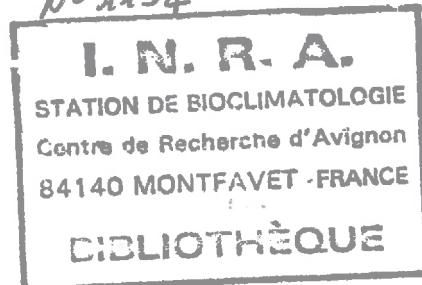


UNIVERSITE PARIS 7

10 AOUT 1987

THESE

No 1134



Présentée par
Maryline AUTRET

A H T H 8

Pour obtenir le titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS 7

Spécialité : METHODES PHYSIQUES EN TELEDETECTION

ETUDE THEORIQUE DE LA SENSIBILITE DU SIGNAL
RETRODIFFUSE EN HYPERFREQUENCE AUX PARAMETRES
CARACTERISTIQUES D'UN SOL AGRICOLE :
HUMIDITE ET RUGOSITE

Soutenue le 27 Avril 1987 devant le jury composé de :

Monsieur R. GENDRIN	Président
Monsieur J.C. BOLOMEY	Rapporteur
Monsieur J. LAVERGNAT	Rapporteur
Monsieur D. VIDAL-MADJAR	Examineur
Monsieur G. QUENTIN	Examineur

1874
STATE OF NEW YORK
IN SENATE
JANUARY 15, 1874
REPORT
OF THE
COMMISSIONERS OF THE LAND OFFICE
IN ANSWER TO A RESOLUTION
PASSED BY THE SENATE
MAY 10, 1873

A Prométhée,
qui, pour avoir donné le savoir aux hommes,
a souffert
presque autant que moi
pour en acquérir une parcelle.



TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES.....	5
REMERCIEMENTS.....	11
INTRODUCTION.....	15
CHAPITRE 1: Diffraction et diffusion d'une surface aléatoire.....	19
1.1 Introduction.....	19
1.2 Puissance reçue et coefficients de diffusion.....	22
1.3 Calcul de σ^0 à partir des mesures de la puissance moyenne.....	23
1.4 Diffusion d'une surface ondulée.....	24
1.4-1 Détermination des champs tangents.....	25
1.4-2 Champs diffusés et coefficients de diffusion.....	27
b) sous l'approximation de la phase stationnaire.....	27
a) sous l'approximation scalaire des champs.....	34
1.5 Application aux surfaces naturelles.....	43
ANNEXE 1-A : Développement de calculs intermédiaires.....	47
ANNEXE 1-B : Valeurs des facteurs de polarisation sous l'approximation de la phase stationnaire.....	49
ANNEXE 1-C : Valeurs des facteurs de polarisation sous l'approximation scalaire des champs.....	51
ANNEXE 1-D : Calcul de la composante cohérente du coefficient de diffusion.....	55
ANNEXE 1-E : Calcul intégral relatif aux moyennes d'ensemble.....	57
ANNEXE 1-F : Développement du calcul de la composante de σ^0 dûe aux termes de pentes.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63

CHAPITRE 2: Le dispositif expérimental.....	65
2.1 Introduction.....	65
2.2 Le site expérimental.....	66
2.3 Le Radar FM-CW ERASME.....	66
2.3-1 Principe de fonctionnement.....	66
2.3-2 Relation entre la distance de la cible et le spectre de puissance du signal reçu.....	69
2.4 Les antennes.....	72
2.5 Le porteur.....	75
2.6 Le matériel au sol.....	75
ANNEXE 2-A : Schéma de principe du Radar ERASME.....	79
ANNEXE 2-B : Plan de drainage du site de Sterlin.....	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	83
CHAPITRE 3: Le traitement des données Radar.....	85
3.1 Introduction.....	85
3.2 Etude du spectre.....	86
3.3 Recherche de l'altitude.....	90
3.4 Corrections de gains des antennes et de surface au sol.....	91
3.5 Repérage de la route suivie par le porteur.....	92
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93
CHAPITRE 4: Les paramètres de sol.....	95
4.1 Introduction.....	95
4.2 Paramètres caractérisant la rugosité de la surface.....	95
4.3 Humidité de surface et constante diélectrique.....	99
4.3.1 Choix du modèle.....	99
4.3.2 Formulation du modèle.....	100
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	107
CHAPITRE 5: Vérification expérimentale du modèle.....	109
5.1 Introduction.....	109
5.2 Méthodes numériques utilisées et limites de validité.....	111
5.3 Résultats obtenus.....	114

