase, (v, v') , (v, h') , (h, v') , (h, h') , s'expriment en fonction de trois termes de variance δ_{11} , δ_{13} et δ_{33} selon:

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

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

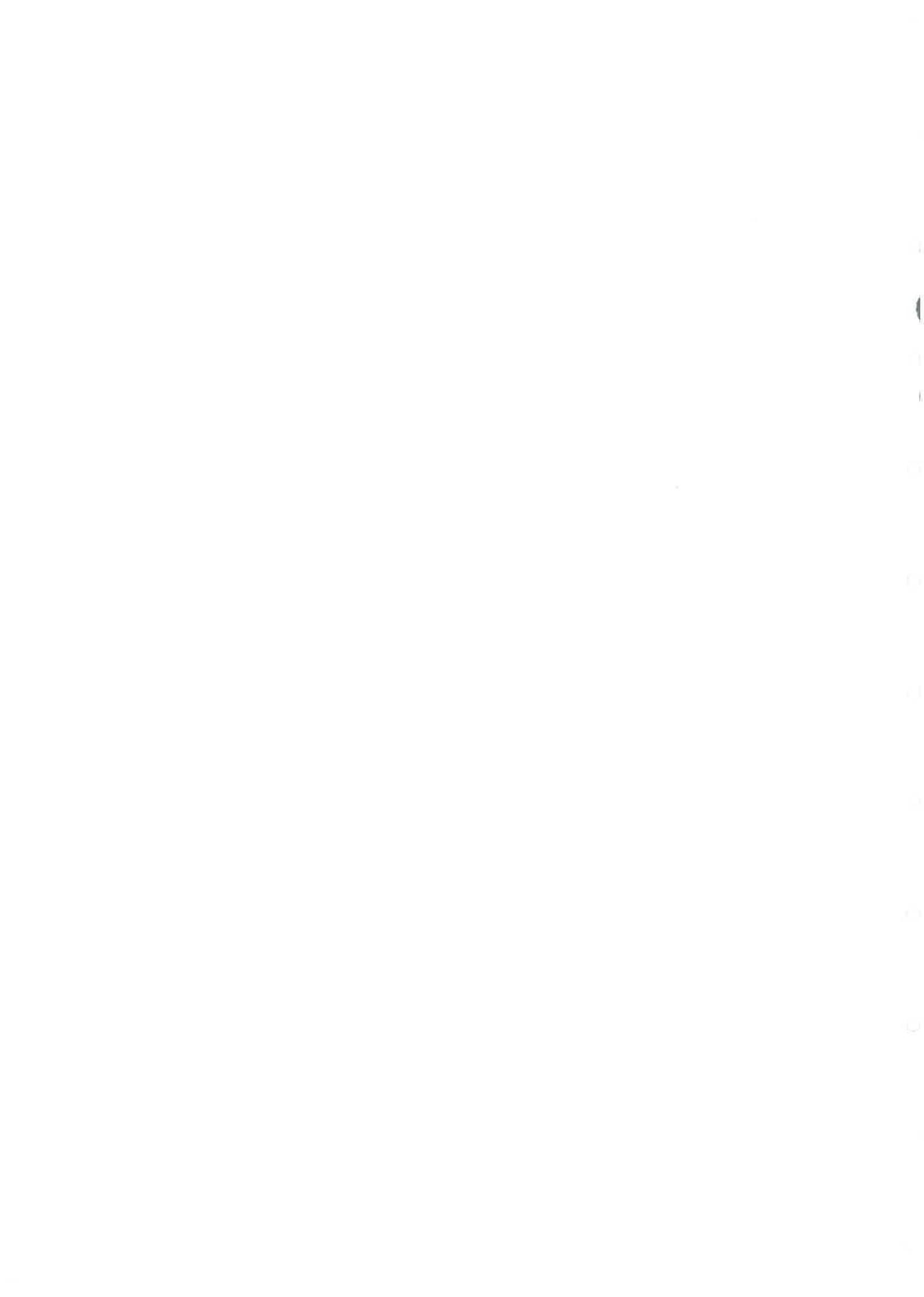
$$(h, v') = \delta_{11} Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} \cdot \cos^2 \theta' [I_0(w) - I_2(w)] / 2$$

$$(h, h') = \delta_{11} Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} [I_0(w) + I_2(w)] / 2 \quad (4-28)$$

avec

$$Q(\theta, \theta') = k_1^4 \cdot l_p^2 / 4 \cdot [l_z / (1 + k_1^2 \cdot l_z^2 (\cos \theta - \cos \theta')^2)] \cdot \exp[-k_1^2 \cdot l_p^2 / 4 \cdot (\sin \theta - \sin \theta')^2]$$

$$w = k_1^2 \cdot l_p^2 / 2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \theta' \quad (4-29)$$



où θ et θ' sont les angles des directions incidente et diffusée; k_1 est le nombre d'onde au sein du couvert végétal; $I_0(w)$, $I_1(w)$, et $I_2(w)$ désignent respectivement les fonctions de Bessel modifiées d'ordre zéro, un et deux.

δ_{11} , δ_{13} et δ_{33} sont fonctions des termes de permittivité ϵ_g et ϵ_{gz} . ϵ_g ($\epsilon_g = \epsilon_{gx} = \epsilon_{gy}$) et ϵ_{gz} sont les composantes du tenseur diagonal de permittivité ϵ , approximation à l'ordre 0 du tenseur de permittivité effective du milieu. δ_{11} , δ_{13} et δ_{33} s'expriment en fonction des variables intermédiaires ξ_x et ξ_z selon:

$$\begin{cases} \delta_{11} = \langle \xi_x \xi_x^* \rangle \\ \delta_{13} = \text{Re}(\langle \xi_x \xi_z^* \rangle) \\ \delta_{33} = \langle \xi_z \xi_z^* \rangle \end{cases} \quad (4-30)$$

avec

$$\begin{cases} \xi_x(r) = (\epsilon(r) - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon(r) - \epsilon_g)) \\ \xi_z(r) = (\epsilon(r) - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon(r) - \epsilon_{gz})) \end{cases} \quad (4-31)$$

et $S = (\epsilon_0 b^{1/2}) / (\epsilon_g (2b^{1/2} + 1))$, $S_z = (\epsilon_0) / (\epsilon_{gz} (2b^{1/2} + 1))$

$$b = \epsilon_g l_z^2 / (\epsilon_{gz} l_p^2) \quad (4-32)$$

ϵ_g et ϵ_{gz} sont déduits de l'équation matricielle: $\langle \xi(r) \rangle = 0$, qui s'écrit pour un milieu à 2 phases (végétation et air ambiant):

$$\begin{cases} f_v \{ (\epsilon_s - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_s - \epsilon_g)) \} + (1 - f_v) \{ (\epsilon_b - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_b - \epsilon_g)) \} = 0 \\ f_v \{ (\epsilon_s - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_s - \epsilon_{gz})) \} + (1 - f_v) \{ (\epsilon_b - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_b - \epsilon_{gz})) \} = 0 \end{cases} \quad (4-33)$$

ϵ_g et ϵ_{gz} sont solutions de ce système d'équations non-linéaires, où f_v désigne la fraction volumique des diffuseurs végétaux (de permittivité ϵ_s) au sein du couvert (de permittivité ϵ_b). La résolution numérique de ce système met en oeuvre une procédure itérative fondée sur l'algorithme de Newton-Raphson (Press *et al.*, 1986). La valeur des termes de variance δ_{11} , δ_{13} et δ_{33} est déduite de ϵ_g et ϵ_{gz} à partir des équations (4-30), (4-31) et (4-32). Pour des valeurs f_v réduites, des formulations simplifiées peuvent être utilisées (Tsang et Kong, 1981). Elles sont valables dans le cadre de cette étude, la valeur de la fraction volumique de la végétation étant très faible (f_v est généralement inférieur à 0.5%). Les valeurs approchées de ϵ_g et ϵ_{gz} s'écrivent alors:

$$\begin{cases} \epsilon_g = \epsilon_b + f_v \{ \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_b) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_s - \epsilon_b)) \} \\ \epsilon_{gz} = \epsilon_b + f_v \{ \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_b) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_s - \epsilon_b)) \} \end{cases} \quad (4-34)$$

et δ_{11} , δ_{13} et δ_{33} sont déduits de ϵ_g et ϵ_{gz} :

$$\begin{cases} \delta_{11} = \langle \xi_x \xi_x^* \rangle = f_v | (\epsilon_s - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_s - \epsilon_g)) |^2 + (1 - f_v) | (\epsilon_b - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_b - \epsilon_g)) |^2 \\ \delta_{13} = \text{Re}(\langle \xi_x \xi_z^* \rangle) = \text{Re} \{ f_v \{ (\epsilon_s - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_s - \epsilon_g)) \} \cdot \{ (\epsilon_s - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_s - \epsilon_{gz})) \}^* \\ + (1 - f_v) \cdot \{ (\epsilon_b - \epsilon_g) / (\epsilon_0 + S(\epsilon_b - \epsilon_g)) \} \cdot \{ (\epsilon_b - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_b - \epsilon_{gz})) \}^* \} \\ \delta_{33} = \langle \xi_z \xi_z^* \rangle = f_v | (\epsilon_s - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_s - \epsilon_{gz})) |^2 + (1 - f_v) | (\epsilon_b - \epsilon_{gz}) / (\epsilon_0 + S_z(\epsilon_b - \epsilon_{gz})) |^2 \end{cases} \quad (4-35)$$

En outre la théorie des fortes fluctuations présente l'avantage de s'affranchir du calcul de la variance δ , qui est une inconnue supplémentaire dans l'approche "faibles fluctuations".

Les coefficients de diffusion k_{sv} and k_{sh} se déduisent des composantes de la matrice de phase, selon la formulation classique:

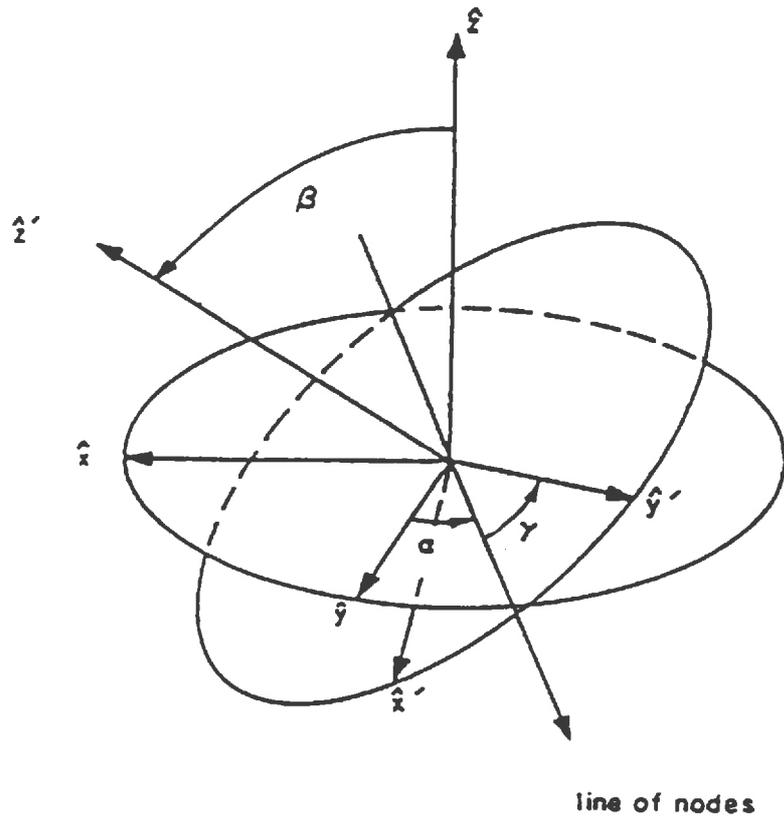


Figure 4-2: Caractérisation par les angles d'Euler de l'orientation relative du repère local à la feuille (R') par rapport au repère de référence (R) (d'après Karam et Fung (1989)).

$$\begin{cases} k_{sv} = \int_0^\pi d\theta' \sin\theta' [(v,v')+(h,v')] \\ k_{sh} = \int_0^\pi d\theta' \sin\theta' [(v,h')+(h,h')] \end{cases} \quad (4-36)$$

Le coefficient d'absorption est exprimé en fonction de la permittivité diélectrique moyenne du couvert végétal:

$$k_a = 2\text{Im}\{k_1\} = 2k_0 \text{Im}\{(\epsilon_{1m}/\epsilon_0)^{1/2}\} \quad (4-37)$$

où $\text{Im}\{\}$ désigne la partie imaginaire, et k_0 le nombre d'onde dans l'espace libre.

Cette paramétrisation du coefficient d'absorption est très sommaire. La formulation (4-37) ne peut rendre compte, en particulier, des effets de la polarisation et de l'angle d'incidence de la radiation.

4.3 Milieu discret: calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de la matrice de phase

4.3.1 Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des feuilles du couvert végétal

Dans les travaux de Karam *et al.* (1988, 1989, 1992) le calcul des matrices de diffusion des ellipsoïdes et des cylindres s'intègre dans la modélisation du coefficient de rétrodiffusion du couvert végétal. De ces travaux, nous avons déduit la matrice de phase et les coefficients d'échanges radiatifs d'un "couvert de feuilles" pour les inclure dans un modèle passif de transfert radiatif. Dans le cadre de cette étude, seules les feuilles du couvert végétal sont modélisées. Ainsi dans un premier temps, les simulations ne prennent pas en compte les branches, troncs, tiges et pétioles qui peuvent être assimilés à des cylindres dans l'approche discrète (Karam et Fung, 1988). Le calcul des matrices de phase des cylindres constitue donc un prolongement naturel et futur de ce travail.

Les feuilles sont assimilées à des disques ou des ellipsoïdes, dont le calcul de la matrice de diffusion est formulé par Karam *et al.* (1988, 1989). Ce calcul se fait dans le cadre de l'approximation de Rayleigh Gans généralisée (GRG). Alors que les approximations de Rayleigh et de Rayleigh Gans sont valables respectivement pour des diffuseurs aux dimensions très réduites ou simplement réduites par rapport à la longueur d'onde λ , l'approximation GRG est valable pour des diffuseurs dont au moins une des dimensions est très réduite par rapport à λ . Le domaine de validité théorique de l'approximation GRG s'étend ainsi jusqu'aux hautes fréquences (de l'ordre de plusieurs dizaines de GHz), pour des feuilles dont l'épaisseur est de quelques dixièmes de mm. Ainsi le domaine de validité du modèle actif du 2^{ème} ordre de Karam *et al.* (1992), s'étendrait jusqu'à 25GHz.

La matrice de phase des feuilles et les coefficients de diffusion et d'absorption du milieu sont déduits du tenseur de diffusion d'amplitude. Dans un premier temps, ce tenseur est calculé dans un repère $R'(x',y',z')$ local à la feuille, puis dans un repère $R(x,y,z)$ de référence. L'orientation de R' par rapport à R est paramétrisée par les angles d'Euler α , β et γ (figure (4-2)). Les directions de la radiation incidente i et diffusée s au niveau de la feuille sont caractérisées par les angles d'inclinaison θ et d'azimut ϕ (figure (4-3)). Les relations entre les expressions de $i(\theta_i, \phi_i)$ et $s(\theta_s, \phi_s)$ dans le repère de référence et $i(\theta'_i, \phi'_i)$ et $s(\theta'_s, \phi'_s)$ dans le repère local à la feuille, sont explicitées dans l'annexe 1.

La composante $F_{pq}(s,i)$ ($p, q = v$ ou h) du tenseur de diffusion d'amplitude est déduite de l'expression de ce même tenseur dans le repère local en écrivant le double produit scalaire:

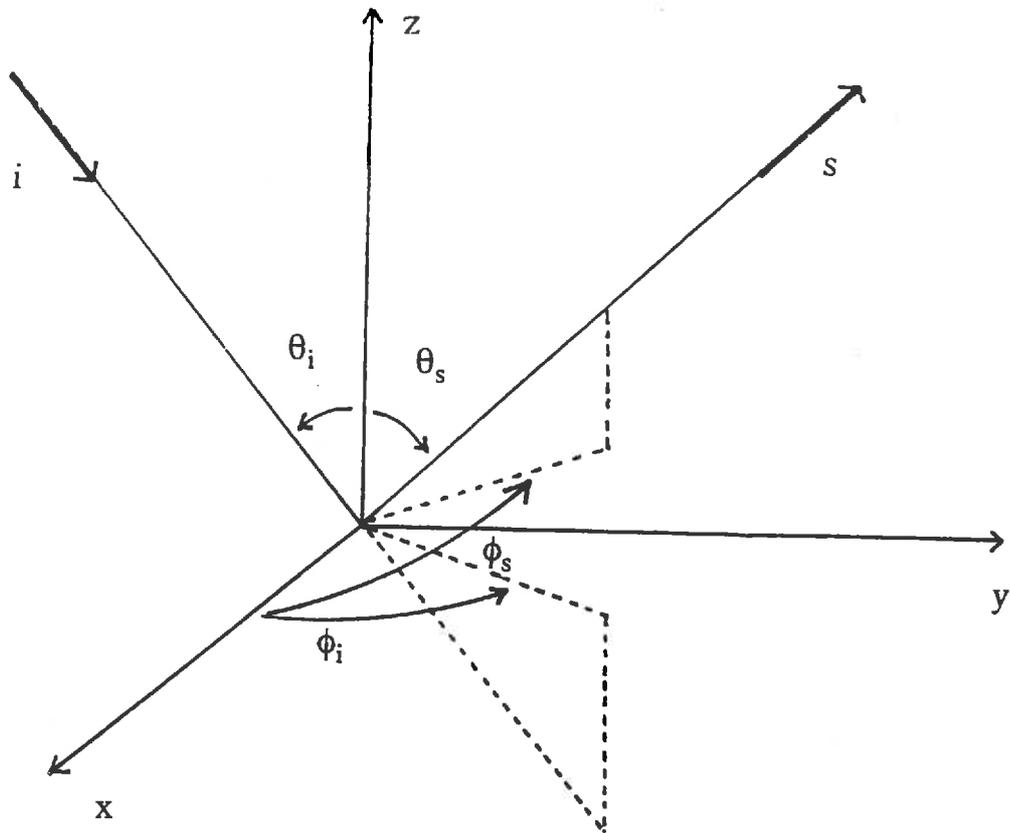


Figure 4-3: Configuration géométrique du problème de la diffusion (d'après Karam et Fung (1989)).

$$F_{pq}(s,i) = p.F'(s,i).q \quad (4-38)$$

où p et q sont les vecteurs de polarisation du champ diffusé. L'expression complète du tenseur de diffusion d'amplitude de l'ellipsoïde, qui découle de cette dernière équation, est donnée en annexe 2.

4.3.2 Calcul des coefficients d'échanges radiatifs et de 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 $F_{pq}(s,i)$. Pour l'ellipsoïde foliaire, la matrice de phase est une moyenne de la matrice de Stokes pondérée par la fonction densité de probabilité en orientation sur les angles α , β et γ . Les troisième et quatrième paramètres de Stokes ont été négligés. Egalement, pour simplifier la modélisation, la distribution en taille des ellipsoïdes n'a pas été prise en compte.

*Les composantes (p,q') de la matrice de phase s'écrivent donc:

$$(p,q') = n_0 \langle |F_{pq}(s,i)|^2 \rangle_{\alpha,\beta,\gamma} \quad (4-39)$$

$\langle \rangle_{\alpha,\beta,\gamma}$ désigne le moyennage sur les angles d'Euler d'orientation de la feuille, n_0 désigne le nombre de feuilles par unité de volume. L'expression (4-39), peut aussi s'écrire en fonction de la distribution densité de probabilité d'orientation des feuilles $p_d(\alpha,\beta,\gamma)$ selon:

$$(p,q') = n_0 \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma |F_{pq}(s,i)|^2 p_d(\alpha,\beta,\gamma) \quad (4-40)$$

*Le coefficient de diffusion est déduit de l'expression des composantes de la matrice de phase, et comme pour le modèle continu, nous avons:

$$\begin{cases} k_{sv}(i) = \int_0^\pi \sin\theta_s d\theta_s \int_0^{2\pi} d\phi_s [(v,v') + (h,v')] \\ k_{sh}(i) = \int_0^\pi \sin\theta_s d\theta_s \int_0^{2\pi} d\phi_s [(v,h') + (h,h')] \end{cases} \quad (4-41)$$

Le coefficient ohmique d'extinction est obtenu via le théorème optique (Tsang *et al.*, 1985):

$$\begin{cases} k_{av}(i) = 4\pi/k \cdot \text{Im}\{ \langle F_{vv}(i,i) \rangle_{\alpha,\beta,\gamma} \} \\ k_{ah}(i) = 4\pi/k \cdot \text{Im}\{ \langle F_{hh}(i,i) \rangle_{\alpha,\beta,\gamma} \} \end{cases} \quad (4-42)$$

où k désigne le nombre d'onde de la radiation ($k=2\pi/\lambda$).

Selon Karam *et al.* (1992), le théorème optique ne prend pas en compte la diffusion dans le cadre des approximations basses fréquences. Aussi le coefficient d'extinction k_{ep} s'écrit comme la somme du terme d'extinction ohmique qui décrit l'absorption, et du coefficient de diffusion:

$$\begin{aligned} k_{ev} &= k_{sv} + k_{av} \\ k_{eh} &= k_{sh} + k_{ah} \end{aligned} \quad (4-43)$$

Comme pour le modèle continu, les expressions des coefficients d'échanges radiatifs k_{ep} , k_{sp} et k_{ap} et de la matrice de phase du milieu sont introduites dans les calculs de résolution du transfert radiatif du paragraphe 4.1. L'expression de la température de brillance au sommet du couvert en découle.

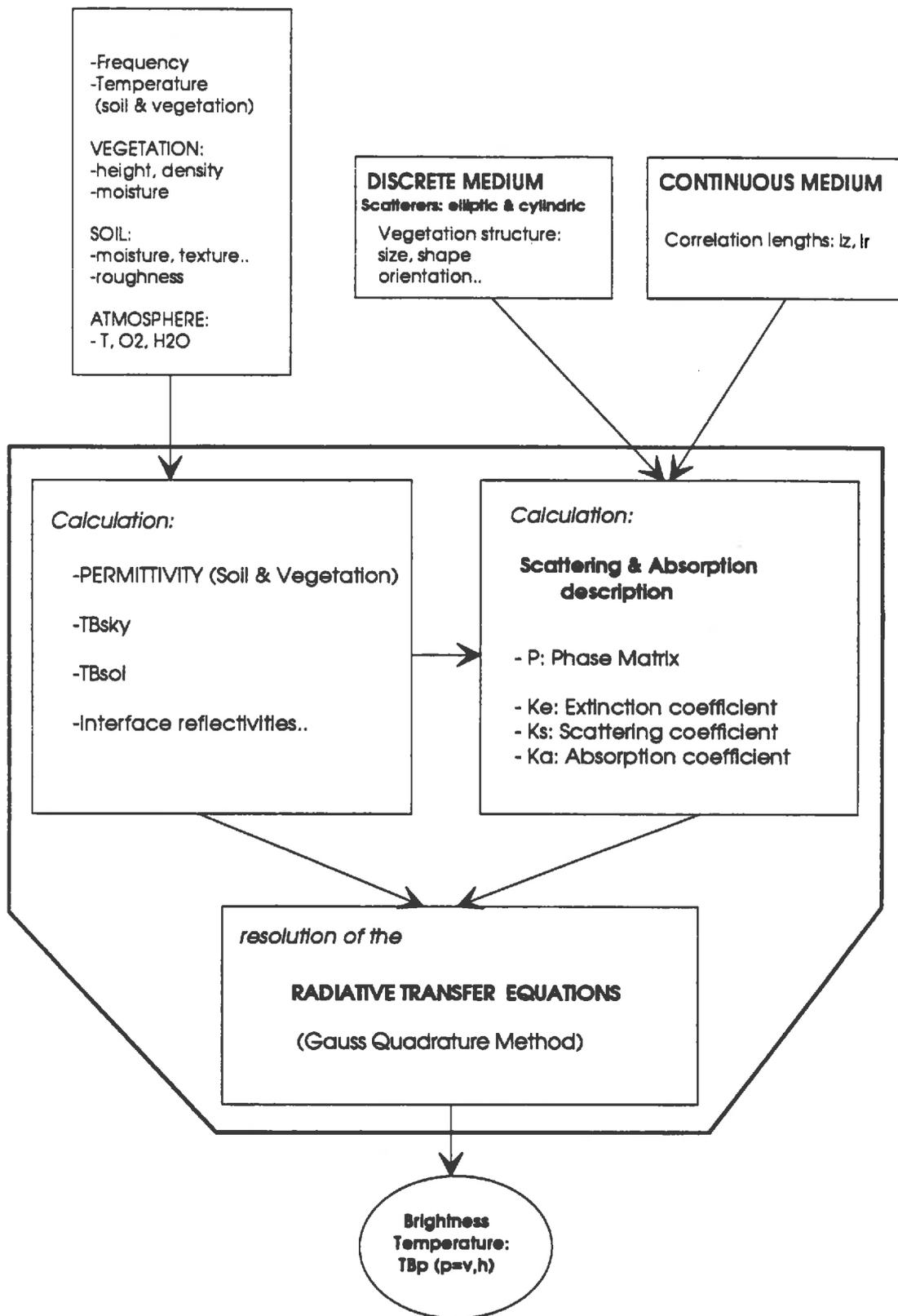


Figure 4-4: Structure générale des modèles continu et discret.

4.4 Structure générale des modèles continu et discret – Données d'entrée et de sortie des simulations

Les données intervenant en entrée et sortie des modèles continu et discret sont récapitulées en annexe 3. D'une manière générale, plusieurs approches permettent d'estimer la valeur des données d'entrée de la simulation. Ainsi certaines de ces entrées sont des données pouvant provenir de mesures directes (hauteur du couvert, dimension des feuilles, humidité et température du sol et de la végétation), de procédure d'inversion (longueurs de corrélation) ou de simulations numériques plus ou moins complexes (température et humidité du sol et du couvert végétal, par exemple).

La structure générale des deux modèles continu et discret est présentée dans la figure (4-4). Trois grandeurs d'entrée 'micro-ondes' des modèles résultent de calculs préliminaires: la température de brillance de l'atmosphère et du sol, et la permittivité diélectrique de la végétation. Leur analyse est présentée dans le chapitre 3. Nous précisons et justifions rapidement dans ce paragraphe l'approche de modélisation que nous avons suivie.

*Nous considérons dans cette étude uniquement la *composante atmosphérique descendante* T_{sky} qui influence les mesures à courte distance (mesures aéroportées ou au sol avec PORTOS). L'influence de l'opacité de l'atmosphère sur une mesure satellite (à grande distance) n'est pas prise en compte. La température de brillance de l'atmosphère est modélisée par ciel clair où seule l'absorption par les molécules de vapeur d'eau et d'oxygène intervient dans l'opacité atmosphérique. L'influence de la diffusion est négligée. Cette modélisation s'appuie sur les formulations reprises par Ulaby *et al.* (1981 p270). Les paramètres d'entrée du calcul de T_{sky} sont les valeurs du profil atmosphérique en température, pression et teneur en eau, classiquement mesurées par les radiosondages de Météo-France. Dans un premier temps, cette approche nous paraît suffisante pour simuler les mesures de PORTOS sur couvert de soja. En effet, l'influence de T_{sky} reste limitée à basses fréquences. Par ailleurs, pour affiner l'estimation de T_{sky} , il serait nécessaire de caractériser précisément la couverture nuageuse simultanément avec la mesure radiométrique; ce qui paraît difficile à concevoir sur l'ensemble d'une campagne de mesure.

*L'émission du sol est prise en compte par l'approche de la réflectivité de Fresnel modifiée de Wang et Choudhury (1981). Dans cette approche les deux paramètres de *rugosité* h_r et Q sont ajustés; leur relation avec la caractérisation de surface du sol n'étant pas établie. L'absence de travaux de synthèse rigoureux sur la rugosité ne permet pas d'envisager la mise en oeuvre d'approches théoriques complexes et non validées. Les travaux de L. Laguerre avec le radiomètre 4.3GHz Marmotte, développé conjointement par le LERTS et le CHS (Centre Hyperfréquences & Semi-conducteurs, Lille) et PORTOS, doivent permettre de mieux caractériser ce terme de rugosité (Kerr, 1992). La *constante diélectrique du sol* qui détermine le calcul de la réflectivité à l'interface sol-végétation est modélisée selon l'approche de Dobson *et al.* (1985), dont les travaux s'appuient sur des techniques précises de mesures de la permittivité (Dobson, 1988) et sur des validations expérimentales conséquentes. Les paramètres d'entrée de cette approche semi-empirique sont facilement accessibles par mesure au sol: teneur en eau gravimétrique (m_v), masse volumique de la matière sèche (ρ_b), fraction gravimétrique en sable (S) et argile (C), et salinité de la solution du sol (σ_s).

*Le calcul de la *permittivité de la végétation* est conduit selon l'approche de Ulaby et El-Reyes (1987), dont les résultats presque universellement utilisés, sont les plus complets à l'heure actuelle. Les paramètres d'entrée de cette approche sont également facilement accessibles: teneur en eau gravimétrique (M_v) et salinité de la solution végétale (σ_v). Seule, l'estimation de la densité de matière sèche (ρ_s) est malaisée à établir.

4.5 Modèle discret de rétrodiffusion radar

Les liens entre les domaines hyperfréquences passif et actif sont abordés succinctement dans cette section sur le plan de la modélisation numérique. Le calcul des matrices de diffusion qui est traité dans ce chapitre, peut également être intégré à une approche du type actif. Ainsi, un modèle de rétrodiffusion radar (dénommé RETROD), qui est en cours de validation sur des données acquises sur couvert de soja (Bertuzzi, 1989), a été développé.

RETROD calcule le coefficient de rétrodiffusion radar σ_{pq} ($p, q = v$ ou h) d'un couvert discret à deux couches: végétation et sol. La formulation du tenseur de diffusion d'amplitude F des diffuseurs végétaux (elliptiques ou cylindriques) est couplée avec une résolution des équations du transfert radiatif au premier ordre. Cette résolution, déduite des travaux de Karam et Fung (1988) et Karam *et al.* (1992), est choisie pour sa simplicité et sa bonne précision pour un milieu à faible albedo. Des travaux plus avancés sont davantage précis dans l'estimation des termes à polarisation croisée σ_{vh} et σ_{hv} (résolution à l'ordre 2 de Tsang et Ding (1991) et de Karam *et al.* (1992)). Dans RETROD, le coefficient de rétrodiffusion $\sigma_{pq}(i)$ ($p, q = v$ ou h) pour une radiation $i(\pi-\theta_i, \phi_i)$, s'écrit au premier ordre:

$$\sigma_{pq}(i) = \sigma_{pq}^d(i) + \sigma_{pq}^s(i) + \sigma_{pq}^{sd}(i) \quad (4-44)$$

où $\sigma_{pq}^d(i)$, $\sigma_{pq}^s(i)$, $\sigma_{pq}^{sd}(i)$ paramétrisent respectivement la diffusion issue du diffuseur végétal, de la surface du sol et de l'interaction surface - diffuseur.

$\sigma_{pq}^d(i)$ qui est relié à la diffusion des éléments discrets elliptiques ou cylindriques, s'exprime simplement en fonction des composantes F_{pq} ($p, q = v$ ou h) du tenseur de diffusion d'amplitude et du coefficient d'extinction k_e selon:

$$\sigma_{pq}^d(i) = [4\pi \cdot \cos\theta_i / (\langle k_{ep}(i) \rangle + \langle k_{eq}(i) \rangle)] \{1 - \exp[-(\langle k_{ep}(i) \rangle + \langle k_{eq}(i) \rangle)n_0 d \sec\theta_i]\} \langle |F_{pq}(-i, i)|^2 \rangle \quad (4-45)$$

où n_0 désigne le nombre de diffuseurs par unité de volume, d désigne la hauteur du couvert, $\langle \rangle$ désigne une moyenne sur l'orientation des diffuseurs, paramétrisée par les angles α, β, γ (section 4.3).

$\sigma_{pq}^s(i)$ est calculé en fonction du coefficient de rétrodiffusion $\sigma_{pq}^{sn}(i)$ du sol nu:

$$\sigma_{pq}^s(i) = \exp[-\langle k_{ep}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i] \sigma_{pq}^{sn}(i) \exp[-\langle k_{eq}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i] \quad (4-46)$$

Différentes approches permettent d'estimer le coefficient de rétrodiffusion $\sigma_{pq}^{sn}(i)$ en fonction de la fréquence de mesure et de la rugosité plus ou moins grande de la surface: modèle des faibles perturbations, modèle physique - optique, modèle géométrique - optique (Ulaby *et al.*, 1981; Ulaby *et al.*, 1990; Oh *et al.*, 1992).

La formulation au premier ordre du coefficient $\sigma_{pq}^{sd}(i)$ représentatif de l'interaction surface - diffuseur s'écrit:

-si $p \neq q$:

$$\sigma_{pq}^{sd}(i) = 4\pi \cdot \cos\theta_i \exp(-4k^2 \sigma^2 \cos^2\theta_i) \{ [\exp(-\langle k_{eq}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i) - \exp(-\langle k_{ep}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i)] / [\langle k_{ep}(i) \rangle - \langle k_{eq}(i) \rangle] \} \cdot \{ |R_{pp}(i)|^2 \exp(-\langle k_{ep}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i) \langle |F_{pq}(-i, i)|^2 \rangle + |R_{qq}(i)|^2 \exp(-\langle k_{eq}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i) \langle |F_{pq}(-i, i)|^2 \rangle \} \quad (4-47)$$

-si $p=q$:

$$\sigma_{pp}^{sd}(i) = 4\pi \cdot \exp(-4k^2 \sigma^2 \cos^2\theta_i) n_0 d \{ 2|R_{pp}(i)|^2 \exp(-2\langle k_{ep}(i) \rangle n_0 d \sec\theta_i) \langle |F_{pp}(-i, i)|^2 \rangle \} \quad (4-48)$$

où $R_{pp}(i)$ ($p=v$ ou h) désigne le coefficient de Fresnel pour une onde plane de direction incidente $i(\pi-\theta_i, \phi_i)$ et avec $-i(\theta_i, \pi+\phi_i)$, $l(\theta_i, \phi_i)$, $-l(\pi-\theta_i, \pi+\phi_i)$.

RETROD constitue donc l'équivalent radar du modèle discret passif. A la résolution numérique précise du modèle discret passif s'est substituée une résolution du premier ordre plus sommaire dans le modèle actif. Les deux approches utilisent les mêmes données d'entrée. Seule la prise en compte de la rugosité du sol diffère et les température T_1 et T_2 du milieu n'interviennent pas dans le modèle radar. Aucune étape de validation de RETROD ne sera présentée dans cette étude. Cependant les résultats de cette section contribuent à préciser "l'ensemble d'intersection" reliant les approches passives et actives. Par ailleurs RETROD s'intégrera également dans une étude de synthèse, portant sur le couplage de modèles simulant l'ensemble des signatures spectrales mesurées par télédétection (Chapitre 8).



Chapitre 5

Etude de sensibilité des modèles continu et discret

Dans ce chapitre, l'influence des caractéristiques de la végétation et du sol sur l'émission micro-onde du couvert végétal est analysée, à travers les simulations des modèles continu et discret. Différents objectifs sont poursuivis:

–Interprétation des données radiométriques mesurées ou simulées en fonction des paramètres de surface.

–Définition des configurations du radiomètre (en fréquence, polarisation et angle d'incidence), les mieux adaptées au suivi des caractéristiques de la végétation et du sol.

–Caractérisation des paramètres pertinents à inverser et d'une méthode appropriée à l'inversion. Aucune étude approfondie ne traite de ces sujets. Les travaux les plus significatifs à partir d'une approche discrète, sont ceux de Choe et Tsang (1983) à la fréquence de 1.4GHz et ceux de Ferrazzoli *et al.* (1992) sur le rapport de polarisation R à 10GHz ($R=(T_{Bv}-T_{Bh})/(T_{Bv}+T_{Bh})$ ou T_{Bp} désigne la température de brillance pour la polarisation verticale (p=v) ou horizontale (p=h)). Aussi une étude de sensibilité systématique constitue un prolongement naturel au développement des modèles que nous venons de décrire. Cette étude se fonde sur l'approche discrète qui prend en compte précisément les caractéristiques de la végétation. Le domaine de validité de la modélisation limite l'étude aux basses fréquences du radiomètre PORTOS: 1.4, 5.05 et 10.6GHz. L'approche continue permet de compléter cette première analyse jusqu'à 37GHz. L'étude de l'influence des longueurs de corrélation sur le signal hyperfréquence s'inscrit dans la thématique de l'inversion du modèle continu.

5.1 Etude de sensibilité du modèle discret

5.1.1 Fondement et Méthode

L'étude de sensibilité du modèle discret porte sur les paramètres foliaires caractéristiques d'un couvert végétal (teneur en eau, forme, dimension, densité et orientation des feuilles) et sur la teneur en eau du sol sous-jacent. Seule l'influence des feuilles sur l'émission du couvert sera prise en compte par les modèles. Les paramètres de la végétation sont ceux d'un couvert de soja pleinement développé et sont détaillés dans le tableau (5-1). Les feuilles sont assimilées à des disques; excepté dans l'analyse de l'influence de l'ellipticité foliaire, paramétrisée par le rapport $r_a=a_1/a_2$ des principaux demi-axes de la feuille. L'orientation des feuilles est paramétrisée en inclinaison par une distribution de beta (Goel et Strebel, 1984) et sera supposée uniforme en azimuth. La rugosité du sol est prise en compte à travers le terme de réflectivité de Fresnel modifiée, paramétrisée par h_r et Q (Wang et Choudhury, 1981). Notons que le contenu global en eau de la végétation W_v (m^3/m^2) est fonction croissante de la fraction volumique de la végétation f_v et de sa teneur en eau gravimétrique M_g selon:

$$W_v = f_v \cdot d \cdot M_v = f_v \cdot d \cdot [M_g \rho_f / (1 - M_g(1 - \rho_f))] \quad (5-49)$$

VEGETATION (couvert de soja):

$f_v=0.14\%$	fraction volumique de la végétation
$d=0.7\text{m}$	hauteur du couvert végétal
$M_g=0.8\%$	teneur en eau gravimétrique des feuilles
$\rho_s=0.2\text{g/cm}^3$	densité de matière sèche des feuilles
$a_1=a_2=2.8\text{cm}$	rayon des feuilles (assimilées à des disques)
$S_f=24.65\text{cm}^2$	surface foliaire moyenne
$\mu=1.5, \nu=2.3$	paramètres de la distribution beta d'orientation des feuilles
$T_v=300\text{K}$	température effective de la végétation

SOL:

$m_v=0.2\text{m}^3/\text{m}^3$	teneur en eau volumétrique
$\rho_b=1.35\text{g/cm}^3$	masse volumique de la matière sèche
$h_r=0.1, Q=0$	coefficients de rugosité
$T_s=300\text{K}$	température effective du sol

Tableau 5-1: Paramètres du couvert de soja dans l'étude de sensibilité du modèle discret.

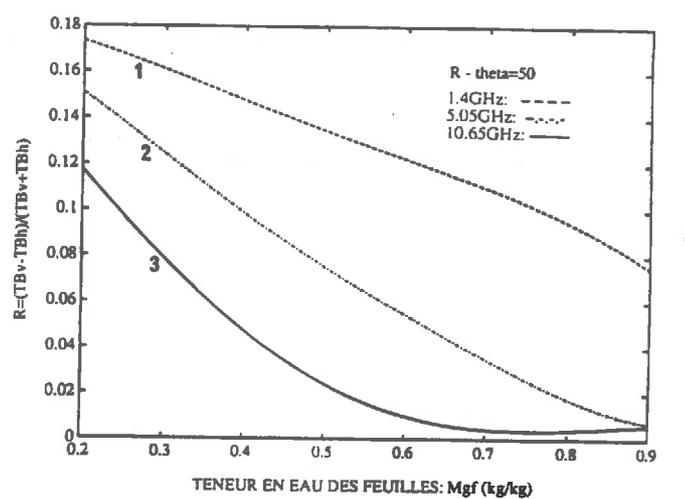
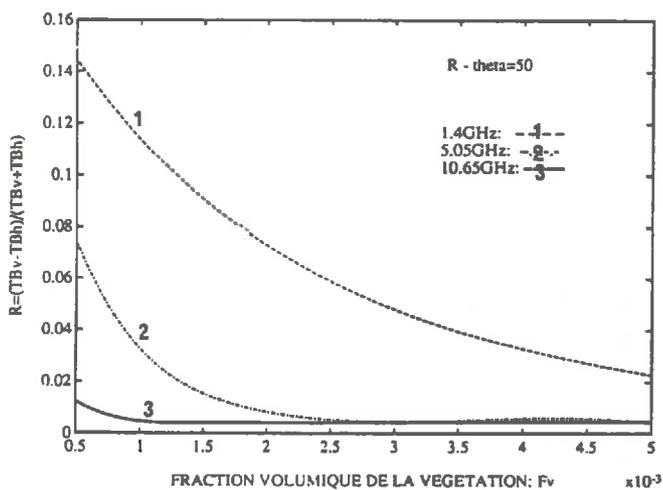
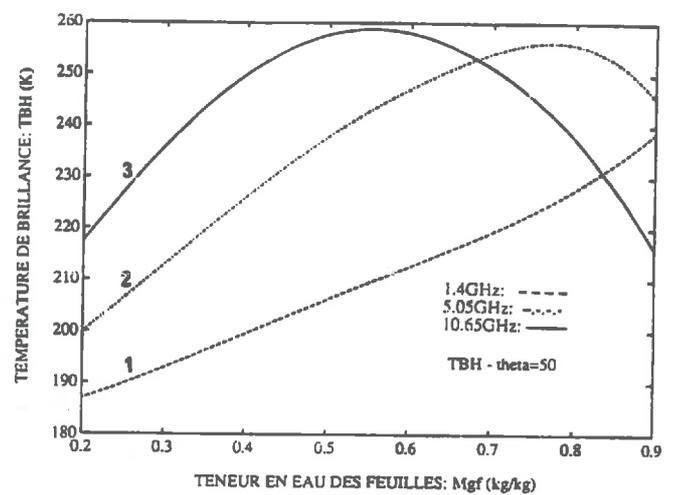
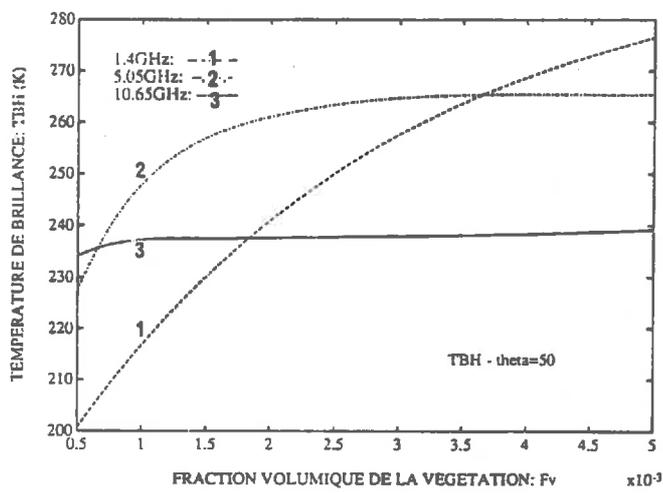
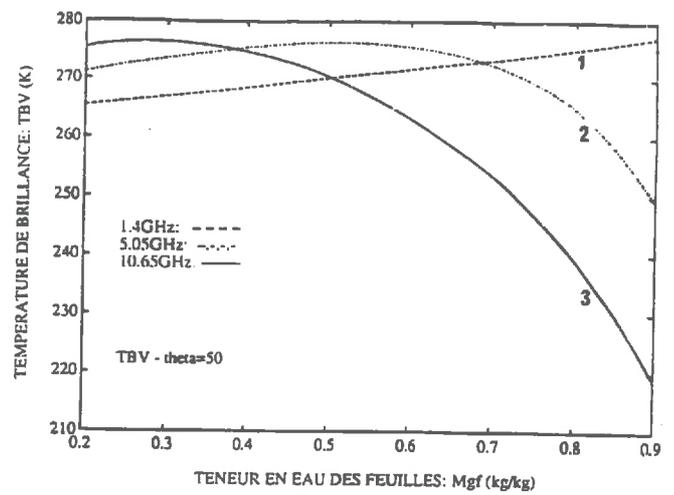
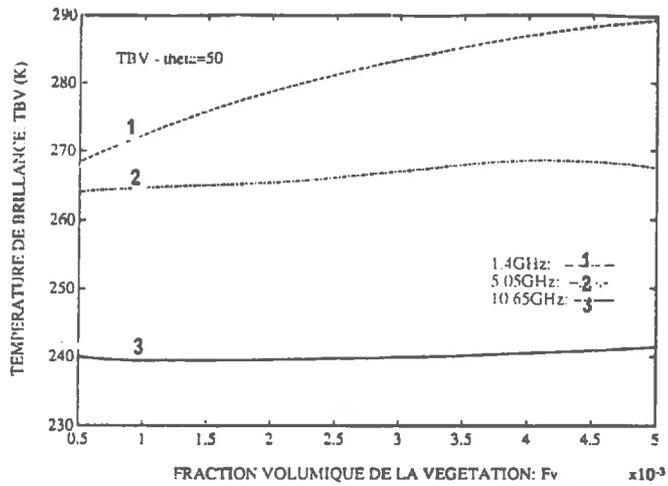


Figure 5-1: Température de brillance T_{Bv} (a), T_{Bh} (b), et rapport de polarisation R (c), en fonction de la fraction volumique f_v de la végétation à 1.4GHz, 5.05GHz et 10.65GHz.

Figure 5-2: T_{Bp} ($p=v$ et $p=h$) et R en fonction de la teneur en eau de la végétation M_g .

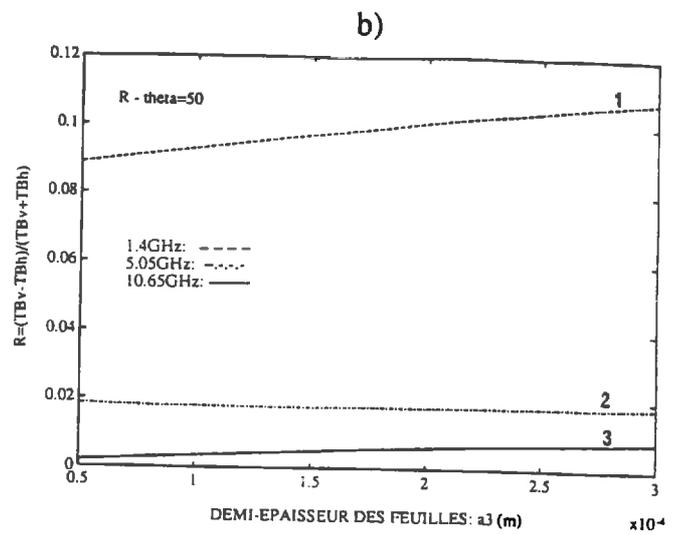
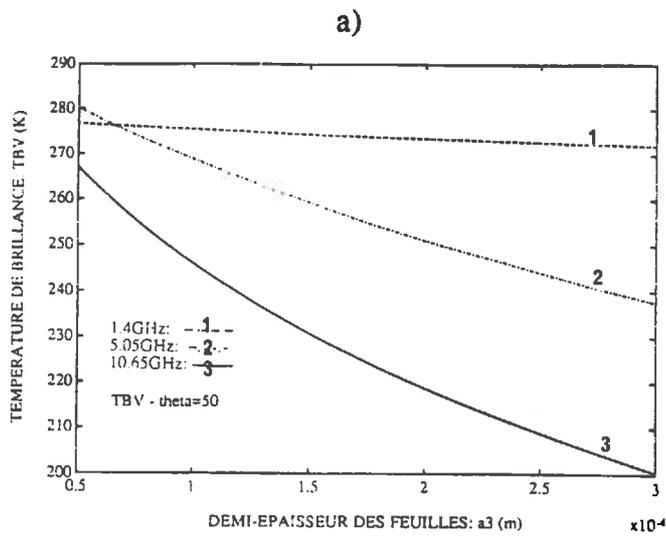


Figure 5-3: T_{Bv} (a) et R (b) en fonction de la demi-épaisseur a_3 des feuilles.

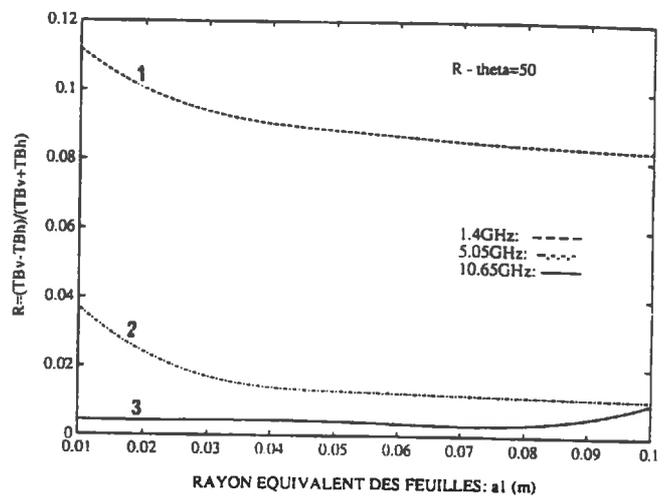
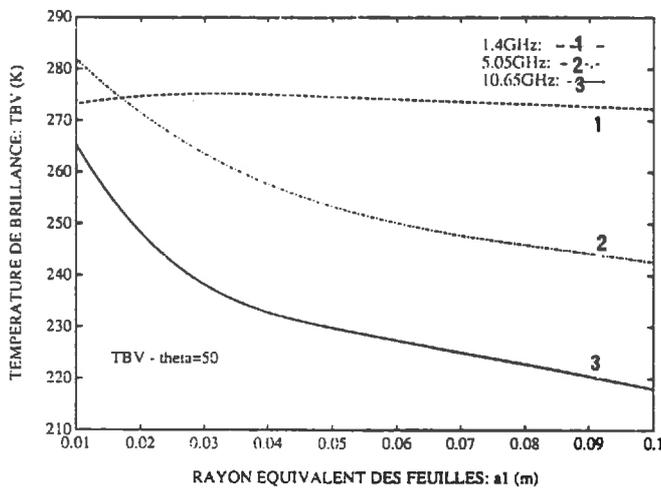


Figure 5-4: T_{Bv} (a) et R (b) en fonction du rayon équivalent a_1 des feuilles.

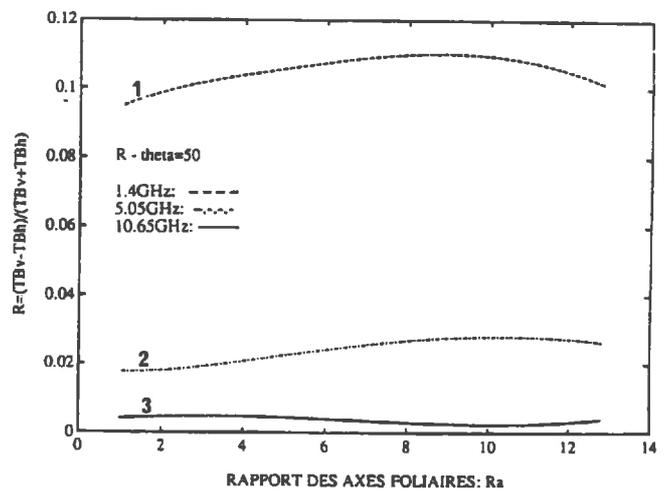
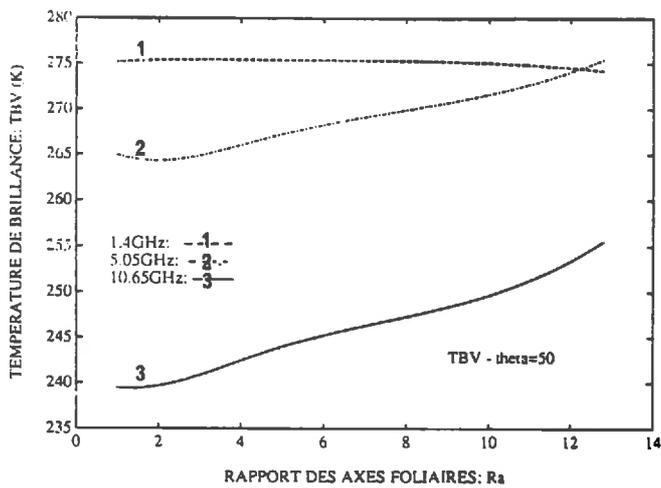


Figure 5-5: T_{Bv} (a) et R (b) en fonction du rapport r_a ($r_a = a_1/a_2$) des demi-axes des feuilles.

où d désigne la hauteur du couvert, et ρ_s désigne la densité de matière sèche de la végétation. Pour caractériser l'influence de la distribution en inclinaison des feuilles sur l'émission du couvert de soja, nous utilisons une fonction densité de probabilité en inclinaison $p_\beta(\beta)$ uniforme sur un intervalle et qui s'écrit:

$$p_\beta(\beta) = \begin{cases} 1/(\beta_2 - \beta_1) & \text{si } \beta_1 < \beta < \beta_2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Nous définissons PB ($PB = (\beta_2 + \beta_1)/2$) comme la valeur moyenne de β sur l'intervalle $[\beta_1, \beta_2]$. La longueur de l'intervalle est fixée arbitrairement à 20° ($\beta_2 - \beta_1 = 20^\circ$).

L'évolution de la température de brillance T_{Bp} et du rapport de polarisation R , en fonction des paramètres caractéristiques du sol et de la végétation, est analysée pour les polarisations verticale (T_{Bv}) et horizontale (T_{Bh}) et aux fréquences 1.4, 5.05 et 10.6GHz, pour l'angle d'incidence $\theta = 50^\circ$. Les résultats sont valables pour le jeu "statique" de paramètres défini dans le tableau (5-1). En particulier le sol est relativement humide ($m_v = 0.2$) et lisse ($h_r = 0.1$). Ces caractéristiques du sol, qui ont une forte influence sur le signal micro-onde à basses fréquences, sont fixées arbitrairement. Par ailleurs, le domaine de variation des différents paramètres du couvert peut également influencer l'interprétation des résultats. Ainsi, au cours du développement d'un couvert de soja, les variations de sa teneur en eau M_g sont de l'ordre de 0.8 ($0.65 < M_g < 0.9$), alors que pour des couverts forestiers, la teneur en eau des branches, des troncs ou du bois mort peut être beaucoup plus faible. Les interprétations faites dans ce chapitre n'ont donc pas un caractère général et doivent être simplement considérées comme des indicateurs de tendance. Lorsque les résultats pour les polarisations (H) et (V) sont très similaires, seule l'évolution de T_{Bv} sera représentée.

5.1.2 Résultats et discussion

5.1.2.1 Influence des caractéristiques de la végétation sur l'émission du couvert

Les figures (5-1)-(5-5) montrent les effets des caractéristiques des feuilles sur les simulations de l'émission du couvert de soja. Les paramètres foliaires de l'étude de sensibilité sont: la fraction volumique (f_v), la teneur en eau (M_g), le rayon (a_1) et la demi-épaisseur des feuilles (a_2), le rapport des principaux axes d'une feuille elliptique ($r_a = a_1/a_2$).

Les résultats des simulations montrent que:

- (i) à 1.4GHz, l'émission micro-onde est principalement sensible à la fraction volumique de la végétation f_v . La sensibilité à la teneur en eau de la végétation M_g est plus faible mais reste significative. Cette sensibilité à f_v et M_g est surtout marquée sur T_{Bh} et R . Les dimensions et la forme des feuilles semblent avoir un effet très limité sur l'émission.
- (ii) à 5.05GHz, l'émission micro-onde est sensible aux variations de f_v (polarisation (H)), M_g , a_1 et a_2 dans des proportions assez voisines. L'influence de la forme des diffuseurs, paramétrisée par le paramètre d'ellipticité r_a , reste très faible.
- (iii) à 10.65GHz, l'influence de f_v est très réduite et limitée aux basses valeurs de f_v ($f_v < 10^{-3}$). Le signal est par contre fortement sensible à M_g , à l'épaisseur des feuilles a_2 et plus modérément à la surface foliaire (ou au rayon équivalent). L'influence de r_a reste faible.