5.4 Interprétation.....	121
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	125
CHAPITRE 6: Simulations sur terrains plats.....	127
6.1 Introduction.....	127
6.2 Etude de la variation relative de σ°	128
6.2.1 Par rapport à la longueur de corrélacion de la surface.....	129
6.2.2 Par rapport à l'écart-type des hauteurs.....	133
6.2.3 Par rapport à l'humidité.....	134
6.3 Influence de la configuration radar sur ces variations relatives.....	138
6.4 Etude du rapport $\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	140
6.5 Discussion et sélection des paramètres déterminants.....	145
6.5-1 En vue d'une mesure de la rugosité.....	146
6.5-2 En vue d'une mesure de l'humidité.....	148
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	149
CHAPITRE 7: Simulations sur les champs en pentes.....	151
7.1 Introduction.....	151
7.2 Analyse des résultats de simulation.....	152
7.3 Influence sur les résultats précédents.....	153
CONCLUSION GENERALE.....	161
ANNEXES: Résultats des calculs de simulation.....	165
ANNEXE I : Etude de la sensibilité de σ° à une variation relative des paramètres de surface.....	167
ANNEXE II : Etude du rapport $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$	193
ANNEXE III: Etude du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$	209
ANNEXE IV : Etude de la sensibilité de σ° à une variation relative de l'angle d'incidence.....	213
ANNEXE V : Etude de la sensibilité du rapport $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ à une variation de l'angle d'incidence.....	221

ANNEXE VI : Etude de la sensibilité de $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$
à une variation de l'angle d'incidence..... 225

BIBLIOGRAPHIE..... 229

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	: Illustration qualitative de la diffusion d'un sol rugueux.....	20
FIGURE 1.2	: Relation qualitative entre la rugosité du sol et la figure de diffusion.	
	(a) Cas d'une surface parfaitement lisse.....	20
	(b) Cas d'une surface moyennement rugueuse.....	20
	(c) Cas d'une surface très rugueuse.....	20
FIGURE 1.3	: Géométrie du problème de la diffusion de surface (d'après Ulaby & al.,1981).....	25
FIGURE 2.1	: Schéma de principe simplifié du diffusiomètre ERASME.....	68
FIGURE 2.2	: (a) Fréquences émise et reçue pour une cible ponctuelle ayant un retard T.....	69
	(b) Fréquence relative en sortie.....	69
FIGURE 2.3	: Géométrie nominale de la mesure.....	70
FIGURE 2.4	: (a) Diagramme de l'antenne de réception en polarisation HH. Représentation en coordonnées rectangulaires.....	73
	(b) Diagramme de l'antenne de réception en polarisation HH. Représentation en coordonnées polaires.....	74
FIGURE 3.1	: Exemple d'un spectre obtenu avec le radar ERASME.....	86
FIGURE 3.2	: Effet de l'incidence sur l'allure du spectre.	
	(a) Spectre obtenu avec une incidence de 44°77.....	88
	(b) Spectre obtenu avec une incidence de 0°98.....	88
FIGURE 3.3	: Effet de la distance sur l'allure du spectre.	
	(a) Spectre obtenu à une altitude proche de 450 mètres.....	89