Ainsi, à basses fréquences (1.4GHz-5GHz), le signal apparaît sensible aux paramètres f_v et M_g qui déterminent le contenu en eau de la végétation; particulièrement au niveau de la polarisation H et du rapport de polarisation. Pour des fréquences plus élevées (5GHz-10.65GHz), le signal apparaît davantage sensible aux caractéristiques de diffusion des feuilles (en terme de permittivité et de géométrie). Cette sensibilité se manifeste pour les deux polarisations (H) et (V). Les effets des caractéristiques géométriques des feuilles (dimensions et forme) sont peu marqués sur le rapport de

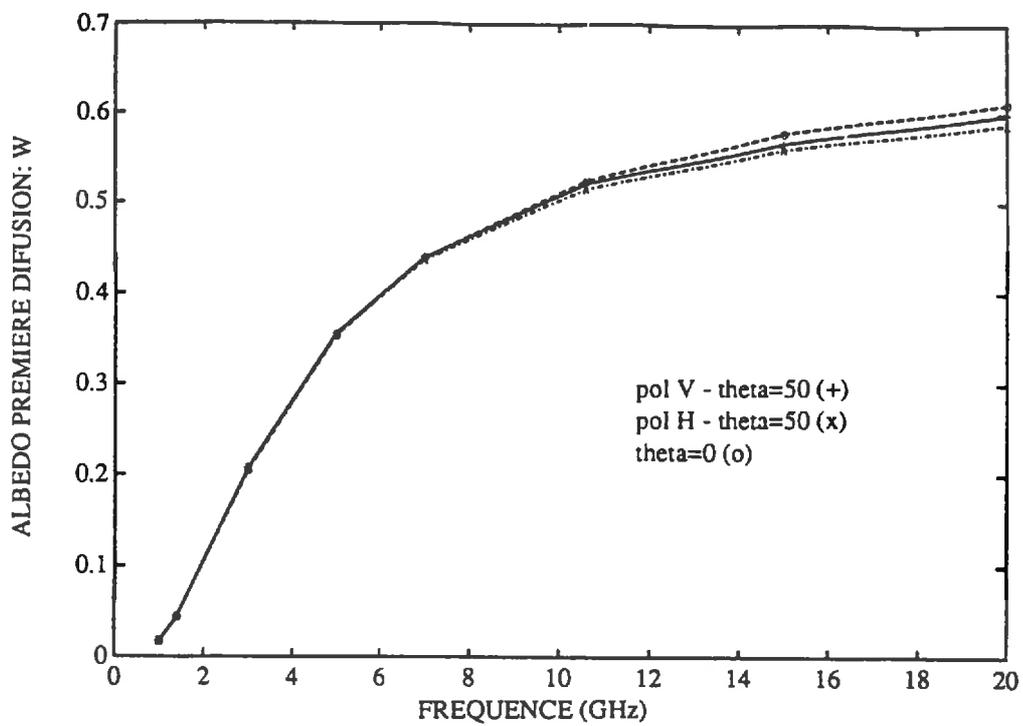


Figure 5-6: Evolution de l'albedo de première diffusion ω en fonction de la fréquence, pour un couvert de soja bien développé (simulations du modèle discret).

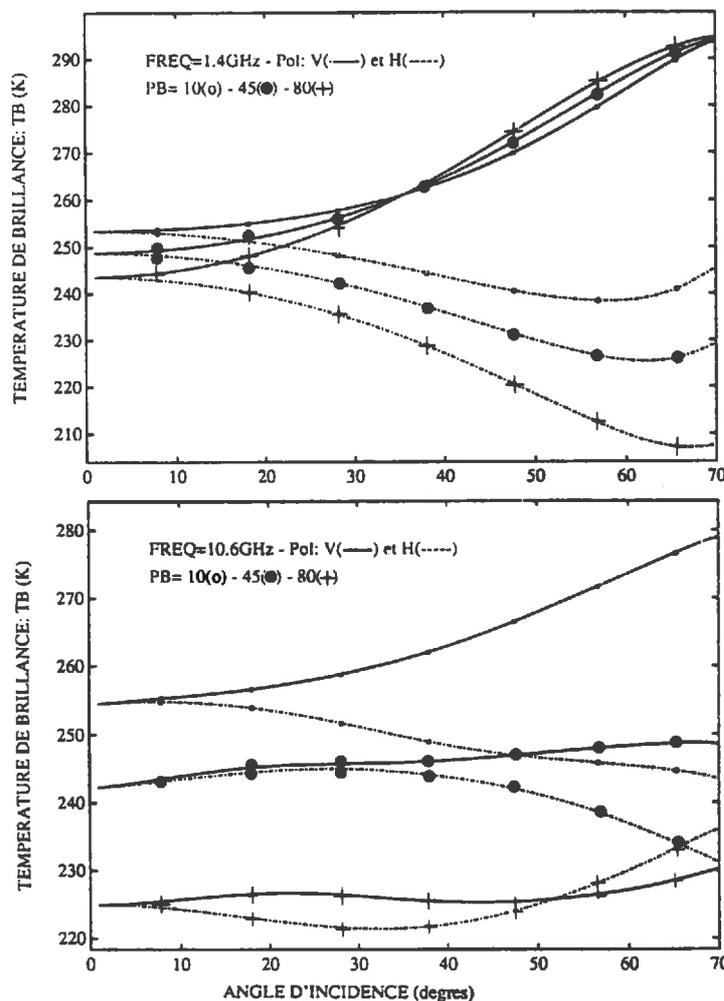


Figure 5-7: Température de brillance T_{Bp} ($p=v$ et $p=h$) en fonction de l'angle d'incidence θ , pour une inclinaison moyenne des feuilles $PB=10^\circ$ (couvert planophile), $PB=45^\circ$, $PB=80^\circ$ (couvert érectophile), à 1.4GHz (a) et à 10.65GHz (b).

polarisation. L'influence de la forme des feuilles sur l'émission du couvert est croissante avec la fréquence, mais reste réduite.

Ces résultats peuvent être interprétés en terme de diffusion, paramétrisée par le coefficient k_s , et d'absorption ou émission (absorption et émission étant paramétrisées par le même coefficient k_a). La figure (5-6) montre l'évolution de l'albédo de simple diffusion ω ($\omega=k_s/(k_s+k_a)$), calculé à partir de l'approche discrète pour un couvert de soja bien développé, en fonction de la fréquence f . La diffusion dans le couvert est très faible pour des fréquences de quelques GHz. Elle s'accroît rapidement avec f et devient très marquée à 10.65GHz. Or, f_v est un des facteurs principaux déterminant l'absorption au sein du couvert, mais il n'influence pas la diffusion (k_s et k_a étant proportionnels à f_v dans le calcul de ω). Aussi l'influence de f_v sur l'émission du couvert domine à basses fréquences. Lorsque la fréquence s'élève, l'influence relative de la diffusion par rapport à l'absorption s'accroît, et les effets de f_v sur le signal micro-onde s'estompent. La forme et les dimensions des diffuseurs, qui influencent surtout la diffusion, ont des effets croissants avec la fréquence. La teneur en eau de la végétation influence à la fois l'absorption et la diffusion au sein du couvert; ses effets sont marqués dans toutes les bandes de fréquence L (1.4GHz), C (5.05GHz) et X (10.65GHz).

Il est à noter que les niveaux de ω présentés dans la figure (5-6) sont très élevés en comparaison avec des résultats obtenus sur la base des équations simplifiés de transfert radiatif (Brunfeldt and Ulaby, 1984; Pampaloni et Paloscia, 1986; Jackson and O'Neill, 1988). Ces niveaux élevés sont par contre en bon accord avec les résultats expérimentaux de Mätzler and Sume (1989), fondés sur les mesures de réflectivité et transmittivité des feuilles. Il apparait ainsi que l'albédo de simple diffusion ω est un terme important, qui ne peut être négligé qu'à très basses fréquences.

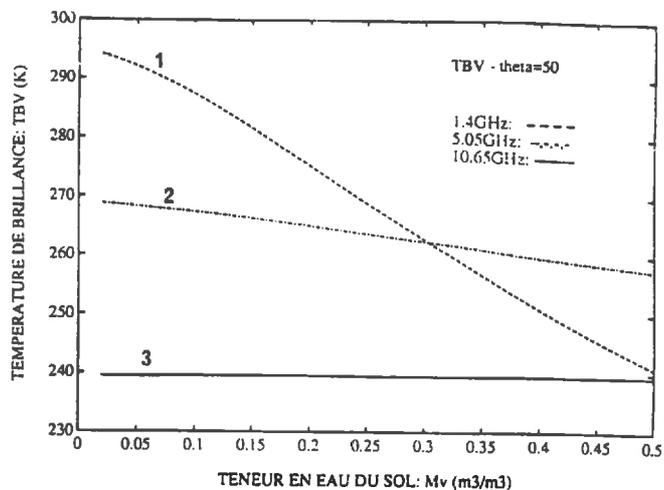
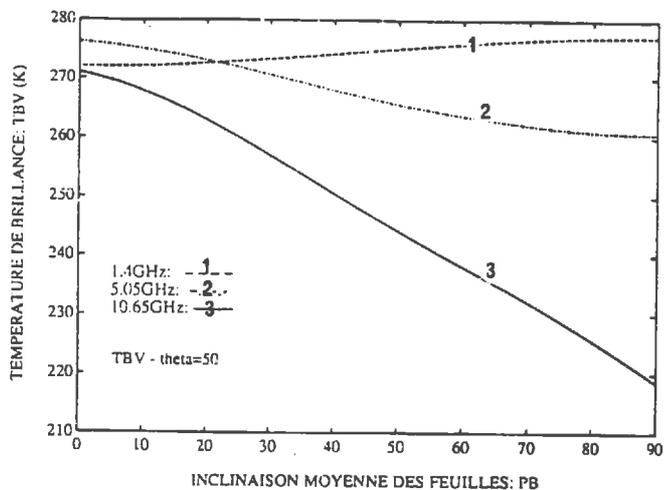
5.1.2.2 Influence de la distribution en inclinaison des feuilles sur l'émission du couvert

Les figures (5-7a-b) montrent l'évolution de T_{Bp} en fonction de l'angle d'incidence θ à 1.4 et 10.65GHz, pour les valeurs: $PB=10^\circ$ (couvert planophile), $PB=45^\circ$ et $PB=80^\circ$ (couvert érectophile). A 1.4GHz et à faible incidence, l'émission du sol est faiblement atténuée par les feuilles lorsque celles-ci sont érigées. Ainsi, la contribution du sol augmente avec PB , tandis que la contribution de la strate végétale décroît. Les caractéristiques de l'émission micro-onde pour $PB=80^\circ$ se rapprochent donc de celles du sol nu humide, sous-jacent au couvert: faibles valeurs de T_{Bh} et fortes valeurs de R . A 10.65GHz, la diffusion est importante et dépend fortement des caractéristiques d'inclinaison des feuilles. Ces effets sont marqués sur T_{Bv} et sur R . Les figures (5-8.a-b-c) permettent de préciser davantage ces observations. Elles montrent l'évolution de T_{Bp} et R en fonction de PB , l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. L'influence de l'inclinaison des feuilles est marquée sur la polarisation H et surtout à 10.65GHz sur la polarisation V. Pour ces configurations, la température de brillance décroît lorsque les feuilles sont davantage inclinées (couvert érectophile). A 10.65GHz le rapport de polarisation R est voisin de zéro pour un couvert érectophile ($PB=70^\circ$). Ce résultat est à rapprocher des données radiométriques sur couverts agricoles de Mätzler (1990) et Ferrazzoli *et al.* (1992), qui constatent des valeurs négatives de R pour des structures végétales (tiges et panicules) orientées verticalement.

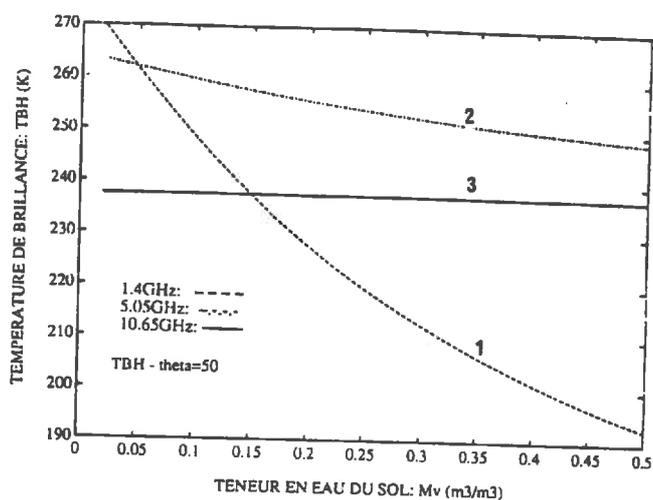
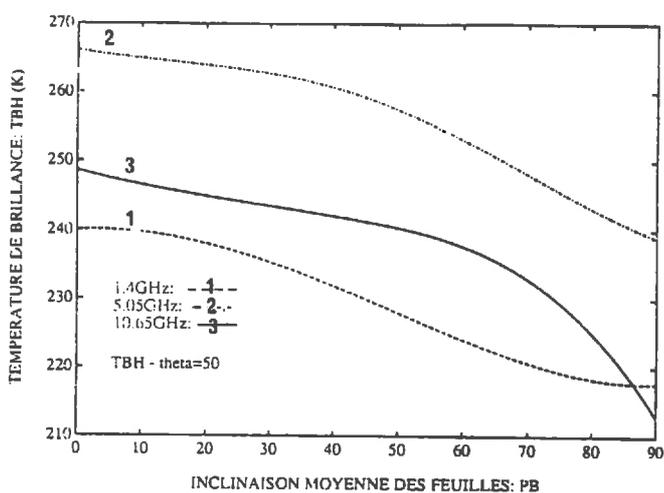
En fonction de ces résultats, les distributions d'inclinaison typées (érectophile, planophile..) apparaissent être des facteurs déterminants de la dépendance de T_{Bp} en fonction de la polarisation et de l'angle d'incidence.

5.1.2.3 Influence de l'humidité du sol sur l'émission du couvert

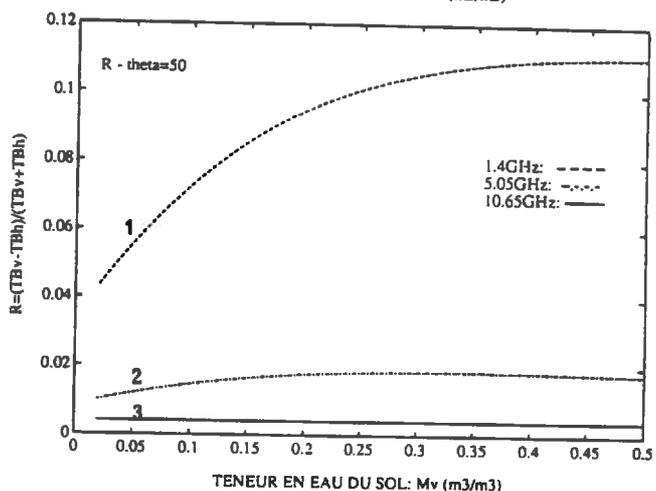
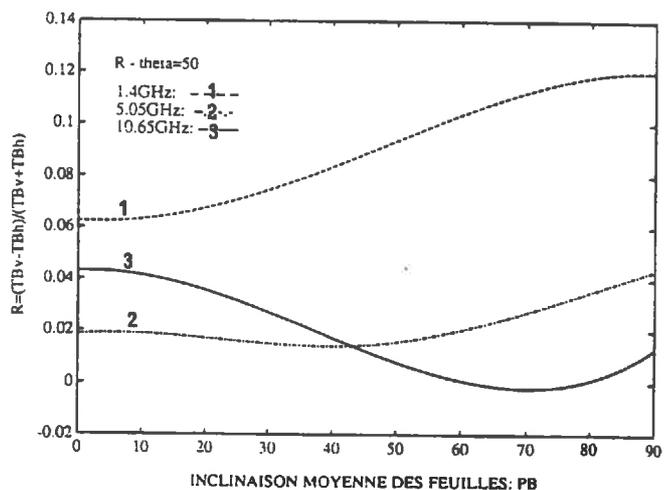
Les figures (5-9a-b-c) présentent l'évolution du signal micro-onde en fonction de l'humidité m_s du sol sous-jacent au couvert de soja. La fréquence croissant, la diffusion et l'absorption s'intensifient au sein



a)



b)



c)

Figure 5-8: Température de brillance T_{Bv} (a), T_{Bh} (b), et rapport de polarisation R (c), en fonction de l'orientation moyenne PB des feuilles à 1.4GHz, 5.05GHz, et 10.65GHz.

Figure 5-9: Température de brillance T_{Bv} (a), T_{Bh} (b), et rapport de polarisation R (c), en fonction de la teneur en eau volumétrique m_v du sol à 1.4GHz, 5.05GHz, et 10.65GHz.

du couvert et atténuent la contribution du sol à l'émission globale mesurée au sommet du couvert. Aussi la sensibilité à m_v est maximale à 1.4GHz et décroît avec la fréquence. A 10.65GHz, le signal micro-onde sur couvert de soja homogène ne dépend plus des caractéristiques du sol, dont la contribution est totalement atténuée.

5.2 Etude de sensibilité du modèle continu

Dans un premier temps nous analysons l'influence des longueurs de corrélation l_z et l_p sur les températures de brillance simulées par le modèle continu, ceci dans l'optique de définir une méthode appropriée à l'inversion des données radiométriques mesurées avec PORTOS sur couvert de soja (campagne Avignon-91).

Dans un deuxième temps le modèle continu nous permet de compléter l'analyse de l'influence des caractéristiques du couvert végétal vers les hautes fréquences, jusqu'à 37GHz. L'étude de l'influence de la fraction volumique, de la teneur en eau et des caractéristiques thermiques de la strate végétale, est conduite sur un couvert forestier. Ce type de couvert végétal présente une structure très aérienne dont l'analyse est complémentaire de celle faite sur couvert de soja.

5.2.1 Influence des longueurs de corrélation sur l'émission du couvert

5.2.1.1 Fondement et Méthode

Les paramètres d'entrée du modèle continu sont ceux du couvert de soja bien développé, qui est décrit dans la section précédente. A la description précise des caractéristiques des feuilles vient se substituer une description statistique des fluctuations diélectriques au sein du couvert. Cette description de la "structure diélectrique" de la végétation est paramétrisée par les deux longueurs de corrélation l_z et l_p . Ces longueurs ne sont pas mesurables et ne peuvent être estimées que par ajustement des simulations et des données radiométriques. L'analyse de l'influence de l_z et l_p sur l'émission du couvert végétal est une étape pour mieux cerner ces variables et leur utilisation dans une stratégie d'inversion. Dans un premier temps, des travaux menés en particulier par Isaacs *et al.* (1989), Jin (1989b, 1992) et des essais préliminaires d'inversion, nous ont permis d'évaluer un domaine de variation pertinent pour l_z et l_p . Ce dernier est décrit dans le tableau (5-2) pour les fréquences 1.4, 5.05, 10.65 et 36.5 GHz qui correspondent à 4 canaux basses et moyennes fréquences de PORTOS. A 1.4, 5.05 et 10.65GHz, le domaine de variation des longueurs de corrélation est identique; pour ces fréquences les résultats pourront aisément être comparés.

5.2.1.2 Résultats et discussion

Les résultats de l'analyse de sensibilité des simulations du modèle continu aux longueurs de corrélation l_z et l_p , sont présentés dans les figures (5-10a-b-c-d). Dans ces représentations, l'écart entre les courbes de niveaux de température de brillance est de 5K. Le point (l_z, l_p), correspondant aux inversions sur couvert de soja du Chapitre 7, est représenté par une croix (X). Les grands traits de ces figures sont:

(i) la sensibilité de T_{Bp} ($p=v$ ou $p=h$) aux longueurs de corrélation apparaît très modérée à 1.4GHz et s'accroît avec la fréquence. Ceci découle logiquement du fait que la diffusion au sein du couvert, paramétrisée par l_z et l_p , s'intensifie avec la fréquence. L'allure des relations $T_{Bp}(l_z, l_p)$ est assez similaire pour les différentes fréquences.

(ii) la sensibilité de T_{Bp} ($p=v$ ou $p=h$) est forte pour des valeurs réduites des longueurs l_z et l_p . La polarisation V est relativement peu sensible à l_z .

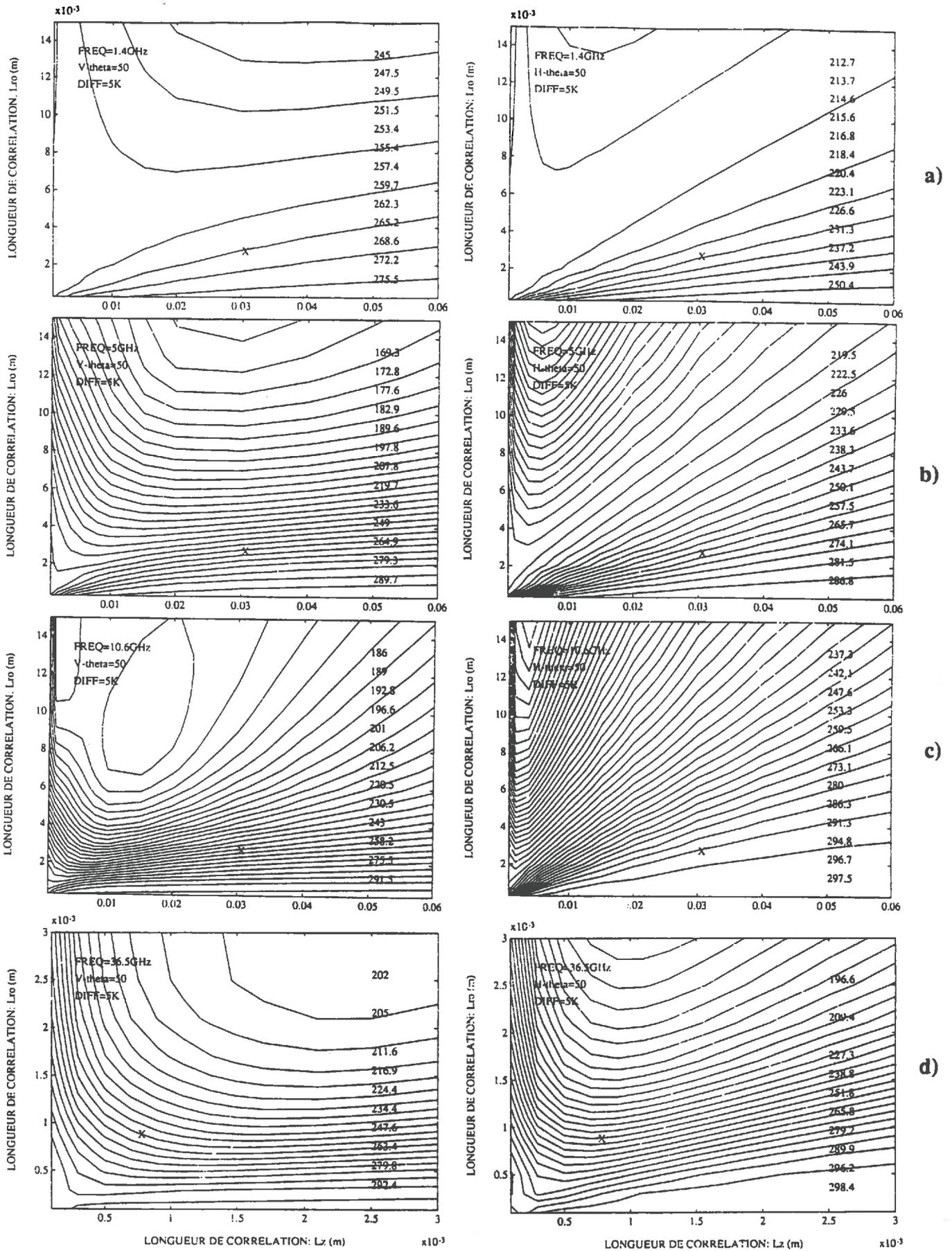


Figure 5-10: Courbes iso-niveaux de température de brillance (T_{BV} et T_{BH}) en fonction des longueurs de corrélation l_z et l_p à 1.4GHz (a), 5.05GHz (b), 10.65GHz (c) et 36.5GHz (d) (pour $\theta=50^\circ$).

(iii) T_{Bp} est une fonction monotone décroissante de l_p . Pour l_p donné, la fonction $T_{Bp}(l_z)$ n'est pas monotone et présente généralement un extrema dans le domaine de variation étudié.

Les relations $T_{Bp}(l_z, l_p)$ n'étant pas monotones sur l'ensemble du domaine de variation étudié, l'inversion des longueurs de corrélation devra porter simultanément sur des données de température de brillance obtenues pour diverses configurations d'angle d'incidence et de polarisation. Il apparaît également que l'ajustement précis des valeurs des longueurs l_z et l_p à un couvert donné est d'autant plus sensible que la fréquence, et donc la diffusion, est élevée.

Ces résultats ne sont qu'une étape vers une meilleure compréhension de la signification des longueurs de corrélation, et en particulier de leur relation avec la structure du couvert.

5.2.2 Influence des caractéristiques de la végétation sur l'émission du couvert

5.2.2.1 Fondement et Méthode

L'analyse de l'influence des principales caractéristiques de la végétation et du sol, sur l'émission hyperfréquence d'un couvert végétal, a été réalisée à basses fréquences (1-10GHz) à partir d'une approche discrète. Le modèle continu nous permet de compléter cette analyse vers les hautes fréquences jusqu'à 37GHz. L'influence de la fraction volumique f_v , de la teneur en eau M_g et des caractéristiques thermiques du couvert végétal est étudiée par Calvet *et al.* (1992) sur la forêt amazonienne. Ce type de couvert très haut permet une étude de M_g et f_v complémentaire de celle conduite sur couvert de soja. Ce couvert est également adapté à l'analyse de l'influence de la température au sein de la végétation, les contrastes thermiques y étant bien marqués entre le sommet et le bas du couvert (écart de l'ordre de 5K). Les fréquences sélectionnées: 6.6, 10.7, 18 et 37GHz correspondent à celles du capteur SMMR embarqué sur Nimbus-7. Les caractéristiques thermiques considérées sont la température de la végétation au niveau du sol T_{1inf} et le gradient thermique au sein du couvert végétal Γ_1 ($\Gamma_1 = (T_{1sup} - T_{1inf})/d$), où T_{1sup} et d désignent respectivement la température de la végétation au sommet du couvert et la hauteur du couvert. Les paramètres d'entrée du modèle continu, caractérisant le couvert végétal dans la forêt amazonienne, sont décrits dans le tableau (5-3). Les longueurs de corrélation l_z et l_p , et la teneur en eau de la végétation M_g , proviennent d'inversions préliminaires à partir des données radiométriques issues de SMMR. Les radiations hyperfréquences montantes sont atténuées par la végétation au cours de leur propagation. Cet effet s'accroît avec la fréquence f . Aussi la contribution du sol et du bas de la strate végétale à l'émission globale mesurée au sommet du couvert, est elle minimale à 37GHz où l'atténuation est importante et maximale à 6.6GHz. Nous dénomerons cet effet: "pondération de l'émission par la fréquence", qui explique pour partie la sensibilité de M_g à la fréquence. Parallèlement la dépendance, en fréquence, des longueurs de corrélation a différentes origines. En particulier, elle provient de l'appréciation différenciée de la géométrie du couvert par des longueurs d'ondes λ plus ou moins grandes, de la dépendance de la constante diélectrique des diffuseurs végétaux en fonction de f et de l'effet de pondération de l'émission par la fréquence.

La sensibilité ψ de la variable X au paramètre p est définie dans cette étude selon:

$$\psi(X,p) = (p/X) \cdot (dX/dp) \quad (5-50)$$

L'étude porte sur les variables T_{Bv} et R ($R = (T_{Bv} - T_{Bh}) / (T_{Bv} + T_{Bh})$), respectivement la température de brillance de polarisation V, et le rapport de polarisation. Le domaine de variation des paramètres p s'accorde avec le cadre du milieu forestier amazonien.

Longueur de corrélation:		l_z	l_p
Fréquence = (GHz)	1.4 5.05 10.65	$[10^{-3}, 6.10^{-2}]$	$[3.10^{-4}, 15.10^{-3}]$
Fréquence = (GHz)	36.5	$[10^{-4}, 3.10^{-3}]$	$[10^{-4}, 3.10^{-3}]$

Tableau 5-2: Domaine de variation des longueurs de corrélation l_z et l_p en fonction de la fréquence, dans l'étude de sensibilité du modèle continu.

VEGETATION (forêt amazonienne):				
$f_v=0.173 \cdot 10^{-3}$	fraction volumique de la végétation			
$d=35m$	hauteur du couvert végétal			
$\rho_s=0.33g/cm^3$	densité de matière sèche des feuilles			
$T_{inf}=301.5K$	température de la végétation (bas du couvert)			
$T_{sup}=306K$	température de la végétation (sommet du couvert)			
Fréquence (GHz)	6.6	10.7	18.0	37.0
M_g	0.63	0.63	0.56	0.44
l_z (mm)	9.25	3.62	1.55	0.96
l_p (mm)	1.67	1.02	1.03	1.0
SOL (sous le couvert forestier):				
$m_v=0.4m^3/m^3$	teneur en eau volumétrique			
$\rho_b=0.9g/cm^3$	masse volumique de la matière sèche			
$h_r=0.1, Q=0$	coefficients de rugosité			
$T_s=301.5K$	température effective du sol			

Tableau 5-3: Paramètres d'entrée du modèle continu, simulant l'émission micro-onde de la forêt amazonienne.

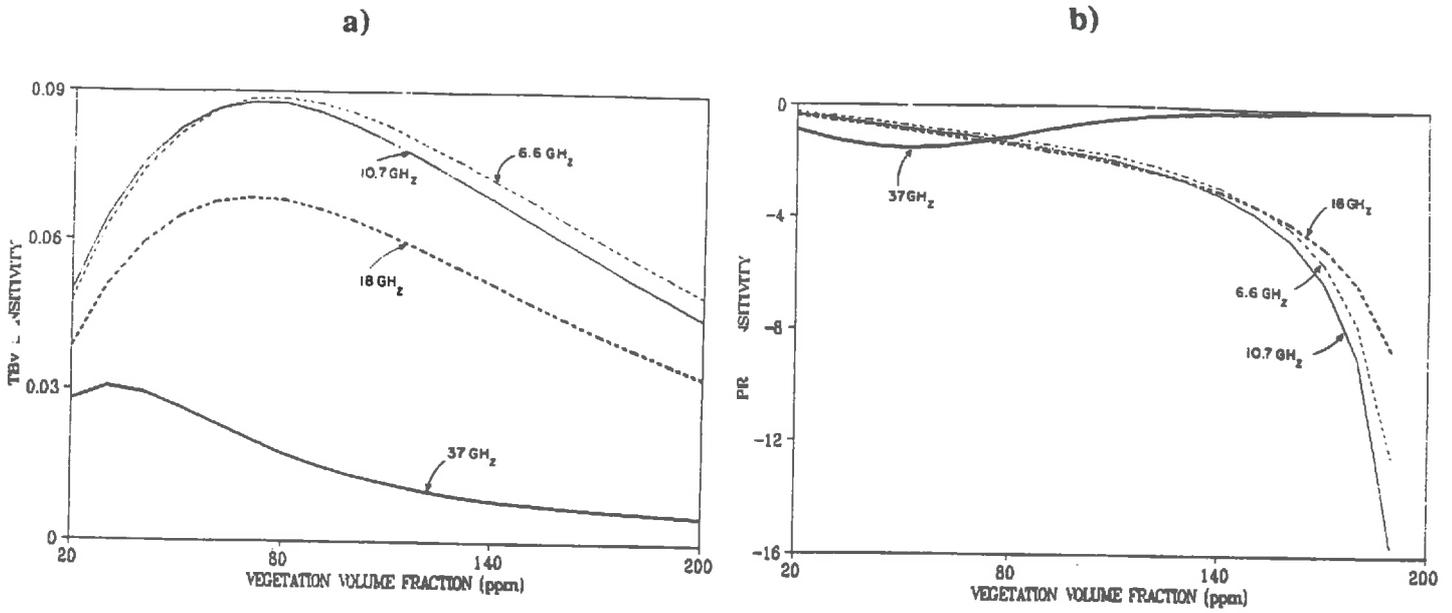


Figure 5-11: Sensibilité de la température de brillance de polarisation T_{Bv} (a) et du rapport de polarisation R (b) à la fraction volumique du couvert f_v (simulations du modèle continu sur la forêt d'Amazonie, d'après Calvet *et al.*, 1992).

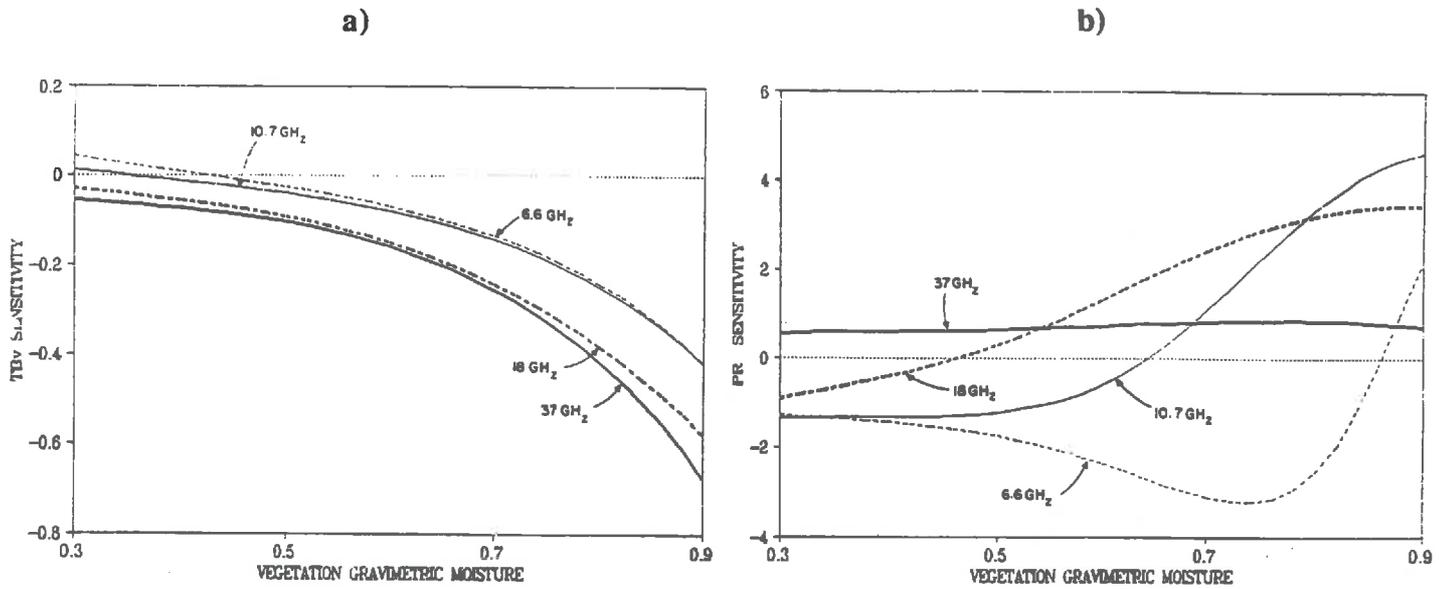


Figure 5-12: Sensibilité de T_{Bv} (a) et R (b) à la teneur en eau de la végétation M_g .

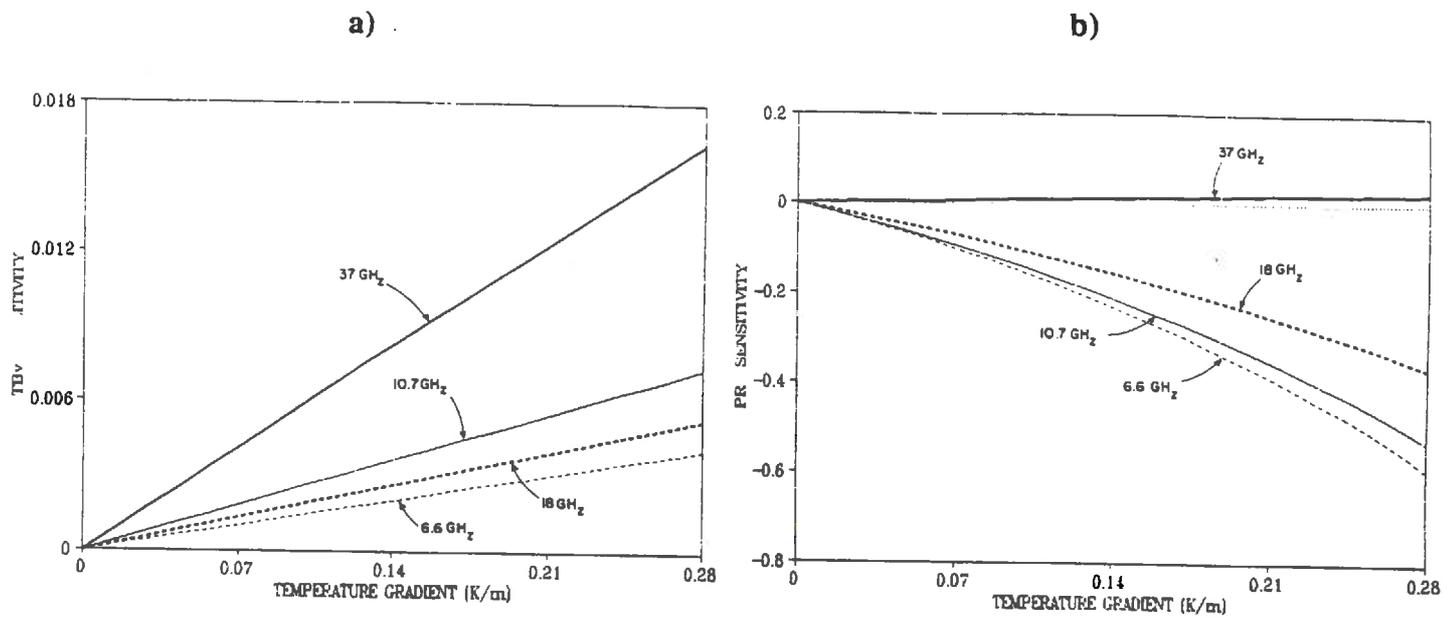


Figure 5-13: Sensibilité de T_{Bv} (a) et R (b) au gradient thermique Γ_1 au sein du couvert.

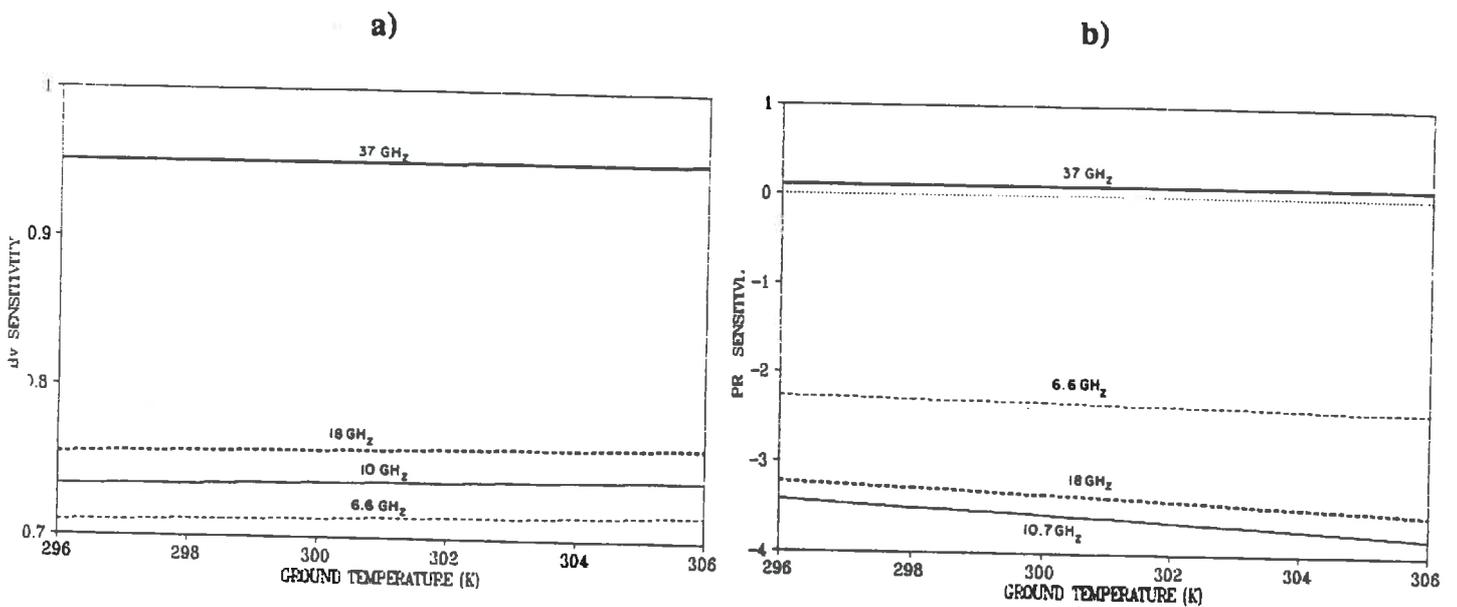


Figure 5-14: Sensibilité de T_{Bv} (a) et R (b) à la température de la végétation T_{inf} au bas du couvert.

5.2.2.2 Résultats et discussion

L'ensemble des résultats de l'étude de sensibilité de T_{Bv} et R aux paramètres M_g , f_v , T_{1inf} et Γ_1 est donné dans les figures (5-11)-(5-14). Leur interprétation est globalement en accord avec les résultats du modèle discret:

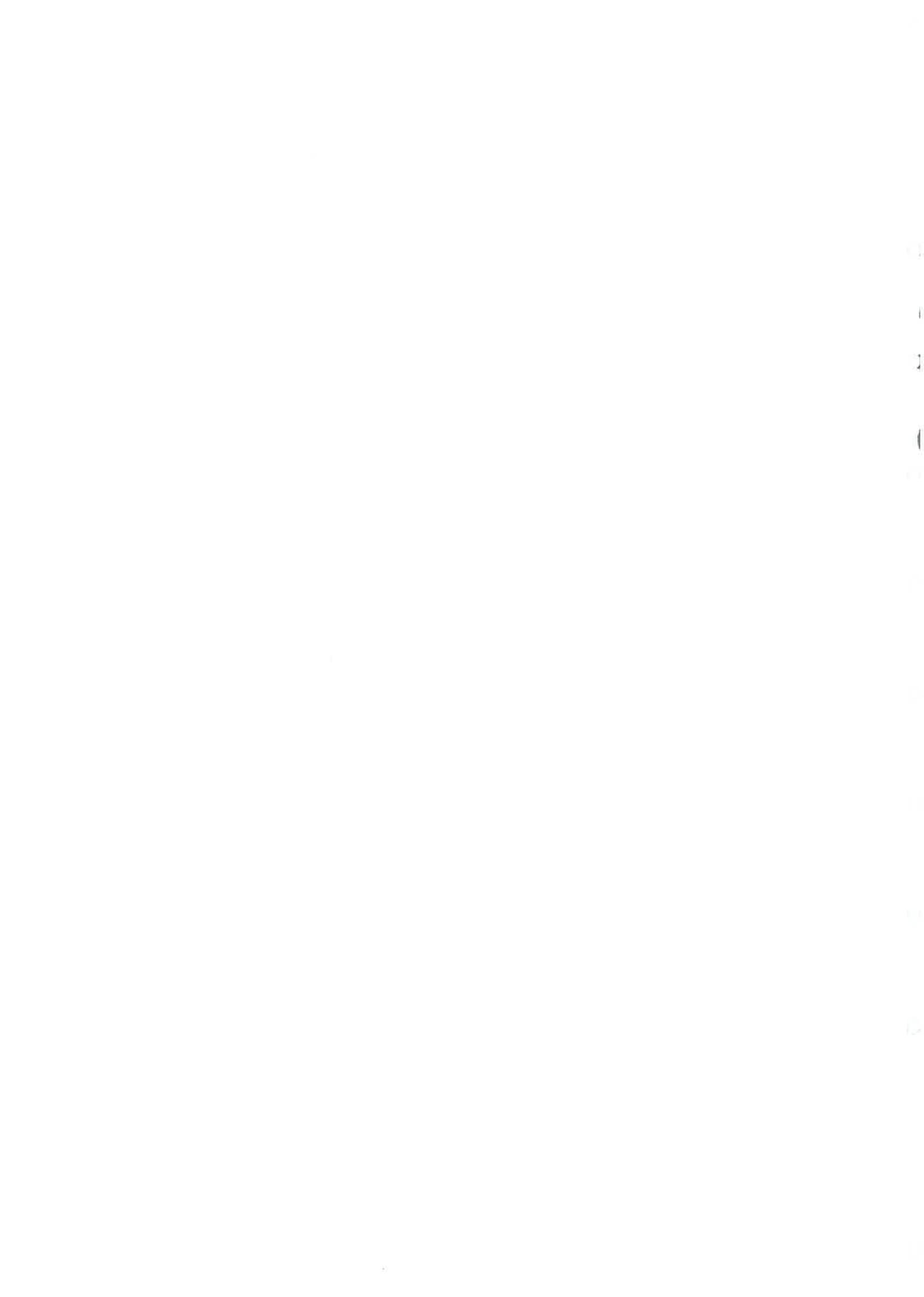
(i) L'influence de la fraction volumique de la végétation sur R et T_{Bv} décroît avec la fréquence. A 37GHz, elle est particulièrement réduite, mais s'élève vers les basses valeurs de f_v . L'influence de f_v reste du même ordre de grandeur à 6.6, 10.7 et 18GHz.

(ii) A 37GHz, la sensibilité du rapport de polarisation à M_g , f_v , T_{1inf} et Γ_1 reste très faible.

(iii) La sensibilité du rapport de polarisation R aux caractéristiques thermiques du couvert est sensiblement voisine à 6.6, 10.7 et 18GHz. L'influence de M_g sur R est plus marquée à 6.6GHz.

(iiii) La sensibilité de la température de brillance T_{Bv} à l'influence de la teneur en eau de la végétation et aux caractéristiques thermiques du couvert s'accroît avec la fréquence. Sa sensibilité au gradient thermique sol / sommet du couvert est distinctement plus élevée à 37GHz.

Ce dernier résultat est en désaccord avec l'étude de sensibilité du modèle discret. Il apparaît ici que la contribution du sol est encore significative à 37GHz, alors qu'elle était totalement atténuée par un couvert de soja à 10.65GHz. Des différences de structure du couvert végétal peuvent expliquer cette observation. Ainsi en terme foliaire, le couvert de soja est beaucoup plus dense que la forêt amazonienne ($f_v=0.14\%$ contre $f_v=0.012\%$) bien que sa biomasse sèche soit beaucoup plus réduite ($B_s=0.12\text{kg/m}^2$ contre $B_s=0.8\text{kg/m}^2$). Cependant, la simulation de l'émission d'un couvert de soja à 37GHz par l'approche continue, montre également une contribution significative du sol; le modèle continu sous-estimant la valeur du coefficient d'extinction au sein du couvert par rapport à l'approche discrète. Ainsi, des mesures radiométriques complémentaires sur couverts homogènes seraient nécessaires pour valider le calcul de l'extinction.



Partie III

Mesures et Simulations des données micro-ondes

Les deux premières parties de cette étude étaient consacrées à l'analyse et à la définition précise de modèles de simulation de l'émission hyperfréquence d'un couvert de végétation. L'étude de sensibilité de ces modèles a permis de préciser différentes relations théoriques entre les paramètres de surface et la mesure radiométrique (exprimée en terme de température de brillance). Cependant plusieurs interrogations restent en suspens et concernent:

- (1) La précision des données simulées (problème de validation des modèles).
- (2) La méthodologie de l'inversion des mesures hyperfréquences.
- (3) Les limites d'une étude de sensibilité "statique", qui ne prend pas en compte les relations naturelles de dépendance entre les divers paramètres descriptifs du milieu (température, humidité du sol et de la végétation, biomasse..).
- (4) La mise en oeuvre d'une synergie entre les différents domaines de longueurs d'ondes.
- (5) L'ouverture vers une approche interdisciplinaire synthétique de l'appréciation et de la modélisation du fonctionnement du couvert végétal.

Cette troisième partie concerne ces différents aspects. Elle s'appuie sur les mesures radiométriques acquises par PORTOS durant l'été 1991 sur couvert de soja. La confrontation des données simulées et mesurées enrichit à la fois la compréhension des mécanismes de l'émission et de la modélisation. Le couplage du modèle micro-onde discret avec un modèle de simulation des échanges d'énergie au sein du couvert végétal s'inscrit dans le développement d'un outil original d'analyse des aspects (3), (4) et (5).

Chapitre 6

Expérimentation PORTOS-1991 sur couvert de soja

L'expérimentation PORTOS-1991 s'est déroulée sur la parcelle "télédétection" POIRSON du domaine de L'INRA à Montfavet durant l'été 1991. Les mesures radiométriques micro-ondes ont été acquises par PORTOS sur des parcelles de sol nu et sur une culture de soja. Sur les parcelles "sol nu", les mesures ont suivi des phases successives de dessèchement et de réhumectation du sol pour différents états de rugosité de la surface (Chanzy *et al.*, 1992). Sur la parcelle agricole, les mesures ont suivi le développement du soja depuis le semis, le 24 juillet (jour 205), jusqu'à un état de maturité avancé de la végétation (jour 273). Le cycle végétatif du couvert était très court (variété de soja du type 000). Des irrigations au début du cycle cultural et une pluviométrie relativement importante par la suite ont limité le dessèchement du sol tout le long de la campagne de mesure. Aucune phase de stress hydrique de la végétation n'a donc pu être observée. Cette campagne constituait la première série de mesures hors laboratoire de PORTOS, qui était encore en période de mise au point. Aussi divers incidents techniques ont parfois perturbé les acquisitions. La précision des mesures fut également affectée par l'insuffisance du contrôle thermique du radiomètre. Néanmoins, l'ensemble des mesures constitue, par ses caractéristiques radiométriques (polarisation, fréquence, configuration angulaire) et par son suivi régulier du développement du couvert végétal, une base de données très riche d'informations. Ses caractéristiques sont précisées dans ce chapitre.

6.1 Mesures des caractéristiques du milieu observé

Les mesures des caractéristiques du couvert de soja 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, couplée avec l'analyse de sensibilité issue des simulations, sera le fondement de l'interprétation des mesures radiométriques de PORTOS. Les mesures ont porté sur:

- la température au sein du couvert de soja et sur le profil thermique dans le sol.
- le contenu en eau de la végétation et ponctuellement sur le potentiel hydrique foliaire.
- le profil d'humidité dans les 10 premiers cm du sol.
- la caractérisation de la structure de la végétation (biomasse sèche, dimensions, forme et orientation des différents éléments du couvert).
- la caractérisation microclimatique et l'évaporation journalière du couvert (termes de flux qui ne seront pas analysés dans le cadre cette étude).

L'ensemble de ces mesures est détaillé dans le tableau (6-1). Le rythme de leur acquisition est fonction de la vitesse de variation des paramètres observés. Ainsi les mesures de température, et de caractérisation microclimatique étaient effectuées en continu (pas de temps de 1/4h). Les mesures du profil d'humidité du sol étaient conduites quotidiennement au moment des mesures radiométriques (entre 11H et 14H TU généralement). La caractérisation de la structure et de la teneur en eau de la végétation était bi-hebdomadaire.

VEGETATION (couvert de soja):

Température de surface du couvert T_{s1} (2 radiothermomètres KT17)

Indice Foliaire (LAI: Leaf Area Index)
Hauteur d (m)

[Couvert entier	Teneur en eau gravimétrique M_g (kg/kg)
	Feuilles	Biomasse sèche et fraîche B_s et B_f (kg/m ²)
	Tiges	
	Pétioles	
	Gousses	

[Feuilles	Densité de matière sèche ρ_s (g/cm ³)
	Tiges	Fraction volumique f_v (m ³ /m ³)
	Pétioles	Orientation en inclinaison et azimuth ($\rho_\beta(\beta)$ et $\rho_\phi(\phi)$).
		Dimensions et forme

Feuilles	Potentiel hydrique π_f (MPa)
----------	----------------------------------

SOL (sous le couvert):

Température de surface T_{s2} (1 radiothermomètre KT17)
Teneur en eau gravimétrique M_g (0-0.5, 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-10 cm)
Masse volumique de la matière sèche ρ_d (g/cm³) (2, 4, 6, 8, 10cm)
Température du sol T_2 (1, 2, ..., 5, 7, 10, 25, 50, 100cm)
Rugosité

Tableau 6-1: Mesures *in situ* des caractéristiques du sol et de la végétation (expérimentation PORTOS-1991).

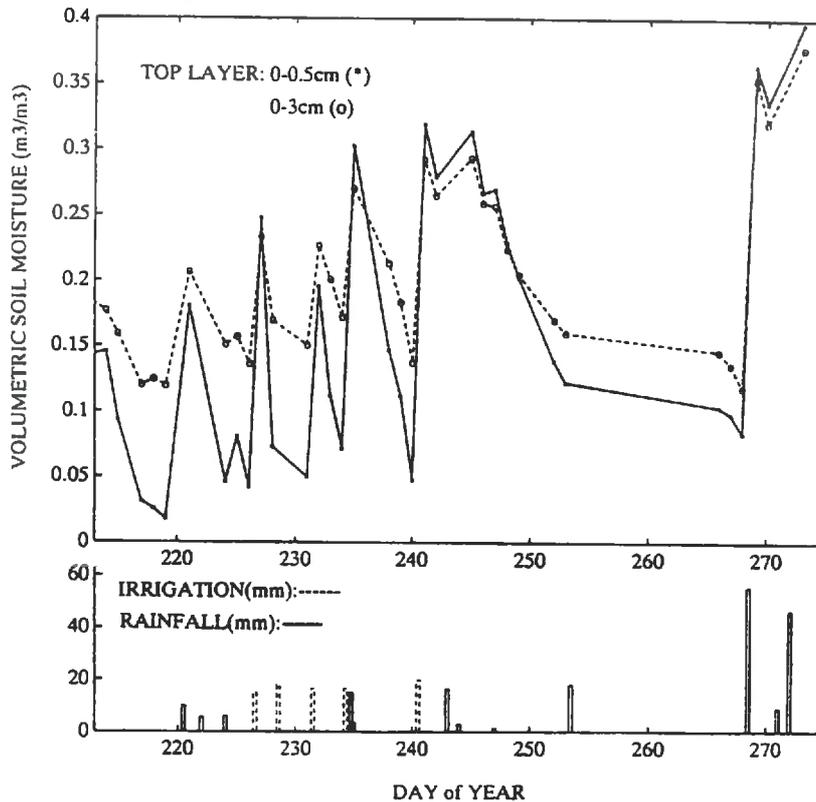


Figure 6-1: Evolution de la teneur en eau volumique m_v du sol sur [0-0.5cm] et [0-3cm], en relation avec les niveaux de précipitations et d'irrigations. (expérimentation PORTOS-1991, d'après Wigneron *et al.* (1992b)).

6.1.1 Caractéristiques thermiques du milieu

Trois radiothermomètres de type Heiman KT17 (plage [8-14 μ_m]), ont assuré la mesure de la température de surface du sol et de la végétation. Le premier observait le sommet du couvert; le second, le sol sous le couvert. Le troisième était installé sur le support de PORTOS et assurait des acquisitions simultanées avec le radiomètre micro-onde. L'étalonnage des radiothermomètres a été conduit avec un corps noir, porté à des températures différentes (Oliosio, 1991). L'émissivité moyenne de la surface sur la plage de longueur d'onde du KT17, varie en fonction du développement du couvert: de l'ordre de 0.95 pour le sol nu (Chanzy, 1991, Labed et Stoll, 1991) et de 0.98 pour la végétation (Oke, 1980; Phinney et Arp, 1979; Elvidge, 1988). Elle est fixée arbitrairement à 0.98 avec une précision sur la mesure de température de l'ordre de 2K.

Le profil thermique dans le sol est mesuré par des sondes platines reliées à un système d'acquisition, avec une scrutation tous les quarts d'heure. Elles sont implantées jusqu'à 1m de profondeur et de façon très régulière dans les dix premiers cm du sol (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 25, 50, 100cm).

6.1.2 Caractéristiques du sol

La texture du sol de la parcelle télédétection est de nature limono-argileuse (limon 62%, argile 27%, sable 11%). La teneur en eau du sol est estimée par des mesures gravimétriques sur les dix premiers cm du sol (0-0.5, 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-10 cm). Les résultats détaillés des mesures d'humidité du sol sont donnés dans l'annexe 4. La masse volumique sèche (ρ_d) du sol est mesurée à l'aide d'une sonde à transmission gamma ($\rho_d = 1.35 \text{ g/cm}^3$ sur une couche de quelques cm en surface). Au cours de la campagne de mesure, l'évolution de la teneur en eau volumique m_v sur les strates de surface du sol [0 - 0.5cm] et [0 - 3cm], est présentée dans la figure (6-1). On peut observer sur la couche très superficielle [0 - 0.5cm], des phases caractéristiques de dessèchement plus rapide et des phases de réhumectation légèrement plus marquée que sur la strate [0 - 3cm]. L'irrigation et les précipitations maintiennent une teneur en eau du sol relativement élevée: $m_v > 0.12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ sur la strate [0 - 3cm]. Par ailleurs le jour 211, 6 jours après le semis, un orage très violent lissa la surface du sol. Ces conditions de très faible rugosité de surface ne changèrent pratiquement pas au cours de la campagne de mesure.

6.1.3 Caractéristiques du couvert végétal

6.1.3.1 Protocole des mesures

Le protocole de mesure des caractéristiques de la végétation est inspiré de Baret (1986) et Oliosio (1992). Les mesures de biomasse et de teneur en eau de la végétation ont été réalisées sur 3 échantillons de plantes, prélevés chacun sur un mètre linéaire (l'écartement moyen des rangées étant de l'ordre de 30cm). Le prélèvement des échantillons a été généralement conduit dans la matinée (7 - 8H TU), deux fois par semaine. La teneur en eau gravimétrique M_g de la végétation a été obtenue par pesée de la matière végétale avant et après passage à l'étuve (105°C pendant 24H). Les mesures de l'indice foliaire par planimétrie et de teneur en eau des différentes composantes de la plante (feuilles, pétioles, tiges et gousses) ont été réalisées sur un sous-échantillon de 3 plantes. La mesure de hauteur du couvert est une moyenne sur 30 mesures environ. L'estimation de volume de la végétation a été fondée sur la mesure des dimensions des différentes composantes du couvert: épaisseur (à l'aide d'un capteur de déplacement), surface des feuilles, longueur et diamètre des tiges et pétioles qui sont assimilés à des assemblages de cônes. Les nervures sur la face interne des feuilles ont été prises en compte par l'intermédiaire d'un coefficient correcteur de l'épaisseur T_{cf} mesuré sur un échantillon de feuilles ($T_{cf} =$

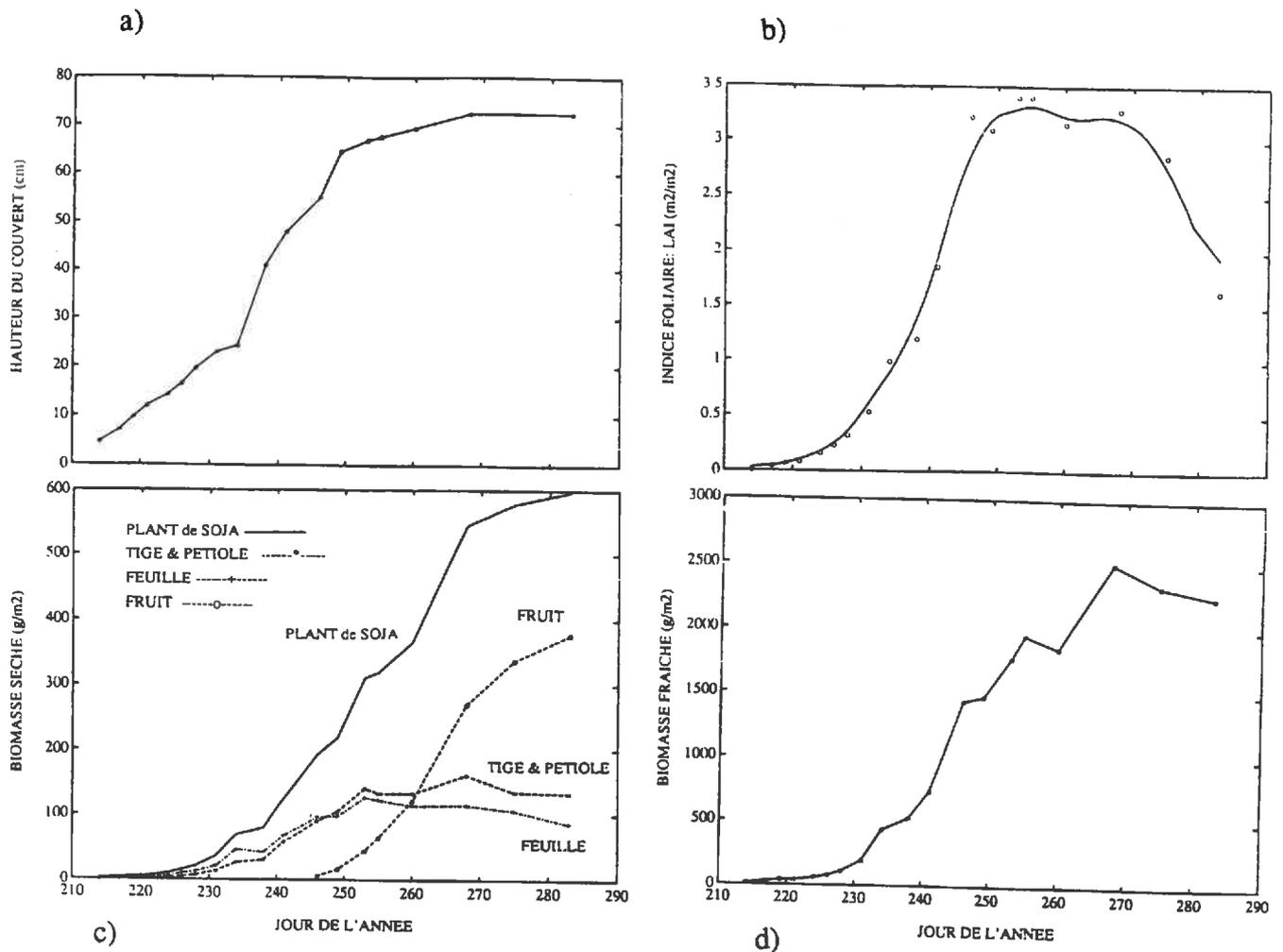


Figure 6-2: Hauteur (a), Indice Foliaire (Leaf Area Index: LAI) (b), biomasse sèche (c) et biomasse fraîche (d) du couvert de soja (expérimentation PORTOS-91).

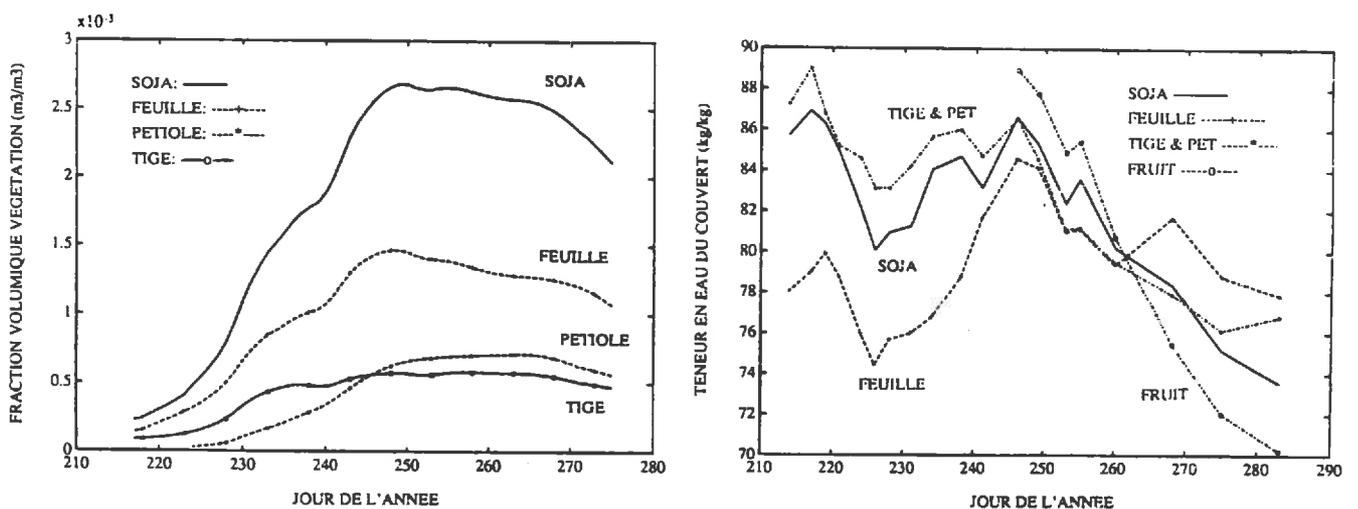


Figure 6-3: Fraction volumique f_v de la végétation et de ses différentes composantes: feuilles, tiges, pétioles (expérimentation PORTOS-91).

Figure 6-4: Teneur en eau gravimétrique M_g de la végétation et de ses différentes composantes: feuilles, tiges&pétioles, gousses (expérimentation PORTOS-91).

1.18). Ce coefficient corrige les mesures d'épaisseur foliaire ep , réalisées sur des zones sans nervure. L'épaisseur corrigée $ep_c = ep.T_{cf}$ est l'épaisseur équivalente d'une feuille sans nervure, de volume équivalent à celui d'une feuille nervurée. La densité de matière sèche des feuilles ρ_{sf} (g/cm^3) est calculée à partir du *shrinking model* (Cf section 3.1), en fonction des mesures de volume V_i et de poids sec P_s et frais P_f des feuilles selon:

$$\rho_{sf} = (1 + (\rho_0 V_i - P_i) / P_s)^{-1} \quad (6-1)$$

où ρ_0 désigne la masse volumique de l'eau (g/cm^3).

Les mesures portant sur l'orientation des feuilles ont été réalisées grâce à un appareil développé par F. Baret (INRA Bioclimatologie, Avignon) associant un inclinomètre électronique et une boussole. Trois mesures par feuille assuraient une description précise de l'orientation foliaire.

Les résultats de l'ensemble de ces mesures sont présentés dans les figures (6-2 à 6-8).

6.1.3.2 Caractéristiques générales du couvert

L'évolution de la hauteur moyenne du couvert est représentée dans la figure (6-2.a). La hauteur maximum est de l'ordre de 0.70cm pour un LAI_{max} de 3.5 (figure (6-2.b)). La mesure de hauteur ne prend pas en compte la modification importante de structure du couvert, causée par un violent orage, en fin du jour 268. Le soja fut alors couché sur de larges zones sur lesquelles le sol était en partie découvert. Ce changement de structure de la végétation affecte les jours de mesure 269, 270, 273. Au cours du développement du couvert de soja, l'évolution de la biomasse sèche B_s (kg/m^2) et fraîche B_f (kg/m^2) de la végétation est représentée dans les figures (6-2.c-d). On note des niveaux de biomasse sèche assez voisins pour les feuilles et l'ensemble (tiges & pétioles). L'apparition des gousses (jour 245) est observée quelques 40 jours après le semis. En fin de campagne de mesure (jour 273) la biomasse sèche des fruits est alors deux à trois fois plus importante que celle des feuilles.

La figure (6-3) montre l'évolution de la fraction volumique f_v de la végétation et de ses composantes (feuilles, tiges, pétioles). On note en fin de croissance du soja l'augmentation de la part des feuilles et des pétioles, alors que la part des tiges se stabilise. L'ensemble (tige + pétiole) représente plus de la moitié de la fraction volumique globale du couvert qui atteint 0.27% à son niveau maximum ($LAI_{max}=3.5$). Dans ce bilan les gousses ne sont pas prises en compte. On peut estimer que dès le jour 255, leur part en terme volumique, devient significative, sinon prédominante en fin de campagne de mesure (jour 273).

L'évolution de la teneur en eau gravimétrique M_g de la végétation est montrée dans la figure (6-4). Ces résultats sont ceux d'un couvert soumis à des phases plus ou moins régulières de dessiccation et réhumectation, et où l'eau n'apparaît à aucun moment comme facteur limitant du développement de la végétation. M_g varie entre 0.87% et 0.73% au cours du cycle cultural. En fin de cycle, sa décroissance jusqu'à $M_g=0.73$ est liée principalement à la dessiccation continue des gousses. La teneur en eau des feuilles M_{gf} décroît plus ou moins régulièrement depuis $M_{gf}=0.89\%$ (en tout début du cycle de végétation) jusqu'à $M_{gf}=0.78\%$ (en fin de cycle).

La déduction à partir de M_g , de la teneur en eau volumique M_v du couvert, qui intervient dans le calcul de la constante diélectrique, nécessite l'estimation de la densité de matière sèche végétale ρ_s (g/cm^3). Cette estimation pour la végétation (ρ_s) et pour les feuilles (ρ_{sf}) est montrée dans les figures (6-5.a-b). On note la décroissance régulière de ρ_{sf} au cours du développement végétatif. Des modifications structurelles de la forme et de la taille des cellules peuvent expliquer cette évolution. Elle peut être aussi reliée à des modifications dans les teneurs relatives des composants moléculaires des feuilles. Ainsi divers travaux sur le soja mettent en évidence des modifications du stock de saccharose et d'amidon foliaire, ou l'enrichissement en composés azotés foliaires durant la période végétative et leur mobilisation au cours de la fructification (Bensari *et al.*, 1990; Calmés et Viala, 1987). La densité ρ_s

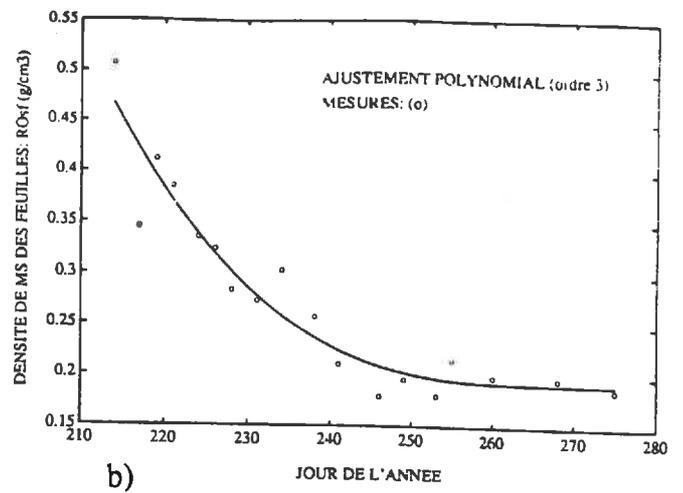
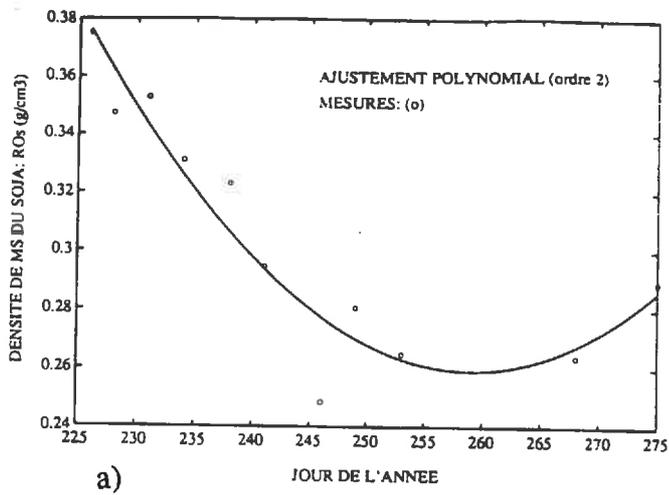


Figure 6-5: Densité de matière sèche de la végétation ρ_v (a) et des feuilles ρ_f (b) (expérimentation PORTOS-91).

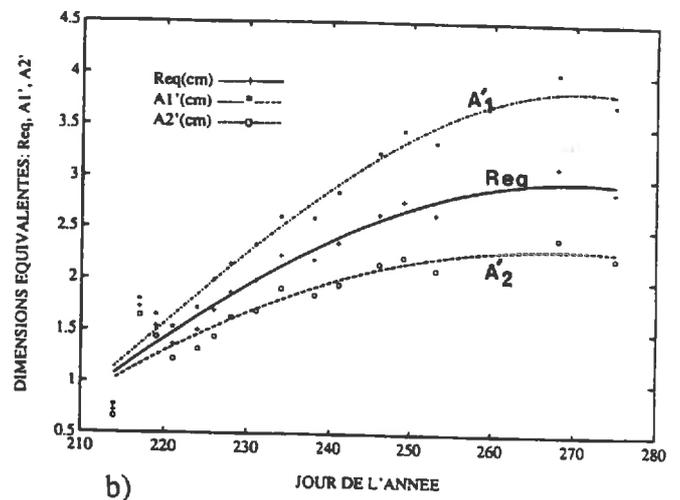
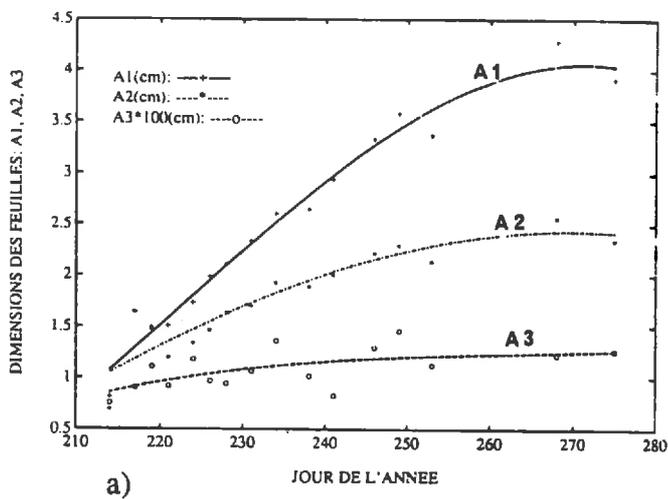


Figure 6-6: Dimensions des principaux demi-axes a_1 et a_2 et de la demi-épaisseur a_3 des feuilles (a) et dimensions équivalentes a_1' , a_2' et R_{eq} (b) (ajustement polynomial des mesures, expérimentation PORTOS-91).

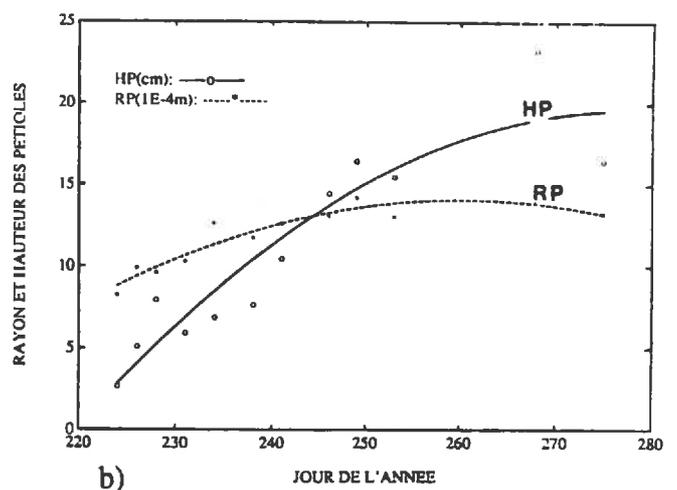
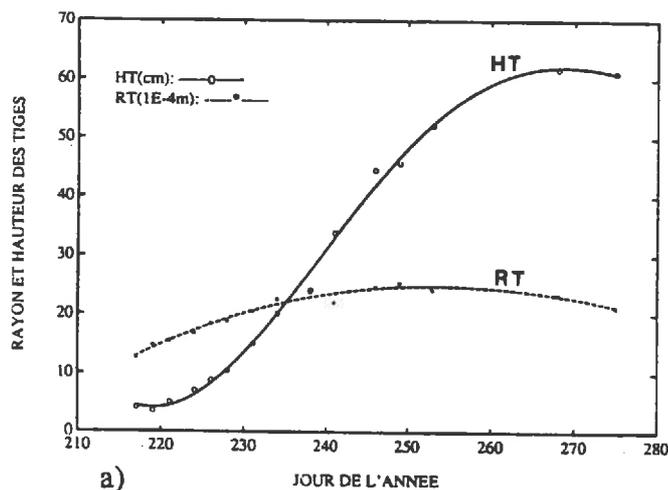
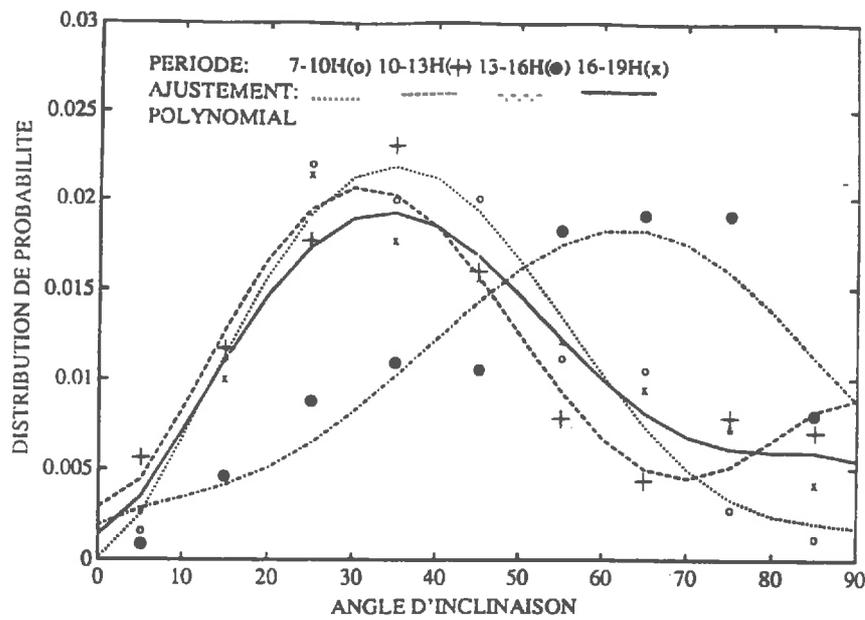
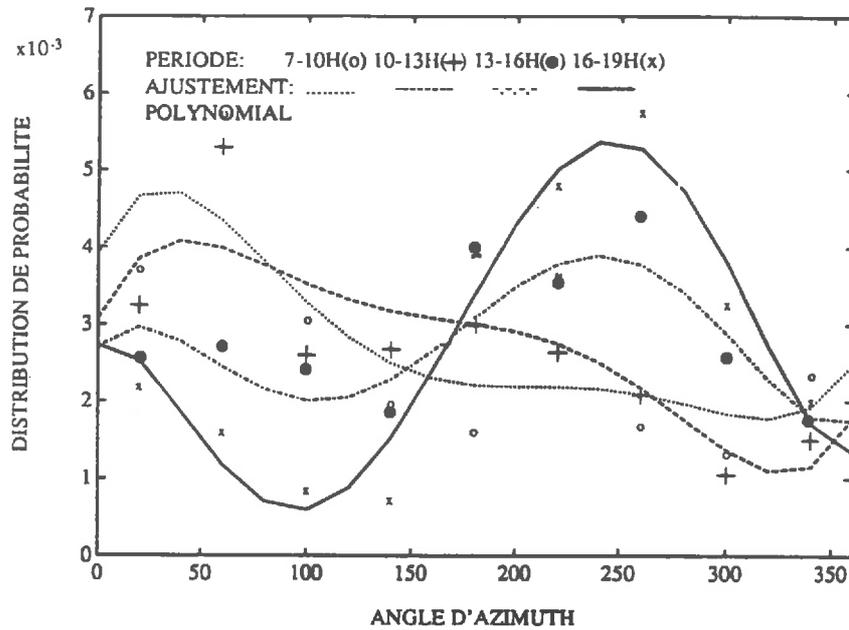


Figure 6-7: Dimensions équivalentes d'un cylindre de hauteur H_q et de rayon R_q représentatif caractéristiques moyennes des tiges: $q=t$ (a) et des pétioles: $q=p$ (b) (ajustement polynomial des mesures, expérimentation PORTOS-91).



a)

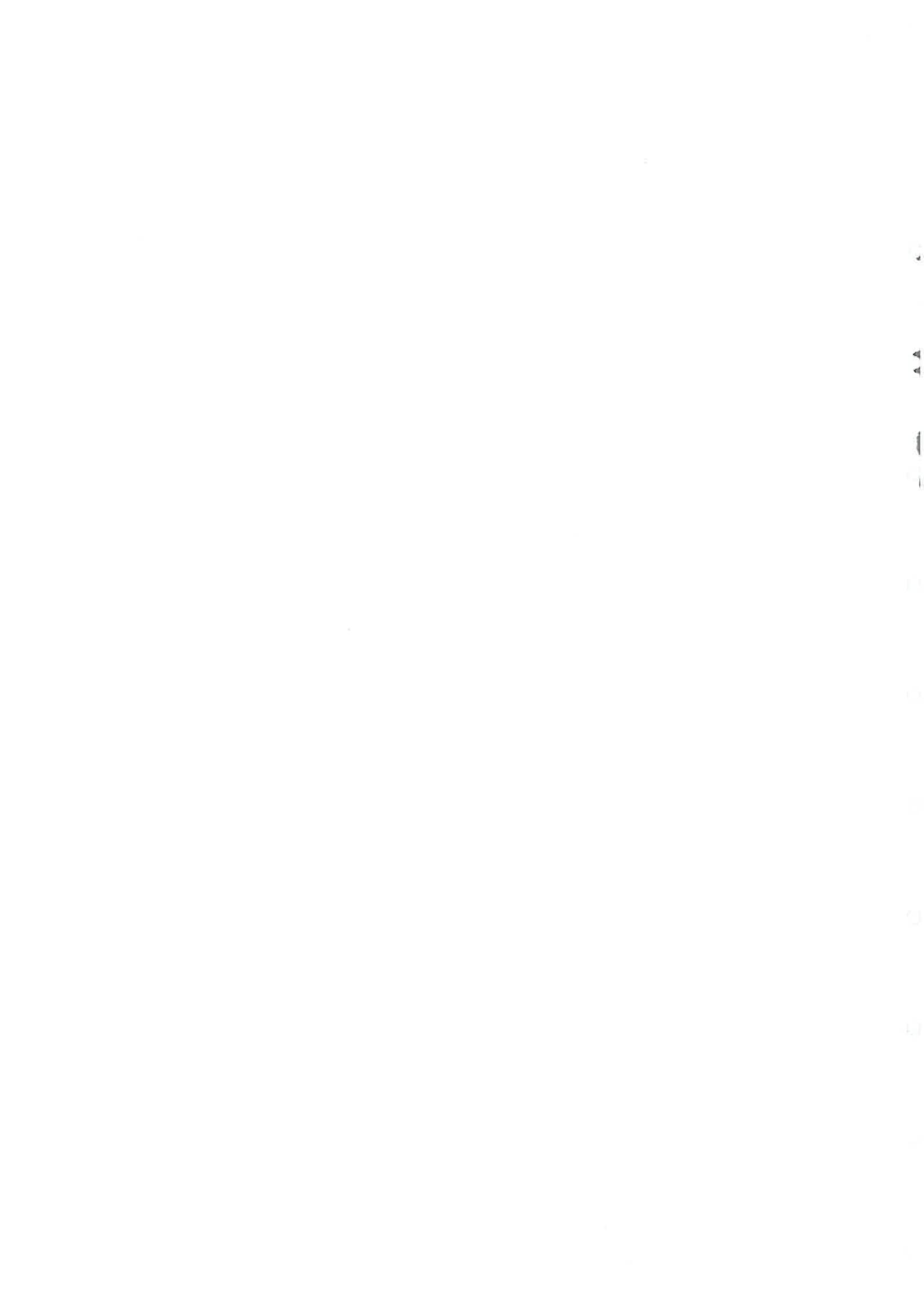


b)

Figure 6-8: Fonctions densité de probabilité d'orientation des feuilles en inclinaison (a) et azimuth (b) pour 4 tranches horaires [7h,10h], [10h,13h], [13h,16h], [16h,19h] (expérimentation PORTOS-91).

Tranches horaires & Jours de mesure	μ	ν	$\langle\theta\rangle$	RMSE
[7h, 10h] J232, 239, 252	3.66	2.53	36.77	1.64e-3
[10h, 13h] J232, 239	4.41	2.68	34.02	3.02e-3
[13h, 16h] J232, 267	1.53	2.30	54.05	2.15e-3
[16h, 19h] J232, 239, 252, 267	2.78	2.02	37.89	3.09e-3
[13h, 16h] J234, 235 (diffus)	6.80	5.60	40.66	3.06e-3
[15h, 17h] J239 (vent)	3.33	1.93	33.0	2.19e-3

Tableau 6-2: Paramètres (μ, ν) de la fonction Beta (Goël et Strebel, 1984) des distributions en inclinaison sur quatre tranches horaires [7h,10h], [10h,13h], [13h,16h], [16h,19h] et pour des conditions climatiques de lumière diffuse et de léger vent.



pour un couvert bien développé est de l'ordre de 0.27g/cm^3 . Ce résultat est voisin de celui calculé pour le maïs ($\rho_s=0.33\text{g/cm}^3$) par Ulaby et El-Rayes (1987).

6.1.3.3 Caractéristiques de structure des diverses composantes du couvert

Les caractéristiques des feuilles, des tiges et des pétioles du couvert de soja en termes de dimensions, forme et orientation, sont présentées dans ce paragraphe.

a) Dimensions et forme des diffuseurs

Dans la modélisation discrète les feuilles sont assimilées à des disques ou à des ellipsoïdes, et les tiges et pétioles à des cylindres. Les dimensions *équivalentes* correspondent aux dimensions de ces objets géométriques qui simulent les composants du couvert. Ce sont précisément les paramètres utilisés en entrée de la modélisation.

Les dimensions des demi-axes, a_1 et a_2 et de la demi-épaisseur a_3 des feuilles sont décrits dans la figure (6-6.a); les dimensions équivalentes a_1' , a_2' et R_{eq} sont représentées dans la figure (6-6.b). a_1' et a_2' sont les dimensions d'un ellipsoïde ayant même rapport des principaux demi-axes (a_1/a_2) et même surface qu'une feuille représentative des caractéristiques moyennes de l'ensemble du couvert. Parallèlement, R_{eq} est le rayon d'un disque dont la surface est égale à la surface moyenne des feuilles du couvert. On peut noter l'apparition des nouvelles feuilles (3^{ème} et 4^{ème} rang) qui font chuter le niveau moyen de a_1' , a_2' et R_{eq} au début du développement du couvert (figure (6-6.b)). Les dimensions équivalentes d'un cylindre de hauteur H_q et de rayon R_q représentatif des caractéristiques moyennes des tiges ($q=t$) et des pétioles ($q=p$) sont représentées dans les figures (6-7.a-b). On peut remarquer l'accroissement régulier de R_q tandis que H_q augmente modérément ($q=p$ ou $q=t$).

b) Orientation des diffuseurs

Ces données de structure doivent être complétées par des informations sur l'agencement dans l'espace des différents composants du couvert. Ainsi la disposition précise d'un objet quelconque dans l'espace est paramétrisée par 6 variables indépendantes (classiquement 3 variables de position (x,y,z) et trois variables angulaires (α,β,γ)). Pour les feuilles assimilées à des disques, deux paramètres angulaires sur trois suffisent. Ce sont généralement les paramètres d'orientation en inclinaison et en azimuth.

Ainsi, plusieurs jours ont été consacrés à des mesures plus ou moins intensives d'orientation en inclinaison et azimuth des feuilles du couvert de soja. Ces mesures ont été regroupées par tranches horaires de trois heures: [7h,10h], [10h,13h], [13h,16h], [16h,19h]. Elles sont pondérées en fonction de la surface foliaire et moyennées sur plusieurs jours. Les résultats sont représentés dans les figures (6-8.a-b). Ils sont lissés par une fonction polynomiale qui permet de prendre en compte deux extrema sur le domaine de variation angulaire, en particulier pour l'azimuth. Ces fonctions en inclinaison ont été également représentées dans le tableau (6-2) par une distribution Beta (Goël et Strebel, 1984), plus simple à mettre en oeuvre dans les modèles.

Ces résultats montrent des variations significatives des distributions d'orientation au cours de la journée. Le port foliaire érigé l'après-midi se distingue du port plutôt planophile le matin et le soir. Les variations en azimuth montrent clairement un pic dans la fonction densité de probabilité en direction du soleil (0° =Est, 360° =Ouest). Ces mouvements correspondent à un comportement héliotropique classique chez les légumineuses (Oliosio, 1992). Le couvert ne subissant pas de stress hydrique, ces variations ne paraissent pas reliées à un phénomène d'évitement (parahéliotropisme) lorsque le soleil est haut dans le ciel. Il est vérifié par ailleurs qu'il n'existe pas de corrélation significative entre les orientations en azimuth ϕ et en inclinaison β , selon les recommandations de Kimes et Kirchner (1983).

Fréquence GHz	1,4135	5,05	10,65	23,8	36,5	90
Bande MHz	$\pm 13,5$	± 50	± 50	± 200	± 200	$\geq \pm 500$
Ouverture du faisceau à - 3 dB	12,5°	12,5°	12,5°	10°	10°	10°
Polarisation	H ou V	H et V	H et V	H ou V	H ou V	H et V
Efficacité de faisceau à l'intérieur de -20dB	$\geq 90 \%$					
Angle d'incidence i	$0^\circ \leq i \leq 50^\circ$					
Précision de pointage	1° pour et entre chaque faisceau					
Sensibilité	0,5 K					
Précision	3 K					

Tableau 6-3: Spécifications générales de PORTOS (d'après Padovan (1991a)).

TEMPERATURE ANTENNE	90 K	250 K
Sensibilité du récepteur	0,5 K	0,5 K
Dérive en gain $\frac{\delta G}{G} (T'_A - T_{REF})$ pour $\frac{\delta G}{G} = 2 \cdot 10^{-2} / ^\circ C$	1,8 K	0,6 K
Contrôle en température de la charge de référence : $T_{REF} = 313 K \pm 0,5 K$	0,5 K	0,5 K
RESOLUTION RADIOMETRIQUE (MQ) R	2,0 K	0,9 K
Erreur sur T'_A due aux erreurs de calibration absolue en deux points soit $T_C = 290 K$ et $T_F = 77 K$ à 0,3 K près $d'où \delta T'_A = \frac{T'_A - T_F}{T_C - T_F} \delta T_C \text{ et } \frac{T_C - T'_A}{T_C - T_F} \delta T_F (MQ)$	0,5 K	0,4 K
Contributions antenne et attitude avion :		
- angle d'incidence $\pm 0,5^\circ$	1,3 K	1,3 K
- polarisation $\pm 2^\circ$	0,2 K	0,2 K
- pertes par débordement de la lentille et lobes secondaires (sauf antenne 5,05 GHz)	1,5 K	1,5 K
PRECISION RADIOMETRIQUE ABSOLUE (MQ)	3,1 K	2,3 K

Tableau 6-4: Bilan radiométrique de PORTOS – Calcul de la résolution et de la précision absolue (d'après Padovan (1991a)).

Le port foliaire peut donc être décrit par deux distributions indépendantes et à une variable: $p_\beta(\beta)$ et $p_\phi(\phi)$.

Le port des pétioles a également fait l'objet de mesures d'orientation. Un léger et régulier accroissement de leur angle d'inclinaison moyen qui évolue de 69° (jour 230) à 75° (jour 270) a été mis en évidence.

6.2 Mesures radiométriques de PORTOS

6.2.1 Caractéristiques de PORTOS

6.2.1.1 Présentation générale de l'instrument

PORTOS a fait l'objet d'un contrat CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) pour son étude et son développement, passé auprès de Matra-Marconi Espace, entre 1988 et 1991. Il s'agit d'un radiomètre micro-onde multifréquence (1.4, 5.05, 10.65, 23.8, 36.5, 90GHz) du type sondeur, pouvant opérer sur des installations de terrain ou en mode aéroporté (en l'occurrence l'ARAT (Fokker 27 de l'Institut Géographique National)). En raison de contraintes d'encombrement au niveau de l'antenne (diamètre de 1.2m), le canal basse fréquence à 1.4GHz n'est disponible qu'en mode "terrain". Les principales spécifications de l'instrument sont données dans le tableau (6-3). Les six canaux hyperfréquences sont matériellement constitués de une ou deux voies suivant les polarisations (Padovan, 1991a):

–canaux H et V à 5.05, 10.65 et 90GHz: les deux polarisations sont mesurées simultanément, ce qui nécessite deux voies distinctes.

–canaux H ou V à 1.4, 23.8 et 36.5GHz: une seule polarisation est détectée. A 23.8 et 36.5 GHz, le changement de polarisation se fait par simple commutation. A 1.4GHz une seule polarisation est traitée: le changement se fait par rotation de 90° de l'antenne.

6.2.1.2 Modes de fonctionnement du radiomètre

Les contraintes opérationnelles de calibration absolue de l'instrument ont imposé un principe de mesure très éprouvé, fondé sur la modulation de Dicke (Skou, 1989). La figure (6-9) présente le mode de fonctionnement de Dicke des canaux 1.4, 5.05, 10.65 et 90GHz. Le signal amplifié et filtré par les cartes FI est transmis aux cartes AF de démodulation synchrone par les diodes tunnel de détection. Le signal est mis sous forme analogique (V_{OUT}) puis transmis à la centrale d'acquisition qui l'échantillonne toutes les 25ms et le numérise sur 12 bits. A 23.8 et 36.5 GHz, un commutateur de polarisation et un té orthomode sont insérés entre l'antenne et le commutateur de Dicke. Ils permettent la sélection de la polarisation verticale (V) ou horizontale (H). La fréquence de modulation est ajustée à 1KHz et la durée de mesure sur l'accès antenne (rapport cyclique) est de 0.5ms. Le signal V_{OUT} est relié à la température de brillance de l'antenne T_A' par la relation:

$$V_{OUT} = G.(T_{REF} - T_A')/2 \quad (6-2)$$

où T_{REF} désigne la charge interne de référence de Dicke ($T_{REF} = 320K$), et G désigne le gain de la chaîne complète (de l'ordre de 100dB). Aussi la résolution radiométrique sera fonction de l'efficacité du contrôle des fluctuations du gain et de la température de référence (tableau (6-4)). Sur le plan thermique, le contrôle à l'intérieur du radiomètre se fait autour de la consigne +50°C à +/-0.5°C pour une résolution radiométrique de l'ordre de 2K. En outre, la température de l'antenne T_A' 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 auto-émise par le capteur (terme de bruit) (Ulaby *et al.*, 1981). La précision radiométrique absolue sera donc directement reliée aux performances de l'antenne (tableau (6-4)).

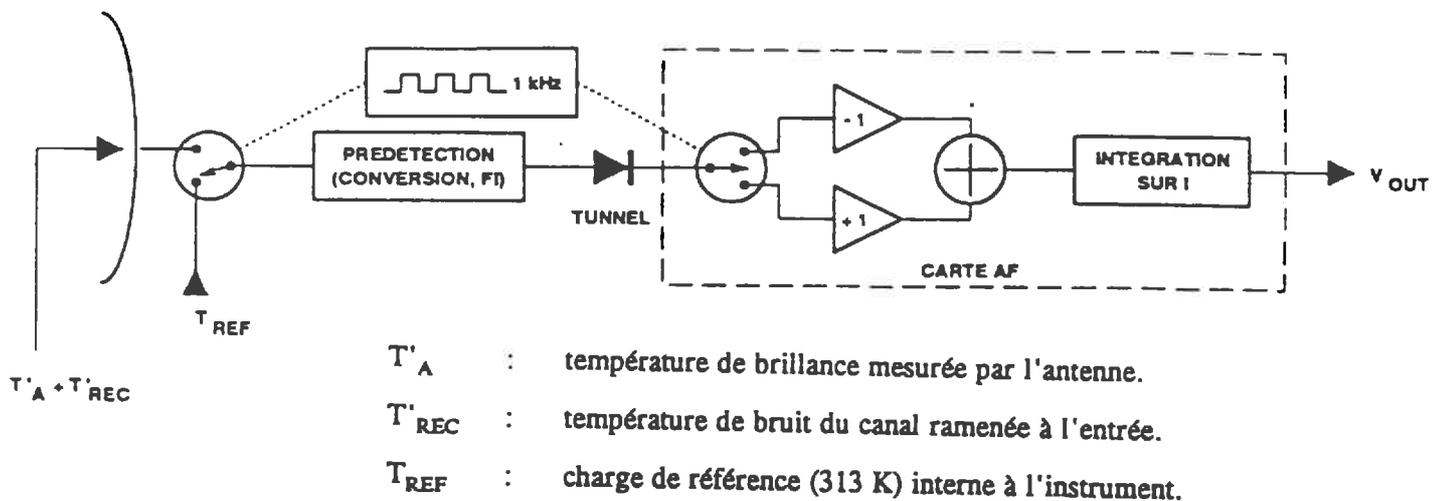


Figure 6-9: Principe de base du fonctionnement du radiomètre en mode Dicke (d'après Padovan (1991a)).

Frequence GHz	1,4135	5,05	10,65	23,8	36,5	90
ouvertures à -3dB plan E	12,5°	17-19°	13,0°	10,3°	9,6°	11,3°
-3dB plan H	11,0°	17°	13,5°	10,0°	9,6°	10,7°
-20 dB moy.	30°		39,2°	31,8°	31,5°	32,8°
Efficacité de faisceau à -20 dB	84 %		96 %	97 %	97 %	98 %
XPO max.	2,0 %	5,0 %	4,0 %	1,6 %	0,7 %	0,3 %
pertes antenne	0,7 dB		1 dB	1,4 dB	1 dB	0,4 dB

Tableau 6-5: Performances radioélectriques mesurées des antennes de PORTOS (d'après Padovan (1991b)).

6.2.1.3 Technologie et performance des antennes

Les antennes peuvent être considérées comme l'aspect le plus innovant de PORTOS. La principale contrainte qui détermine leur technologie est l'encombrement longitudinal admissible à l'intérieur de la cloche de pressurisation, en configuration avion. Cette contrainte de dimension décroît avec la fréquence: pour une résolution géométrique donnée, la taille de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence. Trois technologies différentes ont été développées pour répondre à ces contraintes en fonction des différentes fréquences (Padovan, 1991b):

- Cornet bi-mode focalisé par une lentille métallique pour les canaux 10.65, 23.8 et 36.5GHz.
- Réseau de cup dipôles avec coaxial carré à 5.05GHz
- Cornet bi-mode à 90GHz.

Les performances radioélectriques mesurées des différentes antennes de PORTOS sont données dans le tableau (6-5). L'antenne du canal 1.4GHz est du type parabolique centrée. Son diamètre projeté de 1.2m limite son utilisation à la configuration "terrain". Son efficacité de faisceau à -20dB apparaît médiocre ($\eta_{-20dB} = 84\%$). En corrolaire les lobes secondaires de l'antenne seront relativement importants et ajouteront un terme de bruit significatif à la mesure radiométrique. La technologie de l'antenne 5.05GHz est de loin la plus complexe. Ses performances qui sont en dessous des spécifications, ont imposé des modifications qui sont en cours. Les antennes à 10.65, 23.8, 36.5GHz et celles très simples des deux canaux à 90GHz ont des performances comparables et très satisfaisantes: ouverture à -3dB de l'ordre de 12° et efficacité de faisceau à -20dB supérieure à 95%. Le bilan radiométrique, calculé à partir des caractéristiques des antennes et de la fonction de transfert $V_{OUT}(T_A')$, est donné dans le tableau (6-4) (hormis à 5.05GHz).

Lors de l'expérimentation à Avignon, le radiomètre était simplement équipé d'antennes du type cornet à 1.4 et 5.05GHz. L'antenne parabolique 1.4GHz fut installée en fin de campagne de mesure (jour 265).

6.2.2 Mise en oeuvre des mesures radiométriques avec PORTOS

6.2.2.1 Etalonnage des données radiométriques

Des étalonnages réguliers des différents canaux ont été conduits au cours de la campagne de mesure. Diverses méthodes ont été utilisées: étalonnage sur charges chaudes, sur charges froides, sur eau et par mesure de la température de brillance du ciel:

- Etalonnage sur charge chaude (figure (6-10))

L'antenne vise un panneau d'absorbants pyramidaux. L'épaisseur du panneau doit être proportionnelle à la longueur d'onde du canal étalonné (de l'ordre de 4 à 5 λ). L'émissivité du panneau est voisine de 1, aussi sa température de brillance est très proche de la température de l'air ambiant (de l'ordre de 300K). Le canal à 1.4GHz, dont le lobe principal d'antenne imposait l'utilisation de panneaux très larges, n'a pas pu être étalonné selon ce procédé.

- Etalonnage sur charge froide

L'antenne vise cette fois un panneau d'absorbants pyramidaux immergé dans de l'azote liquide (figure (6-11)). La température de brillance émise est très proche de 77K. Pour des raisons d'encombrement des bacs, seuls les canaux moyennes et hautes fréquences (10.65, 23.8, 36.5 et 90GHz) ont été étalonnés selon ce procédé.

- Etalonnage sur eau (charge "tiède")

L'antenne vise une surface d'eau avec un angle d'incidence θ_i par rapport à la verticale. θ_i doit être supérieur à 10° pour limiter la mesure de radiations auto-émises par l'antenne et réfléchies par la surface (Wang *et al.*, 1980). Des acquisitions à incidence de l'ordre de 30° à 50° permettent de bien découpler les points de mesure des deux polarisation H et V. Par contre, pour ces incidences relativement élevées, la contribution du ciel (source très froide de quelques degrés K) dans les lobes

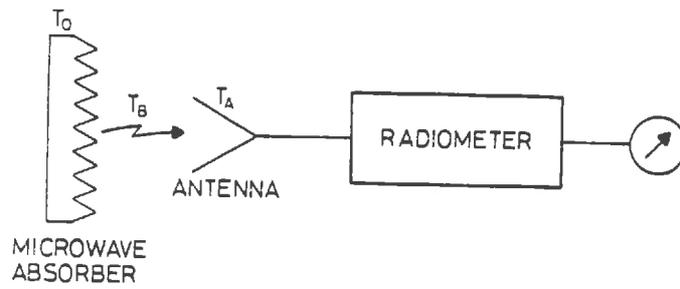


Figure 6-10: Dispositif expérimental de calibration de PORTOS sur charge chaude (d'après Skou (1989)).

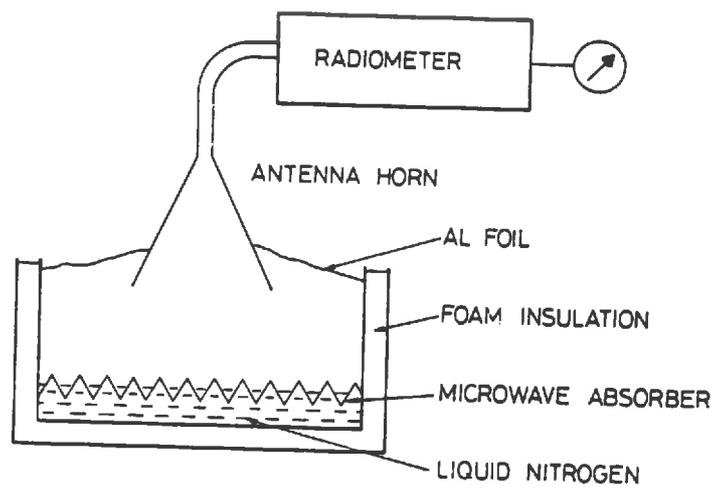


Figure 6-11: Charge froide de calibration du radiomètre. (d'après Skou (1989)).

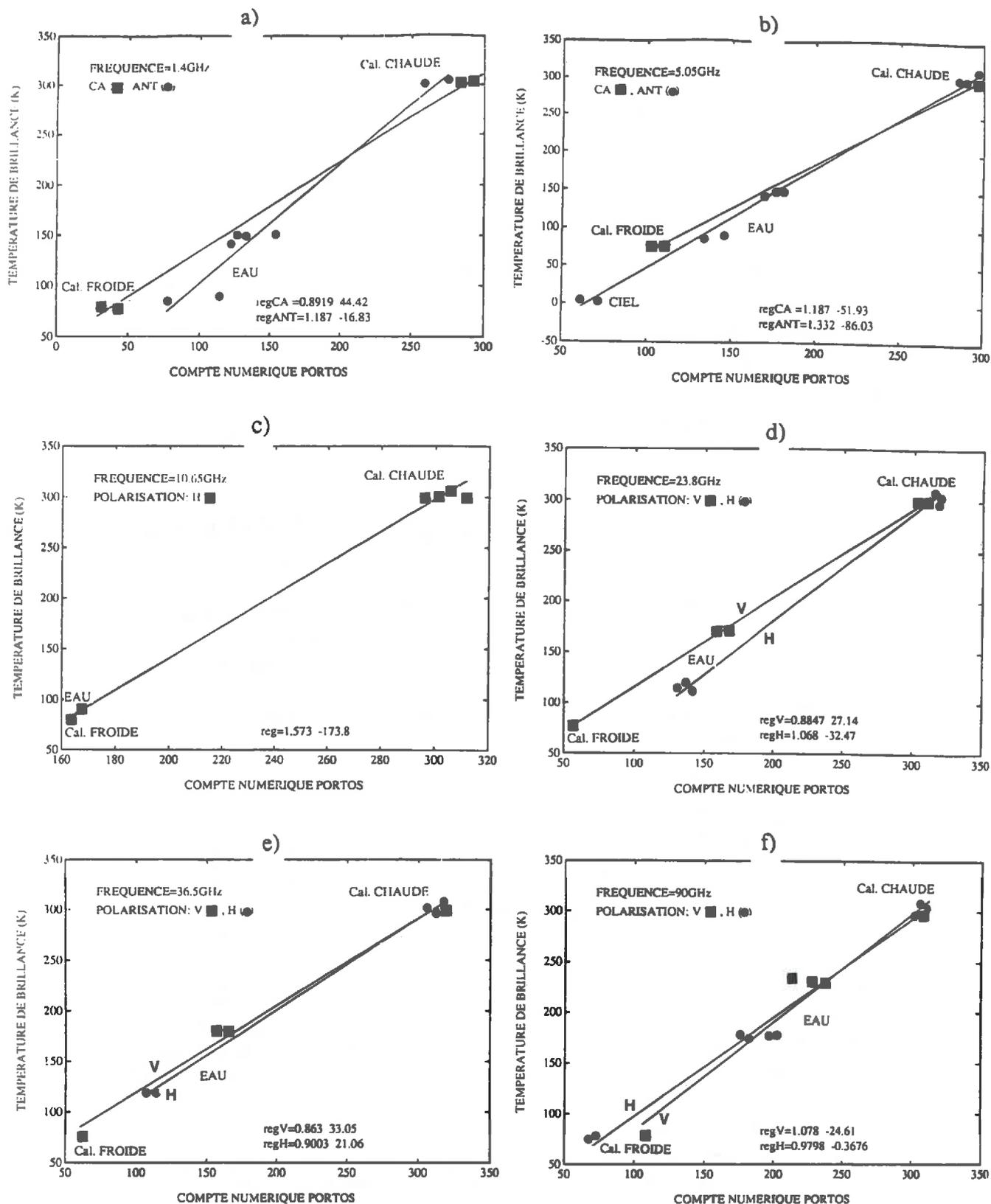


Figure 6-12: Droites de calibration du radiomètre PORTOS à 1.4 (a), 5.05 (b), 10.65 (c), 23.8 (d), 36.5 (e) et 90GHz (f) (reg désigne les coefficients de la droite de régression, CA et ANT désignent respectivement les mesures sur Charge Adaptée et sur Antenne).

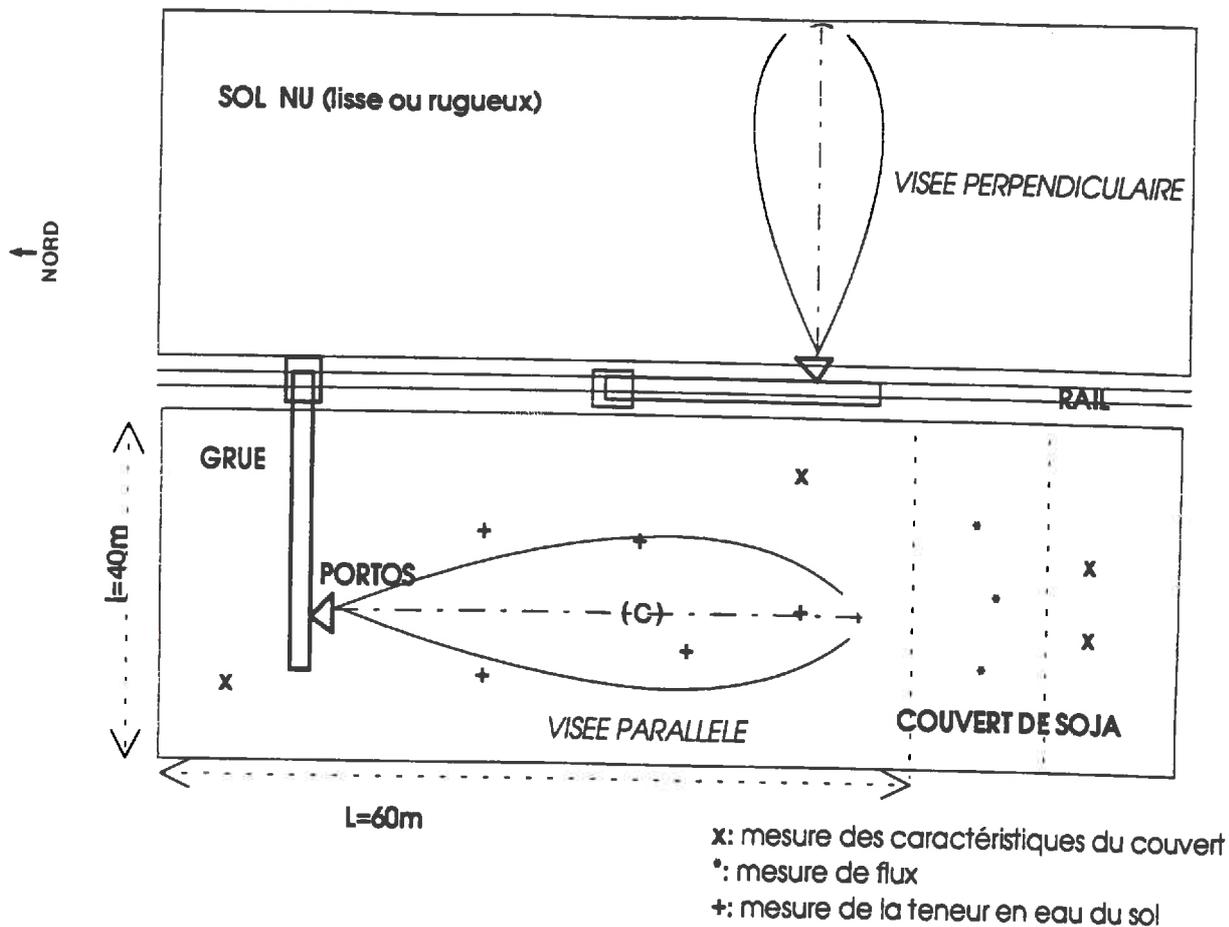


Figure 6-13: Dispositif expérimental de mesures radiométriques avec PORTOS sur couvert de soja (expérimentation PORTOS-1991).

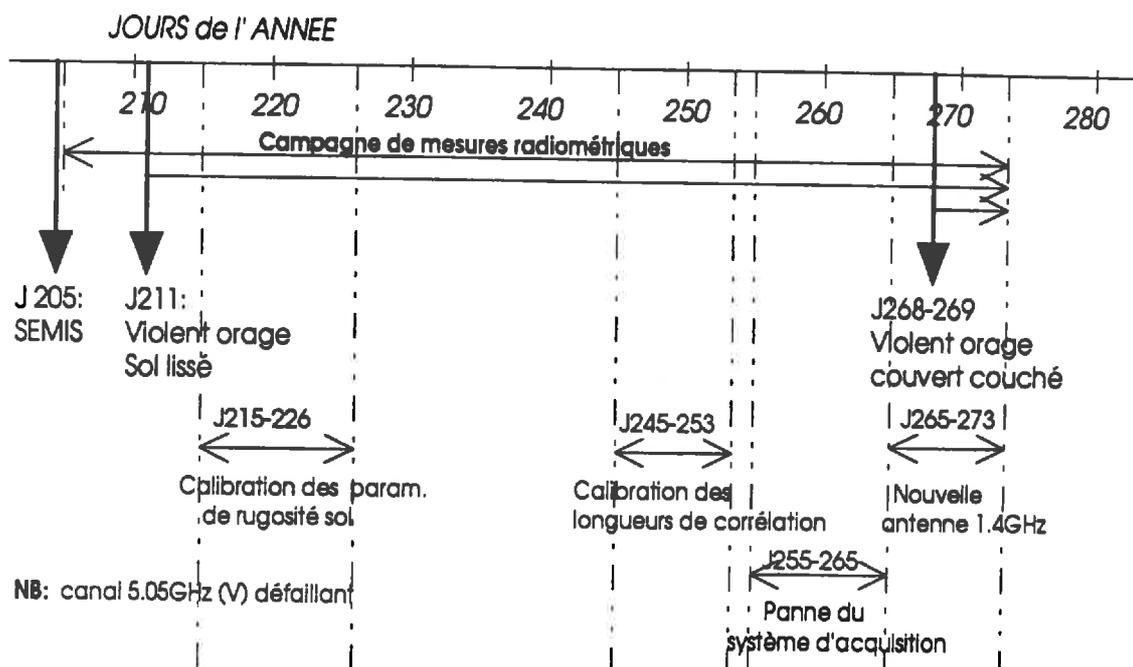


Figure 6-14: Bilan des acquisitions radiométriques de PORTOS (expérimentation PORTOS-91).

secondaires de l'antenne, peut dégrader la précision des étalonnages. Cet effet est particulièrement significatif à 1.4GHz où l'efficacité de faisceau à -20dB est réduite ($\eta_{-20dB} = 84\%$). Le calcul de la température de brillance de la surface d'eau prend en compte l'émission de l'eau et l'émission atmosphérique réfléchie. Aussi ces mesures ont été effectuées en conditions de ciel clair dont la température de brillance descendante T_{sky} peut être calculée avec précision à partir de données de radiosondage (Ulaby *et al.*, 1981). Ces mesures ont été conduites sur une piscine de quelques mètres de côté pour l'angle d'incidence $\theta_i = 45^\circ$. Les dimensions réduites de la surface de calibration ont rendu difficile la mise en oeuvre de cette mesure.