(b) Spectre obtenu à une altitude supérieure à 500 mètres.....	89
FIGURE 4.1 : Profil de la surface mesuré expérimentalement sur le site de Sterlin.....	97
FIGURE 4.2 : Fonction d'autocorrélation de la surface obtenue à partir du profil mesuré.....	98
FIGURE 4.3 : Comparaison entre la constante diélectrique calculée à l'aide du modèle empirique de Wang & Schmugge et les valeurs mesurées à 5 GHz.....	101
FIGURE 5.1 : Comparaison entre les valeurs théoriques obtenues avec l'approximation de la phase stationnaire et celles mesurées avec le radar ERASME.....	110
FIGURE 5.2 : Comparaison entre la fonction de corrélation théorique et celle établie à partir des mesures expérimentales sur le site de Sterlin.....	112
FIGURE 5.3 : Géométrie d'une modulation à grande échelle.....	113
FIGURE 5.4 : Tracé de différentes fonction d'autocorrélation....	115
FIGURE 5.5 : Effet de la forme de la fonction de corrélation sur l'allure de la courbe $\sigma^0(\theta)$	115
FIGURE 5.6 : Résultats expérimentaux obtenus avec le radar ERASME, en polarisation HH, sur le site de Sterlin.	
(a) Le 26 Mars 1984 - $W_c = 0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	116
(b) Le 9 Avril 1984 - $W_c = 0.32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	116
(c) Le 17 Avril 1984 - $W_c = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	116
FIGURE 5.7 : Comparaison entre les valeurs théoriques obtenues avec le modèle de simulation et celles mesurées sur le site expérimental, en polarisation HH.	
(a) Le 17 Avril 1984 - $W_c = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	118
(b) Le 18 Avril 1984 - $W_c = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	118
FIGURE 5.8 : Résultats expérimentaux obtenus avec le radar ERASME, en polarisation VV, sur le site de Sterlin.	
(a) Le 9 Avril 1984 - $W_c = 0.32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	119
(b) Le 13 Avril 1984 - $W_c = 0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	119
(c) Le 18 Avril 1984 - $W_c = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	119

FIGURE 5.9 : Comparaison entre les valeurs théoriques obtenues avec le modèle de simulation et celles mesurées sur le site expérimental, en polarisation VV.

- (a) Le 17 Avril 1984 - $Wc = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 120
- (b) Le 18 Avril 1984 - $Wc = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 120

FIGURE 5.10 : Valeurs de la pente, en dB, correspondant à $\sigma^\circ(11^\circ) - \sigma^\circ(25^\circ)$, en fonction de l'humidité. Les points représentent les valeurs expérimentales et la droite est le résultat de la régression linéaire sur l'ensemble des points..... 122

FIGURE 6.1 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

- (a) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$ 130
- (b) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$ 130
- (c) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$ 130

FIGURE 6.2 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

- (a) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$ 131
- (b) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$ 131
- (c) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$ 131

FIGURE 6.3 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

- (a) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$ 132
- (b) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$ 132
- (c) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$ 132

FIGURE 6.4 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimée en cm.

- (a) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$ 135
- (b) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$ 135
- (c) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$ 135

FIGURE 6.5 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimée en cm.

- (a) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$ 136

(b) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$	136
(c) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$	136

FIGURE 6.6 : Variation relative de σ° , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimée en cm.

(a) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$	137
(b) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$	137
(c) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$	137

FIGURE 6.7 : Allure du rapport des coefficients de Fresnel, R_{hh} / R_{vv} , en fonction de θ , pour trois valeurs de l'humidité de surface ($W_c = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $W_c = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

(a) Bande S.....	141
(b) Bande C.....	141
(c) Bande X.....	141

FIGURE 6.8 : Allure du rapport des coefficients de diffusion $\sigma_{hh}^\circ / \sigma_{vv}^\circ$, en fonction de θ , pour trois valeurs de l'humidité de surface ($W_c = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $W_c = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), avec $s = 1.07 \text{ cm}$ et $L = 9 \text{ cm}$.

(a) Bande S.....	143
(b) Bande C.....	143
(c) Bande X.....	143

FIGURE 6.9 : Valeurs du rapport $\sigma_{hh}^\circ / \sigma_{vv}^\circ$, obtenues à l'aide des données expérimentales, en fonction de θ

144

FIGURE 6.10 : Variation en puissance de $\sigma^\circ(20^\circ)/\sigma^\circ(40^\circ)$, en fonction de l'écart-type des hauteurs pour différentes valeurs de l'humidité de surface.