-Étalonnage par mesure de la température de brillance du ciel (charge très froide)

La mesure n'a pu être conduite que pour le canal 5.05GHz. Le cornet de l'antenne pouvait être séparé du support du radiomètre et orienté verticalement en direction du ciel. La mesure était effectuée en condition de ciel clair avec un angle d'incidence d'une dizaine de degrés pour dégager l'axe de visée des structures principales de la grue. La généralisation à tous les canaux de PORTOS de cette mesure très intéressante, par des techniques de réflexion des ondes E. M. sur des miroirs inclinés, doit être envisagée sérieusement.

-Étalonnage sur charge adaptée (CA)

Les canaux à 1.4 et 5.05GHz étaient équipés d'un cornet relié au corps du radiomètre par un câble coaxial. Ces deux canaux ont été étalonnés en connectant une charge adaptée coaxiale à ce câble, déconnecté de son accès SMA. Les mesures étaient conduites, après stabilisation, pour une charge à température ambiante ou immergée dans l'azote liquide. Cependant cette approche ne prend pas en compte les pertes d'antennes. Celles-ci sont dépendantes des conditions climatiques externes: les cornets (1.4 et 5.05GHz) et l'antenne parabolique (1.4GHz) se trouvant hors de l'enceinte thermostatée de l'instrument. Ce moyen d'étalonnage permet, par contre, une caractérisation précise de la fonction de transfert $V_{OUT}(T_A')$.

Une ou plusieurs de ces techniques ont été mises en oeuvre chaque jour de mesure radiométrique. Les droites d'étalonnage des figures (6-12.a-b-c-d-e-f) en résultent. On peut constater une relative dispersion des points de mesure autour des droites de régression. Cette dispersion provient pour partie de l'imprécision des mesures lors des phases d'étalonnage. Cette imprécision est liée à divers problèmes pratiques: récipient d'azote liquide inapproprié, manque d'isolation thermique des panneaux d'absorbant, sous-dimensionnement du plan d'eau, etc.. La dispersion est également liée à des problèmes propres au radiomètre, en particulier la sensibilité des mesures à la polarisation V ou H des canaux 23.8 et 36.5GHz, et l'insuffisance du contrôle thermique de PORTOS, qui est discutée dans le paragraphe qui suit. Compte-tenu de ces problèmes, la précision absolue des mesures radiométriques de PORTOS, fondée sur les droites d'étalonnage des figures (6-12.a-b-c-d-e-f), n'excède pas +/- 5K.

6.2.2.2 Déroulement des mesures radiométriques

En configuration "terrain", le radiomètre était installé sur la flèche d'une grue à 20m de hauteur. Les visées se faisaient soit dans l'axe du champ de soja (visée //), soit orthogonalement à cet axe (visée \perp). La grue se déplaçait sur des rails parallèles au champ de soja de manière à ce que, selon l'incidence, l'axe du capteur vise toujours la même cible (C) au sein du couvert (figure (6-13)). Les mesures étaient acquises pour des angles d'incidence de (0° à 60°) en visée // et de (20° à 50°) en visée \perp , avec un incrément de 10° . Ces angles étaient compatibles avec la tache au sol du lobe principal des différentes antennes qui devait être restreinte aux limites du champ. Les mesures se déroulaient généralement l'après-midi, avec une périodicité quasi-quotidienne (hormis les interruptions liées aux pannes de l'instrument et aux jours de mistral). Ce qui entre le jour 205 (24 juillet) et le jour 273 (30 Septembre) donne un bilan global de 40 journées de mesure (dont dix journées incomplètes). Plusieurs jours durant,

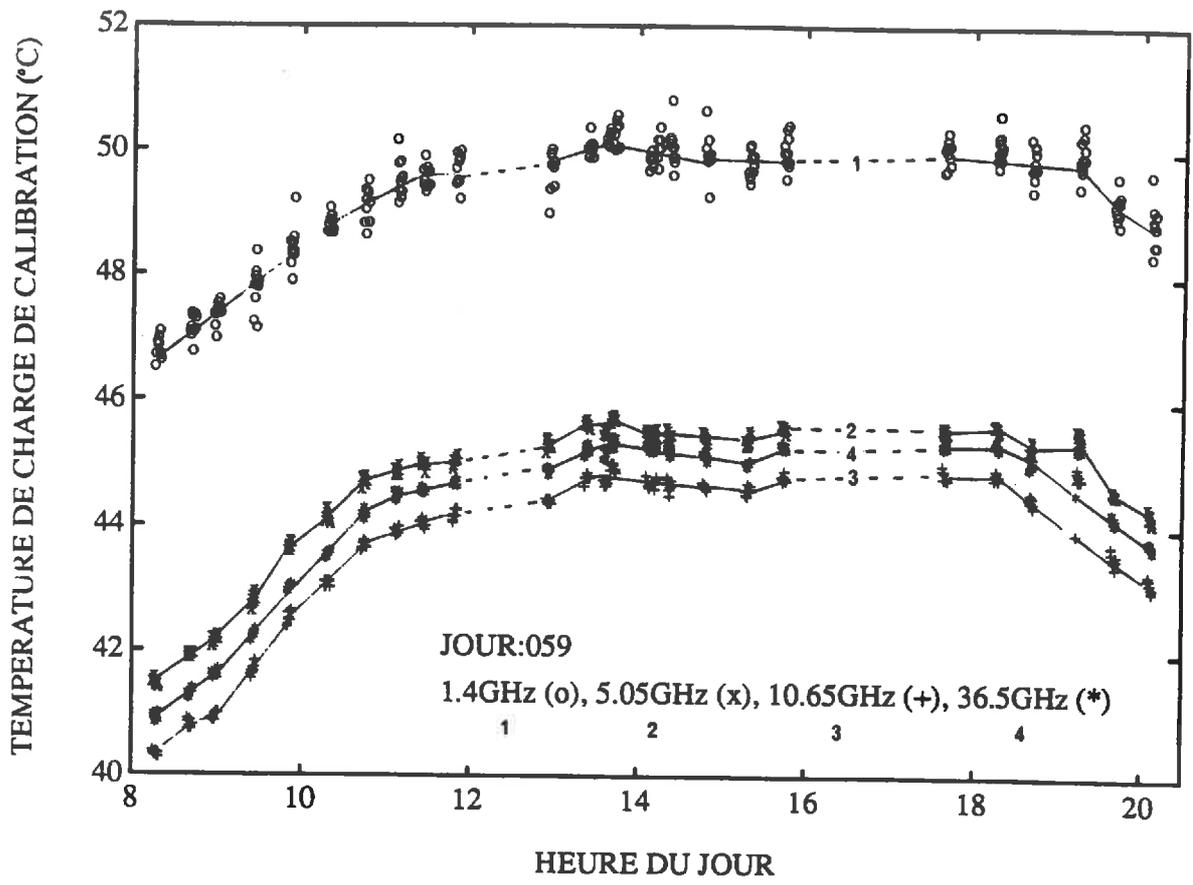


Figure 6-15: Evolution des températures T_C de charge de calibration des canaux 1.4, 5.05, 10.65 et 36.5GHz au cours du Jour 268 (05/09).

des mesures intensives tout le long de la journée ont été conduites (jours 245 à 249 en particulier). Un résumé descriptif de la campagne de mesure est présenté dans la figure (6-14).

Divers problèmes perturbèrent les acquisitions. Notons ainsi la défaillance, tout le long de l'expérimentation, du canal 10.65GHz en polarisation V; la défaillance assez fréquente du canal 23.8GHz; l'interruption des mesures du jour 255 au jour 265 liée à des problèmes d'acquisition des données. Un problème important, évoqué dans le paragraphe portant sur l'étalonnage des mesures PORTOS, s'est révélé au cours des mesures. Il s'agit de l'insuffisance du contrôle thermique du capteur, qui a affecté la précision radiométrique de l'ensemble des mesures. La figure (6-15) montre l'évolution des températures de charge T_C des canaux 1.4, 5.05, 10.65 et 36.5GHz, au cours d'une journée ensoleillée (jour 268), représentative des conditions climatiques estivales. La consigne thermique $T_{REF}=47^\circ\text{C}$ (+/- 0.5°C) n'est pas respectée et les températures de charge sont fortement sensibles à l'amplitude thermique diurne externe. Les variations de T_C sont typiquement de l'ordre de 5°C . Elles ont une répercussion directe sur la résolution radiométrique de PORTOS, par l'intermédiaire de l'équation (6-2). Aussi sans correction des effets de dérive thermique du capteur, l'analyse des données radiométriques est limitée dans ce travail, à l'évolution inter-journalière pour une période horaire commune (de 11 à 14H TU généralement).

6.2.3 Résultats des mesures radiométriques

6.2.3.1 Description du jeu de données radiométriques

Des procédures automatisées ont assuré le traitement des données radiométriques. Les données sont moyennées sur la période de mesure T_{mes} (T_{mes} est de l'ordre d'une dizaine de secondes pour une fréquence d'acquisition de 4KHz) et filtrées (élimination des mesures radiométriques présentant des écarts types élevés sur la période T_{mes}). Les données sont ensuite étalonnées en fonction des droites d'étalonnage (figure (6-12) et recalées par ajustement des valeurs de température de brillance $T_{Bv}(\theta=0)$ et $T_{Bh}(\theta=0)$. En effet, à 1.4 et 5.05GHz les mesures ne sont pas réalisées simultanément pour les deux polarisations et les configurations du lobe d'antenne ne sont pas identiques en (H) et en (V). Aussi les valeurs T_{Bv} et T_{Bh} ne coïncident pas toujours pour l'angle d'incidence $\theta=0$. Les températures de brillance ont donc été ajustées arbitrairement selon: $T_{Bv} = T_{Bv} + (T_{Bh}(\theta=0) - T_{Bv}(\theta=0))/2$ et $T_{Bh} = T_{Bh} + (T_{Bv}(\theta=0) - T_{Bh}(\theta=0))/2$. Enfin, les données sont sélectionnées pour différentes fenêtres horaires et ajustées par des fonctions de spline (Press *et al.*, 1986).

Le jeu de données radiométriques issu de ces traitements, sur lequel se fonde ce travail de thèse, comprend une série de 30 jours de mesure en visée //, au cours du développement du soja. L'angle d'incidence de la mesure varie de 0° à 60° (avec un incrément de 10°), la fenêtre horaire sélectionnée est celle de l'après-midi (11 – 14H TU généralement). Ce jeu de données est illustré par les figures (6-16.a-b-c-d-e) pour les fréquences 1.4, 5.05, 10.65, 36.5 et 90GHz, pour les jours J219 (sol quasi nu) et J252 (couvert de soja bien développé). On note la diminution très sensible à toutes les fréquences, de l'écart entre les polarisations V et H sur la mesure d'émission sur végétation par rapport au sol nu (bien que l'humidité du sol soit plus élevée le jour 252). On note également la régularité de l'évolution angulaire des données.

Une estimation de l'émissivité est obtenue en divisant la température de brillance mesurée T_{Bp} ($p=v$ ou $p=h$) par la température de surface du milieu T_{sm} mesurée par le radiothermomètre installé sur le support de PORTOS (soit $e_p = T_{Bp}/T_{sm}$). L'évolution de l'émissivité e_p ($p=v$ ou $p=h$) du couvert de soja et du rapport de polarisation R ($R=(e_v - e_h)/(e_v + e_h)$) au cours du développement de la végétation est représentée dans les figures (6-17.a-b-c-d-e) et (6-18.a-b-c-d), pour les fréquences 1.4, 5.05, 10.65, 36.5 et 90GHz et pour les angles d'incidence $\theta=0^\circ$ et $\theta=50^\circ$. Dans ces figures on peut observer une tendance générale assez nette dans l'évolution de e_p et de R , sur laquelle se superposent des variations amples et rapides. Deux paramètres principaux semblent déterminer cette évolution du signal mesuré. D'une part,

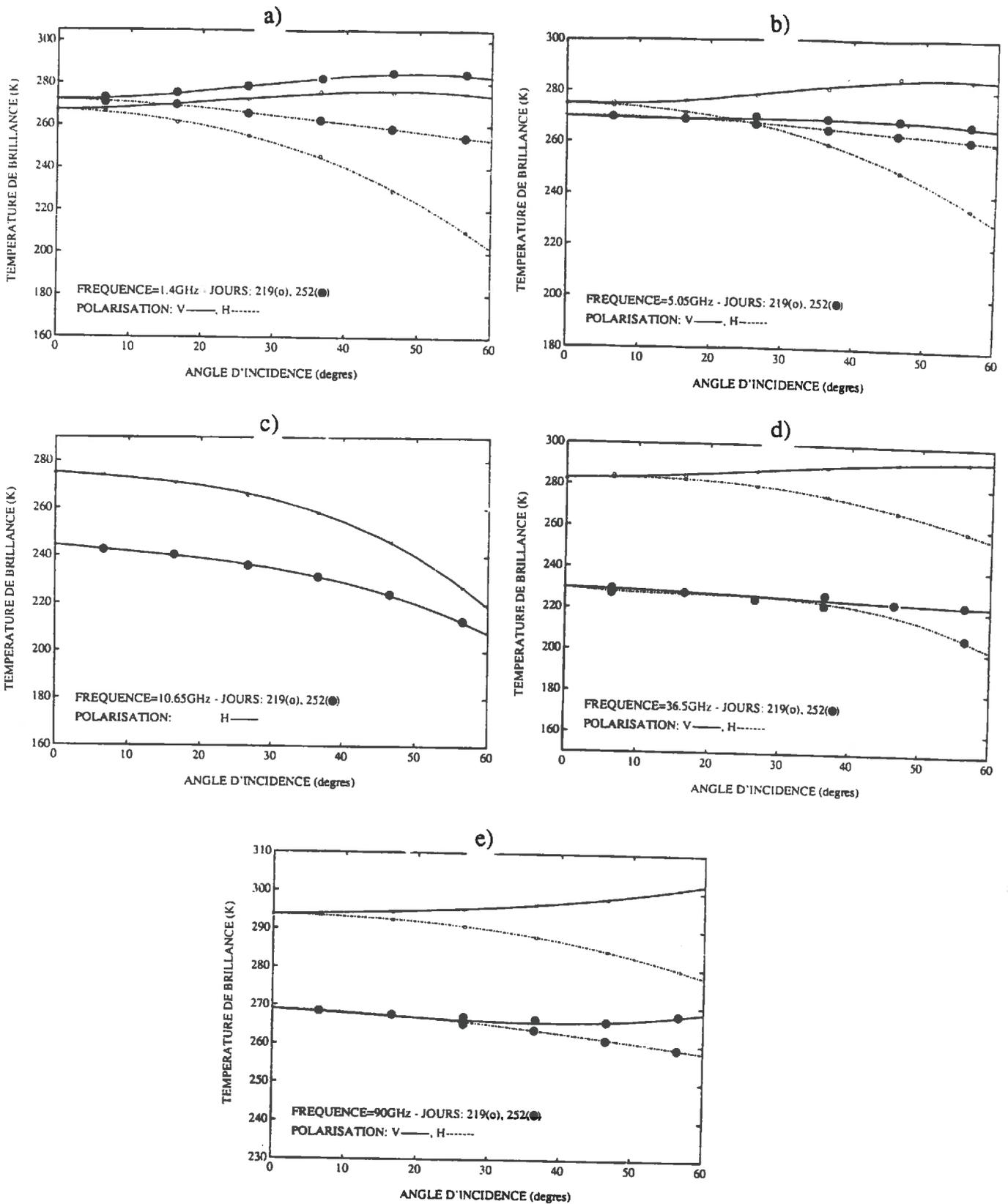


Figure 6-16: Evolution de la température de brillance en fonction de l'angle d'incidence θ , les Jours 219 et 252, pour les fréquences 1.4 (a), 5.05 (b), 10.65 (c), 36.5 (d) et 90GHz (e).

le développement du couvert végétal (qui sera paramétrisé par la fraction volumique de la végétation) semble déterminer la tendance des évolutions de e_p et R. D'autre part, les fluctuations brusques de e_p et R sont souvent corrélées aux variations de l'humidité du sol (figure (6-1)). La discussion de ces points dans les paragraphes qui suivent, s'appuyera sur l'étude de sensibilité du chapitre 6.

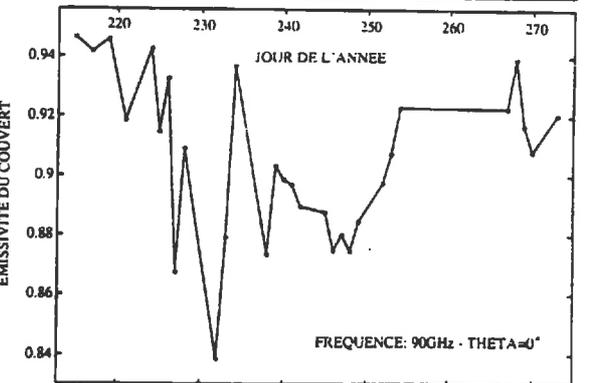
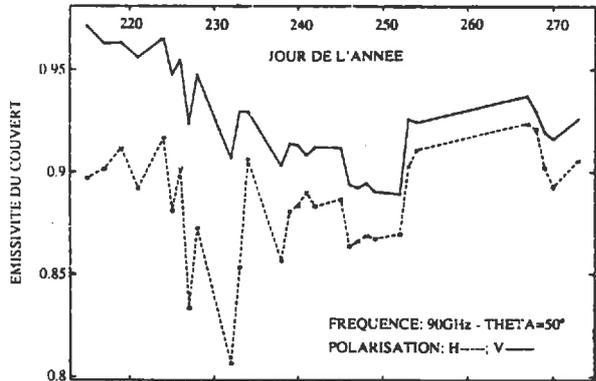
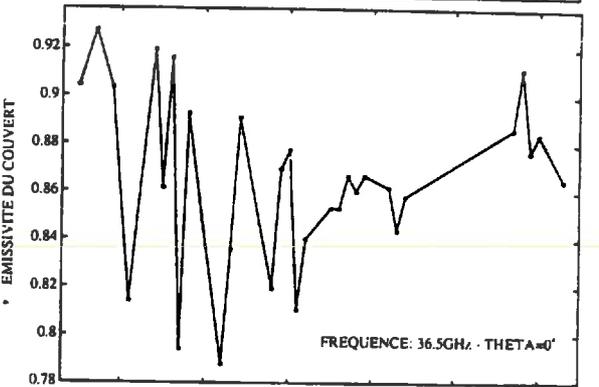
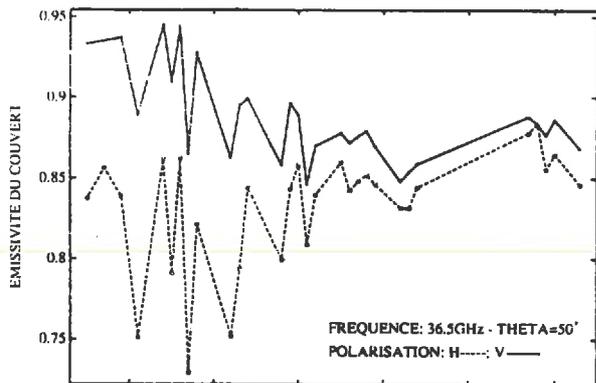
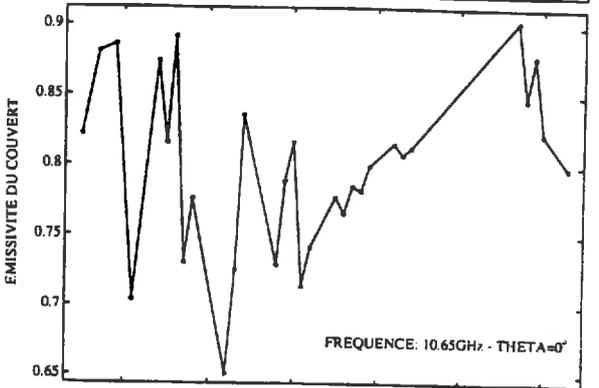
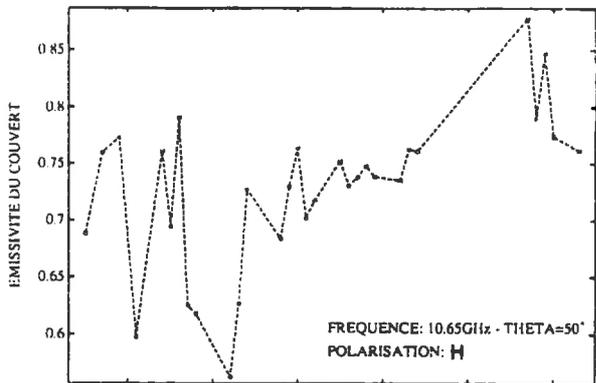
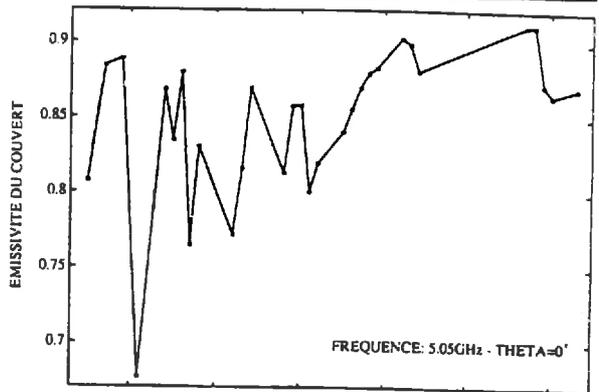
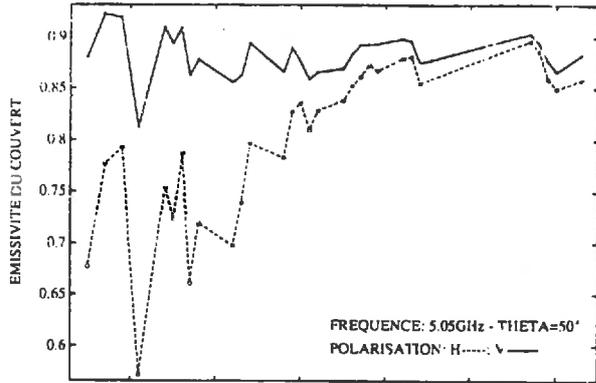
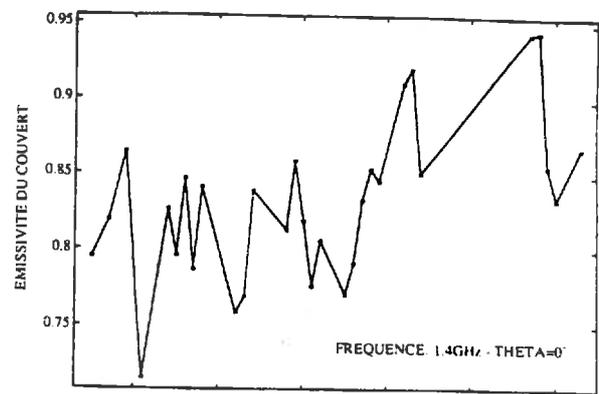
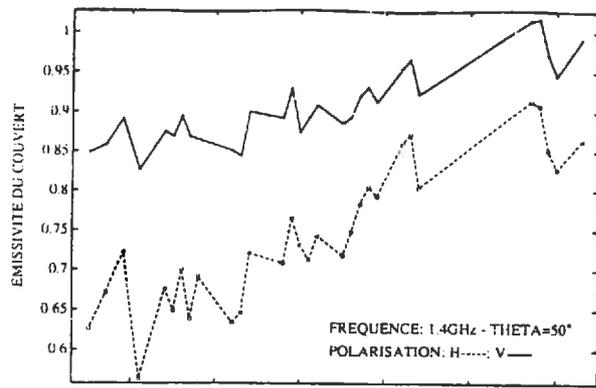
6.2.3.2 Contribution du couvert végétal à l'émission

Les tendances dans l'évolution de l'émissivité: principalement l'accroissement de e_v et e_h à 1.4GHz, l'accroissement de e_h à 5.05 et 10.65GHz, la décroissance de e_v à 36.5 et 90GHz, semblent bien reliées au développement du couvert. Ces observations sont beaucoup plus distinctes pour des angles d'incidence élevés ($\theta=50^\circ$) pour lesquels l'atténuation de la contribution du sol est importante. Le développement du couvert de soja s'observe également à travers la décroissance du rapport de polarisation R: tout d'abord à 36.5 et 5.05GHz lorsque f_v est de l'ordre de 0.13% puis à 1.4GHz lorsque f_v atteint 0.2%. Ces constatations sont cohérentes avec les résultats de l'étude de sensibilité: le développement de la végétation conduit à l'augmentation de l'émission micro-onde principalement à basses fréquences (1.4 et 5.05GHz), et à la dépolarisation du signal émis.

Pendant la période de J241 à J253, caractérisée par le développement du couvert et le dessèchement plus ou moins régulier du sol, l'interprétation du signal micro-onde est relativement difficile. L'évolution de l'émissivité e_p est assez peu marquée pour $\theta=50^\circ$, excepté à 1.4GHz où la décroissance du rapport de polarisation, reliée au développement du couvert, est sensible. Pour $\theta=0^\circ$, l'accroissement régulier de l'émissivité à 5.05 et 10.65GHz peut sans doute être relié à l'évolution des caractéristiques de la végétation (en particulier la diminution de la teneur en eau des feuilles à partir du jour 245). En effet cet accroissement est aussi bien marqué à 10.65 qu'à 5.05GHz. Ceci semble indiquer qu'il soit relié à l'émission de la végétation, et non pas à celle du sol dont l'atténuation s'accroît avec la fréquence.

Les conséquences du violent orage (durant la nuit de J268) sur les mesures radiométriques des jours 269, 270 et 273 sont difficiles à interpréter. Il est en effet difficile de dissocier l'influence de la forte humidification du sol et celle du changement de structure du couvert. Notons également que les mesures des jours 267 et 268 sont en bonne correspondance avec celles des jours 253 et 254, excepté à 10.6GHz. A cette fréquence, durant la période J245 à J273 sur couvert bien développé, on peut observer des fluctuations rapides de l'émissivité. Ces variations sont très probablement reliées à des changements dans les caractéristiques de la végétation: effets probables de la teneur en eau, de l'épaisseur foliaire et surtout de la distribution d'orientation des feuilles, qui est la plus susceptible de varier rapidement dans le temps et dont les effets sont importants en bande X (Cf Chap 6.). Divers indices montrent en effet que ces variations brusques ne sont pas liées à la contribution du sol: les variations sont plus marquées à fortes incidences, e_p décroît le jour 268 (sol sec) et croît les jours 245 et 269 (sol humide), etc..

Dans le but de mieux suivre l'évolution de la biomasse nous avons introduit l'indicateur PD_p (que nous désignerons par Différence de Polarisation modifiée), calculé selon $PD_v=(T_{Bv}-T_{Bh})*T_{Bv}$ et $PD_h=(T_{Bv}-T_{Bh})*T_{Bh}$. En effet le rapport de polarisation $R=(T_{Bv}-T_{Bh})/(T_{Bv}+T_{Bh})$ est fortement sensible aux variations d'humidité de la surface: $(T_{Bv}-T_{Bh})$ s'accroît et T_{Bp} décroît simultanément lors de l'humidification du sol (et inversement lors du dessèchement). Par contre, dans PD_p le produit par T_{Bp} atténue l'influence du niveau d'humidité du sol sur la différence de polarisation $(T_{Bv}-T_{Bh})$ (figures (6-19.a-b)). Pour les fréquences 1.4, 5.05 et 36.5 GHz, les niveaux de corrélation entre PD_p ou R et la fraction volumique de la végétation f_v sont donnés dans le tableau (6-6). PD_p améliore significativement la discrimination du niveau de biomasse par rapport à R. L'indicateur PD_p permet ainsi de mettre en évidence l'influence prépondérante du développement du couvert sur la tendance de l'émission micro-onde mesurée.



a)

b)

c)

d)

e)

Figure 6-17: Evolution de l'émissivité mesurée (e_v et e_h) du couvert au cours du développement de la végétation pour les fréquences 1.4 (a), 5.05 (b), 10.65 (c), 36.5 (d) et 90GHz (e), pour les angles d'incidence $\theta=0^\circ$ et $\theta=50^\circ$.

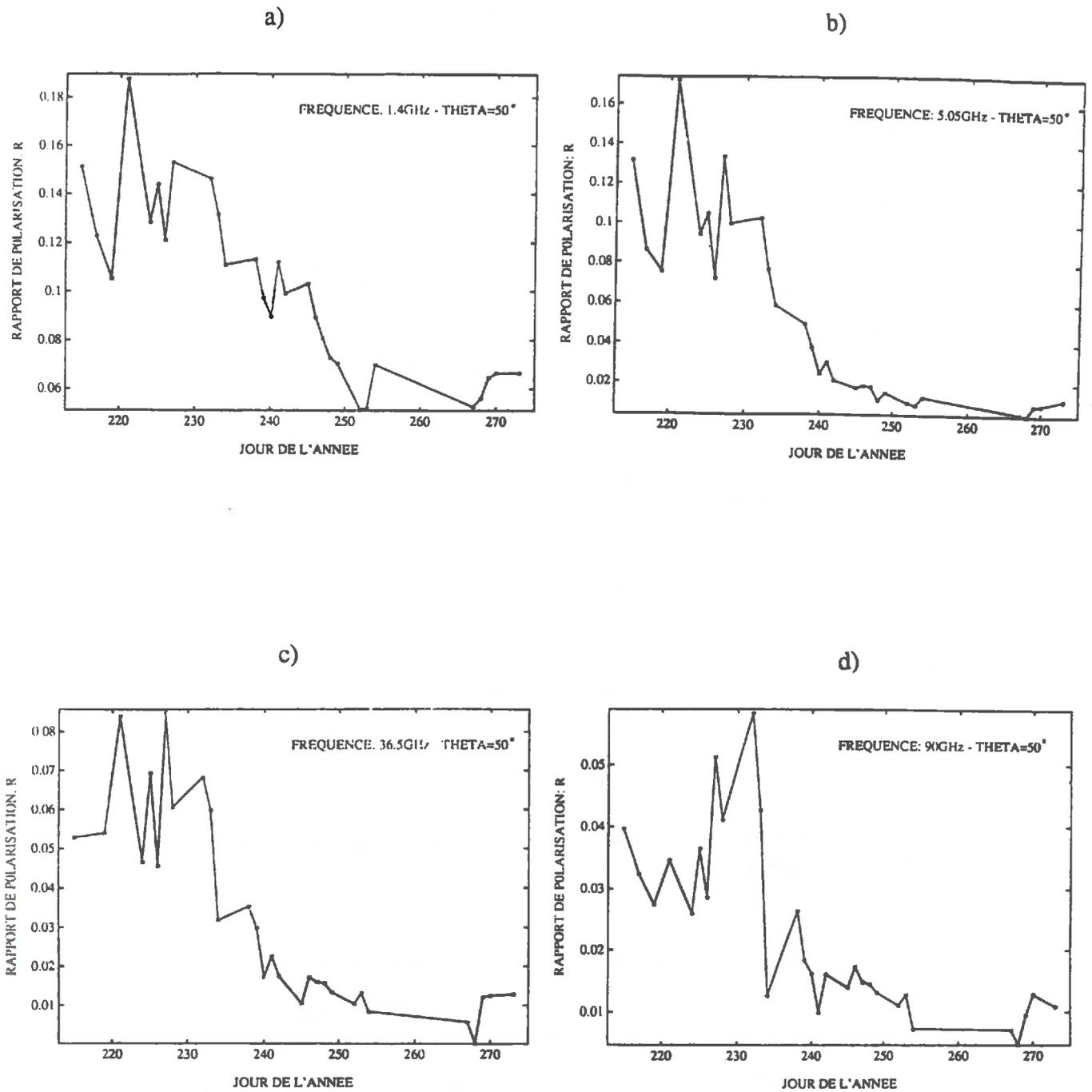


Figure 6-18: Evolution du rapport de polarisation mesuré ($R = (e_v - e_h) / (e_v + e_h)$) du couvert au cours du développement de la végétation pour les fréquences 1.4 (a), 5.05 (b), 36.5 (c) et 90GHz (d), pour l'angle d'incidence $\theta=50^\circ$.

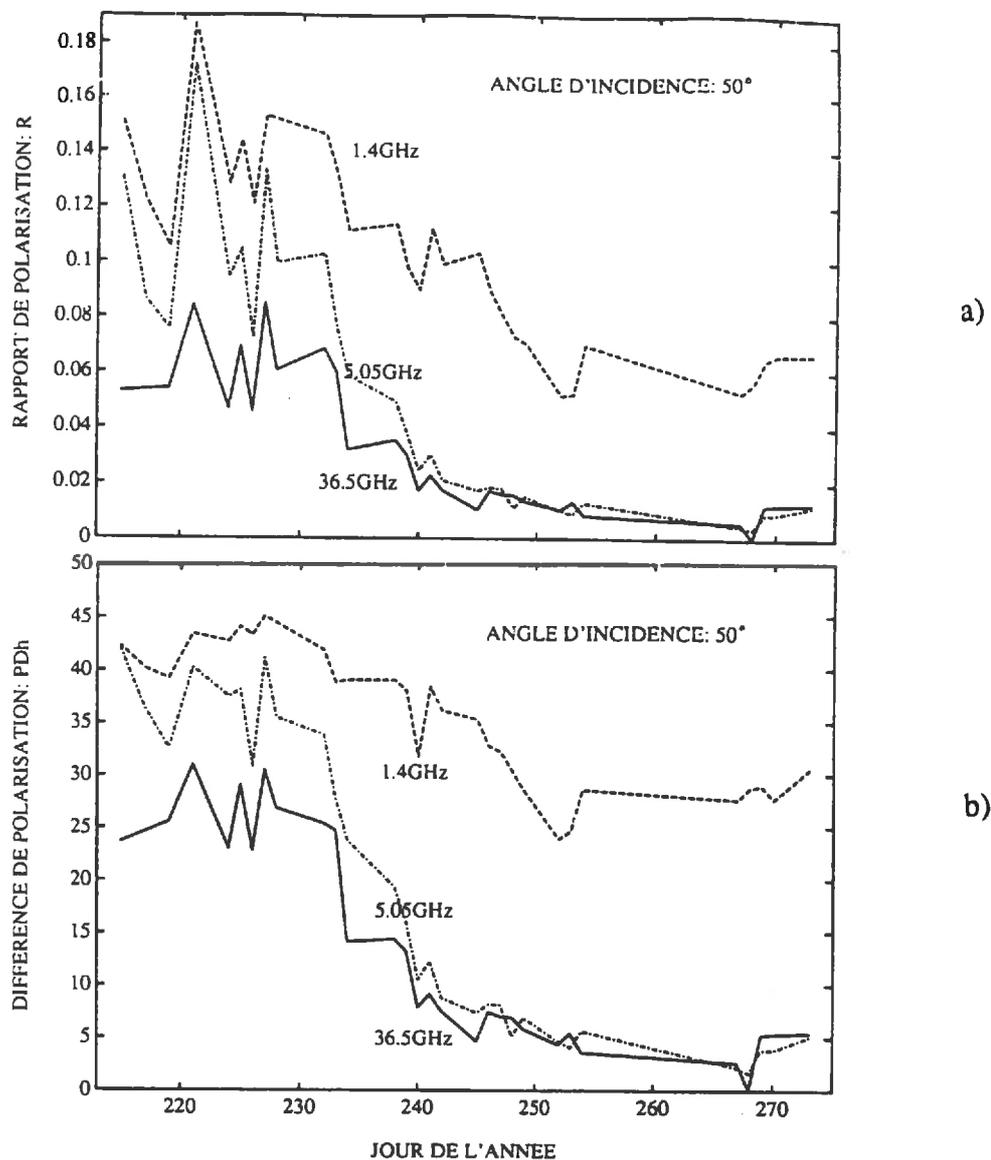


Figure 6-19: Evolution du rapport de polarisation R (a) et de la Différence de Polarisation modifiée PD_h (b), au cours du développement de la végétation pour les fréquences 1.4, 5.05 et 36.5GHz.

	PR	PD _h	PD _v
1.4GHz	0.85	0.89	0.90
5.05GHz	0.90	0.97	0.96
36.5GHz	0.91	0.95	0.95

Tableau 6-6: Coefficient de corrélation (r) entre les indices PR, PD_v, PD_h et la fraction volumique de la végétation f_v à 1.4, 5.05 et 36.5GHz.

6.2.3.3 Contribution du sol à l'émission

Au cours de l'installation du couvert, depuis le semis (jour 205), jusqu'aux jours 240-242 où la fraction volumique atteint 0.2%, les variations brusques de e_p et de R semblent bien corrélées aux changements d'humidité du sol. L'humidification du sol, après une période d'irrigation ou de précipitation, peut être détectée par l'accroissement brusque du rapport de polarisation R , et par la diminution sensible de l'émissivité (jours 221, 227, 232, 235, 241). Au fur et à mesure que le couvert se développe, l'amplitude de ces variations décroît. L'humidification du sol est encore distincte à 10.65GHz et 36.5GHz le jour 241 ($f_v=0.2\%$), particulièrement pour $\theta=0^\circ$. Au delà de cette date l'émission micro-onde du couvert ne semble plus corrélée à l'état de surface du sol pour les fréquences 10.6, 36.5 et 90GHz. Ces différentes constatations sont reliées à l'atténuation de la contribution du sol par le couvert végétal (Cf Chap 6). Cette atténuation s'accroît avec la biomasse du couvert (le coefficient d'extinction k_e est proportionnel à f_v), avec la fréquence (la diffusion et l'absorption s'accroissent avec la fréquence), et avec l'angle d'observation (l'extinction est proportionnelle au trajet de la radiation dans le couvert).

D'autres constatations plus fines peuvent également être établies. Ainsi l'amplitude des variations du signal micro-onde apparaît plus marquée à 5.05 et 10.65GHz qu'à 1.4GHz. Ce résultat peut s'expliquer en partie par l'épaisseur de la couche superficielle de sol contribuant effectivement à son émission micro-onde. L'épaisseur de cette couche décroît lorsque la fréquence augmente: elle est de l'ordre de quelques cm à 1.4GHz et de quelques mm à 36.5GHz (Wang, 1987; Jackson et Schmugge, 1989). L'amplitude des variations d'humidité est plus importante sur les couches très superficielles du sol, et ceci se répercute donc au niveau de l'émission micro-onde de la surface (figure (6-1)). Après le jour 242 l'influence de m_v n'est bien distincte qu'à 1.4GHz pour $\theta=0^\circ$ (jour 245). Cette diminution relativement brusque de l'influence du sol semble pouvoir être reliée au développement d'une couverture végétale continue par dessus le sol. Les espaces de sol découverts au niveau des rangées de végétation disparaissent.

6.2.4 Conclusions

Au cours de l'expérimentation PORTOS-1991, des problèmes techniques du capteur ont rendu difficile l'interprétation des mesures radiométriques. En particulier, les insuffisances du contrôle thermique du radiomètre, ont limité l'analyse des données radiométriques à l'évolution inter-journalière du signal micro-onde, dans une fenêtre horaire précise (11-14H TU). Aussi, les effets de la teneur en eau et de l'orientation foliaire, dont les variations sont significatives à l'échelle horaire au cours de la journée, n'auront pu être mis en évidence. La panne du système d'acquisition (jours 255-265) pendant la période de complet développement du couvert de soja n'a pas permis l'analyse détaillée de l'effet d'atténuation de la contribution du sol par une importante strate de végétation. Par ailleurs les jours J269, J270 et J273, le découplage des effets de l'humidification du sol et du changement de structure du couvert était complexe. L'interprétation des résultats est difficile à 10.65GHz (en lien avec l'absence de la polarisation V) et non présentée dans ce travail à 23.8GHz (en lien avec l'irrégularité des acquisitions radiométriques pour cette fréquence).

L'analyse des données radiométriques montre d'une manière générale, les effets très significatifs de la teneur en eau du sol et de la biomasse sur l'émission micro-onde du couvert de soja. Ces effets sont clairement modulés en fonction de la fréquence, de la polarisation et de l'angle d'incidence de la mesure radiométrique. Aussi ces deux caractéristiques du milieu observé, paramétrisées par m_v et f_v , seront l'objet des confrontations simulations-mesures, décrites dans le chapitre qui suit.

La dynamique de suivi de la biomasse par le canal 1.4GHz apparaît élevée (e_p ($p=v$ ou $p=h$) croît continuellement au cours du développement du soja). Parallèlement ce canal est le moins affecté par le développement de la végétation dans son suivi de la teneur en eau du sol m_v . Le développement du

couvert est suivi régulièrement par le canal 5.05GHz. Cependant, à cette fréquence la sensibilité de e_p à la biomasse et à la teneur en eau du sol semble saturer pour $f_v > 0.2\%$.

Lorsque le couvert est bien développé, les canaux 10.65 et 36.5GHz apparaissent sensibles à des caractéristiques de la végétation qui évoluent rapidement dans le temps (teneur en eau et orientation des feuilles). Aussi le signal micro-onde, mesuré par ces deux canaux, paraît riche d'informations mais aussi complexe sur le plan de l'interprétation.

Les variations d'émissivité les plus réduites sont observées sur le canal 90GHz. Il semble que cette faible dynamique de variation limite l'intérêt de ce canal dans le suivi des caractéristiques du sol et de la végétation. En polarisation verticale pour $\theta=50^\circ$, l'émissivité du sol est proche de 0.96, celle de la végétation est de l'ordre de 0.91. Ce canal paraît ainsi le plus approprié au suivi de la température de surface, mais il est également fortement sensible aux effets de l'atmosphère. Faute de disposer d'un modèle valable à ce niveau élevé de fréquence, l'interprétation du signal à 90GHz n'a pas été développée.

Chapitre 7

Confrontation des données micro-ondes mesurées et simulées

Dans ce chapitre les données radiométriques acquises durant la campagne de mesure PORTOS-1991 sont confrontées avec les résultats des simulations des modèles discret et continu. Les paramètres d'entrée des modèles proviennent des mesures *in situ* des caractéristiques du milieu. La confrontation avec le modèle discret permet d'analyser la cohérence et la validité des grands mécanismes de l'émission hyperfréquence d'un couvert végétal, tels qu'ils ont pu être mis en évidence dans le chapitre 5. La confrontation avec le modèle continu s'inscrit par ailleurs dans une optique d'inversion des données radiométriques de PORTOS pour estimer les paramètres de surface.

7.1 Confrontation des mesures radiométriques avec les simulations du modèle discret

7.1.1 Méthode

Le protocole de la confrontation mesure-simulation est imposé par les caractéristiques du modèle discret. Ce dernier simule l'émission d'un couvert homogène et continu. Il ne prend en compte que les feuilles de la végétation dans un premier temps. La simulation porte donc sur l'émission d'un couvert de soja bien développé, qui présente des caractéristiques de structure relativement stables du jour 245 au jour 253. Durant cette période de confrontation (période C), chaude et sans apport d'eau, le sol se dessèche progressivement. Pendant la période C, les caractéristiques de la végétation seront supposées constantes. Ces caractéristiques correspondent aux paramètres d'entrée utilisés dans l'étude de sensibilité de l'approche discrète (tableau (5-1)). La teneur en eau volumique du sol m_v utilisée dans les modèles est ajustée pour assurer une bonne correspondance visuelle entre les données simulées et mesurées. Ce paramètre est comparé avec la teneur en eau mesurée m_v^m de la strate de surface du sol qui contribue effectivement à l'émission. L'épaisseur δ_e de cette strate varie principalement en fonction de la fréquence de la radiation. Divers travaux basses fréquences (Wang, 1987; Jackson et Schmugge, 1989) donnent des ordres de grandeur de δ_e , qui est également dépendante des caractéristiques de teneur en eau, de rugosité et de texture du sol. Nous avons sélectionné en fonction de résultats précisés par la suite: $\delta_e=3\text{cm}$ pour $f=1.4\text{GHz}$, $\delta_e=1\text{cm}$ pour $f=5.05\text{GHz}$, $\delta_e=0.5\text{cm}$ pour $f=36.5\text{GHz}$. Ces valeurs sont utilisées dans toutes les études de ce chapitre.

Dans cette section, l'évolution de l'émissivité du couvert de soja e_p est analysée, en fonction de l'angle d'incidence θ et de la fréquence f , à travers les données radiométriques simulées et mesurées. Les confrontations sont conduites dans le domaine de validité basses fréquences [1-11GHz] de la modélisation discrète, pour les polarisations (H) et (V) à 1.4 et 5.05GHz et pour la polarisation (H) à 10.65GHz.

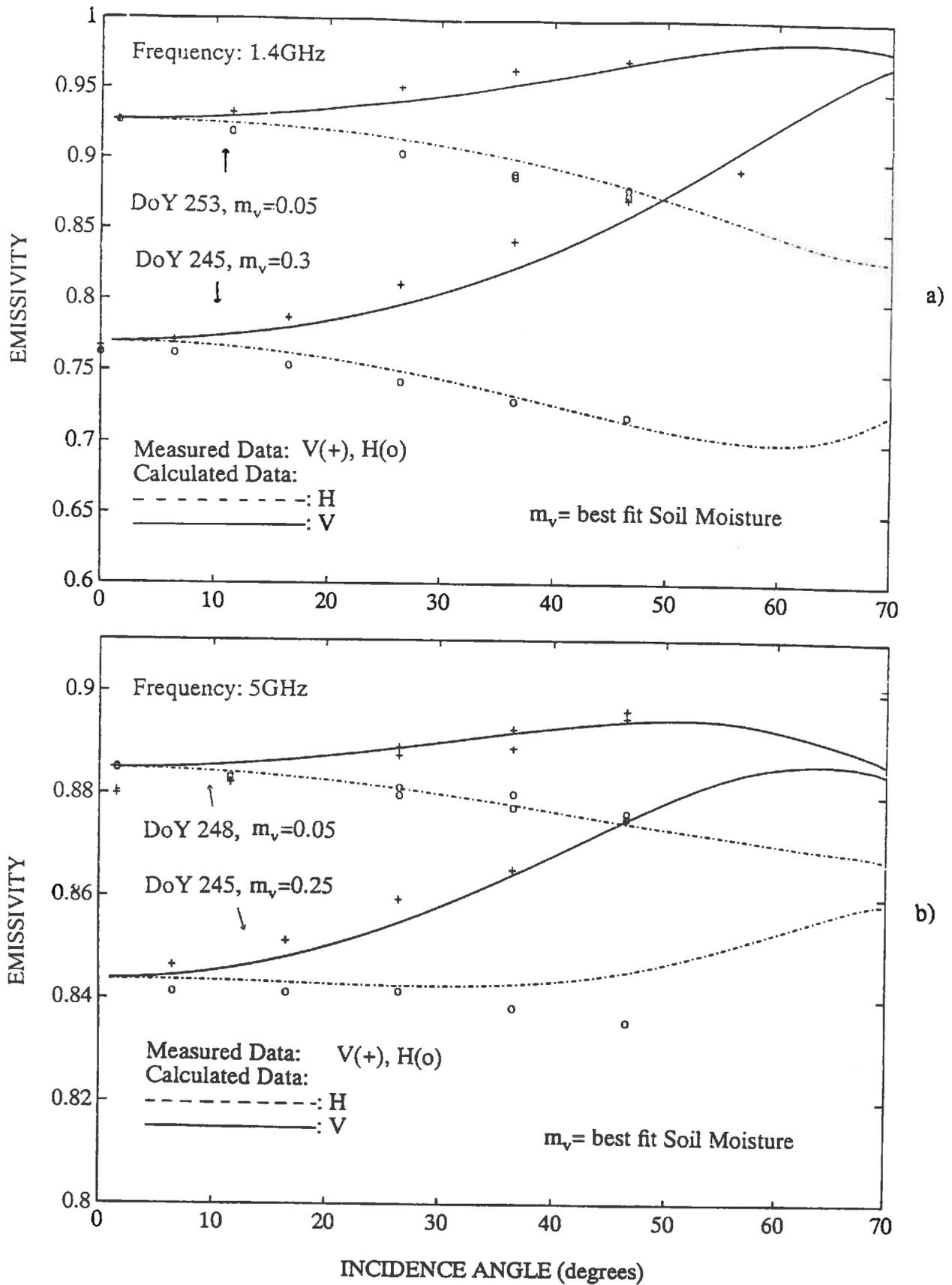


Figure 7-1: Evolution de l'émissivité e_p ($p=v$ ou $p=h$) mesurée et simulée en fonction de l'angle d'incidence θ à 1.4GHz (a) et 5.05GHz (b) (approche discrète).

7.1.2 Résultats

7.1.2.1 Evolution de l'émissivité en fonction de l'angle d'incidence

Les figures (7-1.a-b) présentent l'évolution de l'émissivité e_p ($p=v$ ou $p=h$) mesurée et simulée en fonction de l'angle d'incidence θ de la radiation. Cette confrontation est réalisée pour les basses fréquences $f=1.4\text{GHz}$ et $f=5.05\text{GHz}$ et pour des conditions d'humidité du sol décroissante au cours du temps. Ainsi du jour 245 au jour 253 (période C), la teneur en eau du sol mesurée m_v^m (cm^3/cm^3) sur $[0 - 3\text{cm}]$ décroît continuellement de la valeur $m_v^m=0.29$ à la valeur $m_v^m=0.13$ (Cf Annexe 4). On peut constater un bon accord entre les données mesurées et simulées en termes d'évolutions en fréquence, en polarisation et en incidence. Au cours de la période C, les niveaux de l'émissivité e_p augmentent et l'écart entre les deux polarisations (V) et (H) décroît progressivement. Ces variations sont très significatives à 1.4GHz et plus modérées à 5.05GHz où la contribution du sol à l'émission globale du couvert est davantage atténuée. Les valeurs ajustées m_v de la teneur en eau du sol s'accordent avec ce dessèchement progressif de la surface. Elles le sur-estiment cependant fortement à 5.05GHz ($m_v=0.25$ le jour 245 et $m_v=0.05$ le jour 248; les valeurs mesurées sur la couche $[0 - 1\text{cm}]$ étant $m_v^m=0.30$ le jour 245 et $m_v^m=0.22$ le jour 248).

Diverses explications peuvent être avancées pour expliquer ce désaccord entre les niveaux d'humidité du sol mesurés et simulés:

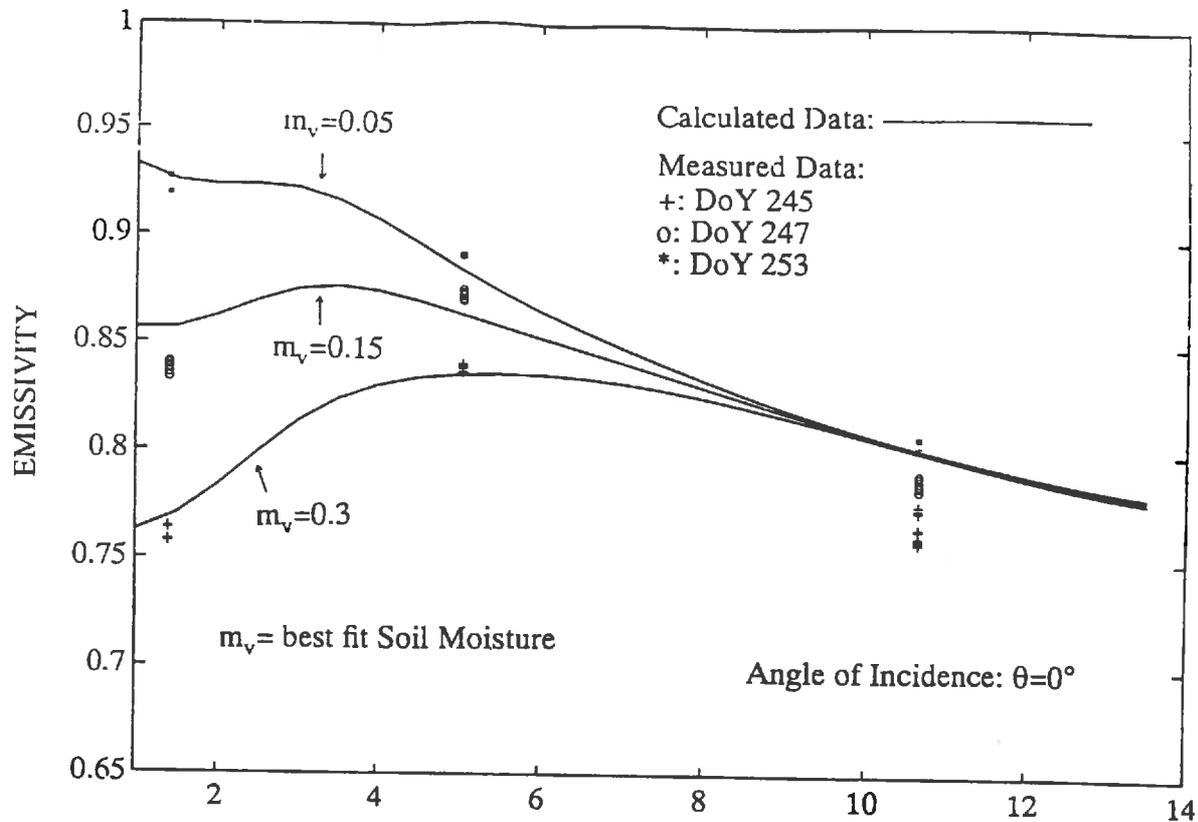
*La fraction volumique du couvert ne prend en compte que les feuilles et se trouve donc sous-estimée. L'accroissement des valeurs de f_v irait dans le sens d'une diminution des valeurs ajustées de m_v (figure (7-1)). Cet effet serait cependant moins marqué à 5.05GHz où le désaccord mesures-simulations est le plus important.

*Les caractéristiques du couvert végétal sont considérées comme constantes au cours de la période C. Cependant la teneur en eau du couvert, l'épaisseur et la distribution d'inclinaison foliaire évoluent rapidement dans le temps (à l'échelle horaire et journalière), et sont difficiles à estimer précisément. Ainsi au cours de la période C, la diminution de l'épaisseur ep_f et de la teneur en eau M_{gf} des feuilles, qui est reliée au dessèchement du sol, entraînerait une augmentation de l'émission micro-onde du couvert (figures (5-2) et (5-3)). Ainsi l'estimation plus précise des paramètres ep_f et M_{gf} irait également dans le sens d'une diminution significative des valeurs ajustées m_v à 5.05GHz .

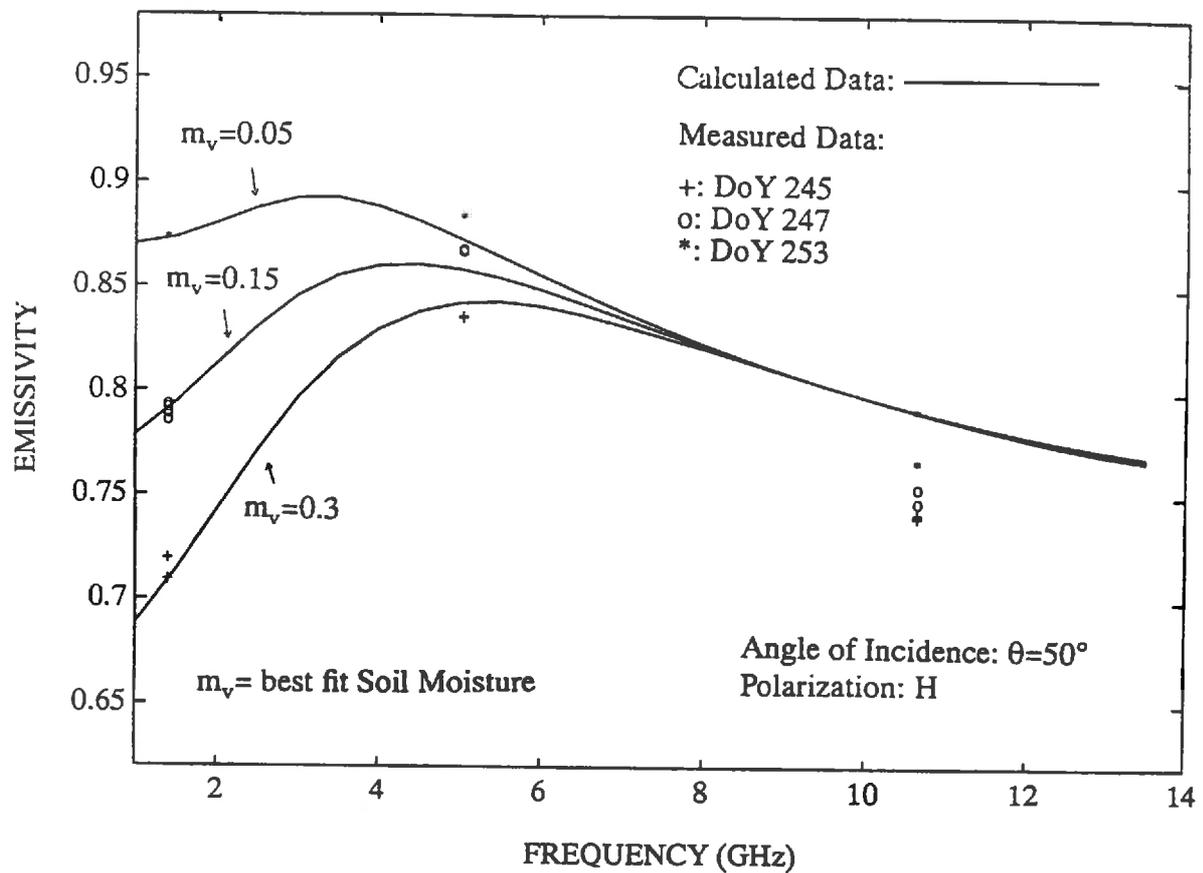
*De plus, les discontinuités du couvert (effets de rang, trouées éparses, irrégularité de hauteur et de densité) ne sont pas prises en compte par les modèles continu et discret, qui font l'hypothèse d'homogénéité de la végétation dans le plan horizontal. En particulier, cette hypothèse conduit systématiquement à une sous-estimation de la contribution simulée du sol. En effet, dans les simulations, l'émission du sol est fortement atténuée par le couvert végétal homogène (en particulier pour les fréquences élevées); alors que dans la réalité, les radiations issues du sol et passant au travers des irrégularités de la végétation (trouées, effets de rang, etc.) contribuent de manière significative à l'émission globale du couvert.

7.1.2.2 Evolution de l'émissivité en fonction de la fréquence

Les figures (7-2.a-b) montrent l'évolution de l'émissivité simulée et mesurée en fonction de la fréquence f pour trois jours: J245 avec $m_v=0.3$ ($m_v^m=0.29$), J247 avec $m_v=0.15$ ($m_v^m=0.25$), J253 avec $m_v=0.05$ ($m_v^m=0.13$). La teneur en eau du sol m_v , utilisée dans ces simulations est choisie indépendamment de la fréquence. Ce choix est valable uniquement pour des sols caractérisés par un profil hydrique uniforme. Avant de comparer mesures et simulations, nous analysons l'évolution théorique en fréquence du signal micro-onde (traits pleins dans les figures 7-2.a-b), pour les trois niveaux d'humidité du sol.



a)



b)

Figure 7-2: Evolution de l'émissivité simulée et mesurée en fonction de la fréquence, pour l'angle d'incidence $\theta = 0^\circ$ (a) et $\theta = 50^\circ$ & polarisation H (b), et pour trois jours: J245 $m_v = 0.3$ ($m_v^m = 0.29$), J247 $m_v = 0.15$ ($m_v^m = 0.25$), J253 $m_v = 0.05$ ($m_v^m = 0.13$) (approche discrète).

On constate tout d'abord que le signal micro-onde simulé devient indépendant de la contribution du sol, lorsque f dépasse 8-10GHz. A ce niveau de fréquence, l'émission montante du sol est complètement atténuée par le couvert végétal (par diffusion et absorption). A basses fréquences (1-6GHz) l'évolution de l'émissivité e_p est fortement dépendante du niveau d'humidité du sol. Lorsque le sol est sec ($m_v=0.05$), e_p est stable puis décroît avec la fréquence, tandis que pour des niveaux d'humidité du sol plus élevés, e_p s'accroît avec la fréquence jusqu'à 4-5GHz avant de décroître. En effet de 1 à 4-5GHz, pour des sols relativement humides (donc à faibles niveaux d'émission micro-onde), la principale contribution à l'émission est celle de la végétation qui augmente avec la fréquence. La diffusion est très faible et l'absorption (donc l'émission) s'accroît avec la fréquence au sein du couvert végétal. Tandis que pour des sols relativement secs, la principale contribution à l'émission est celle du sol qui est de plus en plus atténuée par la végétation lorsque la fréquence augmente.

Au delà de 4-5GHz, la contribution du sol est très atténuée et les effets de la diffusion au sein du couvert deviennent significatifs. En conséquence, l'émissivité décroît quelque soit le niveau d'humidité du sol.

Les données mesurées par PORTOS s'accordent relativement bien avec les simulations du modèle discret à 1.4 et 5.05GHz. Cependant à 10.65GHz on constate que l'émissivité mesurée évolue de façon significative au cours du temps, contrairement aux valeurs simulées. L'analyse faite dans le paragraphe précédent reste valable pour interpréter ces variations. Il semble en particulier que le signal micro-onde soit fortement influencé par l'évolution des caractéristiques de la végétation (teneur en eau et épaisseur foliaire décroissantes). A 10.65GHz le signal est fortement dépendant de ces paramètres, tandis qu'à 5.05 et surtout 1.4GHz l'influence de la contribution du sol apparait suffisante pour expliquer globalement les variations mesurées du signal micro-onde.

Par ailleurs, si l'on considère les mesures radiométriques des figures 7-2.a-b, la différence $e_C - e_L$ (les indices C et L désignent respectivement les bandes C (5.05GHz) et L (1.4GHz)) s'accroît avec l'humidité du sol. L'interprétation physique, qui est exposée au début de ce paragraphe, incite à penser que cette différence pourrait être un indicateur intéressant de l'humidité des sols. Elle serait en effet moins dépendante des caractéristiques de la végétation que les indicateurs e_L et e_C , considérés indépendamment. Cette propriété serait particulièrement utile pour interpréter des données télédéteectées sur couverts végétaux lorsque peu d'informations sur la biomasse sont disponibles.

7.1.3 Discussion

Il apparait donc que l'approche discrète impose une description relativement précise des caractéristiques du couvert (structure, teneur en eau). En accord avec l'étude du chapitre 5, la sensibilité du signal micro-onde à ces paramètres s'accroît significativement avec la fréquence. Ces données descriptives de la végétation évoluent rapidement au cours du temps (à l'échelle horaire pour la teneur en eau, l'épaisseur, et la distribution d'inclinaison des feuilles). Elles sont donc difficiles à estimer concurremment avec la mesure radiométrique. Par ailleurs, dans ce travail, l'influence des tiges et pétioles n'est pas prise en compte par la modélisation discrète. Cette influence serait significative, particulièrement pour des fréquences de quelques GHz (Ulaby et Wilson, 1985; Chuah et Tan, 1990). De même sur la base d'une approche discrète à 1.4GHz, Choe et Tsang (1983) constatent que l'influence des variations de fraction volumique des tiges et pétioles sur l'émission micro-onde d'un couvert de soja, est nettement plus marquée que celle des feuilles. Une analyse des effets de ces diffuseurs "cylindriques" compléterait donc les études des chapitres 5 et 7, qui sont fondées sur l'influence des feuilles du couvert uniquement. D'autre part, les modèles simulent l'émission d'un couvert homogène et continu. L'influence de la structure du couvert de soja, en rangées régulièrement espacées, n'est pas prise en compte par le modèle discret. Or, des études portant sur l'émission des surfaces périodiques de sol nus ou de végétation montrent l'importance des effets de structure en rangs

	h_r	Q	δ_e	RMSE (K)
1.4GHz	0.275	0.13	3cm	4.2
5.05GHz	0.014	0.205	1cm	3.3
36.5GHz	0.0	0.27		2.2

Tableau 7-1: Caractéristiques inversées du sol: h_r , Q et δ_e ; et RMSE entre les valeurs de la température de brillance du sol simulées et mesurées (expérimentation PORTOS-1991).

VEGETATION (couvert de soja):		
d (m)		hauteur du couvert
f_v		fraction volumique
$M_g=0.80$ (Kg/Kg)		teneur en eau gravimétrique
$\rho_s=0.27$ g/cm ³		densité de matière sèche
T_1 (K)		température du couvert
l_z et l_p (mm)		longueurs de corrélation
Valeurs moyennes de l_z et l_p inversées sur la période C (J245-253)		
	l_z (mm)	l_p (mm)
1.4GHz	(29.7)	(2.39)
5.05GHz	29.7	2.39
36.5GHz	0.75	0.82
SOL (sous le couvert de soja):		
m_v (m ³ /m ³)		teneur en eau volumétrique
$\rho_b=1.35$ m ³ /m ³		masse volumique de la matière sèche
h_r , Q		coefficients de rugosité
T_2 (K)		température effective du sol

Tableau 7-2: Paramètres d'entrée du modèle continu (expérimentation PORTOS-1991).

(Ulaby *et al.*, 1981; Kong *et al.*, 1984; Promes *et al.*, 1988). Ainsi, pour des valeurs de fraction volumique du couvert de soja relativement élevées ($f_v=0.15\%$), de larges espaces de sol nu sont encore découverts à faibles incidences. Le recouvrement continu du sol par la végétation (jours 240-245) semble provoquer une discontinuité dans l'évolution des mesures radiométriques, particulièrement lorsque la fréquence est élevée (Cf chap 6), qui ne peut être appréciée par les modèles. De même, l'émission d'un couvert hétérogène, couché par grandes plaques (jours 269-273 par exemple), ne peut être simulée.

Cette première analyse des résultats sera complétée par une discussion plus globale portant sur l'utilisation des approches discrète et continue en fin de ce chapitre.

7.2 Confrontation des mesures radiométriques avec les simulations du modèle continu

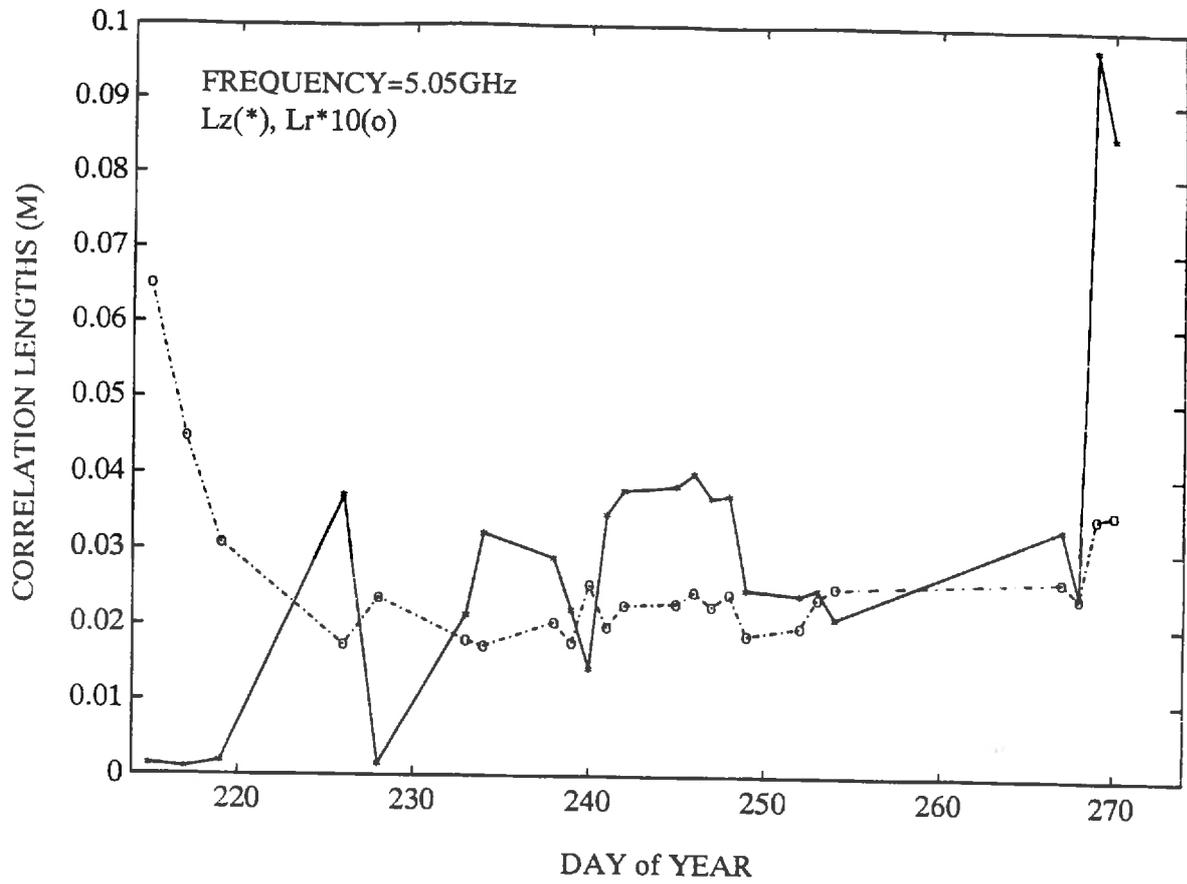
7.2.1 Méthode générale

Une confrontation directe entre les mesures radiométriques et les simulations du modèle continu est impossible. En effet dans l'approche continue, la diffusion au sein du couvert est paramétrisée par les longueurs de corrélation l_z et l_p qui ne peuvent être mesurées, et qui sont très difficiles à estimer par le calcul. L'inversion de l_z et l_p constitue donc une étape préliminaire indispensable, l'inversion simultanée des longueurs et des paramètres de surface se révélant impossible. Aussi dans un premier temps, (1) les longueurs l_z et l_p seront inversées; les paramètres de surface en entrée du modèle continu (essentiellement la teneur en eau du sol m_v et de la végétation M_g , la hauteur d et la fraction volumique du couvert f_v) provenant des mesures *in situ*; les caractéristiques de rugosité du sol ayant été déterminées dans un étape préliminaire. Puis, (2) dans une optique d'utilisation opérationnelle du modèle continu pour l'inversion des paramètres de surface, ces longueurs seront considérées constantes et seront calées sur un sous-échantillon des mesures radiométriques (du jour 245 au jour 253). (3) La faisabilité d'une telle simplification sera discutée en comparant les simulations du modèle continu avec les mesures radiométriques sur l'ensemble du cycle de végétation. Enfin, (4) l'inversion des caractéristiques de surface (teneur en eau du sol et fraction volumique de la végétation) sera conduite, en s'appuyant sur les longueurs calées.

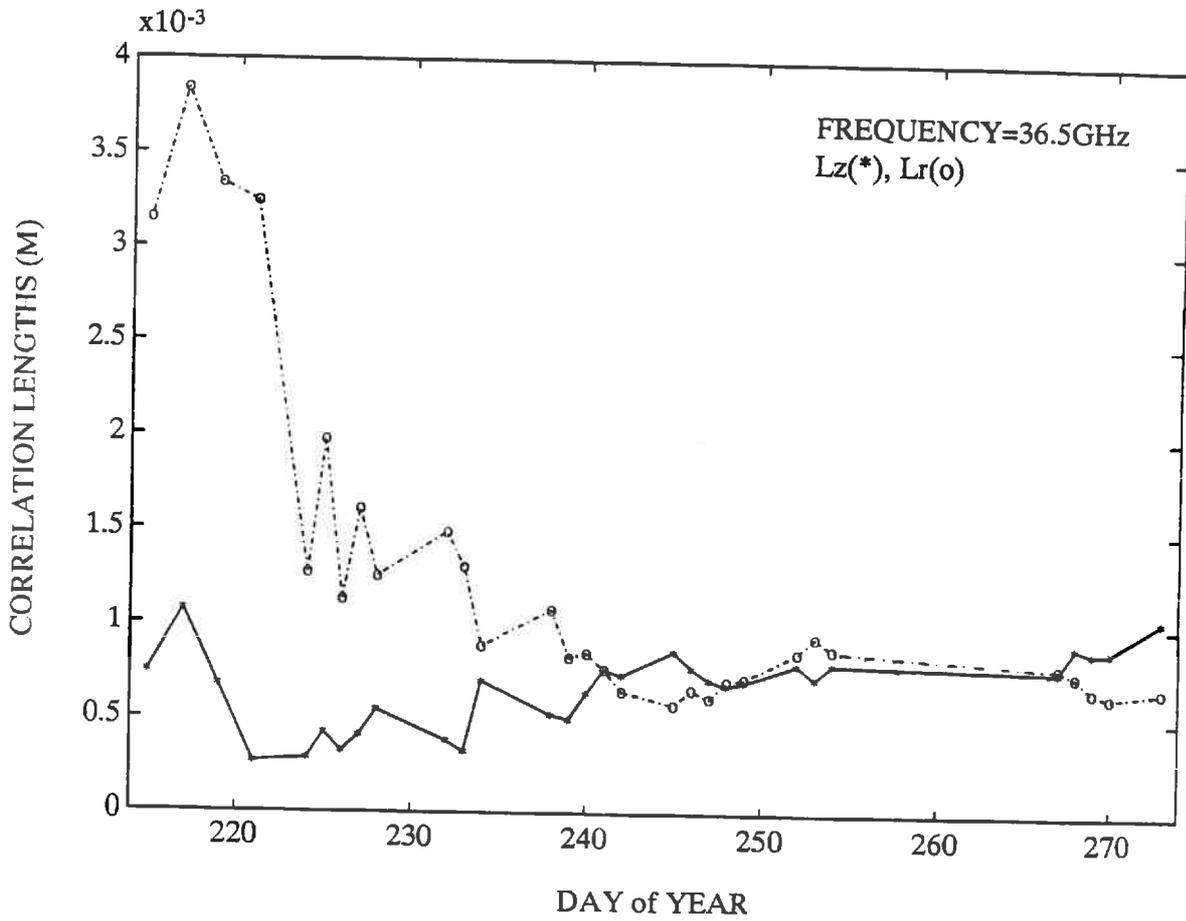
Cette étude porte sur les fréquences 1.4, 5.05 et 36.5GHz; le jeu de données à 10.65 et 23.8GHz étant incomplet et les canaux à 90GHz sortent du domaine de validité de la modélisation. La procédure d'inversion utilisée dans cette étude met en oeuvre une routine de minimisation fondée sur l'algorithme du Simplex (Nag, 1990). La variable minimisée est l'écart quadratique moyen (RMSE) entre les températures de brillance simulées et mesurées, calculé sur 7 points d'incidence ($\theta=0^\circ, 10^\circ, \dots, 60^\circ$) et sur les deux polarisations (H) et (V). Les caractéristiques du sol sont estimées dans une étape préliminaire.

7.2.2 Rugosité et teneur en eau du sol

Dans une étape préliminaire, les paramètres de rugosité du sol sont estimés par inversion des données micro-ondes acquises sur une courte période après le semis (J215-J226), pendant laquelle la végétation est très clairsemée. Ces conditions de rugosité seront supposées stables durant toute la campagne de mesure avec PORTOS. La rugosité est prise en compte par les paramètres h_r et Q qui interviennent dans le calcul de la réflectivité de Fresnel modifiée (Wang et Choudhury, 1981). L'estimation de l'épaisseur δ_e de la strate de sol contribuant effectivement à l'émission à 1.4 et 5.05GHz résulte de la comparaison des valeurs inversées et mesurées de m_v . A 36.5GHz l'inversion porte directement sur la



a)



b)

Figure 7-3: Evolution des longueurs de corrélation inversées l_z et l_p au cours du temps, à 5.05GHz (a) et 36.5GHz (b) (approche continue).

permissivité diélectrique ϵ_2 du sol; la relation entre ϵ_2 et m_v n'étant pas établie précisément pour cette fréquence relativement élevée.

Les résultats de cette inversion préliminaire portant sur h_r , Q et la teneur en eau du sol m_v , sont donnés dans le tableau (7-1). Après calage de h_r et Q , la précision du module "sol" du modèle est satisfaisante. Pour 15 points de comparaison (sept valeurs d'incidence θ et les deux polarisations (H) et (V)) croisés avec huit jours de mesure sur sol nu, RMSE varie entre 4.2K à 1.4GHz et 2.2K à 36.5GHz. La valeur de δ_g est de l'ordre de 3cm à 1.4GHz et 1cm à 5.05GHz, ce qui est cohérent avec la bibliographie (Wang, 1987; Jackson et Schmugge, 1989). Q s'accroît avec la fréquence f . La surface étant relativement lisse, h_r est très faible à 5.05 et 36.5GHz. Par contre sa valeur très élevée à 1.4GHz est assez surprenante. Des observations similaires de dépendance de h_r et Q avec la fréquence ont été faites par Wang *et al.* (1983). Une analyse plus conséquente de la rugosité doit être conduite à partir des mesures acquises par PORTOS sur les parcelles de sol nu adjacentes au couvert de soja.

7.2.3 Evolution temporelle des longueurs de corrélation l_z et l_p

7.2.3.1 Méthode

Dans un premier temps, les longueurs de corrélation l_z et l_p seront seules inversées. L'inversion porte sur l'ensemble des données radiométriques (décrites dans le chapitre 6) acquises par PORTOS au cours de la campagne de mesure, pour les fréquences 1.4, 5.05 et 36.5GHz. Les paramètres d'entrée du modèle continu caractérisant l'état du couvert (sol et végétation) proviennent de l'ensemble des mesures *in situ* et sont résumés dans le tableau (7-2). On notera que la teneur en eau de la végétation M_g sera considérée comme constante et fixée à $M_g=0.80$. Nous avons vu que cette quantité, mesurée le matin, varie selon $0.73 < M_g < 0.87$ au cours de la campagne de mesure. Son estimation précise est difficile car elle varie également au cours de la journée. Ainsi entre le matin tôt (niveau maximal) et le milieu de l'après-midi (niveau minimal) l'amplitude des variations de M_g peut dépasser 6% (Vanderschmidt, 1993). La dépendance de l'épaisseur δ_g de la strate du sol contribuant à l'émission en fonction de la fréquence, est prise en compte. En accord avec les résultats de l'inversion sur sol nu, la teneur en eau du sol m_v est prise sur [0 – 3cm] à 1.4GHz et sur [0 – 1cm] à 5.05GHz. A 36.5GHz, elle est prise sur une couche très superficielle ([0 – 0.5cm]).

7.2.3.2 Résultats

A 1.4GHz l'inversion des longueurs ne converge pas: la diffusion qui est gouvernée par l_z et l_p au sein du couvert est très réduite. Pour cette fréquence, la sensibilité de l'émission hyperfréquence à l_z et l_p reste donc très faible (Cf chapitre 5). Lors de l'inversion des longueurs à 5.05 et à 36.5GHz, le RMSE moyen entre les valeurs simulées et mesurées est respectivement de 2.5 et 1.8K. Les deux paramètres l_z et l_p permettent donc de reproduire fidèlement les variations mesurées de l'émission micro-onde du couvert.

L'évolution temporelle des longueurs de corrélation inversées l_z et l_p est montrée dans les figures (7-3.a-b) à 5.05 et 36.5GHz. Pour ces deux fréquences, les variations de l_p sont assez similaires. Pendant la phase initiale du développement de la végétation, l_p décroît rapidement, puis se stabilise lorsque f_v dépasse 0.1%. A 5.05GHz les variations de l_z sont un peu erratiques surtout pendant la phase de développement de la végétation, tandis qu'à 36.5GHz l_z croît lentement. Le violent orage qui coucha une partie du couvert (jours 269, 270 et 273) modifie peu les valeurs des longueurs, excepté l_z à 5.05GHz. Notons que les données radiométriques de ces trois derniers jours de mesure ne correspondent pas aux conditions d'homogénéité et de hauteur constante du couvert, imposées par la modélisation.

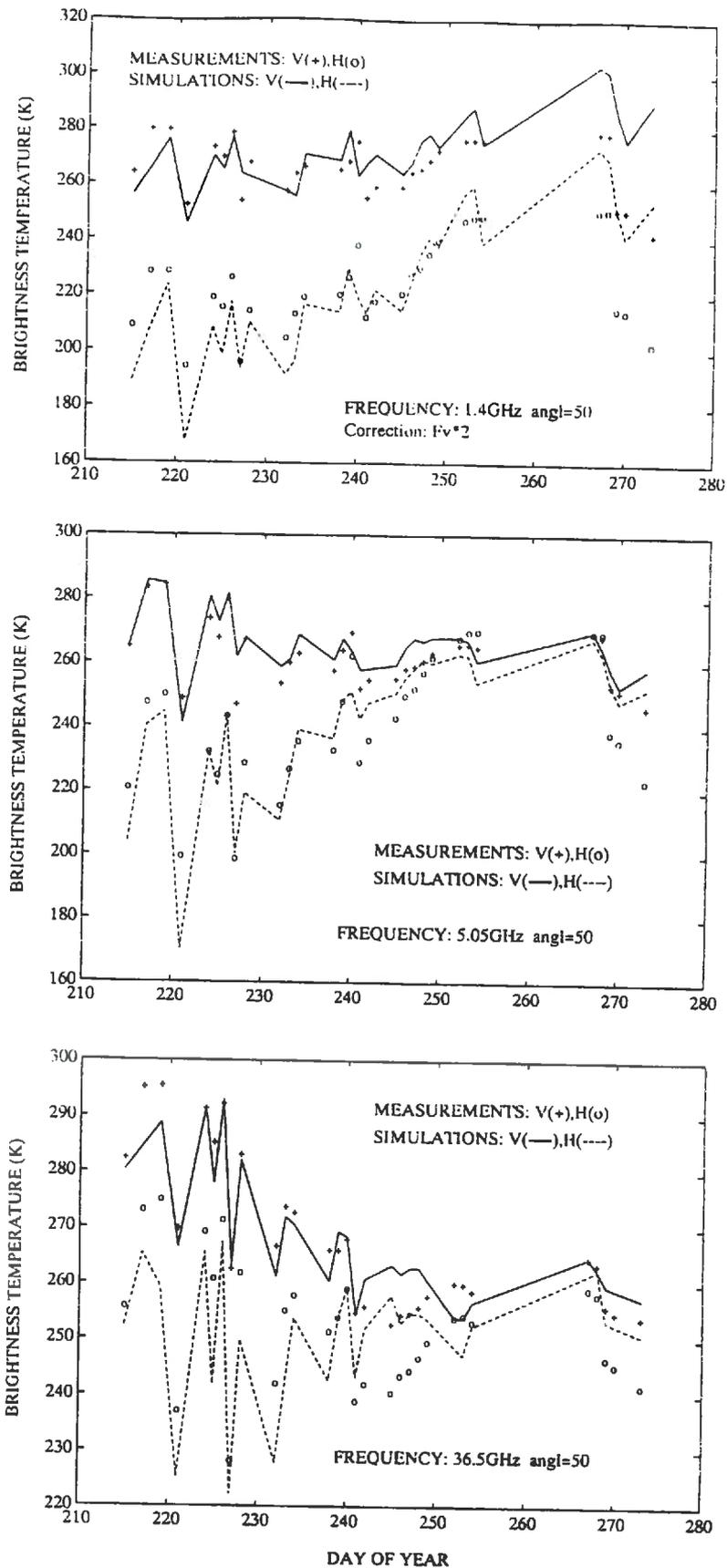


Figure 7-4: Evolutions comparées des températures de brillance simulées et mesurées pour l'angle d'incidence $\theta=50^\circ$ à 1.4GHz (a), 5.05GHz (b) et 36.5GHz (c) (approche continue).

Pendant la phase initiale du développement de la végétation (jours 205 à 235 environ) la diffusion dans le couvert est faible. L'influence des longueurs l_z et l_p sur l'émission micro-onde est alors réduite et leurs valeurs inversées doivent être interprétées avec précautions. Néanmoins, il semble que la "structure diélectrique" de la végétation devienne davantage verticale au cours de son développement (tendance croissante de l_z et décroissante de l_p). Par ailleurs, cette structure apparaît globalement fortement verticale à 5.05GHz ($l_z > l_p$) tandis qu'à 36.5GHz les longueurs l_z et l_p sont très voisines. Cette constatation pourrait être reliée au fait que la radiation basse fréquence intègre l'émission sur toute la hauteur du couvert (tiges et pétioles compris) alors que la radiation à 36.5GHz est davantage sensible à la structure foliaire de surface du couvert. Lorsque f_v dépasse 0.1% aucune tendance nette dans l'évolution de l_z ou l_p n'est perceptible.

Par ailleurs, les variations rapides de l_z à 5.05GHz semblent davantage reliées à un problème de convergence de l'inversion, qu'à des variations des caractéristiques du milieu observé. En effet, l'étude de sensibilité du modèle continu (Chap 5) montre que pour une configuration angulaire donnée, la fonction $T_{Bp}(l_z, l_p)$ n'est pas inversible en l_z . L'inversion qui est conduite ici simultanément sur une combinaison de 13 fonctions $T_{Bp}(l_z, l_p)$ (pour 7 configurations angulaires et 2 polarisations), paraît également fluctuer entre deux solutions pour l_z . D'autres études portant sur les longueurs l_z et l_p pour différents types de couverts (cultures, forêts...) et différents stades phénologiques de la végétation, doivent nous permettre de mieux cerner ce problème.

7.2.4 Confrontation directe entre les données simulées et mesurées

Dans ce paragraphe, l'émission du couvert de soja est simulée en considérant les paramètres l_z et l_p constants et l'influence d'une telle simplification est évaluée. Après la phase initiale d'installation de la végétation ($f_v > 0.1\%$), les longueurs de corrélation du couvert végétal sont assez stables. Aussi l_z et l_p sont calées sur couvert bien développé, lorsque la diffusion paramétrisée par l_z et l_p est élevée. La valeur des longueurs calées est prise égale à leur valeur moyenne sur la période C [J245 à J253]. Ces valeurs sont données dans le tableau (7-2). A 1.4GHz les longueurs de corrélation ont une influence réduite sur le signal micro-onde simulé et elles n'ont pu être inversées. Pour cette fréquence, les valeurs de l_z et l_p sont prises égales à celles à 5.05GHz.

Les évolutions comparées des températures de brillance simulées et mesurées pour l'angle d'incidence $\theta=50^\circ$ sont représentées dans les figures (7-4.a-b-c). La dynamique des variations de T_B apparaît réduite de moitié à 36.5GHz, en comparaison avec 1.4 et 5.05GHz. Les écarts importants mesures-simulations observés les jours 269, 270 et 273 sont reliés à la modification de structure du couvert végétal, qui n'est pas intégrée dans les simulations.

Les valeurs des RMSE entre les mesures et les simulations sont données dans le tableau (7-3). A 5.05 et 36.5GHz, le fait de considérer l_z et l_p constants, conduit à une précision moyenne des simulations de l'ordre de 7.5K (contre 2K environ dans la section précédente). Pour partie, cette valeur intègre également l'erreur de mesure radiométrique, qui est principalement reliée à l'insuffisance du système de régulation thermique de PORTOS. La valeur de RMSE à 1.4GHz est réduite de 16.5K à 11.4K s'il l'on double la valeur de la fraction volumique du couvert f_v en entrée des simulations (configuration qui correspond à la représentation de la figure (7-4.a)). Cette constatation peut correspondre à une correction des valeurs non calées des longueurs de corrélation; ces longueurs ont cependant une influence assez limitée sur l'émission du couvert. Elle est sans doute davantage le signe d'une sous-estimation de la valeur de f_v ou du coefficient d'absorption k_a , qui ont tous deux des effets marqués à 1.4GHz. Ces deux hypothèses sont plausibles. En effet d'une part l'estimation de f_v n'intègre pas la fraction volumique des fruits (mais cette fraction n'est significative qu'après le jour 250). D'autre part le calcul de k_a dans l'approche continue est très sommaire. Pour des fréquences plus élevées (à 5.05 et 36.5GHz), la diffusion prend le pas sur l'absorption, et les effets de la sous-estimation de f_v ou de k_a sont moins perceptibles.

Fréquence (GHz):	1.4	1.4 ($f_v * 2$)	5.05	36.5
RMSE (K):	16.5	11.4	7.6	7.4

Tableau 7-3: RMSE entre les valeurs simulées par le modèle continu et mesurées à 1.4GHz, à 1.4GHz et fraction volumique f_v de la végétation doublée, à 5.05GHz et à 36.5GHz.

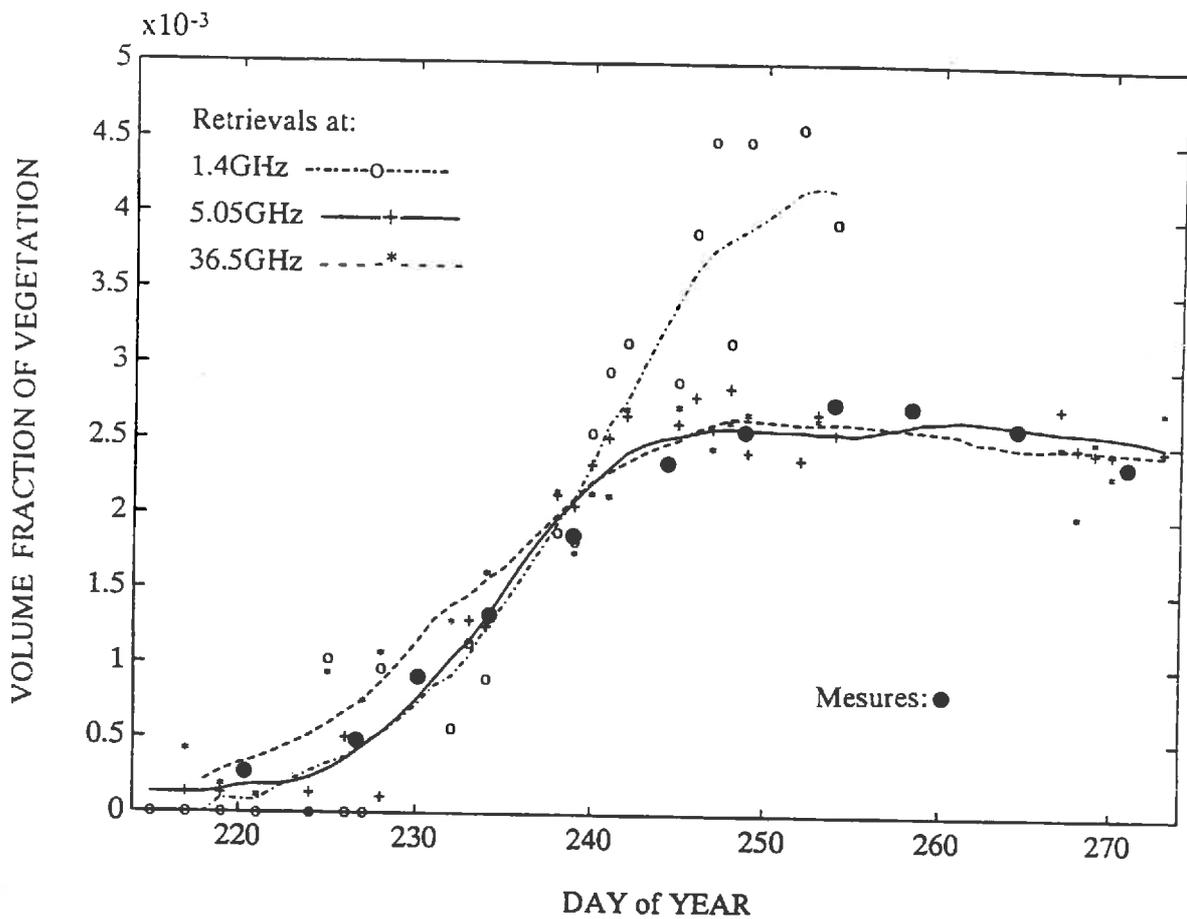


Figure 7-5: Evolution des valeurs inversées de la fraction volumique de la végétation f_v^i par l'approche continue, à 1.4, 5.05 et 36.5GHz (symboles=valeurs inversées; lignes=moyenne sur une fenêtre glissante des valeurs inversées).

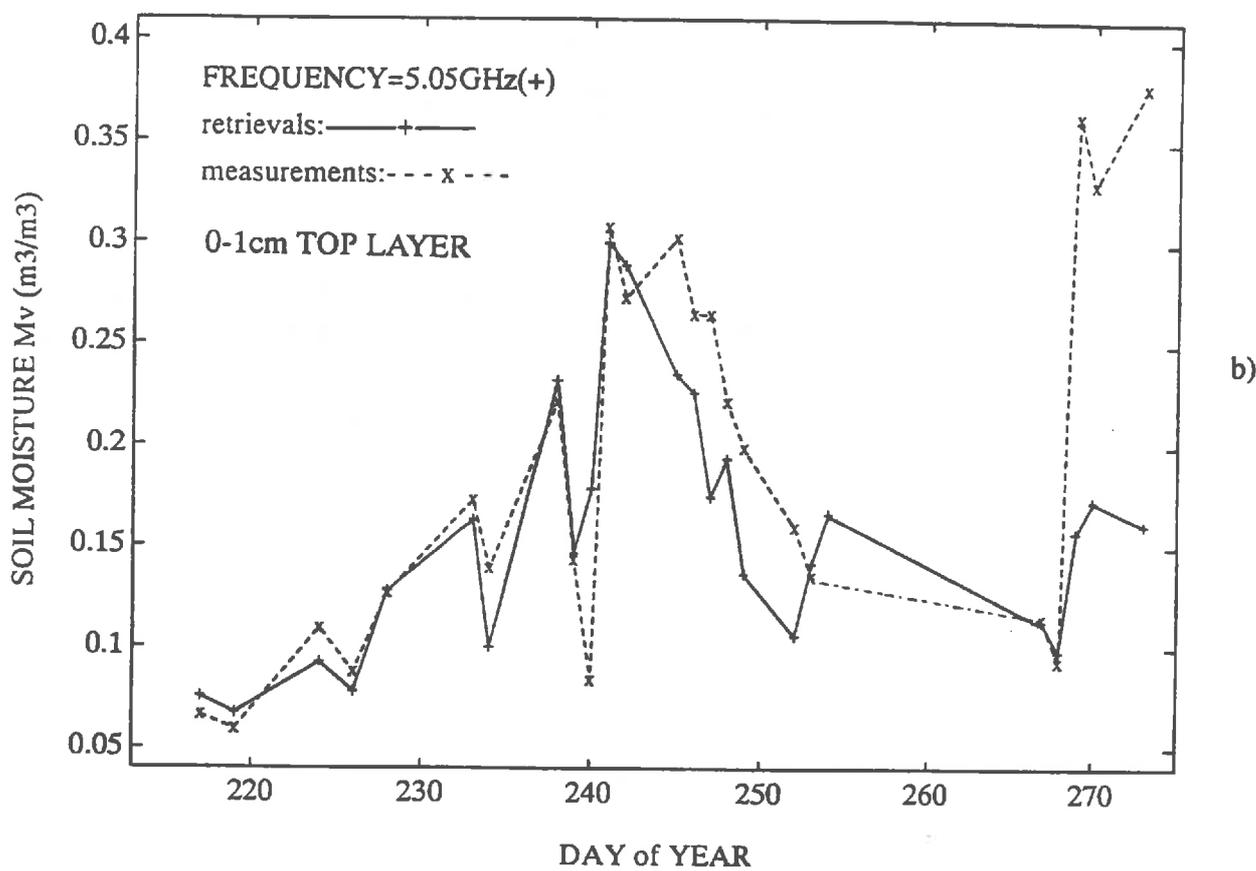
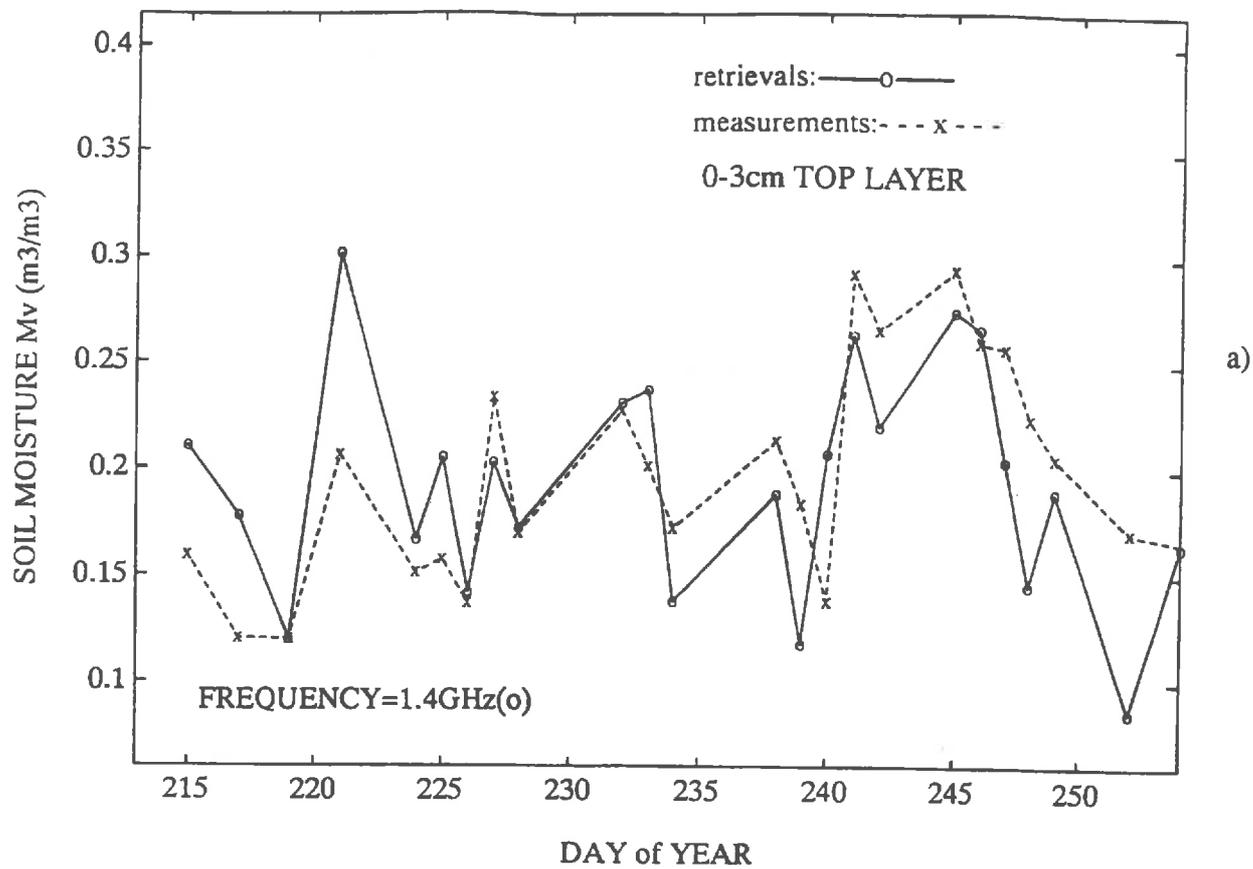


Figure 7-6: Evolutions comparées des valeurs inversées et mesurées de la teneur en eau volumique m_v^i du sol à 1.4GHz (a) et 5.05GHz (b) (approche continue).

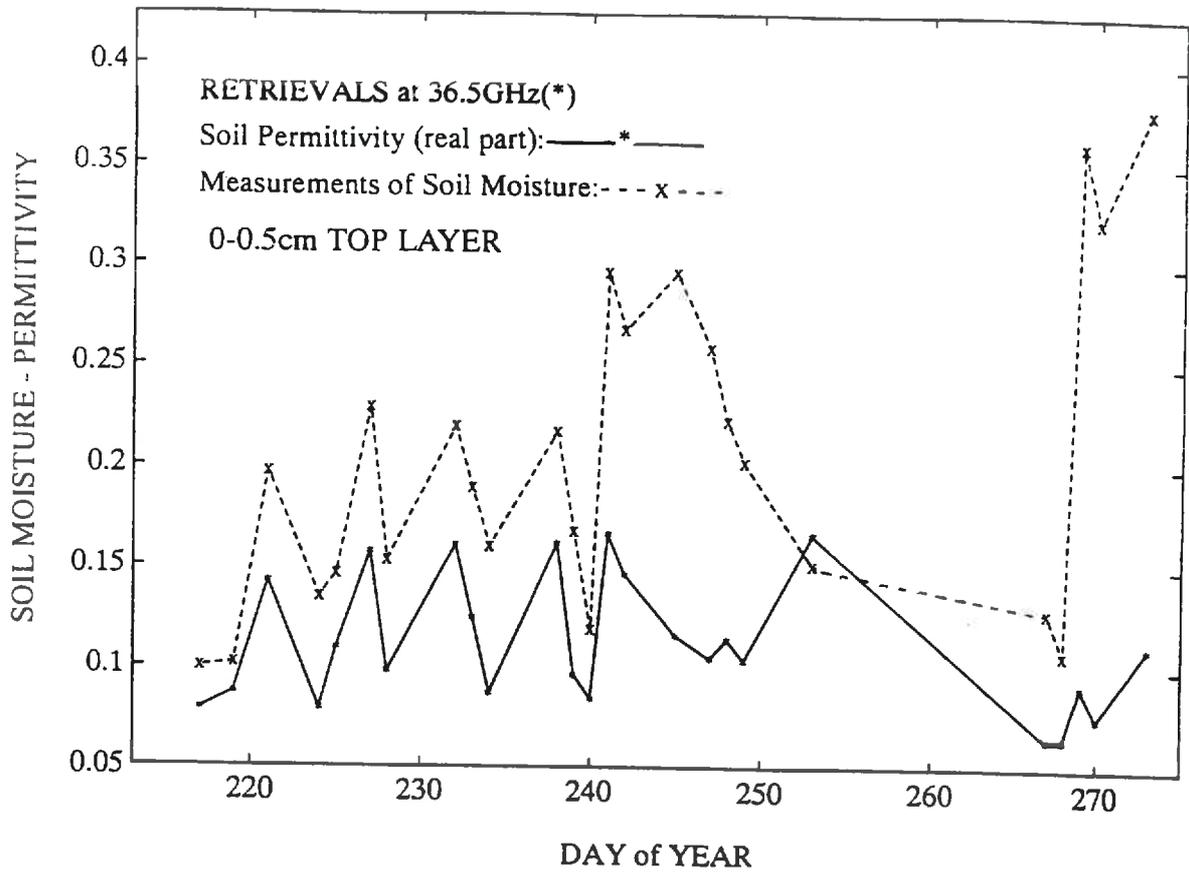


Figure 7-7: Evolutions comparées des valeurs inversées de la partie réelle de la constante diélectrique ϵ_2^i et des valeurs mesurées de la teneur en eau volumique m_v^i du sol, à 36.5GHz (approche continue).

7.2.5 Inversion des paramètres de la surface: teneur en eau du sol m_v et fraction volumique de la végétation f_v

Ce paragraphe se propose d'évaluer l'intérêt de l'approche continue pour estimer des paramètres de surface à partir de données micro-ondes télédéteectées. De l'analyse des données radiométriques PORTOS-1991 (Chapitre 6), il ressort que deux paramètres du milieu sont déterminants dans l'évolution de l'émission micro-onde du couvert de soja: la teneur en eau du sol m_v et la biomasse (paramétrisée dans ce travail par la fraction volumique de la végétation f_v). Ces deux paramètres sont inversés à partir des données PORTOS, sur l'ensemble de la campagne de mesure, les longueurs de corrélation étant calées sur la période C.

Les valeurs inversées de f_v , désignées par f_v^i , sont représentées dans la figure (7-5) pour les fréquences 1.4, 5.05 et 36.5GHz. A 5.05 et 36.5GHz, ces valeurs sont très similaires et sont en bon accord avec les données mesurées (figure 6-3). Lors de l'installation du couvert, l'accroissement de f_v^i peut être observé initialement à 36.5GHz. Cette fréquence élevée apparait ainsi davantage sensible aux faibles valeurs de fraction volumique de la végétation. A 1.4GHz, f_v^i est environ deux fois plus élevé qu'à 36.5GHz et 5.05GHz. Ceci peut être relié aux observations faites dans les deux sections précédentes. Ainsi, la tendance de l'émissivité à 1.4GHz est une fonction croissante régulière tout le long de la campagne de mesure (figure 6-17). Ceci pourrait traduire la sensibilité des mesures à 1.4GHz aux fruits qui se développent après le jour 250. La sous-estimation du coefficient d'absorption k_a du couvert par l'approche continue, pourrait également expliquer la valeur élevée de f_v^i à basses fréquences.

Les valeurs inversées de m_v , désignées par m_v^i , sont représentées dans les figures (7-6.a-b) à 1.4 et 5.05GHz. A 36.5GHz nous avons vu qu'aucune paramétrisation précise de la constante diélectrique ϵ_2 du sol en fonction de m_v n'était disponible. Aussi la partie réelle de ϵ_2 qui est fortement corrélée à m_v sera inversée et désignée par ϵ_2^i (figure (7-7)). Ces valeurs inversées m_v^i et ϵ_2^i seront comparées avec la teneur en eau du sol mesurée sur différentes épaisseurs de sol: $\langle m_v \rangle_{3cm}$ à 1.4GHz, $\langle m_v \rangle_{1cm}$ à 5.05GHz et $\langle m_v \rangle_{0.5cm}$ à 36.5GHz. A basses fréquences, l'accord entre m_v^i et $\langle m_v \rangle_{3cm}$ à 1.4GHz, et entre m_v^i et $\langle m_v \rangle_{1cm}$ à 5.05GHz est plutôt bon, à l'exception de quelques jours. Ainsi m_v est sur-estimée les jours J221 à 1.4GHz et J240 à 5.05GHz. Ces deux jours, les mesures radiométriques ont été effectuées plus tôt dans la journée (9^H-10^H TU) au lieu de (11^H-14^H TU) habituellement. La sensibilité du capteur aux conditions climatiques externes pourrait donc expliquer en partie les écarts mesures-inversions observés. La modification de structure du couvert dans la nuit (J268-J269) explique l'augmentation de sensibilité du signal micro-onde mesuré à m_v , les jours J269, J270 et J273. A 36.5GHz les variations de ϵ_2^i sont bien corrélées avec les variations de $\langle m_v \rangle_{0.5cm}$ jusqu'aux jours 240-242. Après cette date, la contribution montante du sol est complètement atténuée par la végétation en phase de croissance soutenue. L'émission au sommet du couvert ne contient plus alors d'information sur l'humidité du sol sous-jacent.

7.2.6 Discussion

Dans cette section, l'intérêt du modèle continu en tant qu'outil d'inversion a été analysé en s'appuyant sur les données PORTOS-91. Dans une première étape, l'inversion des longueurs de corrélation l_z et l_p montre que ces paramètres sont assez stables, une fois le couvert bien installé ($f_v > 0.1\%$). Ceci nous a conduit à caler l_z et l_p sur un couvert bien développé à partir de données terrain. La confrontation directe mesures-simulations conduit à des valeurs de RMSE de l'ordre de 7.5K à 5.05 et 36.5GHz, qui permettent d'évaluer l'erreur résultant du calage. L'inversion des paramètres de surface m_v et f_v s'est appuyée sur ces longueurs de corrélation calées. Les caractéristiques de surface inversées sont en bon accord avec les mesures *in situ*. La cohérence des résultats obtenus pour les différents canaux 1.4, 5.05 et 36.5GHz montre la pertinence de la mesure micro-onde dans le suivi de ces deux paramètres et l'intérêt du mode d'inversion mis en oeuvre.

Cependant, à 1.4GHz l'approche continue semble pénalisée par la simplicité du calcul du coefficient d'absorption k_a du couvert, dont la valeur apparaît sous-estimée par rapport à l'approche discrète. Ainsi, à 36.5GHz, le signal simulé par le modèle continu reste sensible à la contribution du sol sous couvert bien développé (jours 269, 270, 273, figure (7-4.c)) alors que cette contribution était totalement atténuée dès 10.65GHz dans les simulations du modèle discret. L'absence de variation marquée de l'humidité du sol sous couvert bien développé pendant la campagne PORTOS-1991 ne permet pas de conclure sur ce point.

7.3 Discussion et Perspectives

7.3.1 Mesures micro-ondes sur sol nu et couvert végétal

Divers jeux de données radiométriques (Hapex-Sahel 1992, PORTOS-1993) issus des mesures de MARMOTTE et PORTOS, doivent permettre de compléter ce travail préliminaire portant sur l'analyse physique de la mesure micro-onde sur couvert végétal. Pendant la future campagne PORTOS-1993, conduite sur couvert de blé au cours du printemps à Avignon, un suivi plus fin des paramètres de surface peut être obtenu par la refonte du contrôle thermique du radiomètre, ou du moins par la prise en compte précise de sa dérive en température. Les données PORTOS-1991 pourraient également être réétalonnées, en modélisant l'influence de l'équilibre thermique de l'instrument sur les mesures. Le réajustement de la précision radiométrique de PORTOS élargit le champ des paramètres accessibles. En particulier, les effets de la teneur en eau de la végétation et de l'orientation foliaire peuvent être découplés de l'influence plus marquée de f_v et de m_v par une analyse des variations de l'émission micro-onde à l'échelle horaire. Ces effets qui paraissaient significatifs sur les mesures PORTOS-1991, à 10.65GHz en particulier, n'ont pu être quantifiés. Des mesures acquises lors de phases marquées de variation d'humidité du sol, sous couvert homogène bien développé, permettraient l'analyse des effets d'absorption et de diffusion de la contribution du sol par la végétation. Des mesures en fin du cycle cultural du couvert végétal, en phase de dessiccation progressive, permettraient de préciser à l'échelle journalière les effets de la teneur en eau de la végétation.

Par ailleurs, la paramétrisation par h_r et Q des effets de rugosité de surface paraît satisfaisante. D'autres analyses, à partir de données PORTOS et MARMOTTE sur sol nu, nous permettrons de préciser la relation entre les paramètres (h_r , Q) et l'estimation statistique de la rugosité, et d'établir leur dépendance en fonction de la fréquence.

Durant la campagne PORTOS-1993, l'étude des couverts hétérogènes devrait être conduite par des mesures sur couvert de végétation clairsemé à différentes échelles (échelle très locale avec MARMOTTE, échelle plus globale avec PORTOS installé sur la grue). Ces études s'inscrivent dans la continuité de la campagne Hapex-Sahel qui s'ouvre largement vers l'intégration spatiale et la diversité physiologique des couverts.

7.3.2 Approches discrète et continue

L'approche discrète s'avère être un outil performant d'analyse de l'émission micro-onde du couvert végétal. Son champ d'utilisation apparaît très vaste: définition des configurations du radiomètre en fonction des paramètres observés, interprétation des mesures, couplage avec des modèles simplifiés dans une optique d'inversion, couplage avec des modèles précis de fonctionnement du couvert végétal dans une optique d'intégration de données multispectrales (visible, proche et moyen infrarouge, infrarouge thermique, fluorescence...). Une validation plus générale de cette approche nécessite l'incorporation dans le modèle d'une strate de végétation supplémentaire (strate de troncs et branches,

de tiges..), et d'un module décrivant la diffusion par les cylindres (qui simulent troncs d'arbres, tiges, branches, pétioles..). Ce travail de modélisation pourra s'appuyer sur les mesures PORTOS-1993 sur blé. En effet par rapport au soja, la structure de la végétation devient davantage verticale, cylindrique (avec les tiges verticales) et bi-couche (strate de tiges et de feuilles et strate d'épis).

Dans l'approche continue, le mode de résolution des équations de transfert radiatif est identique à celui de l'approche discrète. Mais la prise en compte des effets de la structure du couvert sur la diffusion est beaucoup plus simple et reste limitée aux deux longueurs de corrélation l_z et l_p . Cette simplicité rend le modèle continu bien adapté à l'inversion des paramètres de surface, en particulier la teneur en eau du sol m_v , la fraction volumique f_v et à terme la teneur en eau M_g de la végétation.