(a) Bande S.....	147
(b) Bande C.....	147
(c) Bande X.....	147

FIGURE 7.1 : Géométrie de la rétrodiffusion

(a) Sur un plan horizontal.....	151
(b) Sur un plan incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale.....	151

FIGURE 7.2 : Variation relative de $\sigma^0(\theta)$, en dB, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$,
L = 9 cm et différentes valeurs de l'écart-type des hauteurs (s = 0.18 cm, 0.63 cm, 1.07 cm et 3 cm),
en polarisation HH, bande S..... 153

FIGURE 7.3 : Variation relative de $\sigma^0(\theta)$, en dB, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$,
L = 9 cm et différentes valeurs de l'écart-type des hauteurs (s = 0.18 cm, 0.63 cm, 1.07 cm et 3 cm),
en polarisation VV, bande S..... 155

FIGURE 7.4 : Variation relative de $\sigma^0(20^\circ)/\sigma^0(40^\circ)$ en fonction
de s, exprimée en puissance, pour les trois bandes
de fréquence (S, C, X). Polarisation HH, L = 9 cm
et $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 158

FIGURE 7.5 : Variation relative de $\sigma^0(20^\circ)/\sigma^0(40^\circ)$ en fonction
de s, exprimée en puissance, pour les trois bandes
de fréquence (S, C, X). Polarisation HH, L = 18 cm
et $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 159

REMERCIEMENTS

*"Ils me réduiraient à crier merci"
Rousseau*

Je remercie :

M. Daniel VIDAL-MADJAR, directeur de cette thèse, pour ses remarques pertinentes mais aussi pour avoir essayé de m'apprendre la philosophie de "Plic et Ploc",

M. Roger GENDRIN, directeur de la formation "Méthodes physiques en télédétection", d'avoir accepté d'être le président de mon jury et pour toutes les questions que je sais déjà qu'il me posera lors de la soutenance,

M. Jean-Charles BOLOMEY, M. Jacques LAVERGNAT et M. Gérard QUENTIN de m'avoir fait l'honneur et le plaisir de participer au jury de cette thèse,

M. Isaac REVAH de m'avoir accueillie, en Mars 1984, au sein du Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et Planétaire,

M. René BERNARD pour sa patience et ses conseils en physique et surtout en informatique.

Mes remerciements s'adressent également à M. Claude MONET, M. Michel GAUTHIER et M. Jean-Claude LE GOFF qui m'ont permis de découvrir les joies de l'hélicoptère ainsi qu'à M. François PAPY et M. Christophe MAITRE pour leur aide précieuse sur le terrain durant l'expérience du Printemps 1984.

Enfin, toute ma reconnaissance va à M. Jean KLEIN et M. Bernard DIU qui ont conforté mon choix et mon intérêt pour la physique.

Cette liste n'est pas exhaustive. Je laisse à chacune et à chacun la liberté d'y ajouter son nom, ne serait-ce que pour avoir pris la peine d'ouvrir ce manuscrit.

Je remercie, de tout coeur, mes parents pour leur présence et leur confiance tout au long de mes études. Je n'oublie pas que, sans leur aide, ce travail ne serait pas.

INTRODUCTION

*"Tout commence en ce monde et tout
fini ailleurs"*

Hugo

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la préparation des futures missions satellitaires, de type ERS (Earth Research Satellite), à applications terrestres. Elle a été menée au sein du groupe Télédétection du Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et Planétaire (C.R.P.E.). Elle porte sur la télédétection active en hyperfréquence, aéroportée ou spatiale, et sur ses applications à la physique des sols.

La mise en orbite de ERS-1, premier de la génération, est prévue vers 1990. Il sera équipé d'un ensemble complet d'instruments radar conçus pour observer la structure des vents et des vagues à la surface des océans et pour fournir des images à haute résolution de la surface de la terre. La charge utile sera composée, en particulier, d'un radar à synthèse d'ouverture avec deux modes d'exploitation : mode imageur total (mode SAR) et mode imageur échantillonné (mode "vagues") et d'un diffusiomètre vents (mode "vents"). Ces deux détecteurs actifs fonctionneront en hyperfréquence, en bande C (5.3 GHz), avec des angles d'incidence élevés (20° à 25° pour le SAR, 20° à 60° pour le diffusiomètre) et en polarisation verticale (VV).