Afin d'améliorer la précision de l'inversion, deux aspects de la modélisation continue doivent être approfondis: (1) l'analyse des longueurs de corrélation et de leur relation effective avec les caractéristiques diélectriques et structurelles des diffuseurs du couvert, et (2) la prise en compte de l'absorption. Ainsi, une meilleure connaissance des valeurs des longueurs, en fonction des différents types de couverts et du stade phénologique de la végétation, doit être acquise. Egalement, le calcul de l'absorption doit être affiné. Il serait intéressant de relier ce calcul aux longueurs de corrélation, pour accroître le poids de l_z et l_p dans la simulation (et donc dans l'inversion), en particulier à très basses fréquences où l'absorption prime sur la diffusion. Cette étude s'appuyera sur les travaux de Jin *et al.* (1992); de Wegmüller *et al.* (1993) (approche d'optique géométrique), et sur la modélisation discrète. Elle s'appuyera aussi sur la campagne de mesure PORTOS-1993, qui permettra en particulier de suivre l'évolution des longueurs l_z et l_p pour un couvert à structure fortement verticale.

Les approches continue et discrète apparaissent donc très complémentaires dans l'analyse de l'émission micro-onde de la végétation. A terme, une fois ces approches bien maîtrisées et validées, leur couplage pourrait être envisagé. En particulier, la liaison entre les longueurs de corrélation et les caractéristiques de structure du couvert pourrait être déduite de l'analyse des relations entre les matrices de phase continue et discrète.

Chapitre 8

Couplage de l'approche discrète avec un modèle de simulation des échanges d'énergie au sein d'un couvert végétal

8.1 Présentation et principe de l'étude

Nous décrivons dans ce chapitre une étude portant sur le couplage du modèle micro-onde discret avec un modèle de simulation des échanges d'énergie et de masse au sein d'un couvert végétal (modèle ALB). Le modèle ALB a été développé dans le but de relier la transpiration et la photosynthèse aux mesures de réflectance dans le domaine visible et proche infrarouge (PIR) et de température de surface dans l'infrarouge thermique (Oliosio, 1992). Ce couplage constitue donc un prolongement naturel du travail de A. Oliosio vers le domaine des mesures hyperfréquences.

Les paramètres d'entrée de ALB sont des données climatiques (rayonnements incidents, données météorologiques..) et des données caractérisant les propriétés de nature optique, structurelle, énergétique du sol et de la végétation. En sortie, ALB simule

- > les divers termes caractéristiques des échanges d'énergie au sein du couvert (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latente, température aérodynamique, potentiel hydrique foliaire)
- > la photosynthèse du couvert
- > les réflectances spectrales (ρ_λ) et la température radiative dans l'infra-rouge thermique du couvert (T_{IRT}), accessibles par télédétection (l'ensemble de ces paramètres sont précisés en détail dans le tableau (8-1)).

Plusieurs objectifs justifient ce couplage. Le premier porte sur le développement d'un outil de *simulation dynamique de la température de brillance micro-onde T_{Bp} en fonction des paramètres du couvert et de données météorologiques*. Le couplage prend en compte les interactions entre les diverses caractéristiques du milieu (température, biomasse, structure du couvert, humidité du sol...). L'étude de sensibilité du modèle discret pourra ainsi être complétée par une étude dynamique de situations naturelles et ne se limitera plus à l'analyse d'une configuration figée du milieu. L'étude s'intéressera particulièrement à l'analyse de deux paramètres: la température et la teneur en eau de la végétation (qui sera reliée au potentiel hydrique foliaire), ces deux termes n'ayant pu être cernés lors de l'expérience sur Avignon.

Le deuxième objectif de ce couplage est *l'accès au suivi du fonctionnement du couvert végétal à partir des mesures micro-ondes passives*. Ainsi la température de brillance micro-onde du couvert sera reliée à des termes de flux de masse et d'énergie au sein de la végétation.

De ces objectifs résulte un outil de simulation de l'ensemble des paramètres accessibles par télédétection. Cet outil prend en compte les relations entre les variables d'entrée et de sortie des modèles développés dans les différents domaines spectraux (visible, proche infra-rouge, infra-rouge thermique, micro-onde (passif et actif)). Il peut donc permettre, à l'échelle de la parcelle agricole, une analyse précise de la complémentarité des mesures multispectrales de télédétection. En l'absence d'un jeu de données adapté, cet aspect synergétique ne sera pas abordé dans cette étude.

1 Paramètres et variables d'entrées

1.1 Variables d'entrée

- variables météorologiques (au niveau de référence atmosphérique z_a) : T_a, q_a, u_a
- rayonnements incidents : $R_{g\lambda_1}, R_{c\lambda_1}, R_{g\lambda_1,\lambda}, Q_p, e_d$
- caractéristiques des rayonnements incidents : Θ_s (calculé d'après Baille *et al.* 1983)
- variables du sol : T_g (à la profondeur de référence z_g), les mesures de G_o pourront aussi être utilisé en entrée

1.2 Paramètres d'entrée

- caractéristiques des rayonnements incidents : p_λ (spectre d'après Avaste *et al.* 1962)
- caractéristiques de structure de la végétation : μ, ν, LAI, z_h
- propriétés optiques de la végétation : ρ_f (spectre), τ_f (spectre), ϵ_f
- caractéristiques "physiologiques" des plantes : G_p (mesurée ou calculée), $g_{fmin}, g_{fmax}, A_{fmin}, A_{fmax}, K_{par}, \psi_{1/2}, K_\psi, K_D, T_{opt}, K_T$ ou T_x et T_m , (Ces huit derniers paramètres peuvent différer entre la photosynthèse et la conductance stomatique)
- caractéristiques aérodynamiques de la végétation : $C_d, z_a,$
- caractéristiques du sol : D_a
- caractéristiques hydriques du sol : θ (dans la zone racinaire), $\theta_{0-5}, \theta_h, \theta_s, \psi_s$ (dans la zone racinaire) mesuré, estimé à partir du potentiel de base ou calculé à partir de θ
- propriétés optiques du sol : ρ_s (spectre de $\rho_{s\lambda}$), $\epsilon_s, \epsilon_{s,d,\lambda}$
- caractéristiques aérodynamiques du sol : z_{0s}
- caractéristiques géométriques de la visée : Θ_o, Ψ

2 Variables de sortie

- rayonnements net : Rn_v, Rn_s, Rn
- flux de chaleur sensible : H_v, H_s, H
- flux de chaleur latente : LE_v, LE_s, LE, T
- flux de chaleur dans le sol : G_o (s'il n'est pas utilisé en entrée)
- photosynthèse du couvert : A_c, A_{c2}
- températures aérodynamiques : T_v, T_{ss}
- température radiative : T_b
- réflectances spectrales : ρ_λ
- albédo : α
- potentiel hydrique foliaire : ψ_f

Tableau 8-1: Paramètres et variables en entrée et sortie du modèle ALB (d'après Oliosio (1992)).
(paramètres = quantités qui restent constantes au cours d'une période de simulation (la journée);
variables = quantités qui varient au pas de temps de la simulation (heure)).

Dans cette étude, l'évolution de l'émission micro-onde d'une culture de soja sera simulée au cours du cycle végétatif, puis au cours de la journée. Le manque de fiabilité des données radiométriques à l'échelle horaire ne nous permet pas d'entreprendre une validation de l'étude sur la campagne PORTOS-1991. Le couplage se fondera donc sur les données microclimatiques de la campagne SOJA-1990 (INRA, Avignon), plus complètes sur le plan de la caractérisation hydrique de la végétation. A l'échelle horaire, les simulations porteront sur quatre configurations du milieu, où sont croisés, une humidité du sol forte ou réduite avec un LAI de la végétation fort ou réduit.

Les termes principaux du couplage sont les variables simulées par ALB et introduites en entrée du modèle discret: le potentiel hydrique des feuilles (ψ_l) et la température du sol (T_2) et du couvert végétal (T_1). Les interactions entre les différents paramètres caractéristiques du milieu seront soit incluses dans le modèle de fonctionnement du couvert ALB, soit représentées sous forme d'équations analytiques simples. Cette étude permettra donc d'appréhender de manière dynamique et globale la mesure micro-onde passive dans le contexte du fonctionnement du couvert végétal.

8.2 Analyse du couplage entre le modèle micro-onde et le modèle de fonctionnement du couvert végétal

8.2.1 Description du modèle de fonctionnement du couvert végétal (modèle ALB)

8.2.1.1 Présentation générale du modèle ALB

Dans le modèle de simulation des flux d'énergie au sein du couvert (Olios, 1992), le couvert est assimilé à une simple feuille ("Big Leaf Model"). Une résistance de surface du couvert est introduite, par analogie avec la résistance stomatique foliaire. Ce type de modèle ne prenant pas en compte les détails du microclimat interne du couvert, correspond bien à l'échelle relativement globale des mesures de la télédétection. Le modèle sépare le fonctionnement du sol et du couvert. Ainsi les équations du bilan d'énergie sont résolues simultanément dans deux couches "sol" et "végétation" superposées. Le modèle se fonde également sur une description monodimensionnelle verticale des transferts turbulents, des transferts radiatifs et des transferts hydriques au sein du continuum sol-plante-atmosphère.

*Le schéma général des flux turbulents et des coefficients d'échange s'inspire des modèles à deux couches de Choudhury et Monteith (1988) et à trois couches de van de Griend et van Boxel (1989). Les transferts turbulents entre le couvert et l'atmosphère sont décrits par analogie avec la diffusion (Monteith, 1973). Ainsi les flux de chaleur sensible provenant du sol H_s et de la végétation H_v s'expriment en fonction d'un coefficient d'échange aérodynamique h_q ($q=s$ ou v) selon:

$$H_q = \rho \cdot C_p h_q (T_q - T_{ac}) \quad (8-3)$$

où T_{ac} désigne la température de l'air au sein du couvert, T_q la température de surface du sol ou de la végétation (T_v et T_s correspondent respectivement à T_1 et T_2 dans le modèle discret), ρ la masse volumique de l'air et C_p sa capacité calorifique. En ce qui concerne les flux de chaleur latente, deux conductances de surface sont introduites au niveau du sol (g_s) et au niveau de la végétation (g_v). Ainsi les flux de chaleur latente LE_v et LE_s s'expriment par:

$$\begin{cases} LE_v = (\rho \cdot C_p / \gamma_p) g_v (e_v^*(T_v) - e_v) = (\rho \cdot C_p / \gamma_p) h_v (e_v - e_{ac}) \\ LE_s = (\rho \cdot C_p / \gamma_p) g_s (e_s^*(T_s) - e_s) = (\rho \cdot C_p / \gamma_p) h_s (e_s - e_{ac}) \end{cases} \quad (8-4)$$

où e_q désigne la pression de vapeur d'eau, e_{ac} la pression de vapeur d'eau dans le couvert, $e_q^*(T_q)$ la pression de vapeur saturante à la température T_q , et γ_p la constante psychrométrique. La conductance g_s

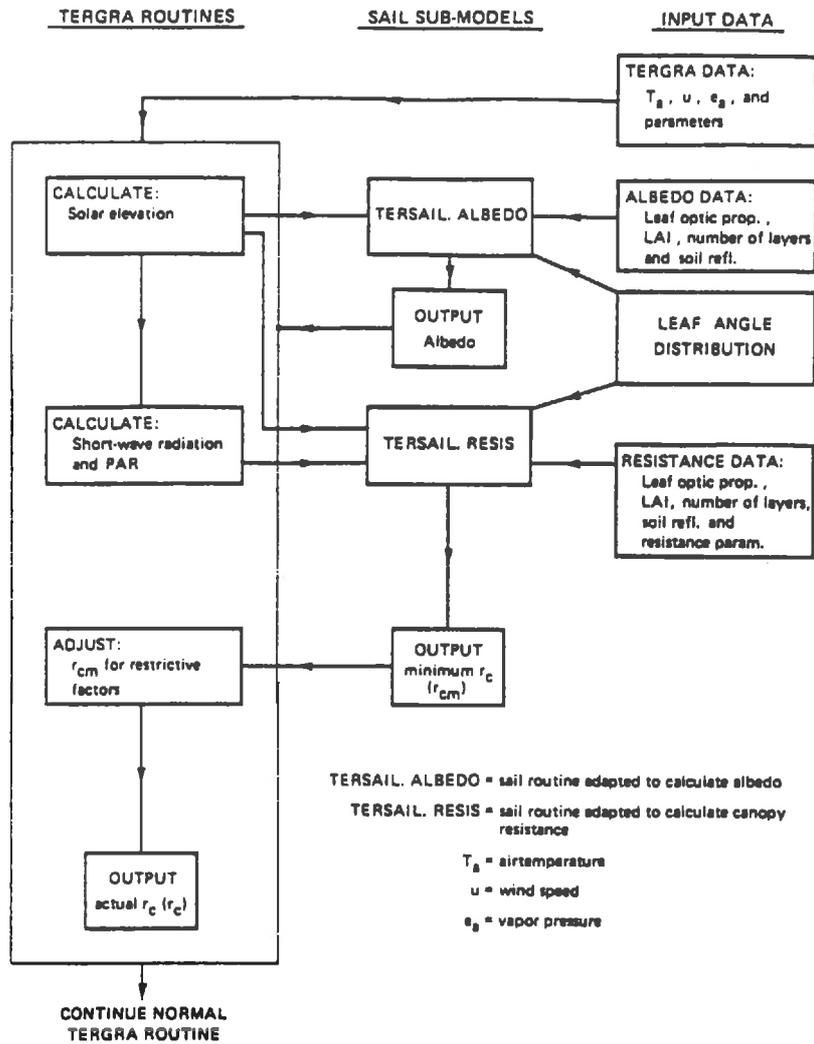


Figure 8-1: Architecture générale du modèle TERSAIL (d'après Hope *et al.* (1988)).

est reliée à l'humidité du sol en surface. La conductance g_v intègre l'ensemble des conductances stomatiques des feuilles du couvert agissant en parallèle. Le calcul de ces deux termes clefs est détaillé dans la section qui suit.

*La description des transferts radiatifs au sein du couvert se fonde sur les équations du modèle SAIL (Verhoef, 1984) en ce qui concerne les courtes longueurs d'ondes et l'infrarouge thermique. ALB s'est inspiré à l'origine de l'architecture du modèle à une couche TERSAIL (Hope *et al.*, 1988; figure 1), sur le plan de l'imbrication des calculs de transfert radiatif (par SAIL) dans un modèle de simulation des échanges d'énergie au sein de la végétation (TERGRA). En particulier, les procédures de SAIL simulent l'éclairement des feuilles dans le couvert. Cette information permet le calcul des réponses stomatiques et photosynthétiques à l'éclairement sur l'ensemble du couvert.

*La transpiration T_r est assimilée au flux d'eau au travers des plantes. Elle s'exprime comme le produit d'une conductance hydraulique G_p et du gradient de potentiel hydrique entre le sol et les feuilles:

$$T_r = LE_w/L = G_p(\psi_s - \psi_l) \quad (8-5)$$

où ψ_s et ψ_l désignent respectivement le potentiel hydrique dans le sol (zone racinaire) et dans la feuille; L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau. La composante synthétique G_p peut se décomposer comme somme en série d'une conductance de la plante et d'une conductance du sol vers la surface des racines (Feddes et Ritjema, 1972). Cependant l'accès aux caractéristiques hydrauliques du sol et aux caractéristiques d'enracinement des plantes étant complexe et difficile, Olioso (1992) se limite à une approche globale de G_p .

8.2.1.2 Calcul des conductances de surface du sol et de la végétation

Les conductances de surface du sol et de la végétation g_s et g_v apparaitront dans la suite de ce travail comme des termes clefs du couplage.

La résistance du sol aux transferts hydriques r_s ($r_s = 1/g_s$) peut être reliée à l'humidité de surface par des approches empiriques (Camillo et Gurney, 1986). Chanzy (1991) montre cependant que ces relations varient significativement en fonction des propriétés de diffusion des couches de surface du sol. Une relation simple a tout de même pu être établie pour le sol de la parcelle POIRSON:

$$r_s = 1.439 \cdot 10^5 (0.35 - m_{v[0-5cm]})^{3.14} \quad (8-6)$$

où $m_{v[0-5cm]}$ désigne l'humidité volumique de surface sur la couche [0 - 5cm].

La conductance de surface de la végétation g_v intègre l'ensemble du fonctionnement stomatique du couvert végétal. Plus précisément la conductance stomatique d'une feuille donnée dépend de l'éclairement photosynthétiquement actif (PAR) reçu Q_p , de son potentiel foliaire ψ_f , de sa température T_f et du déficit de saturation D au niveau de sa surface: $g_f(Q_p, \psi_f, T_f, D)$.

Dans le modèle ALB, la réponse stomatique est représentée par un modèle multiplicatif combinant les effets de chacune des variables:

$$g_f = g_{fmin} + (g_{fmax} - g_{fmin}) g_g(Q_p) g_g(\psi_f) g_g(T_f) g_g(D) \quad (8-7)$$

où g_{fmax} et g_{fmin} sont les conductances maximale et minimale, et g_g des fonctions spécifiques telles que $0 < g_g < 1$. Ce modèle considère les effets des facteurs environnementaux Q_p , ψ_f , T_f et D comme indépendants les uns des autres. Les fonctions g_g sont exprimées sous des formes analytiques assez simples, obtenues à partir d'études en conditions contrôlées (Jarvis, 1976; Jones, 1983). En particulier, la dépendance de g_f en fonction de D , différence entre la pression de vapeur à la surface de la feuille e_f et la pression de vapeur saturante à la température de la feuille $e_f^*(T_f)$, sera exprimée selon:

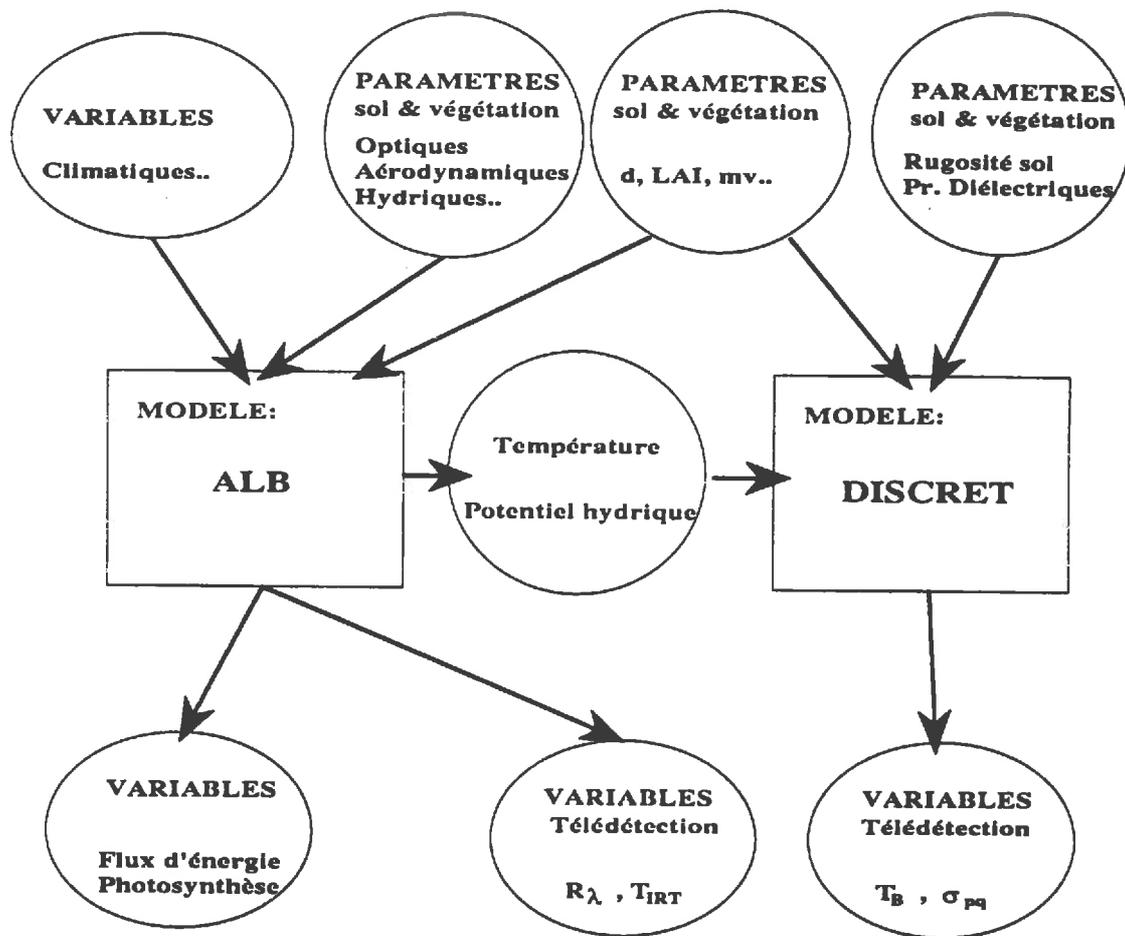


Figure 8-2: Architecture générale du couplage modèle discret – ALB.

$$g_s(D) = 1 - (1/K_D) \cdot D = 1 - (1/K_D) \cdot (e_f^*(T_f) - e_f) \quad (8-8)$$

où K_D est un paramètre empirique qui exprime le déficit de saturation pour lequel la fermeture des stomates se produit.

La conductance de surface de la végétation g_v est obtenue en intégrant la réponse des feuilles sur l'ensemble du couvert. Cette intégration fait appel aux transferts radiatifs pour le calcul de Q_p et à la résolution du bilan d'énergie pour le calcul de ψ_f , T_f et D (qui sont considérés constants sur l'ensemble du couvert).

8.2.2 Description des différents termes du couplage

8.2.2.1 Architecture générale du couplage (modèle discret-ALB)

L'architecture générale du couplage (modèle discret-ALB) est représentée dans la figure (8-2). Nous distinguerons les variables qui varient au pas de temps horaire de la simulation, des paramètres qui restent constants au cours d'une période de simulation (la journée). Les paramètres et variables d'entrée peuvent être regroupés en quatre classes:

- *variables spécifiques de ALB: caractéristiques climatiques du milieu (température et humidité de l'air, vitesse du vent, rayonnement incident..).

- *paramètres spécifiques de ALB: caractéristiques optiques et aérodynamiques du sol et de la végétation, caractéristiques "physiologiques" des plantes, caractéristiques hydriques du sol.

- *paramètres spécifiques du modèle discret: rugosité "électromagnétique" du sol, propriétés diélectriques du sol et de la végétation, caractéristiques fines de structure du couvert (dimensions, forme et orientation des diffuseurs végétaux).

- *paramètres communs au modèle discret et à ALB: caractéristiques générales de structure du couvert (hauteur (d), LAI, distribution d'inclinaison des feuilles (μ , ν)), teneur en eau volumique en surface du sol.

Les termes de fond du couplage sont les variables de sortie de ALB qui sont introduites en entrée du modèle discret: la température du sol (T_2) et de la végétation (T_1), ainsi que le potentiel hydrique des feuilles (ψ_f). Les variables de sortie globales du couplage sont les termes caractéristiques des échanges d'énergie au sein du milieu, la photosynthèse du couvert végétal, et les paramètres accessibles par télédétection: les réflectances spectrales ρ_λ (visible et proche infra-rouge), les températures de brillance infrarouge thermique T_{IRT} et micro-onde T_B (et le coefficient de rétrodiffusion σ_{pq} dans le cadre d'une extension du couplage avec le modèle actif RETROD). Certains aspects relativement délicats du couplage concernent les flux d'eau dans la végétation (variables ψ_f et M_{gf}) et dans le sol (variables r_s et m_v). Ils sont abordés dans la section qui suit.

8.2.2.2 Prise en compte de la teneur en eau du sol et de la végétation

Les deux modèles couplés prennent en compte l'humidité du sol de façon distincte. En effet ALB ne calcule pas le bilan hydrique au niveau du sol contrairement à Soer (1977), Taconet *et al.* (1986) ou Choudhury et Monteith (1988). La valeur de la teneur en eau du sol sur la couche [0 – 5cm] ($m_{v[0-5cm]}$) est un paramètre d'entrée de ALB, considéré comme constant au cours de la journée, et qui intervient dans le calcul de la résistance de surface à l'évaporation (r_s). Par contre, le modèle discret nécessite en entrée la valeur de l'humidité du sol sur une couche de surface dont la profondeur varie avec la fréquence (typiquement [0 – 3cm] à 1.4GHz, [0 – 1cm] à 5.05GHz, [0 – 0.5cm] pour des fréquences au delà de 10GHz). Cette distinction dans la prise en compte de l'humidité du sol par les deux modèles, sera résolue ponctuellement par la prise en compte d'une relation analytique entre $m_{v[0-5cm]}$ et $m_{v[0-3cm]}$.

Jour	psis (MPa)	mv (m3/m3)	LAI	d (m)	mu	nu	Gp (Nm-2.MPa-1)
211	-0.23	0.223	0.58	0.21	2.5	2.2	62.
214	-0.20	0.146	1.00	0.27	2.7	1.2	136.
216	-0.19	0.207	1.37	0.30	2.7	1.2	245.
219	-0.30	0.13	2.02	0.33	1.1	1.9	251.
221	-0.35	0.12	2.30	0.36	1.1	1.9	261.
223	-0.29	0.10	2.61	0.40	1.1	1.9	246.
225	-0.38	0.092	2.91	0.44	1.1	1.9	70.
228	-0.31	0.179	3.27	0.50	1.1	1.9	356.
232	-0.52	0.088	3.57	0.57	1.1	1.9	384.
235	-0.58	0.09	3.68	0.61	1.1	1.9	224.
239	-0.47	0.086	3.74	0.64	1.1	1.9	82.
243	-0.41	0.277	3.64	0.65	1.1	1.9	370.
244	-0.41	0.22	3.70	0.65	1.1	1.9	370.
245	-0.41	0.18	3.67	0.65	1.1	1.9	370.
246	-0.48	0.111	3.64	0.65	1.1	1.9	360.
247	-0.50	0.10	3.73	0.65	1.1	1.9	360.
248	-0.50	0.086	3.56	0.65	1.1	1.9	210.
249	-0.54	0.08	3.51	0.65	1.1	1.9	204.
250	-0.57	0.076	3.60	0.65	1.1	1.9	194.
251	-0.59	0.07	3.39	0.65	1.1	1.9	194.
252	-0.59	0.07	3.33	0.65	1.1	1.9	168.
253	-0.63	0.066	3.25	0.65	1.1	1.9	160.
254	-0.66	0.06	2.89	0.65	1.1	1.9	157.
255	-0.66	0.06	3.06	0.65	1.1	1.9	148.
256	-0.70	0.06	2.98	0.65	1.1	1.9	140.

Tableau 8-2: Paramètres descriptifs du couvert: potentiel hydrique (ψ_s) et teneur en eau ($m_{v[0-5cm]}$) du sol, LAI, hauteur (d), conductance hydraulique du couvert (G_p), au cours de la campagne SOJA-1990 (Oliosio, 1992).

Jour	psis (MPa)	mv (m3/m3)	LAI	d (m)	mu	nu	Gp (Nm-2.MPa-1)
PL1M1:							
248	-0.20	0.08	1.3	0.3	1.1	1.9	160.
PL1M2:							
248	-0.20	0.25	1.3	0.3	1.1	1.9	160.
PL2M1:							
248	-0.10	0.08	3.6	0.65	1.1	1.9	210.
PL2M2:							
248	-0.10	0.25	3.6	0.65	1.1	1.9	210.

Tableau 8-3: Paramètres descriptifs des quatre configurations LAMB (A,B, = 1 ou 2).

$m_{v[0-1cm]}$, $m_{v[0-0.5cm]}$, calculée à partir de données expérimentales sous couvert de soja dans des conditions similaires à celles de l'expérience SOJA-1990 (Bertuzzi, 1989).

D'autre part, une différence apparaît également entre les deux modèles couplés, au niveau du choix de la variable descriptive de l'eau dans le couvert. Le potentiel hydrique foliaire ψ_f , qui est pertinent dans une approche de modélisation des flux d'eau dans la plante, est la variable "hydrique" sélectionnée par ALB. Par contre, l'estimation de la constante diélectrique de la matière végétale dans le modèle discret, est paramétrisée par un terme de teneur en eau de la végétation (M_{gf}). Aussi, comme précédemment une relation analytique simple entre ψ_f et M_{gf} sera estimée à partir de données expérimentales sur soja (Vanderschmidt, 1993).

8.3 Simulations de données par les modèles couplés

8.3.1 Aspects méthodologiques

8.3.1.1 Description des simulations

Deux types de simulation seront mises en oeuvre. La première davantage introductive, modélise l'émission micro-onde du couvert de soja au cours de l'expérience SOJA-1990, qui a permis le calage et la validation du modèle ALB (Oliosio, 1992). Les calculs suivent le développement du couvert du jour 211 au jour 256 à 12H TU, aux basses fréquences de PORTOS: 1.4GHz, 5.05GHz et 10.65GHz. Les paramètres de description générale du couvert sont donnés dans le tableau (8-2). L'ensemble des paramètres d'entrée du modèle discret et de ALB proviennent de mesures des propriétés et caractéristiques du sol, de la végétation et du climat qui sont détaillés dans le travail de Oliosio (1992). Au cours de la période J211-J256, le couvert se développe régulièrement, et atteint un LAI maximum de 3.6. Quatre phases d'irrigations ou de précipitations élèvent fortement le niveau d'humidité du sol (les jours 206, 216, 228 et 243).

Le deuxième jeu de simulation porte sur quatre configurations du milieu, désignées par L1M1, L1M2, L2M1, L2M2: humidité du sol forte (M2) ou réduite (M1) croisée avec un LAI de la végétation fort (L2) ou réduit (L1). Pour ces quatre configurations, l'évolution du signal micro-onde est simulée au cours de la journée (de 6^H à 18^H TU). Les paramètres spécifiques d'entrée des quatre configurations LAMB (A,B, = 1 ou 2) sont donnés dans le tableau (8-3). A l'exception des paramètres spécifiques, les variables et paramètres d'entrée de ALB (données météorologiques, propriétés du couvert et du sol..) sont ceux d'un jour caractéristique de la campagne SOJA-1990 (jour 248 chaud et sec). L'évolution des caractéristiques: rayonnement global, vitesse du vent, température et humidité de l'air, au cours de la journée est représentée dans la figure (8-3). Cette figure illustre également la validation des sorties de ALB, qui sont comparées aux données mesurées de rayonnement net, de chaleur latente et de chaleur sensible. Par ailleurs, G_p a été calée pour que l'évolution du potentiel hydrique foliaire de la végétation au cours de la journée, soit proche pour les quatre configurations LAMB.

Dans le cadre de ces simulations, des équations analytiques simples reliant divers paramètres caractéristiques du milieu et permettant le couplage des deux modèles (discret et ALB) sont mises en oeuvre. Elles sont précisées dans le paragraphe qui suit.

8.3.1.2 Relations analytiques entre paramètres caractéristiques du milieu

a) Prise en compte de la teneur en eau du sol et de la végétation

Des équations analytiques simples reliant divers paramètres caractéristiques du milieu, sont calées à partir de mesures expérimentales et mises en oeuvre dans les simulations. Deux de ces relations

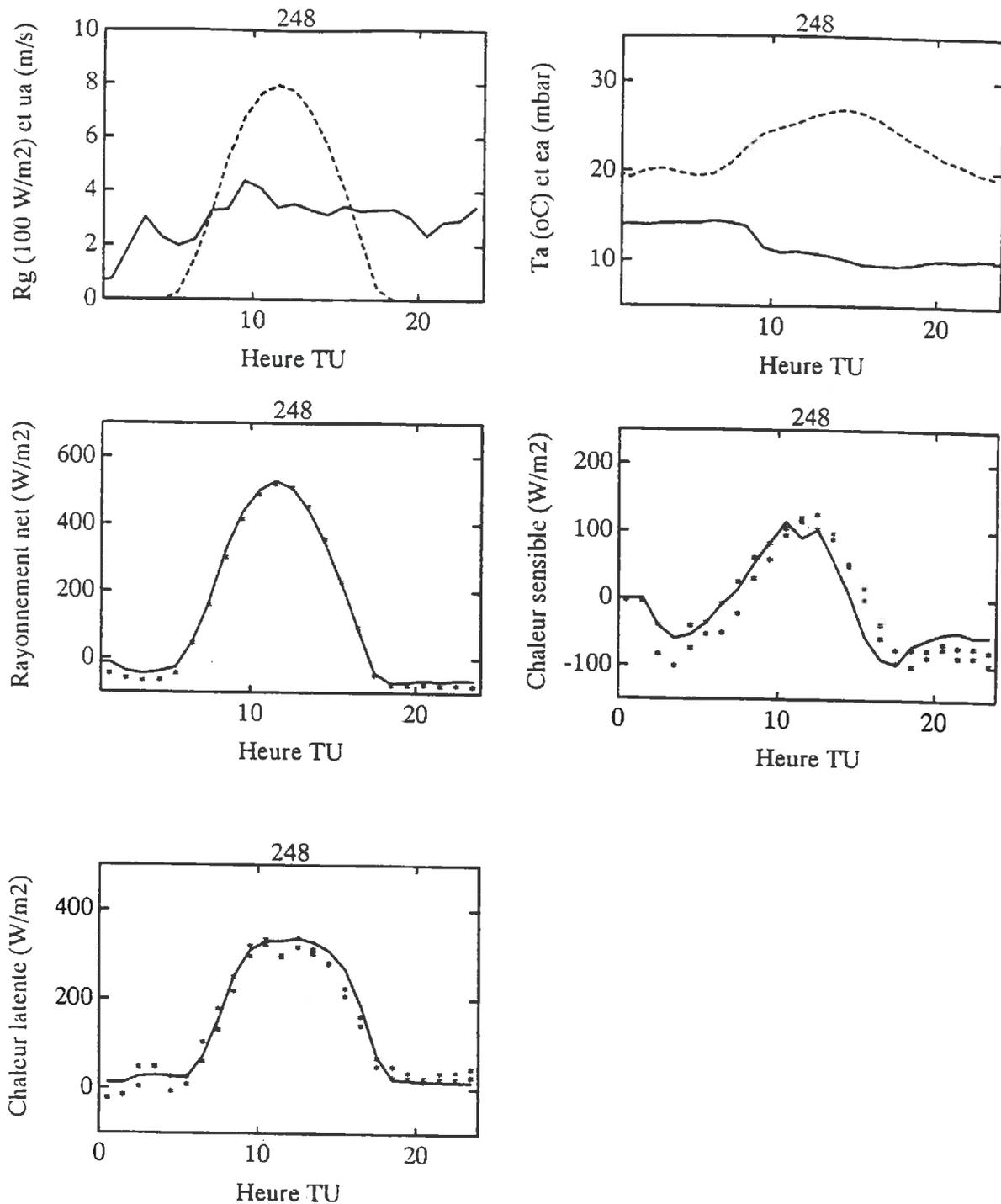


Figure 8-3: Evolution de caractéristiques mesurées (*) ou simulées par ALB (pointillés ou trait plein) au cours du Jour 248: Rayonnement global R_g (pointillés), vitesse du vent u_a (trait plein), température T_a (pointillés) et pression de vapeur e_a (trait plein), rayonnement net R_n , chaleur sensible et chaleur latente (expérimentation SOJA-1990, d'après Oliosio (1992)).

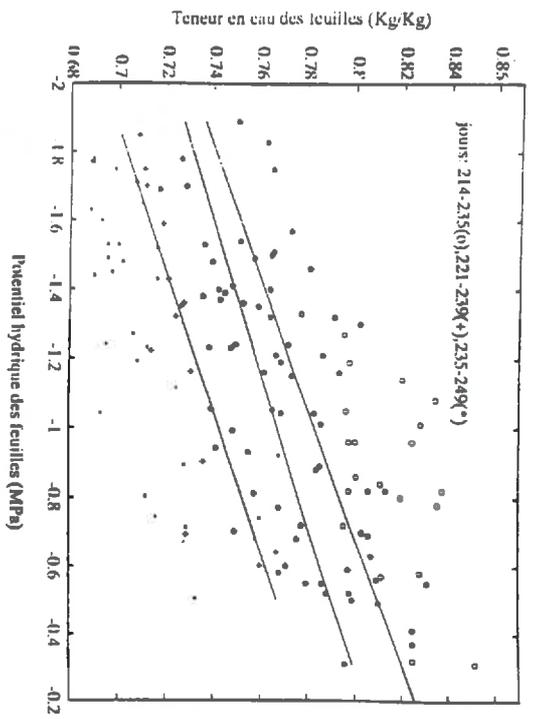


Figure 8-4: Régressions linéaires de la relation $\Psi_f M_f^g$ pour trois périodes: [J214-J235], [J221-239] et [J235-249] (SOJA-1990, d'après données de Vanderschmidt (1993)).

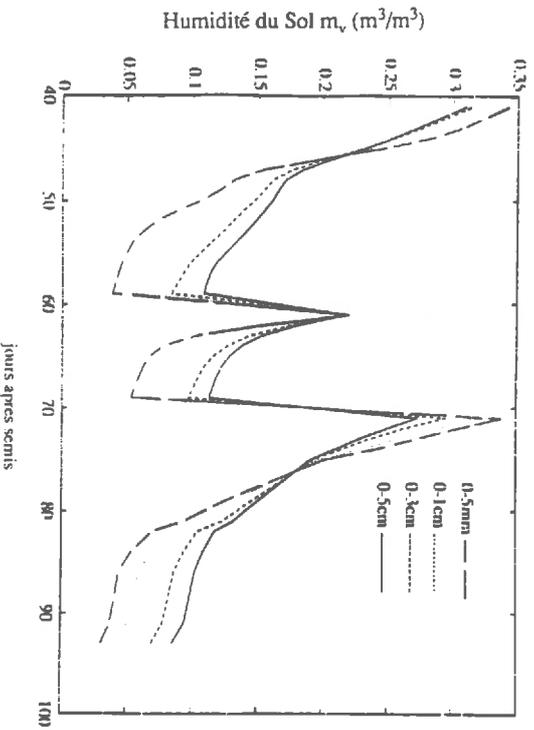


Figure 8-6: Teneur en eau volumique du sol m_v pour différentes profondeurs des couches de surface (entre 41 et 93 jours après le semis de soja, d'après données de Bernuzzi (Bay 1990)).

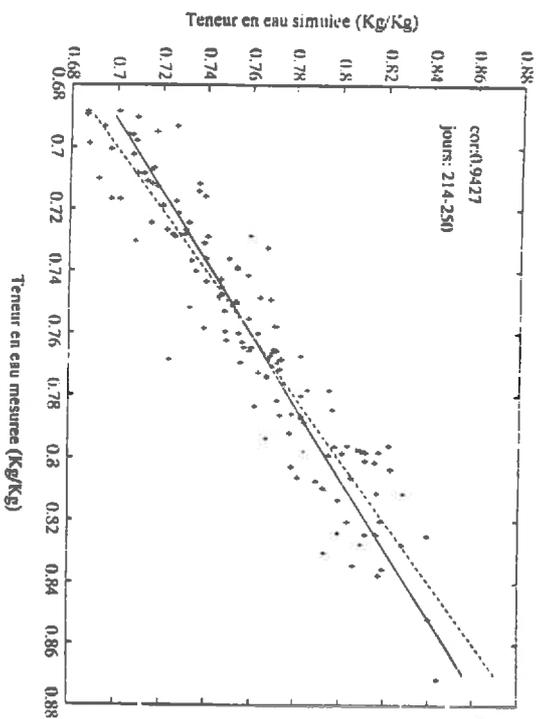


Figure 8-5: Comparaison entre les données de teneur en eau des feuilles (M_f^g) mesurées et modélisées, campagne SOJA-1990 (trait plein = régression).

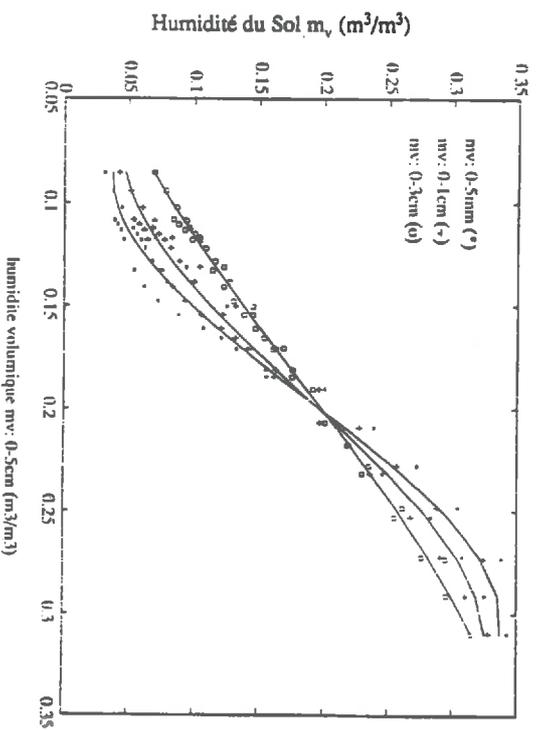


Figure 8-7: Evolution de $m_v(0.5cm)$, $m_v(0.3cm)$ et $m_v(0.1cm)$ en fonction de $m_v(0.5cm)$ (idem figure 8-6 courbes = ajustements polynomiaux).

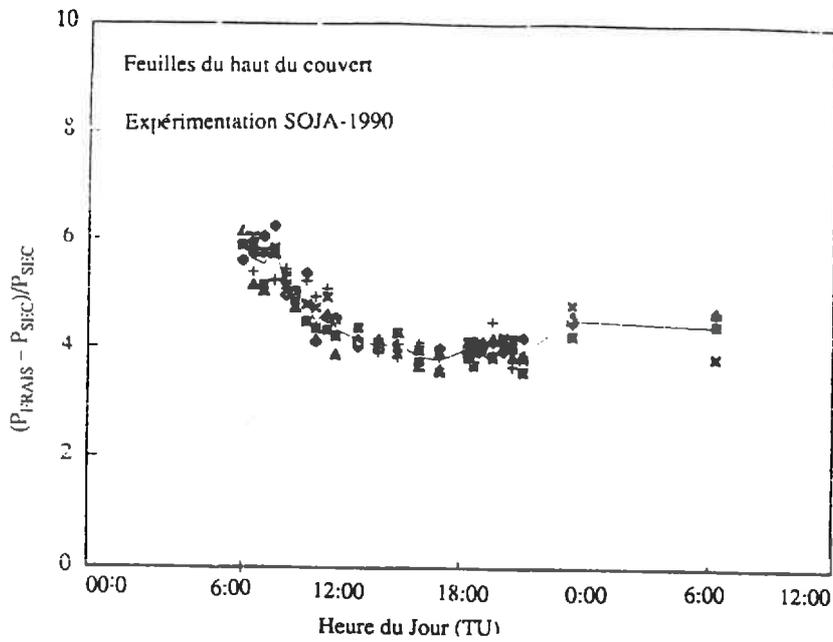
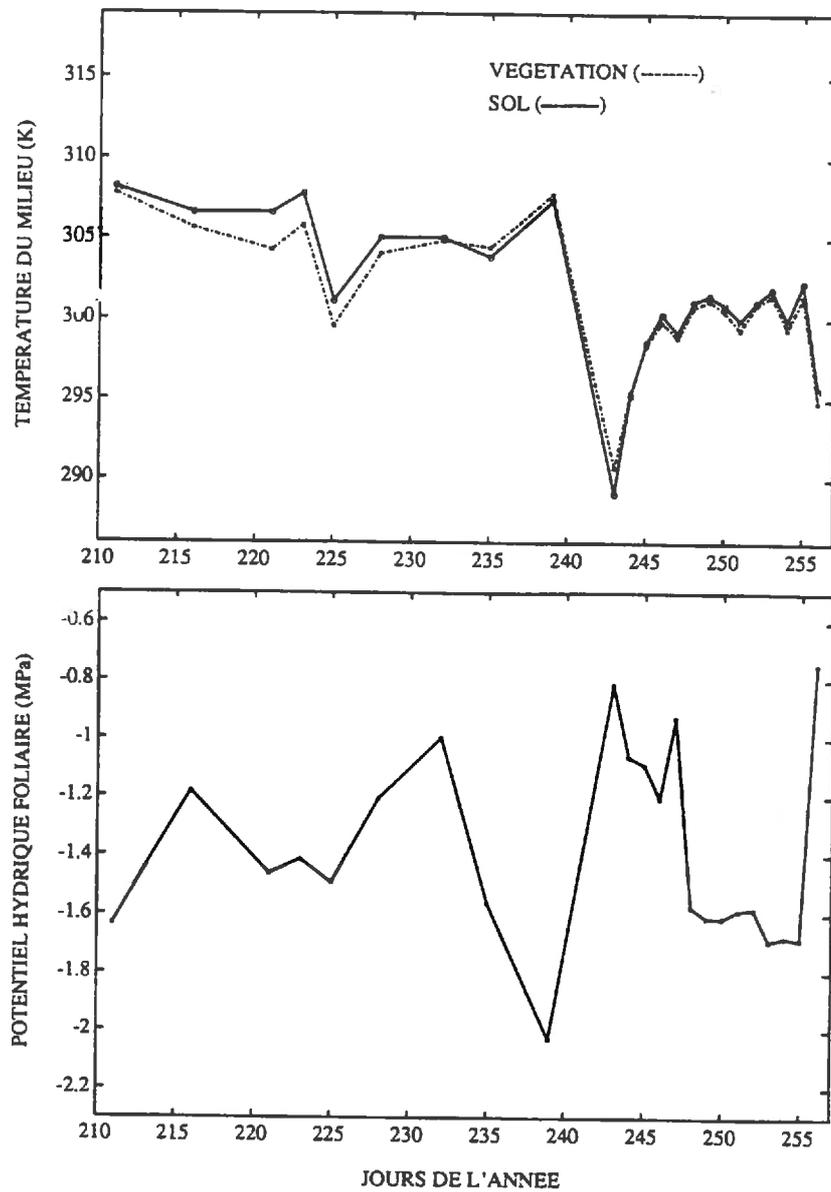


Figure 8-8: Evolution de l'humidité pondérale le 6 Août (d'après Vanderschmidt (1993)).



a)

b)

Figure 8-9: Simulation par ALB de la température du sol (T_1) et du couvert végétal (T_2) (a), et du potentiel foliaire (Ψ_f) (b), au cours de la campagne SOJA-1990 (12^H TU).

concernent directement l'articulation du couplage modèle discret-ALB. Elles relient d'une part le potentiel hydrique foliaire ψ_f à la teneur en eau des feuilles M_{gf} , et d'autre part la teneur en eau du sol sur [0 - 5cm] $m_{v[0-5cm]}$ à $m_{v[0-3cm]}$, $m_{v[0-1cm]}$ et $m_{v[0-0.5cm]}$.

La relation entre ψ_f et M_{gf} s'est fondée sur les données collectées par Vanderschmidt (1993) au cours de la campagne SOJA-1990. L'analyse des données montre que cette relation est sensiblement linéaire pour une journée donnée. De plus la pente de la relation évolue peu au cours du développement de la végétation (figure (8-4)). Par ailleurs l'ordonnée extrapolée pour la valeur $\psi_f=0$, qui correspond à une teneur en eau potentielle maximale M_{gf}^{max} , évolue de jour en jour de façon sensiblement linéaire. Ceci nous a conduit à l'utilisation d'une relation simple entre ψ_f (MPa) et M_{gf} (kg/kg) selon:

$$M_{gf} = (M_{gf}^{max}) + \text{pent.}\psi_f = (a.Jo_{sm} + b) + \text{pent.}\psi_f \quad (8-9)$$

où Jo_{sm} désigne le nombre de jour après le semis (jour 181); a, b et pent sont des coefficients calculés par ajustement linéaire ($a=-2.561.10^{-3}$, $b=0.9314$, $\text{pent}=3.848.10^{-2}$). Sur l'ensemble de la campagne SOJA-1990, la comparaison entre les données mesurées et modélisées selon cette approche, est donnée dans la figure (8-5). L'écart entre la droite d'ajustement linéaire ($r=0.94$) et la bissectrice ($y=x$) est très réduit.

D'autres relations analytiques ont été mises en oeuvre pour relier la teneur en eau volumique du sol sur [0 - 5cm] $m_{v[0-5cm]}$ utilisée dans ALB, à $m_{v[0-3cm]}$, $m_{v[0-1cm]}$ et $m_{v[0-0.5cm]}$, utilisées dans le modèle discret (respectivement pour $f=1.4$, 5. et 10.6GHz). Ces relations se fondent sur des mesures sous couvert de soja conduites sur la même parcelle (Bertuzzi, 1989). L'évolution de m_v au cours du temps, sur différentes couches de surface est représentée dans la figure (8-6). On y observe des phases caractéristiques de dessèchement plus rapide, et de réhumectation plus marquée des couches superficielles. Au cours de cette période, l'évolution de $m_{v[0-3cm]}$, $m_{v[0-1cm]}$ et $m_{v[0-0.5cm]}$ en fonction de $m_{v[0-5cm]}$ est représentée dans la figure (8-7). Ces relations sont ajustées par des fonctions polynomiales. Toutes ces relations n'ont pas un caractère général et restent dépendantes en particulier des caractéristiques du sol et du couvert. Dans l'attente de l'intégration dans le couplage d'approches plus fonctionnelles des transferts d'eau dans le sol et les plantes, ces relations seront utilisées ponctuellement dans le cadre de ce travail.

b) Paramètres de structure et teneur en eau du couvert végétal

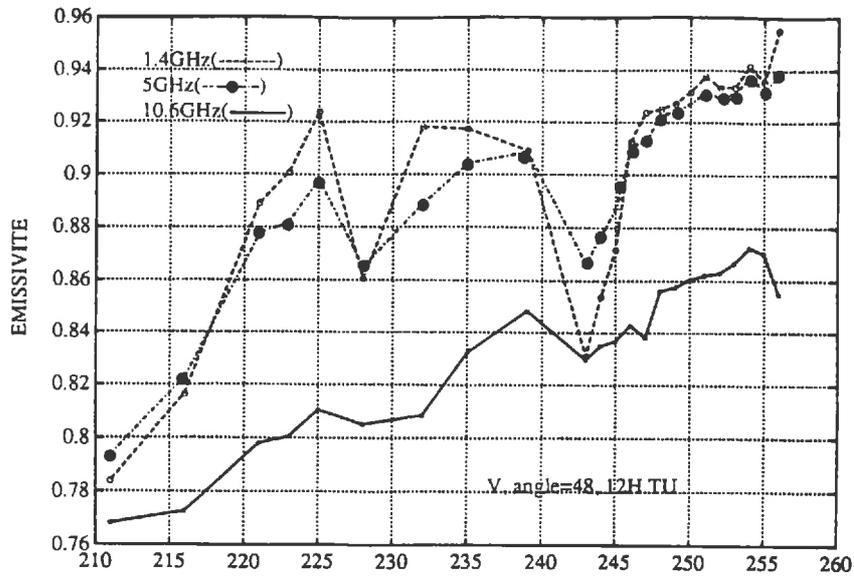
Parallèlement, des relations entre différents paramètres caractéristiques du couvert de soja seront utilisées. Elles permettent de compléter cette approche vers une synthèse des relations fonctionnelles de dépendance entre les paramètres du milieu. Ainsi, les variations d'humidité pondérale foliaire des plants de soja peuvent être de l'ordre de 40% à l'échelle d'une journée (figure (8-8)). Ces fluctuations ont des répercussions directes sur le volume et l'épaisseur de la feuille qui doivent être prises en compte.

En assimilant le volume au produit de l'épaisseur par la surface et en utilisant les équations du *shrinking model*, il est possible de relier l'épaisseur ep_f (cm) à la teneur en eau gravimétrique M_{gf} (kg/kg) des feuilles selon:

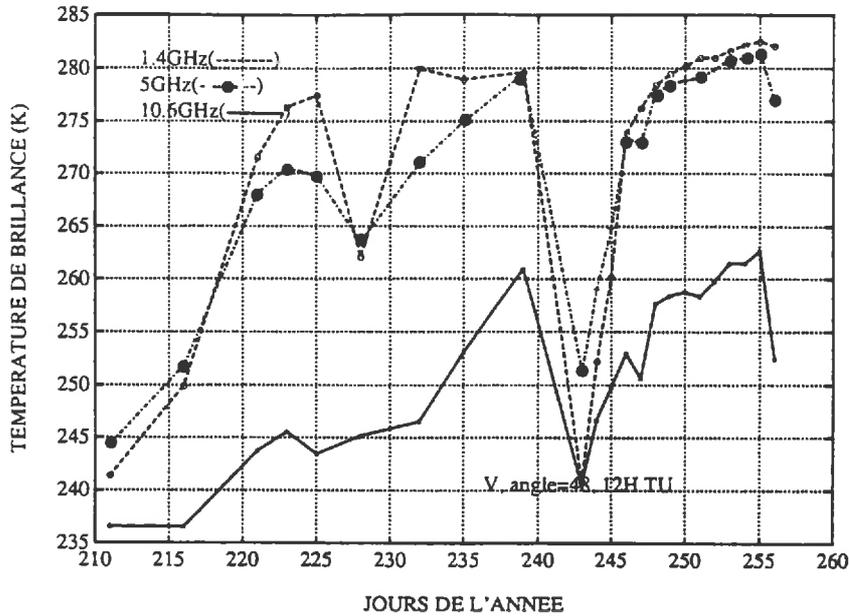
$$ep_f = (P_s/S)_f \cdot [(1-\rho_{sf})/\rho_{sf} + 1/(1-M_{gf})] \quad (8-10)$$

où $(P_s/S)_f$ désigne le poids sec par unité de surface des feuilles ($(P_s/S)_f = 50.75 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}^2$) et ρ_{sf} (g/cm^3) désigne la masse volumique de la matière sèche des feuilles. Ces paramètres qui varient en fonction du stress et du stade phénologique du couvert, seront considérés constants en l'absence de mesures précises.

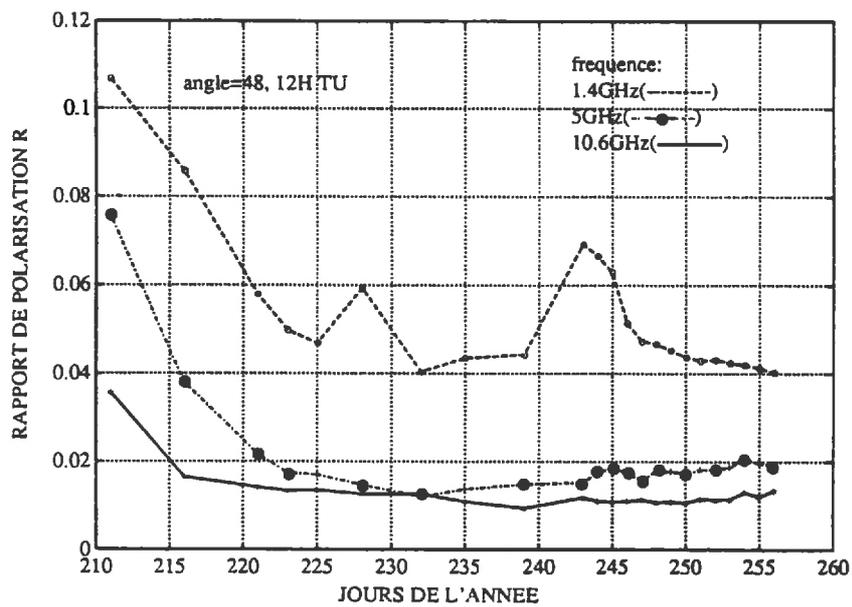
Par ailleurs la fraction volumique foliaire f_{vf} (m^3/m^3) sera reliée à M_{gf} (kg/kg) par l'intermédiaire de l'épaisseur ep_f (m) selon:



a)



b)



c)

Figure 8-10: Simulation de l'émissivité e_v (a), de la température de brillance T_{Bv} (b) et du rapport de polarisation R (c), au cours de la campagne SOJA-1990, à 1.4, 5.05 et 10.65GHz (angle d'incidence $\theta=50^\circ$).

$$f_{vf} = (LAI \cdot ep_f) / d$$

(8-11)

où d (m) désigne la hauteur du couvert.

8.3.2 Résultats

8.3.2.1 Evolution du signal micro-onde simulé au cours de la campagne SOJA-1990

Le couplage modèle discret-ALB permet de réaliser la simulation de la température de brillance micro-onde T_{Bp} , de l'émissivité micro-onde e_p et du rapport de polarisation R du couvert au cours de la campagne SOJA-1990. Les simulations sont conduites du jour 211 au jour 256, à 12H TU lorsque le potentiel hydrique foliaire est maximal en valeur absolue. Les sorties de ALB qui sont couplées avec le modèle discret, soit la température du sol (T_1) et du couvert végétal (T_2) ainsi que le potentiel hydrique des feuilles (ψ_f), sont représentées dans les figures (8-9.a-b)). Les simulations de e_v , T_{Bv} et R par le modèle discret à 1.4, 5.05 et 10.65GHz sont représentées dans les figures (8-10.a-b-c). Toutes les interprétations faites pour la polarisation (V) seront également valables pour la polarisation (H).

La tendance à l'accroissement régulier de l'émissivité e_v , à toutes les fréquences, est induite par le développement du couvert. Parallèlement on note la décroissance régulière du rapport de polarisation R . Cette évolution est assez similaire à celle, mesurée au cours de la campagne PORTOS-1991, aux fréquences 1.4, 5.05 et 36.5GHz (Cf chapitre 6, figure 6-19.a). R atteint presque son niveau minimal dès le jour 220 ($LAI=2.1$) aux fréquences 5.05 et 10.65GHz. Par contre à 1.4GHz la décroissance de R se poursuit jusqu'au jour 232 ($LAI=3.5$).

Pour cette fréquence, le suivi de la biomasse par R est davantage affecté par les fluctuations de l'humidité du sol m_v . Notons que le jour 228 ($LAI=3.3$), la forte teneur en eau du sol m_v affecte l'évolution de e_v à 1.4 et 5.05GHz. Par contre à 10.65GHz, le signal apparaît indépendant de la contribution du sol dessous le couvert de soja bien développé.

Les variations rapides du potentiel hydrique foliaire (jours 239, 247, 256) induisent des variations discrètes de e_v à 1.4GHz (reliées aux variations induites de la fraction volumique f_{vf}) et à 10.65GHz (reliées aux variations induites de la teneur en eau M_{gf} et de l'épaisseur ep_f des feuilles). Il est possible de distinguer aisément l'influence de la teneur en eau du sol de celle du potentiel hydrique foliaire sur le signal émis. En effet les effets de m_v sur $T_{Bv}(1.4GHz)$ et $T_{Bv}(10.6GHz)$ vont dans le même sens: ils conduisent à un accroissement ou une décroissance simultanée de $T_{Bv}(1.4GHz)$ et $T_{Bv}(10.6GHz)$. Par contre, les effets de ψ_f sur $T_{Bv}(1.4GHz)$ et $T_{Bv}(10.6GHz)$ vont en sens inverse (jours 239, 247, 256 par exemple).

La tendance générale de l'évolution de T_{Bv} au cours du temps est assez similaire à celle de l'émissivité (8-10.b). Cependant, la comparaison des figures (8-10.a) et (8-10.b) montre que les effets de la température modulent de façon significative les variations de la température de brillance micro-onde, observées au cours du développement du couvert (jours 225, 243, 256 en particulier). Ainsi le jour 243, on observe la décroissance très marquée de T_{Bv} . La chute de l'émissivité du couvert, qui est reliée à la valeur élevée de teneur en eau du sol, est fortement amplifiée par la décroissance de la température du milieu de près de 20K. Cet effet est notable en particulier à 10.65GHz. Notons aussi que le gradient thermique sol-végétation $\Delta.T$ reste assez limité ($\Delta.T_{max} \approx 2K$). Son effet sur l'émission hyperfréquence du couvert de soja ne peut être mis en évidence au cours de cette simulation.

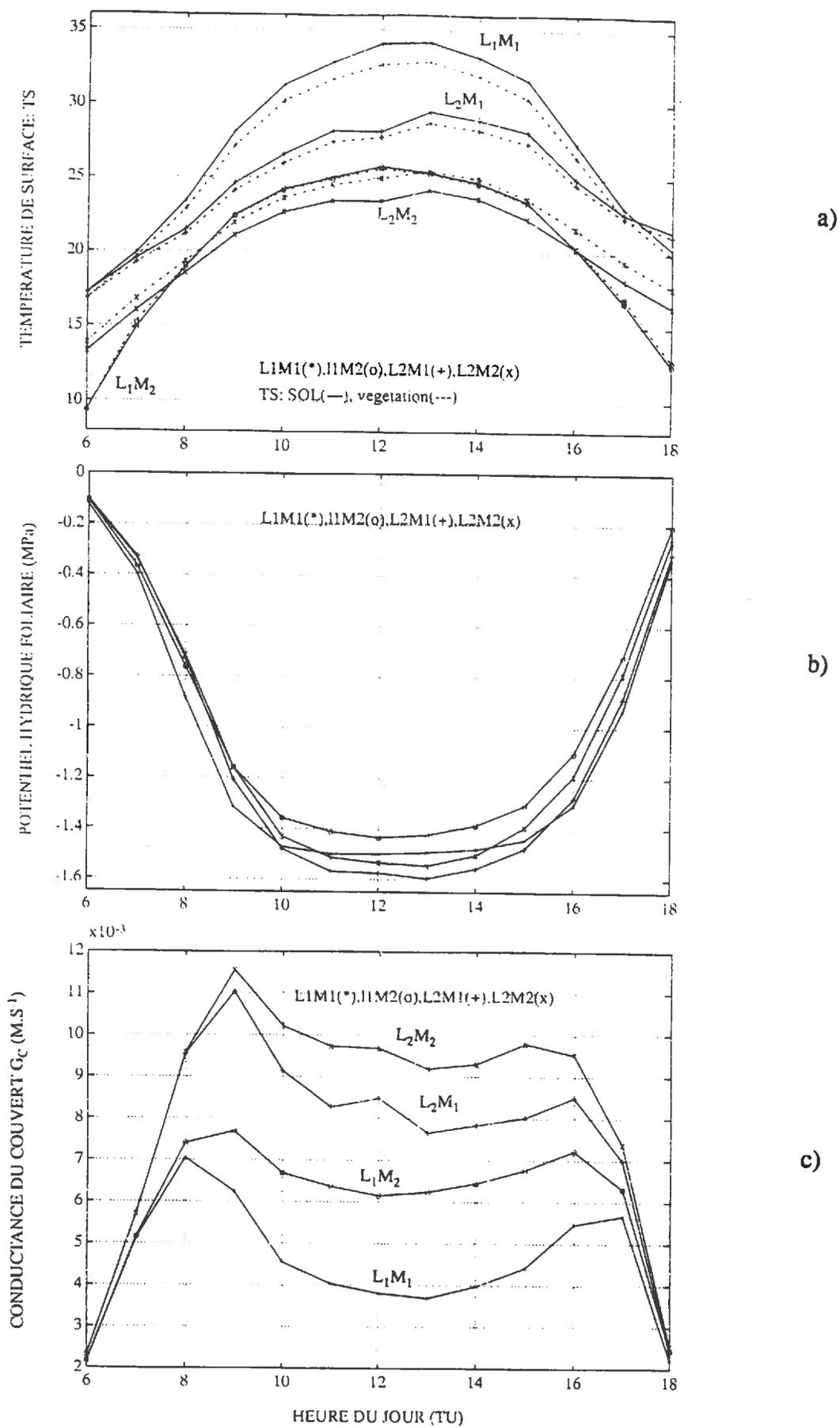
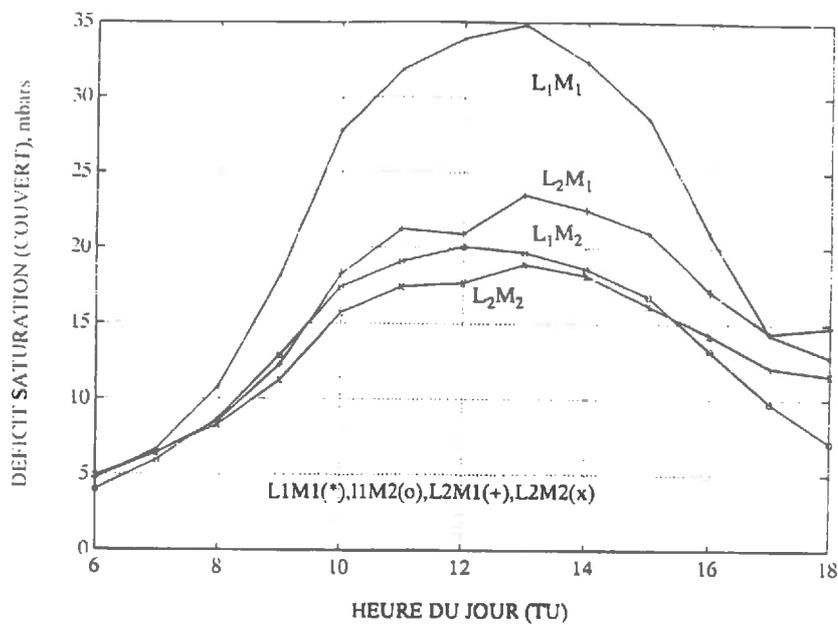
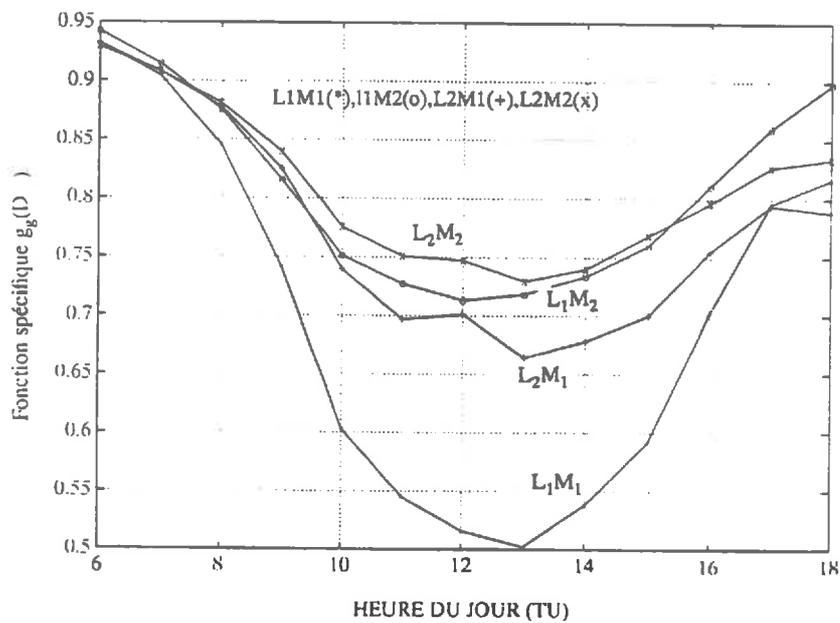


Figure 8-11: Simulation par ALB de la température de surface du sol et de la végétation (a), du potentiel hydrique foliaire (b), de la conductance du couvert g_c (c) au cours de la journée, pour les quatre configurations $L_{\underline{A}}M_{\underline{B}}$ ($\underline{A}, \underline{B} = 1$ ou 2).

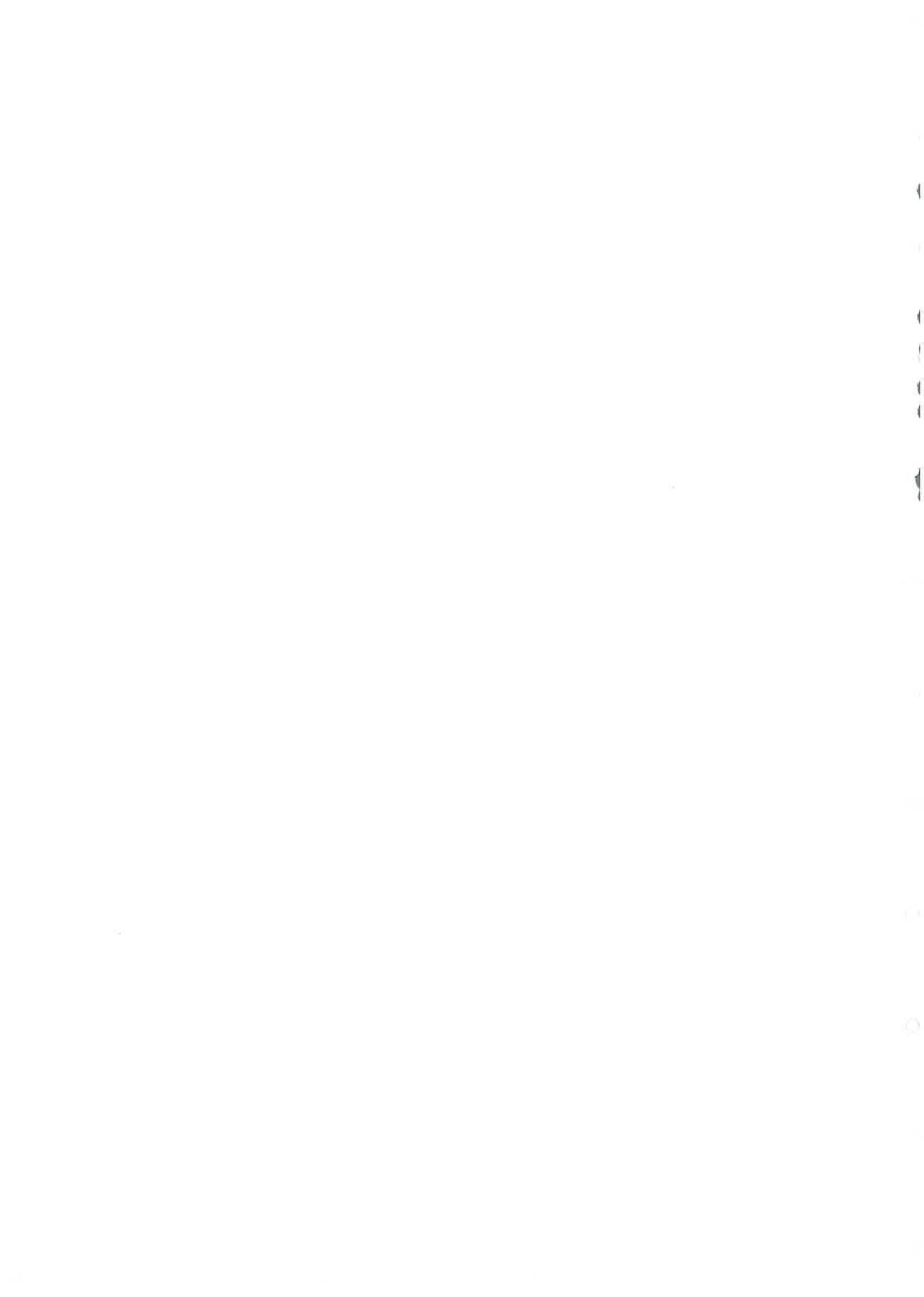


a)



b)

Figure 8-12: Evolution simulée par ALB du déficit de saturation au sein du couvert D (a) et de la fonction spécifique de conductance stomatique $g_g(D)$ (b) pour les quatre configurations $LAMB$ ($A, B = 1$ ou 2).



8.3.2.2 Emission micro-onde du couvert végétal pour les quatre configurations LAMB du milieu

Dans ce paragraphe, les simulations ont été conduites pour les quatre configurations du milieu désignées par L1M1, L1M2, L2M1, L2M2: sol humide (M2) ou sol sec (M1) croisé avec un LAI de la végétation fort (L2) ou réduit (L1).

a) Résultats des simulations de ALB

Les résultats des simulations de ALB sont donnés dans les figures (8-11.a-b-c) en termes de température du sol T_2 et de la végétation T_1 , de potentiel hydrique (ψ_f) et de conductance stomatique (g_s) du couvert. La conductance hydraulique G_p a été ajustée pour que les niveaux de ψ_f soient très proches pour les quatre journées de simulation.

En terme de température du sol et de la végétation (T_m , $m=1$ ou 2) on observe que:

* T_m (sol sec) est nettement plus élevé que T_m (sol humide). Ceci peut être expliqué par la chute de la conductance stomatique du couvert liée par la faible évaporation sur sol sec. En effet, lorsque la surface du sol est sèche, la faible évaporation provoque un dessèchement de l'air au sein du couvert, qui conduit à l'augmentation du déficit de saturation D . L'accroissement du déficit de saturation entraîne une baisse de la conductance du couvert, par l'intermédiaire de la fonction spécifique $g_s(D)$ dans ALB (figures (8-12.a-b)). La transpiration du couvert décroît alors. L'accroissement du gradient thermique milieu-air compensant la réduction du niveau du flux de chaleur latente dans l'équilibre énergétique du couvert, la température de surface s'élève.

Par ailleurs, notons que l'élévation de la température fait à son tour croître le déficit de saturation D , ce qui constitue un feedback positif important mis en évidence par Choudhury et Monteith (1998).

* T_m (LAI faible) est plus élevé que T_m (LAI fort). En effet, le niveau de transpiration du couvert s'accroît avec la biomasse, les conductances stomatiques du couvert agissant en parallèle. Par ailleurs, les effets de l'humidité de surface du sol sur T_m paraissent plus marqués que ceux du LAI. Notons que van de Griend et van Boxel (1989) observent une faible influence du LAI sur la température radiative d'un couvert de Maïs.

*L'amplitude thermique est plus forte sur un sol faiblement recouvert par la végétation (écart de l'ordre de 5° entre L1MB ($B=1$ ou 2) et L2MB ($B=1$ ou 2)). L'inertie thermique du milieu apparaît donc fortement liée à la biomasse du couvert végétal.

*Les écarts de température entre le sol (T_2) et la végétation (T_1) restent peu marqués (de l'ordre de 1°C). Ce résultat peut apparaître surprenant et des mesures expérimentales précises doivent être entreprises pour le confirmer. On constate par ailleurs que pour un sol sec: $T_2 > T_1$, et pour un sol humide et un LAI fort: $T_1 < T_2$.

En terme de conductance stomatique du couvert g_f , l'ordre de grandeur est inversé par rapport aux températures T_m . L'évolution du déficit de saturation D et de la fonction spécifique $g_s(D)$ déterminant l'influence de D sur g_f est représentée dans les figures (8-12.a-b). Les faibles niveaux de la conductance stomatique g_f reliés aux niveaux élevés de la température en configuration (L1M1) (sur sol sec et LAI faible) apparaissent principalement déterminés par les fortes valeurs de D . Ces valeurs peuvent être reliées à la faible évaporation (sol sec), à la faible transpiration du couvert (LAI faible) et aux forts niveaux de température qui élèvent la pression de vapeur saturante à la température de la feuille $e_f^*(T_f)$. Face au gradient élevé d'humidité entre l'air et la feuille, la réaction de la plante se traduit par une fermeture des stomates et une réduction des pertes d'eau ($g_s(D) \approx 0.5$ à 13^H TU).

b) Résultats des simulations du modèle discret

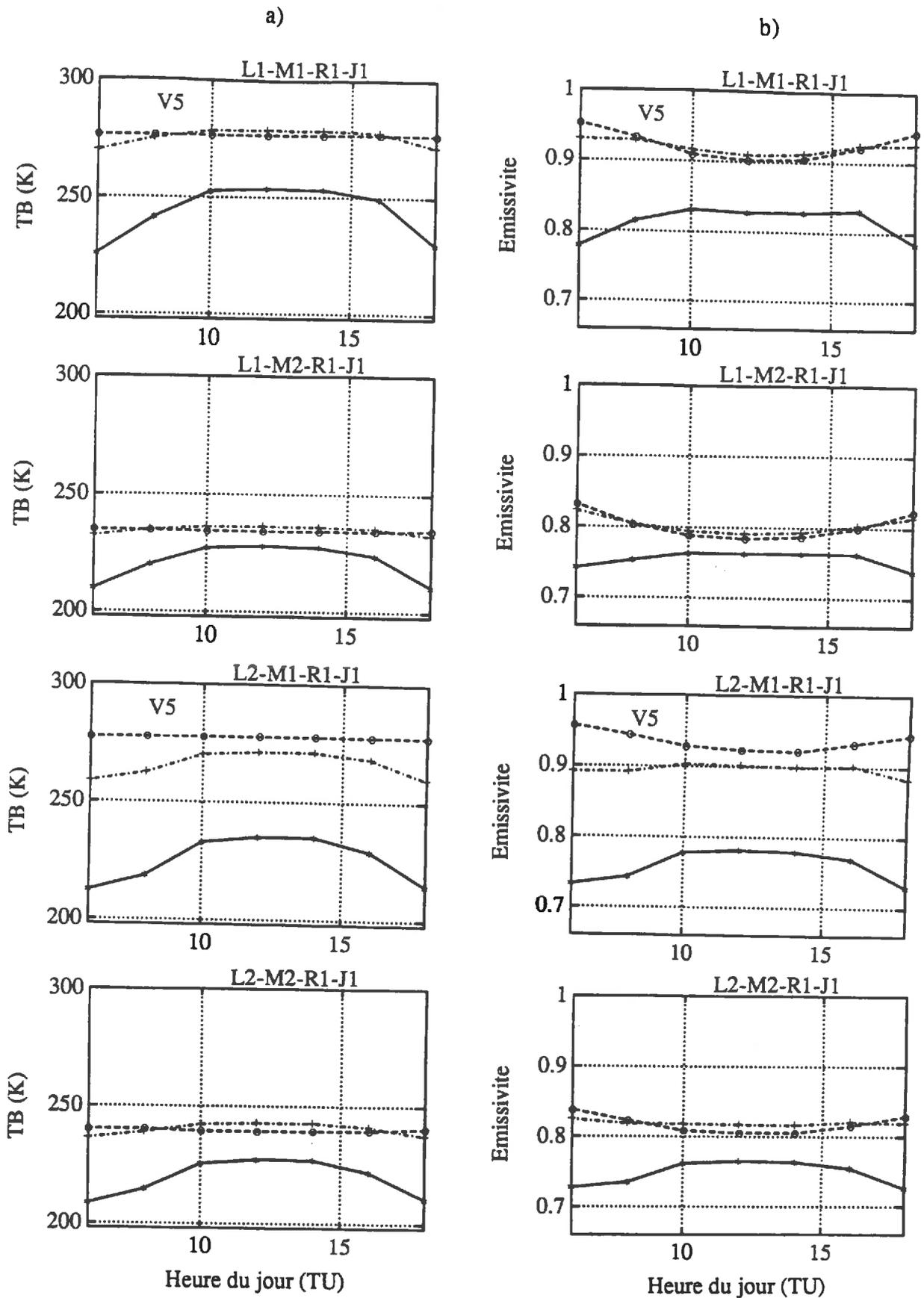


Figure 8-13: Simulation de la température de brillance micro-onde T_{Bv} (a) et de l'émissivité micro-onde e_v (b) pour les quatre configurations LAMB ($A,B, = 1$ ou 2) ($\theta=50^\circ$, polarisation V, à 1.4 (o), 5.05 (+) et 10.65GHz (*), relation $\psi_f M_g$ du jour 220).

L'évolution de la température de brillance et de l'émissivité micro-onde du couvert de soja a été simulée de 6^H à 18^H TU pour les quatre configurations LAMB (A,B, = 1 ou 2) (figures (8-13.a-b)). La relation entre le potentiel hydrique foliaire ψ_f et la teneur en eau du couvert M_{gf} est celle du jour 220 ($M_{gf}^{max}=0.831$). Cette relation, calculée en phase de croissance soutenue de la végétation (LAI=2.3), correspond à des niveaux relativement élevés de M_{gf} . Les figures portent sur la polarisation verticale uniquement, mais les résultats qui seront présentés restent valables pour les deux polarisations p ($p=v$ et $p=h$).

Au cours de la journée on peut noter les tendances de l'amplitude journalière de l'émissivité e_p . On observe au midi solaire, la diminution de e_p à 1.4GHz et à 5.05GHz (relative stabilité de e_p en L2M1) et l'augmentation de e_p à 10.65GHz (relative stabilité de e_p en L1M2). Ces évolutions peuvent être reliées à:

- (1) -l'augmentation en valeur absolue de ψ_f en milieu de journée, qui est corrélée à:
 - (1.1) -la diminution de la teneur en eau et de l'épaisseur foliaire (effet + sur e_p à 10.65GHz).
 - (1.2) -la diminution de la fraction volumique du couvert (effet - sur e_p , décroissant avec la fréquence).
- (2) -l'augmentation de la contribution du sol à l'émission globale du couvert. Cette augmentation résulte de la diminution du contenu en eau du couvert, qui détermine l'extinction par la végétation des radiations montantes issues du sol (effet + sur e_p , particulièrement sur sol sec et à 10.65GHz). A 5.05GHz, l'influence de l'émission du sol (élevée sur sol sec) et l'influence de la végétation (élevée pour un LAI fort) se compensent en configuration (L2M1).

En terme de température de brillance micro-onde T_{Bp} , l'analyse des résultats montre principalement que:

*Les effets de la teneur en eau du sol (m_v) diminuent avec la fréquence (effet maximal à 1.4GHz et minimal à 10.65GHz). La différence ($T_{Bp}(1.4GHz) - T_{Bp}(10.6GHz)$) semble bien reliée à m_v , particulièrement en polarisation H ($\theta=50^\circ$).

*Les effets du LAI sont bien marqués, particulièrement à 10.6GHz sur sol sec. A cette fréquence, l'accroissement du LAI entraîne l'augmentation de l'émission du couvert et la diminution de la contribution du sol (atténuée par la végétation). Le bilan de ces effets varie avec m_v : sur sol sec T_{Bp} diminue (atténuation de la forte émission du sol), sur sol humide T_{Bp} augmente.

*Les tendances de l'amplitude journalière de T_{Bp} sont: la relative stabilité à 1.4 et 5.05GHz, et l'accroissement marqué à 10.65GHz au midi solaire (amplitude journalière de l'ordre de 25K).

Considérons les effets conjoints de l'émissivité et de la température sur la température de brillance T_{Bp} . Les variations de T_{Bp} peuvent s'exprimer en fonction des variations de l'émissivité e_p et de la température effective du couvert dT_{ec} selon:

$$dT_B = de_p \cdot T_{ec} + e_p \cdot dT_{ec} \quad (8-12)$$

A 12H TU, l'amplitude des effets sur T_{Bp} de l'émissivité décroissante et de la température effective croissante, semblent être du même ordre de grandeur à 1.4 et 5.05GHz (entre 10 et 15K). Ils se compensent et déterminent la quasi stabilité de T_{Bp} pour ces deux fréquences. A 5.05GHz en configuration (L2M1), on note l'amplitude journalière légèrement positive de T_{Bp} , qui est reliée à la stabilité de l'émissivité sur la journée.

A 10.65GHz, les effets de la température et de l'émissivité s'additionnent et provoquent l'accroissement marqué de T_{Bp} au midi solaire. Pour cette fréquence, l'amplitude journalière de T_{Bp} est maximale en configuration L1M1. Ceci peut être relié aux effets conjoints, de l'amplitude journalière de la température effective du milieu (élevée pour un LAI réduit) et de la contribution du sol à l'émission (élevée sur sol sec).

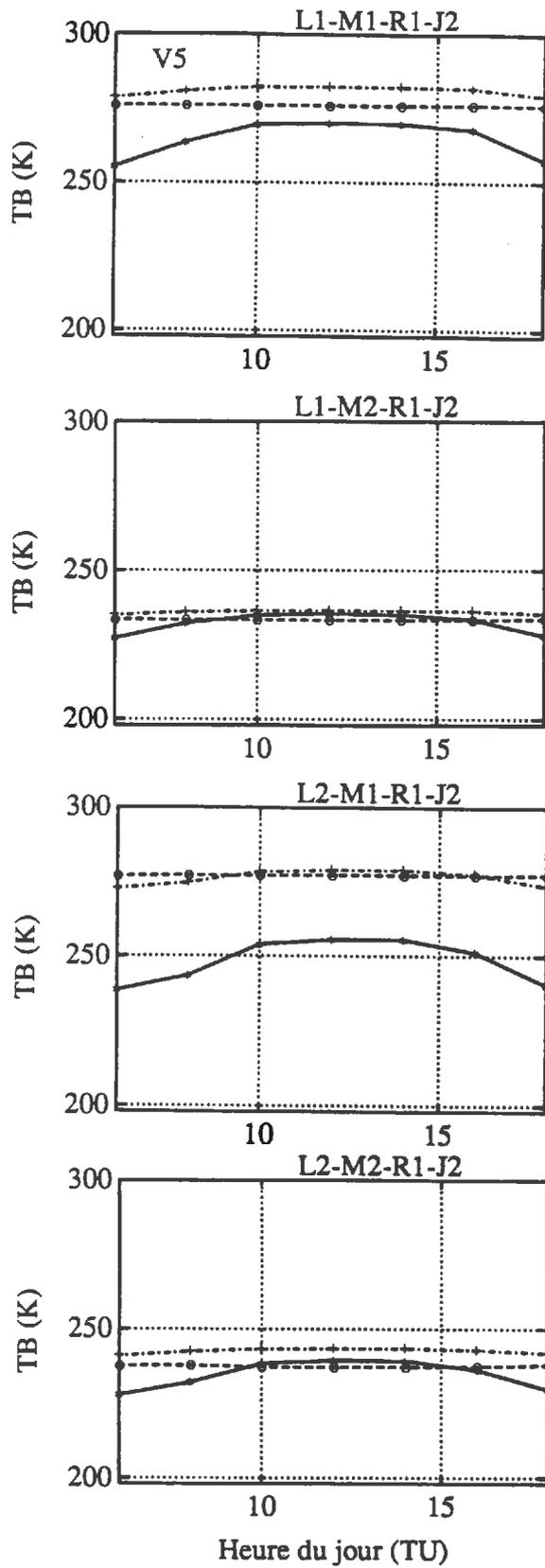


Figure 8-14: Simulation de la température de brillance micro-onde T_B , pour les quatre configurations L_{AMB} ($A, B, = 1$ ou 2) ($\theta=50^\circ$, polarisation V , à 1.4 (o), 5.05 (+) et 10.65GHz (*), relation $\Psi_f M_{gf}$ du jour 245).

Notons également que sur le plan thermique, le faible écart de température entre le sol et la végétation n'influe pas sur les effets de profondeur de pénétration dans le couvert (qui varient en fonction de la fréquence des radiations).

L'influence de la teneur en eau des feuilles M_{gf} a également été considérée. Des simulations ont été réalisées pour des niveaux plus réduits de M_{gf} et sont représentées dans les figures (8-14). La relation $\psi_f - M_{gf}$ du jour 245 ($M_{gf}^{max}=0.767$), au lieu du jour 220 ($M_{gf}^{max}=0.831$), a été utilisée. Elle induit une diminution de M_{gf} de l'ordre de 6.5%. La comparaison entre l'allure des courbes des figures (8-14) et (8-13) montre:

*la sensibilité croissante de T_{Bp} à M_{gf} en fonction de la fréquence (effets négligeables à 1.4GHz et accroissement très marqué de T_{Bp} à 10.65GHz).

*l'atténuation de l'amplitude journalière de T_{Bp} à 10.65 et 5.05GHz pour des niveaux réduits de teneur en eau du couvert (figures (8-14)).

La diminution de M_{gf} induit à 10.65GHz, l'accroissement conjoint de la contribution de la végétation (diminution de M_{gf} et de ep_f) et de la contribution du sol (diminution de l'atténuation du couvert). La diminution régulière du niveau de M_{gf} au cours du développement du couvert paraît donc influencer fortement l'évolution de l'émission micro-onde à 5.05 et particulièrement à 10.65GHz.

Notons enfin que les variations à l'échelle horaire de l'humidité de surface du sol et de la distribution d'orientation foliaire peuvent être importantes, au cours d'une journée ensoleillée. Ces variations, qui en l'absence de mesures précises n'ont pas pu être prises en compte dans ce travail, moduleraient les résultats des simulations de ALB et du modèle discret.

8.4 Conclusion

Une approche synthétique de modélisation au sein du couvert végétal des échanges d'énergie et des échanges radiatifs (visible, proche-infrarouge, infra-rouge thermique et micro-onde) a été présentée dans ce chapitre. Elle permet de relier les paramètres énergétiques caractéristiques du fonctionnement du couvert végétal à des mesures de télédétection. Elle permet également l'analyse simultanée de mesures effectuées dans les différents domaines de longueur d'ondes.

8.4.1 Mesures micro-ondes sur couvert végétal

Dans le cadre de cette étude, le couplage du modèle micro-onde discret avec ALB avait pour objectif premier la prise en compte réaliste des relations de dépendance entre les paramètres du milieu: données météorologiques, température, potentiel hydrique foliaire, structure du couvert végétal, teneur en eau de la végétation et du sol... L'influence des paramètres de surface sur l'émission hyperfréquence est intégrée dans le contexte global du fonctionnement du couvert de soja. Plus précisément les caractéristiques hydriques de la végétation (teneur en eau et potentiel foliaire), et la température du sol et de la végétation qui interviennent comme paramètres d'entrée du modèle discret ont été reliés par l'intermédiaire de ALB, aux caractéristiques du climat et du couvert. Une analyse dynamique de l'évolution du signal micro-onde à l'échelle du développement du couvert, puis à l'échelle horaire a pu être entreprise. Cette analyse nous permet de compléter et de moduler les résultats de l'analyse de sensibilité du chapitre 5 sur couvert de soja. Ainsi des effets inattendus des caractéristiques du milieu sur l'émission micro-onde du couvert, ont pu être mis en évidence par cette étude:

—effets de la biomasse du couvert à 10.6GHz (sur sol sec en particulier)

—effets du potentiel hydrique foliaire à 1.4GHz (par l'intermédiaire de la relation $\psi_f - f_v$).

De façon plus générale:

*à 1.4GHz le signal micro-onde est sensible à la biomasse du couvert avec une faible résolution mais sur une large gamme de variation. Sa sensibilité à la teneur en eau du sol reste élevée pour des couvertures de végétation très développées. Les effets des caractéristiques fines du couvert (teneur en eau, orientation des feuilles..) sont réduits. Le signal paraît bien adapté à un suivi du couvert avec un pas de temps journalier.

*à 10.65GHz le signal est fortement sensible aux caractéristiques fines du couvert (teneur en eau, orientation et dimensions des feuilles..). Il est sensible à la biomasse du couvert avec une forte résolution mais sur une gamme de variations réduites (jusqu'à un LAI de l'ordre de 2). Sa sensibilité à la teneur en eau du sol devient très faible dès que la végétation devient couvrante. Le signal paraît bien adapté à un suivi du couvert de soja à l'échelle horaire.

*à 5.05GHz le signal présente des caractéristiques intermédiaires à celles des deux canaux précédents. Il paraît pertinent pour suivre les paramètres d'humidité du sol et de biomasse à l'échelle journalière. Il paraît également sensible à la teneur en eau du couvert en particulier, à l'échelle horaire.

Par ailleurs, à l'échelle horaire les effets de la variation de température du milieu sur T_{Bp} , lors d'une journée bien ensoleillée, sont de l'ordre de grandeur de ceux de l'émissivité e_p à 1.4, 5, et 10.65GHz. Cette constatation faite sur couvert de soja, doit être considérée si l'on cherche à réaliser le suivi de la température de surface par radiométrie micro-onde. Sur le plan du fonctionnement du couvert et sur le plan du transfert radiatif, les interactions entre les paramètres de surface influençant e_p apparaissent très fortes. Citons les principales:

–relations entre la teneur en eau du couvert, sa fraction volumique, la dimension des diffuseurs (épaisseur des feuilles, diamètres des tiges).

–relations entre la température du milieu, l'humidité du sol et la structure du couvert.

–conjugaison des effets d'émission hyperfréquence de la végétation et d'atténuation de la contribution du sol.

A l'échelle du développement du couvert, la tendance de la température de brillance micro-onde dans une tranche horaire donnée, est principalement déterminée par l'émissivité du couvert végétal. L'influence de la température du milieu module de façon significative l'évolution de T_{Bp} pour des journées climatiquement contrastées. Les simulations montrent également que l'influence de la teneur en eau du couvert, difficile à apprécier d'un jour à l'autre, est forte à l'échelle horaire et à l'échelle plus vaste du cycle cultural.

8.4.2 Perspectives

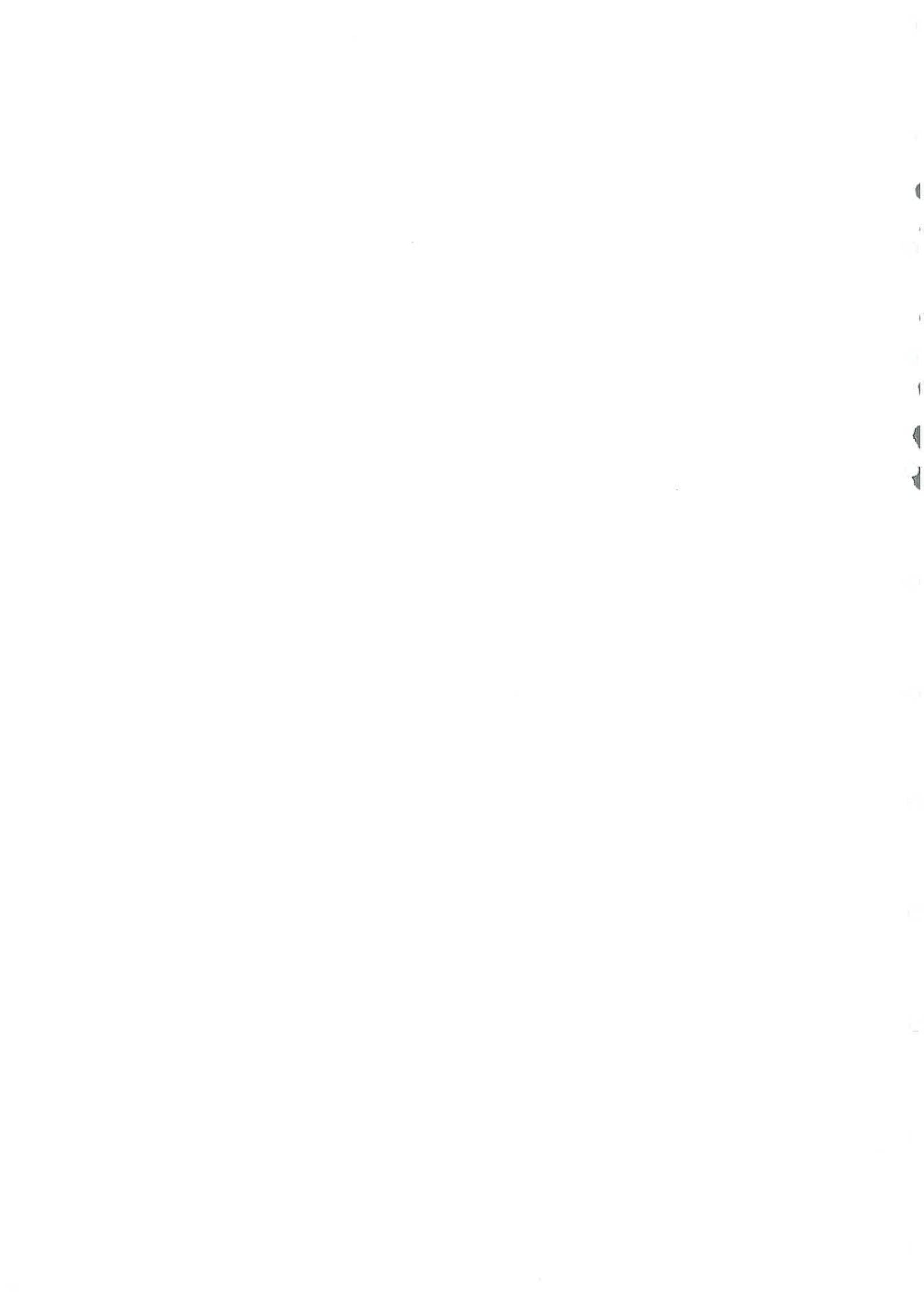
L'outil de modélisation qui est considéré dans cette étude, s'inscrit dans un cadre prospectif d'analyse et d'utilisation des données de télédétection provenant de différentes bandes de fréquence du spectre des radiations et des différents systèmes d'acquisition (actif, passif). D'ores et déjà cet outil permet d'orienter de futures expérimentations dans un but de validation. La campagne PORTOS-1993 en particulier pourrait en être le cadre.

Le modèle discret et le modèle de simulation des échanges d'énergie (ALB) présentent des caractéristiques générales très similaires sur le plan de la prise en compte de la végétation (couvert homogène, à states planes infiniment étendues). Sur le plan thermique, la précision du modèle ALB considérant deux couches homogènes (sol et végétation) apparaît suffisante dans un premier temps, pour simuler la température de brillance micro-onde. La prise en compte de la structure de la végétation par les trois approches de transfert radiatif (visible & proche-infrarouge, infra-rouge thermique et micro-onde) est très similaire.

Cependant, si les deux modèles s'appuient sur des fondements physiques et biologiques théoriques éprouvés, ils sont toujours en cours de développement. Ainsi, la mise en oeuvre du couplage révèle certains points faibles au niveau de leur liaison. Sur le plan de l'approche micro-onde, la modélisation

de la permittivité diélectrique de la végétation (ϵ_1) se fonde sur la notion de teneur en eau. Les approches biologiques, physiologiques, ou "énergétiques" préfèrent les paramètres plus fonctionnels de potentiel hydrique foliaire (ψ_f) ou de teneur en eau relative (RWC). A ce niveau les deux modèles pourraient évoluer. D'une part, des études théoriques et expérimentales doivent permettre dans le futur de préciser l'intérêt du potentiel hydrique ψ_f comme déterminant "hydrique" de la constante diélectrique de la végétation (McDonald *et al.*, 1990). D'autre part, dans ALB une analyse plus complète des transferts d'eau dans la plante doit permettre d'éliminer les hypothèses de régime permanent, qui sont contradictoires avec les niveaux très significatifs de variation de teneur en eau de la végétation à l'échelle horaire (Katerji *et al.*, 1983; Katerji, 1992, Vanderschmidt, 1993). Ceci permettrait la prise en compte dans la végétation, du stockage d'eau et implicitement l'accès à la variable de teneur en eau M_{gr} . Un décalage existe également au niveau de la prise en compte des diffuseurs végétaux: ALB se fonde principalement sur les caractéristiques foliaires, tandis que l'approche discrète doit à terme prendre en compte toutes les composantes de la végétation (feuilles, branches, troncs, tiges, fruits..) (Karam *et al.*, 1988; Ulaby *et al.*, 1990). ALB doit également être complété sur le plan de la simulation des caractéristiques hydriques du sol. Il doit en effet répondre aux exigences des modèles micro-ondes qui prennent en compte de façon très précise la teneur en eau du sol (m_v) sur des couches de surface dont la profondeur varie avec la fréquence (Jackson et Schmugge, 1989; Wang, 1987). L'évolution du modèle ALB vers une description plus complète des transferts d'eau dans le sol à l'échelle horaire apparaît donc souhaitable. Ce point est très sensible car, d'une part m_v est avec la biomasse le paramètre principal déterminant l'émission du couvert à basses fréquences (1.4 et 5.05GHz), d'autre part la modélisation précise de m_v nécessite l'estimation de caractéristiques physiques du sol présentant une forte variabilité spatiale (Chanzy, 1991). Il s'avère que la mise en oeuvre de modèles mécanistes des transferts couplés d'eau et de chaleur dans le sol (Passerat de Silans *et al.*, 1988) répond bien à nos objectifs d'approche intégrée du fonctionnement du couvert végétal, mais oriente encore davantage la validation vers une échelle très locale.

Ainsi de multiples voies doivent permettre de faire évoluer l'approche synthétique qui est décrite dans ce chapitre. Cette évolution se fera en lien avec les différentes disciplines concernées (sciences du sol, bioclimatologie, télédétection..). Il s'agira, face à la diversité des mécanismes devant être pris en compte, d'associer enrichissement et simplicité.



CONCLUSION GENERALE

Avant de présenter les résultats principaux de ce travail, et d'ouvrir des perspectives sur son développement futur, reprecisons rapidement le cadre dans lequel s'est inscrit le sujet de cette étude. L'émission micro-onde d'un couvert végétal a fait l'objet de nombreuses études qui se focalisaient le plus souvent sur l'estimation de la teneur en eau du sol dessous un couvert, sans chercher à estimer les paramètres de la végétation (biomasse et teneur en eau notamment) (Jackson *et al.*, 1982; Wang *et al.*, 1982; Ulaby *et al.*, 1983b; O'Neill *et al.*, 1984; Chukhlantsev *et al.*, 1989). Ces travaux prennent généralement en compte de façon assez sommaire la diffusion au sein de la végétation. Par contre relativement peu d'études portent sur la caractérisation précise des échanges radiatifs dans la végétation; citons les principales: Choe et Tsang, 1983; Jin, 1989; Choudhury et Wang, 1990; Tsang, 1991; Ferrazzoli *et al.*, 1992. Un renouveau d'intérêt pour la mesure micro-onde passive sur végétation s'est opéré depuis quelques années (Hallikainen *et al.*, 1988; Kerr et Njoku, 1990; Choudhury *et al.*, 1990; Mätzler, 1990; Paloscia et Pampaloni, 1992). Il est en lien avec le développement de radiomètres de terrain, aéroportés, ou satellitaires de plus en plus performants (Le Vine *et al.*, 1989; Thibaut *et al.*, 1990; Windsor et Charlton, 1991), avec l'intérêt croissant pour le suivi régulier de la biosphère continentale à l'échelle globale (MRT, 1990), et avec le large éventail de paramètres accessibles par radiométrie multifréquence (Ulaby *et al.*, 1981). En particulier, cette étude est reliée au développement par le CNES et Matra-Marconi-Espace, du radiomètre PORTOS à six fréquences (Padovan, 1992a-b).

Dans ce travail nous avons cherché à évaluer l'intérêt de la radiométrie hyperfréquence dans le suivi des caractéristiques d'un couvert végétal et à définir des méthodes précises d'analyse et d'inversion des données de température de brillance micro-onde. L'étude s'est fondée sur la confrontation entre des données simulées et mesurées en s'appuyant sur trois axes de recherches:

- le développement d'outils de simulation fondés sur la caractérisation précise des échanges radiatifs au sein du couvert végétal.
- l'acquisition d'un vaste jeu de données en terme de fréquence de mesure et en terme de dynamique des paramètres de surface observés.
- l'intégration des mesures radiométriques hyperfréquences sur végétation dans le contexte plus large des mesures par télédétection et du fonctionnement du couvert végétal.

Le développement des modèles physiques passifs s'est appuyé sur les travaux très avancés dans le domaine de l'actif (Karam *et al.*, 1988, 1989, 1992; Ulaby *et al.*, 1990; Tsang et Ding, 1991). Deux approches complémentaires ont été développées dans le cadre de ce travail. Elles se fondent toutes deux sur une méthode classique de résolution des équations de transfert radiatif par la méthode de Gauss (Chandrasekhar, 1960; Tsang et Kong, 1980; Jin et Isaacs, 1987). La prise en compte de la diffusion est conduite par l'intermédiaire de matrices de phase, selon l'approche discrète et selon l'approche continue. Dans le cadre de l'approche discrète, le calcul de la matrice de phase des feuilles s'est fondé sur les travaux de Karam *et al.* (1988, 1989 et 1992). Cette approche modélise la diffusion des divers composants du couvert (feuilles, branches...), qui sont assimilés à des objets géométriques (disques, cylindres). La structure de la végétation doit être décrite en termes précis de dimension, forme, distribution d'orientation et densité des diffuseurs. L'approche continue prend en compte de façon statistique, les fluctuations diélectriques internes au sein du couvert. Deux longueurs de corrélation verticale l_z et horizontale l_p , la hauteur d et la fraction volumique f_v du couvert, suffisent pour caractériser la structure de la végétation. Cette simplicité rend *a priori* cette approche bien adaptée à la description de milieux très variés et à la mise en oeuvre de l'inversion des données radiométriques. Cette approche théorique a été développée par l'école "Kong" (Tsang et Kong, 1976, 1980). Dans cette étude, le calcul de la matrice de phase du milieu continu s'est fondé sur les résultats de Jin (1989), qui étend la théorie des fortes fluctuations (Tsang et Kong, 1981) au domaine passif.

Les modèles discret et continu sont deux outils composites, qui découlent naturellement des résultats des travaux de modélisation dans le passif et dans l'actif. Des modèles similaires n'ont fait l'objet que de partielles tentatives de validation (Choe et Tsang, 1983; Wang *et al.*, 1983; Jin, 1992). La confrontation de données radiométriques avec un modèle discret, dérivé directement d'une approche de l'actif (Eom et Fung, 1984), a été conduite par Ferrazzoli *et al.* (1992) à la fréquence de 10GHz uniquement. Aussi, de nombreuses questions concernant la mise en oeuvre, la validation et l'inversion des modèles physiques de l'émission micro-onde d'un couvert végétal, restaient ouvertes. La confrontation des simulations avec des données radiométriques, s'est fondée sur les mesures conduites avec PORTOS sur couvert de soja (Chanzy *et al.*, 1992). Cette expérimentation (PORTOS-1991) a permis le suivi du développement de la végétation depuis le semis jusqu'à un stade de maturité avancé du couvert, dans les canaux de fréquence: 1.4, 5.05, 10.65, 23.8, 36.5 et 90GHz. Les principaux résultats de l'analyse des simulations et des données radiométriques sont:

*Le suivi de la fraction volumique du couvert (f_v) et de la teneur en eau du sol (m_v) est principalement le domaine des basses fréquences (1 – 5GHz). Le rapport de polarisation R, ou la différence de polarisation modifiée PD_p ($p=v$ ou $p=h$) à forte incidence ($\theta > 50^\circ$), semblent être les indicateurs privilégiés du suivi du développement du couvert. La dynamique du suivi de m_v et f_v est très importante à 1.4GHz. Par contre, la fréquence 5.05GHz (bande C) semble être en limite de saturation lorsque le couvert est bien développé ($LAI > 3$). La pertinence du suivi de la teneur en eau de la végétation en bande C n'est pas clairement établie.

*Les radiations de fréquence supérieure ou égale à 10GHz sont fortement sensibles aux caractéristiques fines de la végétation. Ainsi l'ordre de grandeur des effets de la teneur en eau, de l'épaisseur et de la distribution d'orientation des feuilles semblent être assez voisins à 10.65GHz (bande X). Le signal en bande X apparaît donc susceptible de fluctuer rapidement en relation avec les facteurs du climat (vent, rayonnement global incident, rosée..) qui influent directement sur les caractéristiques des diffuseurs végétaux, et des feuilles en particulier. Ces observations faites sur un couvert de soja pourraient être fortement modulées pour d'autres types physiologiques de végétation; en particulier sur un couvert forestier où les branches et les troncs jouent un rôle déterminant dans les interactions végétation-radiations hyperfréquences (Beaudoin, 1992).

Pour les fréquences f ($f \geq 10\text{GHz}$), le suivi de la biomasse ou de la teneur en eau du sol est limité aux faibles valeurs de recouvrement du sol par la végétation ($LAI < 2$). Ainsi à 36.5GHz, une discontinuité dans le suivi de m_v est notée aussitôt que la couverture végétale devient continue. Enfin, les variations d'émissivité les plus réduites, au cours de la campagne PORTOS-1991, ont été relevées à la fréquence de 90GHz ($\theta=50^\circ$, polarisation V). Cette configuration paraît la mieux adaptée au suivi de la température de surface, hors considération de l'influence de l'atmosphère sur le signal. L'ensemble de ces résultats sont récapitulés dans un tableau synthétique (Annexe (5)).

Pour ce qui est de la mise en oeuvre des approches discrète et continue, il apparaît que:

*Le modèle discret nécessite une description très fine des paramètres descriptifs du couvert qui doit être obtenue concurremment avec les mesures radiométriques (Wigneron *et al.*, 1992a). C'est un outil très performant d'analyse du signal radiométrique, mais dont la validation est restreinte à des expérimentations très ciblées.

*Le modèle continu est complémentaire du modèle discret. Sa description très dépouillée de la structure interne du couvert végétal par les deux longueurs de corrélation l_z et l_p et la densité volumique f_v , élargit son utilisation vers des analyses à plus grandes échelles. Les travaux menés sur couvert de soja (Wigneron *et al.*, 1992b; Wigneron, 1993) et sur la forêt d'Amazonie (Calvet *et al.*, 1992) illustrent son potentiel comme outil d'inversion des paramètres de surface (teneur en eau du sol, biomasse et teneur en eau du couvert). Dans cette optique, l'évolution des longueurs de corrélation a été reliée au développement du couvert de soja. Les paramètres l_z et l_p semblent relativement stables, après la phase initiale d'installation de la végétation. Les radiations basses fréquences semblent intégrer

l'émission sur toute la hauteur du couvert ($l_z \gg l_p$, à 5.05GHz), alors que les radiations hautes fréquences seraient davantage sensible à la structure foliaire de surface du couvert ($l_z \approx l_p$, à 36.5GHz). La principale limitation de ces deux approches concerne l'hypothèse de milieu continu et homogène dans le plan horizontal. En particulier, la structure en rangs d'une culture ou l'hétérogénéité d'un couvert naturel ne peuvent être pris en compte. Par ailleurs, divers prolongements doivent permettre de compléter ces premiers résultats, acquis essentiellement sur un couvert de soja. En particulier cette étude doit être élargie à l'analyse de couverts à structure diélectrique davantage verticale (et incidemment davantage cylindrique): cultures de maïs, de céréales, et couverts forestiers. Pour ce faire, la résolution des équations de transfert radiatif doit être étendue à des milieux à deux strates (typiquement une strate de troncs ou de chaumes, et une strate de branches, de feuilles et de fruits). Dans le modèle discret, les matrices de phase des cylindres et des feuilles (dans l'approximation hautes fréquences) doivent être incluses. Egalement, dans le modèle continu, le calcul du coefficient d'absorption du couvert doit être révisé.

A plus long terme, la modélisation doit être également élargie aux couverts hétérogènes (effets de rangs dans un couvert agricole, couverts clairsemés dans les zones semi-arides...). Cet objectif pourra être abordé dans un premier temps, par l'adaptation des modèles discret et continu: pondération de l'émission micro-onde par le taux de couverture de la végétation et du sol, effet de rugosité à l'interface végétation-atmosphère... Dans un deuxième temps, des approches physiques des échanges radiatifs par des techniques de Monte-Carlo (Chuah et Tan, 1990) ou de Radiosité (Goel *et al.*, 1990a-b) permettraient de prendre en compte l'agencement spatial des diffuseurs végétaux, et d'élargir l'analyse de l'émission micro-onde à des architectures variées du couvert végétal. Ces approches théoriques complexes pourraient également servir à caler des modèles paramétriques plus adaptés à l'exploitation des mesures télédéteectées.

Par ailleurs, le couplage du modèle micro-onde discret avec un modèle de simulation des échanges d'énergie dans un couvert végétal (ALB) a été conduit dans cette étude. Ce couplage a permis l'analyse des variations de la température du milieu et des caractéristiques hydriques de la végétation, à l'échelle horaire et à l'échelle du développement d'un couvert de soja. A l'échelle horaire, les variations de l'émissivité micro-onde e_p à 1.4, 5.05 et 10.65GHz sont principalement reliées aux flux d'eau dans la plante. Ces transferts, paramétrisés dans ce travail par le potentiel hydrique foliaire ψ_f , induisent des variations significatives du *volume* et de la *permittivité diélectrique* des feuilles. Les effets des variations de e_p sur la température de brillance du couvert végétal T_B ($T_B = e_p \cdot T_{em}$) sont de l'ordre de grandeur des variations de température effective du milieu T_{em} . Par contre, à l'échelle du développement du couvert et pour une tranche horaire donnée, les mesures micro-ondes sont principalement déterminées par l'émissivité du couvert végétal (effets prépondérants de la teneur en eau du sol et de la biomasse).

Dans la liaison entre le modèle micro-onde discret et le modèle de simulation des échanges d'énergie (ALB), deux problèmes se sont posés. Ils concernent la prise en compte des transferts d'eau dans la plante et dans le sol par ALB en relation avec l'estimation de la constante diélectrique, respectivement de la végétation et du sol. Dans cette étude ces deux difficultés ont été contournées par l'utilisation de relations empiriques, simples, mais de portée restreinte. Ainsi le poids de l'approche couplée que nous avons présentée pourrait être considérablement accru:

-par l'analyse de la relation entre potentiel hydrique foliaire et permittivité diélectrique de la végétation (relation avancée mais non validée par McDonald *et al.* (1990)).