Cette étude vise à estimer, dans un premier temps, s'il sera possible d'utiliser les résultats des mesures obtenues avec l'un ou l'autre de ces capteurs, pour connaître l'humidité à la surface des sols.

En effet, l'analyse du signal rétrodiffusé en hyperfréquence peut fournir des renseignements intéressants sur la rugosité, la texture, la couverture végétale et le contenu en eau de la surface des sols. Or, la connaissance de l'humidité de surface des sols a de nombreuses applications, en particulier l'évaluation du bilan hydrique et l'organisation des travaux agricoles. Plusieurs équipes (Ulaby, U.S.A., 1978; Le Toan, France, 1982; Bernard & al., France, 1982) ont déjà montré qu'il était possible de mesurer le contenu en eau des sols à l'aide d'un radar hyperfréquence. Dans le cas où l'on ne dispose que d'une seule fréquence et d'une seule polarisation pour le capteur (comme pour ERS-1), les points de fonctionnement optimaux sont connus. Il s'agit d'une fréquence dans la bande C (autour de 5 GHz) avec une direction d'observation ayant une faible incidence (<20°). Dans ces conditions, on minimise l'effet de la rugosité de la surface des sols car les incidences allant de 10° à 20° correspondent à une transition entre les deux causes physiques responsables de la rétrodiffusion : de type spéculaire pour les faibles angles et de type diffusion pour les grands angles.

Aucun des capteurs actifs d'ERS-1 ne fonctionne dans ces conditions car, bien qu'ils opèrent dans la bande de fréquence adéquate (5.3 GHz), leurs angles d'incidence sont différents des conditions optimales. Cependant, le fait que l'angle de visée, sur le diffusiomètre, prenne des valeurs élevées, présente un avantage certain : grâce à l'augmentation de la surface observée, on améliore le bilan de liaison de l'instrument et il est donc possible d'obtenir des mesures plus précises et plus aisément quantifiables.

Ainsi, après avoir regardé l'information qu'il sera possible d'extraire des données obtenues avec une telle configuration (Bande C, polarisation VV, angle d'incidence $> 20^\circ$), nous élargirons notre champ d'investigations à des configurations différentes. Ceci, dans le but de proposer d'autres caractéristiques pour une éventuelle charge utile destinée à l'étude des sols, lors des futures missions satellitaires.

Cette étude sera théorique, c'est-à-dire que nous aurons recours aux simulations de données. Ces dernières peuvent, en effet, nous aider à comprendre la façon dont les micro-ondes sont rétrodiffusées par une surface.

Il existe actuellement plusieurs modèles théoriques qui simulent le processus de rétrodiffusion et ils apportent d'excellents moyens pour décrire le signal reçu par un diffusiomètre. Celui que nous utiliserons dans cette étude a été testé, entre autres, par Mo & al. (1984) et Fung & Eom (1981). Il est basé sur la méthode de Kirchhoff qui permet une formulation scalaire approchée des champs électrique et magnétique diffusés à l'interface de deux milieux supposés homogènes. Il s'applique aux sols nus, c'est-à-dire sans couverture végétale. Nous utiliserons ce modèle pour évaluer l'influence de la configuration radar sur la section efficace de rétrodiffusion. En particulier, nous proposerons l'utilisation de fréquences dans la bande S (2.25 GHz) et dans la bande X (9 GHz). Ces valeurs ont été choisies car elles correspondent à celles accessibles, dans l'immédiat, pour les radars opérationnels embarqués à haute altitude. Nous étudierons simultanément l'effet de la polarisation HH et de la polarisation VV, pour des angles d'incidence compris entre 20° et 40° .

Pour chacune de ces configurations, nous testerons la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation relative des paramètres de surface (humidité et rugosité). Le but de cette étude est d'évaluer la précision avec laquelle nous pourrions extraire ces paramètres du signal rétrodiffusé et d'en déduire une configuration optimale qui minimise l'effet de l'un aux dépens de l'autre.

Les bases théoriques de la diffusion des surfaces aléatoires nécessaires à l'établissement du modèle de simulation seront exposées dans le premier chapitre. Nous présenterons, en détail, deux approximations possibles pour calculer le champ diffusé par une surface aléatoire :

l'approximation de la phase stationnaire et l'approximation scalaire des champs, ainsi que leurs limites de validité.

Cependant, avant d'aborder plus en détail l'étude des résultats obtenus par simulation, il est utile de vérifier si les valeurs calculées à l'aide du modèle rendent effectivement compte du processus de rétrodiffusion engendré par les surfaces naturelles. Dans ce but, nous nous référerons à des données expérimentales recueillies sur le terrain. Nous présenterons donc, dans le deuxième chapitre, le site où, au printemps 1984, s'est déroulée l'expérience ainsi que le matériel utilisé pour rassembler les données. Il y sera principalement question du radar bande C ERASME (Etude RADAR des Sols et de la MER) développé au C.R.P.E. avec l'aide financière du Centre National d'Etude Spatiale (C.N.E.S.). C'est un instrument monofréquence (5.3 GHz, correspondant à la fréquence du SAR de ERS-1) qui peut opérer à plusieurs angles d'incidence et avec diverses configurations de polarisation. L'opérationnalité d'ERASME a fait l'objet de plusieurs vérifications avant que celui-ci ne soit utilisé pour l'expérience dont il sera question ici.

Le troisième chapitre sera consacré au traitement des données radar. Ce traitement permet d'obtenir la valeur de la section efficace de rétrodiffusion à partir des données brutes.

Dans le quatrième chapitre, nous définirons les paramètres de sol nécessaires à l'utilisation du modèle de simulation ainsi que leur acquisition expérimentale. Nous verrons aussi comment l'humidité de surface peut être reliée à la constante diélectrique et présenterons, dans ce contexte, le modèle empirique développé par Wang & al. (1980).

Le cinquième chapitre fera l'objet de la vérification expérimentale du modèle de simulation. Après avoir décrit les méthodes numériques utilisées et leur limite de validité, nous présenterons les résultats obtenus.

L'étude de la sensibilité des paramètres de sol selon la configuration radar sera amorcée au sixième chapitre. Il y sera question de la simulation sur terrains plats. Les simulations seront effectuées pour plusieurs types de surfaces. Différentes valeurs de l'humidité et de la rugosité (exprimée sous forme de longueur de corrélation et d'écart-type des hauteurs de la surface) seront choisies en se référant, d'une part à celle présentées dans la littérature et d'autre part, à celle obtenues lors des mesures expérimentales sur le terrain. Une discussion sur la configuration optimale en vue d'une mesure de la rugosité ou de l'humidité conclura ce chapitre.

Nous envisagerons dans le septième chapitre la simulation sur les champs en pente, c'est-à-dire les surfaces qui présentent une inclinaison par rapport au géoïde moyen. En effet, l'imagerie radar rapporte toutes les mesures effectuées sur un sol à un même plan horizontal. Il devient dès lors difficile de faire la part entre les variations du signal dues à une modification des paramètres de sol et celles

correspondant à une différence d'incidence locale. Ce chapitre vise à estimer l'erreur commise, lors de la comparaison d'images radar, lorsque l'inclinaison du sol varie d'une scène à l'autre. Pour cela, nous étudierons la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation de l'angle d'incidence et l'influence qu'elle peut avoir sur les résultats du chapitre précédent.



Chapitre 1

DIFFRACTION ET DIFFUSION D'UNE SURFACE ALEATOIRE

"toute théorie n'est bonne qu'à condition de s'en servir pour passer outre"

Gide

1.1 INTRODUCTION

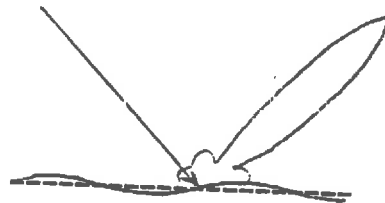
L'essentiel de la démarche, présentée dans ce premier chapitre, est inspirée du livre de Ulaby & al. [1]. Nous avons cependant pensé qu'il serait utile de faire figurer ces quelques pages en guise d'introduction à ce travail, dans le but de rendre l'