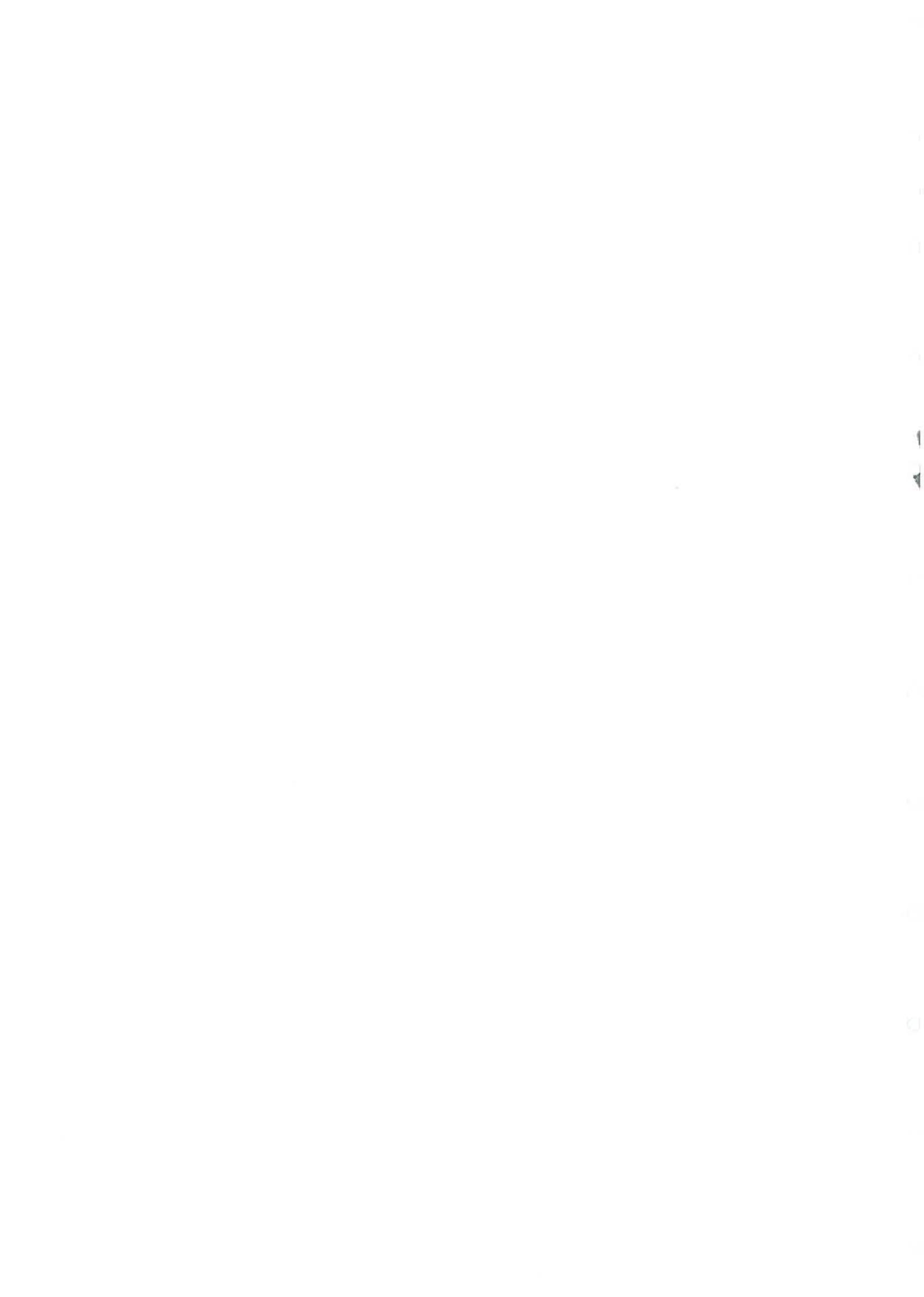
-par la mise au point d'un modèle de portée assez générale, reliant les teneurs en eau sur les différentes couches de surface qui interviennent dans l'émission hyperfréquence du sol (analyse s'intégrant directement dans le cadre des travaux de Chanzy (1991), Chanzy *et al.* (1992)).

Ce couplage s'inscrit, de manière plus générale, dans une perspective de complémentarité des mesures de télédétection. Ainsi, aux analyses très pointues dans un domaine du spectre donné (analyse des effets de l'atmosphère ou de l'angle de visée, perfectionnement des systèmes de mesure et de

traitement des images..) doivent d'ores et déjà s'adjoindre des préoccupations de synergie entre les différentes mesures de télédétection. Cette synergie intervient sur le plan de la complémentarité des échelles spatiales et temporelles des mesures et sur le plan de l'éventail des paramètres accessibles. Typiquement, l'analyse des mesures satellitaires de température de brillance micro-onde (pixel de l'ordre de 10km x 10km) nécessite l'estimation de la température de surface (domaine de l'infra-rouge thermique) pour accéder à l'émissivité. Elle sera également dépendante de mesures à forte résolution (100m x 100m) pour accéder au taux de couverture de la végétation (domaine du visible & proche-infrarouge) ou à un terme de rugosité de surface (hyperfréquences actives). Ces préoccupations qui s'inscrivent en droite ligne du projet EOS (Earth Observing System) concourent au développement de campagnes de mesures sur des zones variées (EFEDA 1991, HAPEX-SAHEL 1992, BOREAS 1994), et de systèmes cohérents d'acquisition (Kerr, 1991).

Enfin, la mesure de la température de brillance micro-onde, pourrait à terme venir compléter les entrées des modèles atmosphériques, à l'échelle globale de la biosphère. Cette possibilité, qui favoriserait de façon très significative l'essor des hyperfréquences passives, est en cours d'évaluation par les travaux de J-C. Calvet (Météo-France). Ces travaux s'inscrivent en étroite connection avec les développements futurs de cette étude, sur le plan de la modélisation physique de l'émission et sur le plan de la complémentarité des mesures de télédétection.

Annexes



Annexe 1

Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des feuilles: Relations géométriques entre le repère de référence et le repère local lié à la feuille

L'orientation du repère local $R'(x',y',z')$ est celle des principaux axes d'une feuille orientée aléatoirement dans l'espace. R' est relié au repère de référence $R(x,y,z)$ par l'intermédiaire des angles d'Euler α, β, γ selon:

$$\begin{cases} x' = (\cos\gamma \cos\beta \cos\alpha - \sin\gamma \sin\alpha).x + (\cos\gamma \cos\beta \sin\alpha + \sin\gamma \cos\alpha).y - \cos\gamma \sin\beta.z \\ y' = (-\sin\gamma \cos\beta \cos\alpha + \cos\gamma \sin\alpha).x + (\cos\gamma \cos\alpha - \sin\gamma \sin\alpha \cos\beta).y + \sin\gamma \sin\beta.z \\ z' = \sin\beta \cos\alpha.x + \sin\beta \sin\alpha.y + \cos\beta.z \end{cases} \quad (1.1)$$

Considérons une radiation E.M. incidente sur une feuille du couvert. Cette radiation sera représentée par le vecteur direction incidente i caractérisé par les angles d'inclinaison et d'azimut (θ_i, ϕ_i) dans le repère de référence, et (θ_i', ϕ_i') dans le repère local (figure.?):

$$\begin{cases} i = \sin\theta_i.(x \cos\phi_i + y \sin\phi_i) - z \cos\theta_i \\ i = \sin\theta_i'.(x' \cos\phi_i' + y' \sin\phi_i') - z' \cos\theta_i' \end{cases} \quad (1.2)$$

où

$$\cos\theta_i' = -i.z' = \cos\beta \cos\theta_i - \sin\beta \cos(\alpha - \phi_i) \sin\theta_i = -t_i$$

$$\sin\theta_i' = (i.x)/\cos\phi_i' = (1 - \cos^2\theta_i')^{1/2}$$

et

$$\begin{aligned} \cos\phi_i' &= (i.x')/\sin\theta_i' = [\sin\theta_i(\cos\gamma \cos\beta \cos(\phi_i - \alpha) + \sin\gamma \sin(\phi_i - \alpha))] + \cos\theta_i \cos\gamma \sin\beta / (1 - t_i^2)^{1/2} \\ \sin\phi_i' &= (i.y')/\sin\theta_i' = [\sin\theta_i(-\sin\gamma \cos\beta \cos(\phi_i - \alpha) + \cos\gamma \sin(\phi_i - \alpha))] - \cos\theta_i \sin\gamma \sin\beta / (1 - t_i^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Des expressions similaires pour la radiation diffusée (le long du vecteur s) peuvent être écrites. Les angles d'inclinaison et d'azimut (θ_s, ϕ_s) et (θ_s', ϕ_s') respectivement dans le repère de référence et le repère local, sont obtenus en remplaçant θ_i et ϕ_i respectivement par $\pi - \theta_s$ et ϕ_s dans les équations (1.3):

$$\begin{cases} s = \sin\theta_s.(x \cos\phi_s + y \sin\phi_s) + z \cos\theta_s \\ s = \sin\theta_s'.(x' \cos\phi_s' + y' \sin\phi_s') + z' \cos\theta_s' \end{cases} \quad (1.4)$$

avec

$$\cos\theta_s' = s.z' = \cos\beta \cos\theta_s + \sin\beta \cos(\alpha - \phi_s) \sin\theta_s = +t_s$$

$$\sin\theta_s' = (s.x)/\cos\phi_s' = (1 - \cos^2\theta_s')^{1/2}$$

et

$$\begin{aligned} \cos\phi_s' &= (s.x')/\sin\theta_s' = [\sin\theta_s(\cos\gamma \cos\beta \cos(\phi_s - \alpha) + \sin\gamma \sin(\phi_s - \alpha))] - \cos\theta_s \cos\gamma \sin\beta / (1 - t_s^2)^{1/2} \\ \sin\phi_s' &= (s.y')/\sin\theta_s' = [\sin\theta_s(-\sin\gamma \cos\beta \cos(\phi_s - \alpha) + \cos\gamma \sin(\phi_s - \alpha))] + \cos\theta_s \sin\gamma \sin\beta / (1 - t_s^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Annexe 2

Calcul du tenseur de diffusion d'amplitude des ellipsoïdes dans le repère local et dans le repère de référence.

d'après Karam *et al* (1988, 1989, 1992)

Le tenseur de diffusion d'amplitude des feuilles, assimilées à des ellipsoïdes, s'écrit dans le repère local:

$$\left\{ \begin{array}{l} F'_{vv}(s,i) = [k^2 v_0 (\epsilon_r - 1) / 4\pi] [a_{33} \sin\theta_i' \sin\theta_s' - \cos\theta_i' \cos\theta_s' \cdot (a_{11} \cos\phi_i' \cos\phi_s' + a_{22} \sin\phi_i' \sin\phi_s')] \mu(s,i) \\ F'_{hv}(s,i) = [k^2 v_0 (\epsilon_r - 1) / 4\pi] \cos\theta_i' [a_{11} \cos\phi_i' \sin\phi_s' - a_{22} \sin\phi_i' \cos\phi_s'] \mu(s,i) \\ F'_{vh}(s,i) = [-k^2 v_0 (\epsilon_r - 1) / 4\pi] \cos\theta_s' [a_{11} \sin\phi_i' \cos\phi_s' - a_{22} \cos\phi_i' \sin\phi_s'] \mu(s,i) \\ F'_{hh}(s,i) = [k^2 v_0 (\epsilon_r - 1) / 4\pi] [a_{11} \sin\phi_i' \sin\phi_s' + a_{22} \cos\phi_i' \cos\phi_s'] \mu(s,i) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

où k et λ désignent respectivement le nombre d'onde et la longueur d'onde de la radiation ($k=2\pi/\lambda$), v_0 désigne le volume foliaire unitaire $v_0=(4\pi/3)a_1 a_2 a_3$ ($a_1 > a_2 > a_3$); ϵ_r désigne la constante diélectrique de la feuille; $\mu(s,i)$ est la fonction d'interférence de Debye.

a_{ii} et g_i ($i=1,2,3$) sont respectivement les éléments du tenseur de polarisabilité et les facteurs de démagnétisation des feuilles assimilées à des ellipsoïdes:

$$a_{ii} = 1 / [(\epsilon_r - 1)g_i + 1] \quad (2.2)$$

$$g_1 = (a_3/a_1)(1 - e^2)^{1/2} (K(e, \pi/2) - E(e, \pi/2)) / e^2$$

$$g_2 = (a_3/a_1) (- (1 - e^2)K(e, \pi/2) + E(e, \pi/2)) / (e^2(1 - e^2)^{1/2})$$

$$g_3 = 1 - (a_3/a_1)E(e, \pi/2) / (1 - e^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

avec

$$e = (1 - (a_2/a_1)^2)^{1/2} \quad (2.4)$$

$K(e, \pi/2)$ et $E(e, \pi/2)$ sont les intégrales elliptiques de première et deuxième espèce.

$$\left\{ \begin{array}{l} K(e, \pi/2) = \int_0^{\pi/2} d\psi / (1 - e^2 \sin^2 \psi)^{1/2} \\ E(e, \pi/2) = \int_0^{\pi/2} d\psi \cdot (1 - e^2 \sin^2 \psi)^{1/2} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

La fonction d'interférence de Debye s'écrit

$$\mu(s,i) = 2J_1(Q_e) / Q_e \quad (2.6)$$

avec

$$Q_e = [(q_{xa} \cos\beta + q_{za} \sin\beta)^2 (a_1^2 \cos^2 \gamma + a_2^2 \sin^2 \gamma) + q_{ya} (q_{xa} \cos\beta + q_{za} \sin\beta) (a_1^2 - a_2^2) \sin 2\gamma + q_{ya}^2 (a_1^2 \sin^2 \gamma + a_2^2 \cos^2 \gamma)]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{xa} = k [\sin\theta_i \cos(\phi_i - \alpha) - \sin\theta_s \cos(\phi_s - \alpha)] \\ q_{ya} = k [\sin\theta_i \sin(\phi_i - \alpha) - \sin\theta_s \sin(\phi_s - \alpha)] \\ q_{za} = k [\cos\theta_i - \cos\theta_s] \end{array} \right. \quad (2.8)$$

et $J_1()$ est la fonction cylindrique de Bessel du premier ordre.

Les éléments $F_{pq}(s,i)$ du tenseur de diffusion d'amplitude dans le repère de référence sont reliés à ces mêmes éléments $F'_{pq}(s,i)$ dans le repère local selon:

$$\begin{cases} F_{vv}(s,i)=[t_{vs}(F'_{vv}(s,i)t_{vi}-F'_{vh}(s,i)t_{hi}) - t_{hs}(F'_{hv}(s,i)t_{vi}-F'_{hh}(s,i)t_{hi})]/D(s,i) \\ F_{hv}(s,i)=[t_{hs}(F'_{vv}(s,i)t_{vi}-F'_{vh}(s,i)t_{hi}) + t_{vs}(F'_{hv}(s,i)t_{vi}-F'_{hh}(s,i)t_{hi})]/D(s,i) \\ F_{vh}(s,i)=[t_{vs}(F'_{vv}(s,i)t_{hi}+F'_{vh}(s,i)t_{vi}) - t_{hs}(F'_{hv}(s,i)t_{hi}+F'_{hh}(s,i)t_{vi})]/D(s,i) \\ F_{hh}(s,i)=[t_{hs}(F'_{vv}(s,i)t_{hi}+F'_{vh}(s,i)t_{vi}) + t_{vs}(F'_{hv}(s,i)t_{hi}+F'_{hh}(s,i)t_{vi})]/D(s,i) \end{cases} \quad (2.9)$$

avec

$$D(s,i)=[(t_{vs}^2+t_{hs}^2)(t_{vi}^2+t_{hi}^2)]^{1/2} \quad (2.10)$$

où

$$\begin{aligned} t_i &= \sin\beta \cdot \sin\theta_i \cdot \cos(\alpha-\phi_i) - \cos\beta \cdot \cos\theta_i \\ t_{vi} &= -[\sin\beta \cdot \cos\theta_i \cdot \cos(\alpha-\phi_i) + \cos\beta \cdot \sin\theta_i] \\ t_{hi} &= \sin\beta \cdot \sin(\alpha-\phi_i) \end{aligned} \quad (2.11)$$

t_h, t_{vs}, t_{hs} sont déduits des équations (2.11) en remplaçant respectivement θ_i et ϕ_i par $\pi-\theta_s$ et ϕ_s .

Annexe 3

Paramètres d'entrée et de sortie des modèles de simulation de l'émission micro-onde d'un couvert végétal – Modèles continu et discret

ENTREE:

f (GHz)	fréquence de la radiation
T_2 et T_1 (K)	température du sol et de la végétation
Γ_1 (K/m)	gradient thermique au sein du couvert végétal

VEGETATION: paramètres de structure et diélectriques

f_v (m^3/m^3)	fraction volumique de la végétation
d (m)	hauteur du couvert végétal

calcul de la permittivité diélectrique du couvert (ϵ_1):

M_g (kg/kg)	teneur en eau gravimétrique du couvert végétal
ρ_s (g/cm^3)	densité de matière sèche du couvert végétal

PARAMETRES SPECIFIQUES DU MODELE DISCRET:

a_1, a_2 (m)	demi-axes des feuilles (assimilées à des ellipsoïdes)
a_3 (m)	demi-épaisseur de la feuille
$p_\beta(\beta), p_\alpha(\beta), p_\gamma(\beta)$	fonctions densité de probabilité d'orientation des feuilles (inclinaison, azimuth, rotation autour de l'axe foliaire).

PARAMETRES SPECIFIQUES DU MODELE CONTINU:

l_z et l_p	longueurs de corrélation verticale et horizontale
----------------	---

SOL: paramètres de structure et diélectriques

h_r, Q	paramètres de rugosité (réflectivité de Fresnel modifiée)
----------	---

calcul de la permittivité diélectrique du sol (ϵ_2):

m_v (m^3/m^3)	teneur en eau volumétrique
ρ_b (g/cm^3)	masse volumique de la matière sèche
S, C	fraction en sable et argile

ATMOSPHERE: (composante atmosphérique descendante T_{sky} par ciel clair)

T_a, p_a, θ_a profil atmosphérique de température, de pression et de teneur en eau.

SORTIE:

$T_{Bp}(\theta_i)$ (K)	température de brillance pour la polarisation verticale (p=v) et horizontale (p=h), et pour l'angle d'incidence θ_i ($0 < \theta_i < \pi/2$ ($i=1, \dots, n$) découle de la quadrature de Gauss).
------------------------	---

Annexe 4

Mesure de la teneur en eau gravimétrique m_g sur différentes couches de surface du sol, dessous le couvert de soja (Méthode de pesée, Expérimentation PORTOS-1992).

J	H	mv1	mv2	mv3	mv4	mv5	mv6	mv7	mv8
206	15.7	0.171	0.177	0.186	0.195	0.205	0.208	0.212	0.217
207	16.3	0.097	0.125	0.171	0.185	0.190	0.205	0.208	0.215
214	15.4	0.108	0.127	0.149	0.117	0.183	0.206	0.204	0.218
215	14.3	0.069	0.088	0.123	0.143	0.157	0.168	0.179	0.191
217	13.8	0.023	0.049	0.099	0.119	0.137	0.146	0.158	0.169
218	14.0	0.019	0.049	0.104	0.124	0.136	0.150	0.151	0.163
219	15.3	0.013	0.044	0.107	0.115	0.150	0.139	0.176	0.159
221	15.0	0.134	0.134	0.158	0.167	0.171	0.177	0.179	0.179
224	15.4	0.034	0.081	0.119	0.136	0.144	0.147	0.159	0.168
225	15.3	0.060	0.094	0.123	0.133	0.143	0.147	0.157	0.165
226	15.8	0.031	0.065	0.111	0.128	0.134	0.143	0.152	0.161
227	14.9	0.184	0.164	0.175	0.180	0.191	0.175	0.199	0.203
228	15.1	0.054	0.094	0.133	0.150	0.159	0.165	0.176	0.184
231	13.8	0.037	0.077	0.122	0.136	0.144	0.151	0.161	0.172
232	15.5	0.145	0.151	0.174	0.180	0.183	0.189	0.196	0.200
233	14.4	0.083	0.128	0.152	0.167	0.172	0.184	0.190	0.195
234	14.0	0.053	0.103	0.134	0.146	0.165	0.162	0.173	0.174
235	15.0	0.225	0.197	0.201	0.204	0.209	0.208	0.214	0.219
238	16.6	0.109	0.164	0.157	0.153	0.177	0.176	0.186	0.195
239	16.7	0.083	0.106	0.142	0.160	0.167	0.172	0.179	0.185
240	15.6	0.035	0.062	0.114	0.130	0.143	0.151	0.158	0.171
241	13.7	0.237	0.228	0.210	0.212	0.214	0.212	0.217	0.212
242	13.8	0.207	0.202	0.194	0.194	0.196	0.198	0.198	0.201
245	15.4	0.233	0.224	0.214	0.215	0.218	0.217	0.213	0.213
246	9.8	0.225	0.216	0.210	0.209	0.207	0.223	0.211	0.206
246	15.6	0.198	0.196	0.191	0.190	0.191	0.187	0.188	0.188
247	16.3	0.200	0.196	0.187	0.188	0.191	0.192	0.190	0.189
248	15.6	0.170	0.164	0.165	0.169	0.168	0.171	0.173	0.174
249	15.5	0.150	0.147	0.152	0.157	0.156	0.160	0.160	0.166
252	15.8	0.103	0.118	0.127	0.134	0.139	0.143	0.145	0.155
253	15.0	0.091	0.100	0.124	0.133	0.138	0.138	0.146	0.151
266	15.0	0.077	0.091	0.113	0.122	0.127	0.123	0.125	0.140
267	10.1	0.071	0.086	0.106	0.116	0.127	0.130	0.134	0.140
267	15.3	0.073	0.085	0.105	0.113	0.118	0.124	0.129	0.138
268	10.5	0.075	0.083	0.101	0.109	0.113	0.119	0.126	0.134
268	16.6	0.062	0.069	0.090	0.105	0.109	0.113	0.119	0.129
269	15.5	0.270	0.269	0.265	0.253	0.248	0.248	0.242	0.236
270	15.1	0.249	0.244	0.233	0.236	0.233	0.227	0.224	0.219
273	15.8	0.294	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280

J: Jour de l'année

H: Heure de la mesure

m_{gn} (kg/kg): teneur en eau gravimétrique sur la couche de sol n

n=1 [0 - 0.5cm]; n=2 [0 - 1cm]; n=3 [1 - 2cm]; n=4 [2 - 3cm]; n=5 [3 - 4cm]; n=6 [4 - 5cm]; n=7 [5 - 7cm]; n=8 [7 - 10cm].

$\rho_d=1.35g/cm^3$: densité de matière sèche du sol ($m_v=\rho_d \cdot m_g$).

Annexe 5

Sensibilité des mesures micro-ondes passives aux caractéristiques du sol et de la végétation: tableau récapitulatif des potentialités et des indicateurs privilégiés (polarisation (V) et (H), rapport de polarisation R, différence de polarisation modifiée PDv et PDh, angle d'incidence θ).

(GHz)	1.4	5	10	36.5	90
Teneur en eau du sol	+++ (H) R, (V)	++ (H) R	+ (H)	+ (H)	. (H)
Biomasse	++ PD _p ,(H) (V)	++ PD _p ,(H)	+ ?	+ PD _p	. PD _p
Tx couverture végétation	++ PD _p ,(H) (V)	++ PD _p ,(H)	+ ?	+ PD _p	. PD _p
Structure du couvert	.	+ (V)	++ (V)	?	.
Orientation	. (H)	+ (H)	++ (V) (H),R	?	.
Teneur en eau des feuilles	+ (H)	+ (V)	++ (H),(V) R,PD _p	?	.
Température	.	+ (V)	?	+ (V)	++ (V)

végétation dense, $\theta > 30^\circ$

Sensibilité:
 . très faible
 +
 ++
 +++ élevée

BIBLIOGRAPHIE

- Alishouse J. C., J. B. Snider, E. R. Westwater, C. T. Swift, C. S. Ruf, S. A. Snyder, J. Vongsathorn and R. R. Ferraro (1990), 'Determination of cloud liquid water content using the SSM/I', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 28(5):817-822.
- Alphonse (1988), Extraction de paramètres d'un couvert végétal en télédétection hyperfréquence active – Méthodologie et application aux données en bande C pour l'humidité du sol et la biomasse en eau de couverts de soja, *Thèse Univ. Rennes I, CESR Toulouse.*
- Aries F., L. Prévot et P. Monestiez (1992), 'Geometrical canopy modeling in radiation simulation studies', Structure du couvert et climat lumineux, INRA Versailles, ed. Varlet-Grancher.
- Baldochi D. D., S. B. Verma and N. J. Rosenberg (1983), 'Microclimate in the soybean canopy', *Agricultural Meteorology* 28:321-337.
- Bay D. (1990), 'Comparaison de différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle d'une culture de soja', Mémoire d'ingénieur, INRA Science du Sol, Montfavet, France.
- Becker F. and B. J. Choudhury (1988), 'Relative sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) and microwave polarization difference index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring', *Remote Sens. Environ.* 24:297-311.
- Becker F. et Z.-L. Li (1991), 'Complementarity of temperature independent thermal infrared spectral indices (TISI) and NDVI: compared properties and combined use for soil and vegetation discrimination', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp475-480.
- Bensari M., J. Calmés et G. Viala (1990), 'Déficit hydrique et distribution du carbone photosynthétique entre saccharose et amidon', *Acta OEcologica* 11(6):843-855.
- Boissard P. (1987), 'Température radiative et hétérogénéité thermique des couverts végétaux', Acte de la sem. de Monétier-les-Bains, vol.II, INRA Paris.
- Bolle H.-T. and B. Streckenbach, 'The Echival field experiment in a desertification threatened area (EFEDAS)', Contract EPOC-CT 90-0030, First Annual Report, Berlin, Jan 1992.
- Borel C. C., S. A. W. Gerstl and B. J. Powers (1991), 'The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces', *Remote Sens. Environ.* 36:13-44.
- Brisson N. (1989), 'Modèle de simulation de la culture de soja et de son fonctionnement hydrique – Estimation agrométéorologique des potentialités de production', Thèse de Doctorat de l'INA – Paris Grignon, 84p.
- Brunet Y., K. T. Paw U and L. Prévot (1991), 'Using the radiative surface temperature in energy budget studies over plant canopies', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp557-560.
- Brunfeldt D. R. and F. T. Ulaby (1984), 'Measured microwave emission and scattering in vegetation canopies', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 22:520-524.
- Brunfeldt D. R. and F. T. Ulaby (1986), 'Microwave emission from row crops', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 24:353-359.
- Brunfeldt D. R. (1987), 'Theory and design of a field-portable dielectric measurement system', Proceedings of IGARSS-87, Ann Arbor, pp.559-563.
- Burke W. J., T. Schmugge and J. F. Paris (1979), 'Comparison of 2.8 and 21cm microwave observations over soils with emission model calculations', *J. Geophys. Res.* 84:287-294.
- Calmés J. et G. Viala (1987), 'Relations organes donneurs et organes receveurs chez le Soja: migrations vers les graines des composés azotés foliaires', *C. R. Acad. Sci. Paris* t.305, Série III, p.165-169.

- Calvet J. C. et Y. H. Kerr (1991), 'Utilisation des micro-ondes passives sur la forêt Amazonienne', Rapport Météo-France/LERTS Toulouse, 31p.
- 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*.
- Calvet, J.-C., J.-P. Wigneron, E. Mougin, Y. H. Kerr and J. L. Brito, 'Plant water content and temperature of the Amazon forest from satellite microwave radiometry' submitted for publication in *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 1992.
- Camillo P. J. and R. J. Gurney (1986), 'A resistance parameter for bare soil evaporation models', *Soil Sci.* 141(2):95-105.
- Campbell G. S. (1990), 'Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions', *Agric. and Forest Meteor.* 49:173-176.
- Chandrasekhar S. (1960), *Radiative Transfer*, Dover Publications, Inc., New York.
- Chanzy A. (1991), 'Modélisation simplifiée de l'évaporation d'un sol nu utilisant l'humidité et la température de surface accessibles par télédétection', Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 221p.
- Chanzy A., J.-P. Wigneron and T. J. Schmugge (1992), 'Multifrequency passive microwave measurements with Portos: experimental design and first results', *Proceedings of Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications*, Ed R. Westwater, Boulder.
- Chen M. F., K. S. Chen and A. K. Fung (1989), 'A study of the validity of the integral equation model by moment method simulation – cylindrical case', *Remote Sens. Environ.* 29:217-228.
- Choe Y. and L. Tsang (1983), 'A mathematical characterization of vegetation effect on microwave remote sensing from the earth', Technical Report RSC-139, Remote Sensing Center, Texas A/M University.
- Choudhury B. J., T.J. Schmugge, A. Chang and R.W. Newton (1979), 'Effect of surface roughness on the microwave emission from soils', *J. of Geophysical Research* 84:5699-5706.
- Choudhury B. J, T. J. Schmugge and T. Mo (1982) 'A parameterization of effective soil temperature for microwave emission' *J. Geophys. Res.* 87(C2):1301-1304.
- Choudhury B. J. and J. L. Monteith (1998), 'A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces' *Quarterly J. of Royal Meteor. Society* 114:373-398.
- Choudhury B. J. (1989), 'Monitoring global land surface using Nimbus-7 37GHz data – Theory and examples', *Int. J. Remote Sens.* 10(10):1579-1605.
- Choudhury B. J. (1990), 'Monitoring arids lands using AVHRR-observed visible reflectance and SMMR-37GHz polarization difference', *Int. J. Remote Sensing* 11(10):1949-1956.
- Choudhury B. J. and J. R. Wang (1990), 'Simulated and observed 37GHz emission over Africa', *Int. J. Remote Sens.* 11:1837-1868.
- Chuah H. T. and H. S. Tan (1990), 'A multiconstituent and multilayer microwave backscatter model for a vegetative medium', *Remote Sens. Environ.* 31:137-153.
- Chukhlantsev A. A, S. P. Golovachev and A. M. Shutko (1989), 'Experimental study of vegetable canopy microwave emission', *Adv. Space Res.* 9(1):317-321.
- Crane R. K. (1971), 'Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands', *Proc. IEEE* 59:173-188.
- Cruizat P. (1992), 'L'état hydrique des plantes: rappels et utilisation', Séminaire Fonctionnement hydrique des plantes – Relations avec la physiologie, INRA – Bioclimatologie, Paris. 118p.

- Dauzat J. et O. Hautecoeur (1991), 'Simulation des transferts radiatifs sur maquettes informatiques de couverts végétaux', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp415-418.
- Davies W. J. (1977), 'Stomatal responses to water stress and light in plant grown in controlled environments and in the field', *Crop Science*, 17:735-740.
- de Reffye P., C. Edelin, J. Françon, M. Jaeger and C. Puech (1988), 'Plant models faithful to botanical structure and development', *Computer Graphics* 22:151-158.
- Dickinson R. E., B. Pinty and M. M. Verstraete (1990), 'Relating surface albedos in GCM to remotely sensed data', *Agric. and Forest Meteor.* 52:109-131
- Dobson M. C., F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen and M. A. El-Reyes (1985), 'Microwave dielectric behavior of wet soil- Part II: Dielectric mixing models', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.* 23:35-46.
- Dobson M. C. (1988), 'Diurnal and seasonal variations in the microwave dielectric constant of selected trees', Proceedings of IGARSS-88, Edinburgh, pp.1754.
- Elvidge C. D. (1988), 'Thermal infrared reflectance of dry plant materials: 2.5 – 20.0 μ_m ', *Remote Sens. Environ.* 26:265-285.
- England A. W. (1975), 'Thermal microwave emission from a scattering layer', *Journal of Geophysical Res.* 80:4484-4496.
- Ehleringher J. R. and S. D. Hammond (1987), 'Solar tracking and photosynthesis in cotton leaves', *Agric. and Forest Meteor.* 39:25-35.
- Eom H. J. and A. K. Fung (1984), 'A scatter model for vegetation up to Ku-band', *Remote Sens. Environ.* 15:185-200.
- Famiglietti J. S. and E. F. Wood (1991), 'Comparison of passive microwave and model derived estimates for soil moisture fields', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp321-326.
- Feddes R. A. and P. E. Ritjema (1972), 'Water withdrawal by plants roots', Inst. for Plant and Water Manag. Res., Techn. Bull. N°83, Wageningen, The Netherlands, 59pp.
- Ferrazzoli P., L. Guerriero, S. Paloscia, P. Pampaloni and D. Solimini (1992), 'Modeling polarization properties of emission from soil covered with vegetation', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30:157-165.
- Fung A. K. and H. S. Fung (1977), 'Application of first order renormalization method to scattering from a vegetation-like half space', *IEEE Trans. on Geoscience Electr.*, 15:189-195.
- Fung A. K. and F. T. Ulaby (1978), 'A scatter model for leafy vegetation' *IEEE Trans. on Geoscience Electr.*, 16:281-285.
- Fung A. K. and A. J. Eom (1981), 'Emission from a Rayleigh surface with irregular boundaries', *J. Quant. Spectrosc Radiat. Transfer.* 26:397-409.
- Fung A. K. and G. W. Pan (1987), 'A scattering model for perfectly conducting random surfaces, I. Model development, II. Range of validity, *Int. J. Remote Sens.* 8(11):1579-1605.
- Fung A. K., Z. Li and K. S. Chen (1992), 'Backscattering from a randomly rough dielectric surface', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30:356-364.
- Gerstl S. A. W. and C. C. Borel (1992), 'Principles of the radiosity method versus radiative transfer for canopy reflectance modeling', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30:271-275.
- Giddings L. and B. J. Choudhury (1989), 'Observation of hydrological features with Nimbus-7 37GHz data, applied to South America', *Int. J. Remote Sensing* 10(10):1673-1686.
- Goel N. S. and Strebel D. E. (1984), 'Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies', *Agronomy Journal* 76:800-802.

- Goel N. S. (1988), 'Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance', *Remote Sens. Reviews* 4:1-122.
- Goel N. S., I. Rozehnal and R. L. Thompson (1991a), 'A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region', *Remote Sens. Environ.* 36:73-104.
- Goel N. S., I. Rozehnal and R. L. Thompson (1991bb), 'Vegetation canopies and objects of arbitrary shapes: computer generation and bidirectional reflectance calculations', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp409-413.
- Goodberlet M. A., Swift C. T. and J. C. Wilkerson (1990), 'Ocean surface wind speed measurements of the special sensor microwave/Imager (SSM/I)', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 28(5):823-828.
- Halle F., R. A. A. Oldeman and P. B. Tomlinson (1978), 'Tropical trees and forest. An architectural analysis', Springer Verlag, Berlin
- 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.* 26(5):622-628.
- Hoffer R. and E. G. Njoku (1981), 'Regression techniques for oceanographic parameter retrieval using space borne microwave radiometry', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 19:178-189.
- Hollinger J. P., J. L. Peirce and G. A. Poe (1990), 'SSM/I instrument evaluation', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 28:781-790.
- Hope A. S., S. N. Goward and D. E. Petzold (1988), 'Tersail: A numerical model for combined analysis of vegetation canopy bidirectional reflectance and thermal emissions', *Remote Sens. Environ.* 26:287-300.
- Isaacs R. G., Y. Q. Jin, R. D. Worsham, G. Deblonde and V. J. Falcone (1989), 'The RADTRAN microwave surface emission models', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.*, 27:433-440.
- Ishimaru A. (1978), *Wave propagation and scattering in random media*, Academic Press, New York.
- Jackson T. J., T. J. Schmugge and J. R. Wang (1982), 'Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies', *Water Resour. Res.* 18:1137-1142
- Jackson T. J. and P. E. O'Neill (1986), 'Microwave dielectric model for aggregated soils', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* GE-24:920-929.
- Jackson T. J. and P. O'Neill (1988), 'Attenuation of soil microwave emissivity by corn and soybeans at 1.4 and 5GHz', IGARSS-88, pp1165-1168.
- Jackson T. J. and T. J. Schmugge (1989), 'Passive microwave remote sensing system for soil moisture: some supporting research', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, 27:225-235.
- Jarvis P. G. (1976), 'The interpretation of the variations in the leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field', *Philos Trans. R. Soc. London*, Ser. B, 273:593-602.
- Jin Y. Q. and J. A. Kong (1984), 'Strong fluctuation theory for electromagnetic wave scattering by a layer of random discrete scatterers', *J. Appl. Phys.* 55:1364-1369.
- Jin Y. Q. and R. G. Isaacs (1987), 'Simulation and statistical retrieval for inhomogeneous nonisothermal atmospheric precipitation', *J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer* 37:461-469.
- Jin Y. Q. (1989a), 'The radiative transfer equation for strongly-fuctuating continuous random media', *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 42:529-537.
- Jin Y. Q. (1989b), 'A set of surface emissivity simulation for microwave remote sensing from satellite-borne sensors, ISGARSS pp. 166-169.
- Jin Y. Q., J. Zhang and R. Zhao (1992), 'Numerical modelling of radiative transfer and multi-frequency measurement of thermal emission from crop canopies', *Int. J. Remote Sens.* 13(15):2801-2812.

- Jones H. G. (1983), *Plants and Microclimate*, Cambridge University, 323pp.
- Joseph J. H., W. J. Wiscombe and J. A. Weinman (1976), 'The Delta-Eddington approximation for radiative flux transfer', *J. of Atmospheric Sciences* 33:2452-2459.
- Karam M. A. and A.K Fung (1983), 'Scattering from randomly oriented circular discs with application to vegetation', *Radio Science* 18:p557-565.
- Karam M.A., A. K. Fung and Y. Y. M. Antar (1988), 'Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples', *IEEE Tr.Geosc.Remote Sensing* GE-26:799-807
- Karam M. A. and A. K. Fung (1988), 'Electromagnetic scattering from a layer of finite length, randomly oriented, dielectric, circular cylinders over a rough interface with application to vegetation', *Int. J. Remote Sens.* 9:1109-1134.
- Karam M. A. and A. K. Fung (1989), 'Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sensing* GE-27:687-697.
- Karam M. A., A. K. Fung, Lang R. H. and N. S. Chauhan, 'A microwave scattering model for layered vegetation', submitted for publication in *IEEE Tr. Geosc. Remote Sensing*, 1992.
- Katerji N., M. Hallaire, A. Perrier et R. Durand (1983), 'Transfert hydrique dans le végétal – I.-Modélisation à l'échelle du couvert végétal en conditions naturelles', *Oecol. Plant.* 4:11-26.
- Katerji N. (1992), 'L'état hydrique des plantes: rappels et utilisation', Séminaire Fonctionnement hydrique des plantes – Relations avec la physiologie, INRA – Bioclimatologie, Paris. 118p.
- Kerr Y. H. and E. G. Njoku (1990), 'A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.* 28:384-393.
- 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. (1992), 'MARMOTTE: a portable field microwave radiometer', Proceedings of Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications, Ed R. Westwater, Boulder.
- Kim Y. and E. Rodriguez (1992), 'Comparison of the unified perturbation method with the two-scale expansion', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.* 30(3):510-515.
- Kimes D. S. and J. A. Kirchner (1983), 'Diurnal variations of vegetation canopy structure', *Int. J. Remote Sensing* 4:257-271.
- Kirdiashev K. P., A. A. Chukhlantsev and A. M. Shutko (1979), 'Microwave radiation of the earth's surface in the presence of vegetation cover', *Radiotekhnika* 24:256-264. – also *NASA. Tech. Trans* TM-75469.
- Kong J. A., S. L. Lin and S. L. Chuang (1984), 'Microwave thermal emission from periodic surfaces', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 22(4):377-382.
- Kovalik P. J. and N. C. Turner (1983), 'Diurnal changes in the water relations and transpiration of a soybean crop simulated during the development of water deficits', *Irrig. Sci.* 4:225-238.
- Kruse F. A. and J. B. Dietz (1991), 'Integration of visible through microwave range multispectral image data sets for geologic mapping', Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing', Courchevel, ESA SP-319, pp481-486.
- Labad J. et M. P. Stoll (1991), 'Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band: spectral signature and effective surface temperature' *Remote Sens. Environ.* 38:1-17.
- Lambert V. M. and M. J. McFarland, 'Land surface temperature estimation over the northern Great Plains using dual polarized passive microwave data from the Nimbus 7', presented at the 1987 Summer Meeting ASAE, Baltimore, MD, ASAE Paper 87-4041, 23pp.
- Lang R. H. (1981), 'Electromagnetic backscattering from a sparse distribution of lossy dielectric scatterers' *Radio Science* 16:15-30.

- Lang R. H. and J. S. Sidhu (1983), 'Electromagnetic backscattering from a layer of vegetation: a discrete approach', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sensing* 21(1):62-71.
- Lang R. H. and H. A. Saleh (1985), 'Microwave inversion of leaf area and inclination angle distributions from backscattered data', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* GE-23:685-693.
- Lang R. H., D.M. Le Vine, P. O'Neill, S. Saatchi, O. Yazici and T. Jackson (1989), 'Comparison of theoretical and measured brightness temperature of a soybean canopy', IGARSS, pp. 400-404.
- Laug M. (1980), *Traitement Optique du signal et des images – Bases théoriques et applications*, Cepadues Editions, Sup'Aéro Toulouse.
- Lee J. K. and Kong J. A. (1985), 'Passive microwave remote sensing of an anisotropic random-medium layer', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.* GE-23:924-932.
- Le Vine D. M., T. T. Wilheit, R. E. Murphy and C. T. Swift (1989), 'A multifrequency microwave radiometer of the future', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 27(2):193-199.
- Li X. and A.H. Strahler (1986), 'Geometrical-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 24:906-919.
- Lopes A. and E. Mougin (1990), 'Microwave coherent propagation in cylindrical-shaped forest components: interpretation of attenuation observations' *IEEE Tr. Geosc. Remote Sensing* 28(3):315-324.
- Maslanik J. A., J. R. Key and R. G. Barry (1989), 'Merging AVHRR and SMMR data for remote sensing of ice and cloud in polar regions', *Int. J. Remote Sensing* 10(10):1691-1696.
- Mätzler C. and A. Sume (1989), 'Microwave radiometry of leaves', *Microwave Radiomet. Remote Sens. Appl.*, P. Pampaloni (Ed.), pp. 133-148., VSP Utrecht, The Netherlands.
- Mätzler C. (1990), 'Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field', *Remote Sens. Environ.* 31:161-173.
- McDonald K. C., M. C. Dobson and F. T. Ulaby (1990), 'Using MIMICS to model L-band multiangle and multitemporal backscatter from a walnut orchard', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 28:477-491.
- McFarland 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(5):839-845.
- Mead B. J. and R. E. McIntosh (1991), 'Polarimetric backscatter measurements of deciduous and coniferous trees at 225GHz', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 29:21-28.
- Mo T., B.J. Choudhury, T.J. Schmugge, J.R. Wang and T.J. Jackson (1982), 'A model for microwave emission from vegetation-covered fields', *J. of Geophysical Research* 87:11.229-11.237.
- Monteith J. L. (1973), *Principles of environmental physics*, Edward Arnold, London. 241pp.
- Mougin E. (1989), 'Télé-détection de la végétation par micro-ondes – Mesure 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, 231p.
- MRT – Ministère de la recherche et de la technologie (1990), *L'évolution du climat et de l'environnement global – La contribution française*, MRT, Dept. Terre Océan Espace Environnement, Paris, France.
- Neale C. M. U., M. J. McFarland and K. Chang (1990), 'Land-surface-type classification using microwave brightness temperatures from the special sensor microwave imager', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 28(5):829-838.
- Newton R. W., Q. R. Black, S. Mekanvand, A. J. Blanchard and B. R. Jean (1982), 'Soil moisture information and thermal microwave emission', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* GE-20:275-281.
- Njoku E. G. and J. A. Kong (1977), 'Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture', *J. of Geophys. Res.* 82:3108-3118.

- Njoku E. G. and P. E. O'Neill (1982), 'Multifrequency microwave radiometer measurements of soil moisture', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* GE-20:468-475.
- Noilhan J. et J.- C. Calvet, 'Mesoscale land-atmosphere models and data needs', soumis dans les *Proceedings of the ESA/NASA International workshop on Passive Microwave Remote Sensing research related to Land-Atmosphere Interactions*, January 11-15, 1993, S' Lary, France.
- Numerical Algorithms group limited (NAG) (1990), *NAG Fortran Workstation library handbook*, NAG Ltd, Oxford, United Kingdom.
- Oh Y., K. Sarabandi, F. T. Ulaby (1992), 'An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces' *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* GE-30(2):370-381.
- Oke, T. R. (1980), *Boundary Layer Climates*, Methune, New York, 371p.
- Olioso A. (1991), *Experimentation SOJA 1990*, Note 1, INRA Montfavet.
- Olioso A. (1992), 'Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal, dans le but de relier la transpiration et la photosynthèse aux mesures de réflectance et de température de surface', Thèse de doctorat de l'Univ. des Sciences (USTL), Montpellier.
- O'Neill P. E., T. J. Jackson, B. J. Blanchard, J. R. Wang and W. I. Gould (1984), 'Effects of corn stalk orientation and water content on passive microwave sensing of soil moisture', *Remote Sens. Environ.* 16:55-67.
- Padovan G. (1991a), *Radiomètre PORTOS – Manuel de l'utilisateur et de maintenance*, Matra-Marconi Espace, Département Hyperfréquences, Ref: 134.91/HY/POR.
- Padovan G. (1991b), *Radiomètre PORTOS – Rapport de mesure*, Matra-Marconi Espace, Département Hyperfréquences, Ref: 235.90/HY/POR.
- 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 Tr. Geosc. Remote Sensing* GE-24:900-905.
- Passerat de Silans A., L. Bruckler, J. L. Thony et M. Vauclin (1988), 'Numerical modelling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. *J. of Hydrology* 9:857-861.
- Peake W. H. (1959), 'Interaction of electromagnetic waves with some natural surfaces', *IEEE Trans. Antennas Propagation* AP-7:324-329.
- Perrier A. (1979), 'Variation du microclimat d'une culture en fonction de ses caractéristiques biologiques', *Bull. OEPP* 9:187-204.
- Perrier A. (1989), 'Espace cultivé – Climat et production de biomasse végétale', Chaire de Bioclimatologie, Cours de 1^o année à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Phinney D. E. and G. K. Arp (1979), 'Emissivity corrections for satellite-derived radiometric data', Lockheed Tech. Memo. N° LEC12394, Houston, TX, 19p.
- Press W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling (1986), *Numerical Recipes – The art of scientific computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 818p.
- Prévo L. (1985), 'Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application à la télédétection. Validation sur un couvert de Maïs', Thèse de doctorat de l'Univ. Paris VI, 178p.
- Promes P. M., T. J. Jackson and P. E. O'Neill (1988), 'Significance of agricultural row structure on the microwave emissivity of soils', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 26(5):580-589.
- Rees W. G. (1990), *Physical principles of remote sensing*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Reutov E. A. and A. M. Shutko (1992), 'Estimation of the depth to a shallow water-table using microwave radiometry', *Int. J. Remote Sens.* 13(12):2223-2232.
- Rondeaux G. et G. Guyot (1990), 'Polarisation de la lumière par les couverts végétaux: possibilités d'application agronomiques', *J. Can. de Teled.* 16:32-41.
- Ross J. K. and Marshak A. L. (1987), 'Calculation of the canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method', *Remote Sens. Environ.* 24:213-225.
- Saatchi S. and U. Wegmüller (1992), 'Modeling and measurements of microwave emission and backscattering from bare soil surfaces', *Proceedings of the IGARS'92, Houston, Texas.*
- Schmugge T. J. (1976), 'Preliminary results from the March 1975 soil moisture flight', *NASA X-913-76-216*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md.
- Schmugge T. J. and B. J. Choudhury (1980), 'Comparison of radiative transfer models for predicting the microwave emission from soils', *Radio Science* 16:927-938.
- Schmugge T. J., P. E. O'Neill and J. R. Wang (1986), 'Passive microwave soil moisture research', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 24:12-22.
- Schmugge T., T. J. Jackson and J. R. Wang (1991), 'Passive microwave remote sensing of soil moisture: results from HAPEX, FIVE and MONSOON 90', *Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing'*, Courchevel, ESA SP-319.
- Seguin (1987), 'Température de surface et bilan hydrique', *Acte de la sem. de Monétier-les-Bains, vol.II*, INRA Paris.
- Skou N. (1989), *Microwave radiometer system: design and analysis*, Artech House, Inc., Norwood.
- Smith E. K. (1982), 'Centimeter and millimeter wave attenuation and brightness temperature due to atmospheric oxygen and water vapor', *Radio Science* 17:1455-1464.
- Soer G. J. R. (1977), 'The Tergra model, a mathematical model for the simulation of the diurnal behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration', *NIWARS Publ.* 46, Delft, The Netherlands.
- Srivastav S. K. and R. P. Singh (1991), 'Microwave radiometry of snow-covered terrains', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 12(10):2117-2131.
- Stogryn A. (1974), 'Electromagnetic scattering by random dielectric constant fluctuations in a bounded medium', *Radio Science* 9(5):509-518.
- Surdyk S. and M. Fily (1991), 'Comparison between the observed microwave spectral signatures over the Antarctic ice sheet and a snow emissivity model', *Proceedings of the 5th International Colloquium 'Physical Measurements and Signature in Remote Sensing'*, Courchevel, ESA SP-319.
- Taconet O., T. N. Carlson, R. Bernard and D. Vidal-Madjar (1986), 'Evaluating of a surface vegetation model using satellite infrared surface temperatures', *J. of Clim. and Applied Meteor.* 26:107-117.
- Thibaut P., Y. H. Kerr, M. Avignon, J. C. Magnan, B. Le Stradic and F. Castanie (1990), 'Application of aperture analysis in passive microwave remote sensing', *IGARSS'90*, College Park, Maryland.
- Townshend J. R. G., B. J. Choudhury, L. Giddings, C. O. Justice, S. D. Prince and C. J. Tucker (1990), 'Comparison of data from the scanning multifrequency microwave radiometer (SMMR) with data from the advanced very high resolution radiometer (AVHRR) for terrestrial environmental monitoring: an overview', *Int. J. Remote Sensing* 10(10):1687-1690.
- Tsang L. and J. A. Kong (1975), 'The brightness temperature of a half space random medium with non uniform temperature profile', *Radio Science.* 10:1025-1033.
- Tsang L. and J. A. Kong (1976), 'Thermal microwave emission from half space random media', *Radio Science.* 11:599-609.

- Tsang L. and J.A. Kong (1977), 'Theory for thermal microwave emission from a bounded medium containing spherical scatterers', *J. Appl. Phys.*, 48:3593-3599.
- Tsang L., J. A. Kong, E. Njoku, D. H. Staelin and J. W. Waters (1977), 'Theory for microwave thermal emission from a layer of cloud or rain', *IEEE Trans. Antennas. and Propag.* 25:650-657.
- Tsang L. and J. A. Kong (1980), 'Thermal microwave emission from a three-layer random medium with three dimensional variations', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 18:212-216.
- 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., M. C. Kubacsi and J. A. Kong (1981), 'Radiative transfer theory for active remote sensing of a layer of small ellipsoidal scatterers', *Radio Science* 16:321-329.
- Tsang L. and R. W. Newton (1982), 'Microwave emissions from soils with rough surfaces', *J. of Geophys. Res.* 87:9017-9024.
- Tsang L., J. A. Kong and T. S. Shin (1985), *Theory of microwave remote sensing*, Wiley-Interscience Publications, New York.
- Tsang L. and K. H. Ding (1991), 'Polarimetric signatures of a layer of random nonspherical discrete scatterers overlying a homogeneous half-space based on first- and second-order vector radiative transfer theory', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 29:242-253.
- Tsang L. (1991), 'Polarimetric passive microwave remote sensing of random discrete scatterers and rough surface', *J. of Electr. Waves and Appl.* 5:41-57
- Tsang L., J. A. Kong, Z. Chen, K. Pak and C. Hsu (1993), 'Theory of microwave scattering from vegetation based on the collective scattering effects of discrete scatterers', soumis dans les *Proceedings of the ESA/NASA International workshop on Passive Microwave Remote Sensing research related to Land-Atmosphere Interactions*, January 11-15, 1993, S^t Lary, France.
- Tucker C. J. (1992), 'Relating SMMR 37GHz polarization difference to precipitation and atmospheric carbon dioxide concentration: a reappraisal', *Int. J. Remote Sensing* 13:177-191
- Twomey S., H. Jacobowitz and H. B. Howell (1966), 'Matrix methods for multiple-scattering problems', *J. Atmos. Sci.* 23:289-296.
- Ulaby F. T., R.K. Moore and A.K. Fung (1981-1986), *Microwave Remote Sensing – Active and Passive*, Addison-Wesley Publishing Company, 1981-82 vol I, II; Artech House, vol III, 1986.
- Ulaby F. T., M. C. Dobson, D. R. Brunfeldt (1983a), 'Improvement of moisture estimation accuracy of vegetation-covered soil by combined active/passive microwave remote sensing', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 21(3):300-307.
- Ulaby F. T., M. Razani and M. C. Dobson (1983b), 'Effects of vegetation cover on the microwave radiometric sensitivity to soil moisture', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 21:51-61.
- Ulaby F. T. and Jedlicka R.P (1984), 'Microwave dielectric properties of plant materials', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 22:406-415.
- Ulaby F. T. et E. A. Wilson (1985), 'Microwave attenuation properties of vegetation canopies', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 23:746-753.
- Ulaby F. T., A. Tavakoli et T. B. A. Senior (1987), 'Microwave propagation constant for a vegetation canopy with vertical stalks', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 25:714-725.
- Ulaby F. T. and M. A. El-Rayes (1987), 'Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: dual-dispersion model', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens.* 25:550-557.
- Ulaby F. T., K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt and M. C. Dobson (1990), 'Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS)', *Int. J. Remote Sensing*, 12:1223-1253.

- Ustin S. L., S. N. Martens and V. C. Vanderbilt (1991), 'Canopy architecture of a walnut orchard', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 29:843-851.
- Vanderschmidt E. (1993), 'Analyse et suivi de la contrainte hydrique chez le soja: mesure et comparaison des indicateurs en vue d'une modélisation des transferts hydriques', Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon.
- van de Griend A. A. and J. H. van Boxel (1989), 'Water and surface energy balance model with a multilayer canopy representation for remote sensing purposes', *Water Ressources Research* 25(5):949-971.
- Verhoef W. (1984), 'Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the Sail Model' *Remote Sens. Environ.* 16:125-141.
- Verstraete M. M. (1987), 'Radiation transfer in plant canopies: transmission of direct solar radiation and the role of leaf orientation', *J. of Geophys. Res.* 92:10,985-10,995.
- Wang J., J. Shiue, W. Gould, J. Fuchs, E. Hirschmann and W. Glazar (1980), 'System calibration of the 1.4GHz and 5GHz radiometers for soil moisture remote sensing', Ref: Nov.TM82043, Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland.
- Wang J. R. and B. J. Choudhury (1981), 'Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4GHz frequency', *J. Geophys. Res.* 86:5277-5282.
- Wang J. R., T. J. Schmugge, W. I. Gould, W. S. Glazar and J. E. Fuchs (1982), 'A multi-frequency radiometric measurement of soil moisture content over bare and vegetated fields', *Geophysical Research Letters* 9(4):416-419.
- Wang J. R., P. E. O'Neill, T. J. Jackson and E. T. Engman (1983), 'Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sens* 21:44-51.
- Wang J. R., J. C. Shiue, S. L. Chuang, R. T. Shin and M. Dombrowski (1984), 'Thermal microwave emission from vegetated fields: a comparison between theory and experiment', *IEEE Tr. Geosc. Remote Sensing* GE-22(2):143-149.
- Wang J. R. (1987), 'Microwave emission from smooth bare fields and soil moisture sampling depth', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 25:616-622.
- Waters J. W. (1976), 'Absorption and emission of microwave radiation by atmospheric gases', *Methods of experimental physics* (M.L. Meeks, ed.), Ch.12, part B, Radio Astronomy, Academic Press, New York, section 2.3.
- Wegmüller U., C. Mätzler and E. Njoku, 'Canopy opacity models', soumis dans les *Proceedings of the ESA/NASA International workshop on Passive Microwave Remote Sensing research related to Land-Atmosphere Interactions*, January 11-15, 1993, S^t Lary, France.
- Wigneron J.-P., J.-C. Calvet, Y. H. Kerr, A. Chanzy and A. Lopes, 'Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics', *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, in press, 1992.
- Wigneron J.-P., Y. H. Kerr, A. Chanzy and Y. Q. Jin, 'Inversion of surface parameters from passive microwave measurements over a soybean field', submitted for publication in *Remote Sens. Environ.* 1992.
- Wigneron J.-P., 'Retrieval of geophysical parameters from multifrequency passive microwave measurements over a soybean canopy', soumis dans les *Proceedings of the ESA/NASA International workshop on Passive Microwave Remote Sensing research related to Land-Atmosphere Interactions*, January 11-15, 1993, S^t Lary, France.
- Wilheit T. (1978), 'Radiative transfer in a plane stratified dielectric', *IEEE Tr. Geosc. Electron.* 16:134-143.
- Windsor E. P. and J. E. Charlton (1991), 'European development in microwave radiometry: 1978-1988', *Int. J. Remote Sensing* 12(8):1741-1751.

Yueh S. H., J. A. Kong, J. J. Jao, R. T. Shin and T. Le Toan (1992), 'Branching model for vegetation', *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30:390-402.

Zuniga M. and J. A. Kong (1980), 'Active remote sensing of random media', *J. Appl. Phys.* 51:74-79.

Zur B. and J. W. Jones (1981), 'A model for the water relations, photosynthesis, and expansive growth of crops', *Water Ressour. Res.* 17:311-320.

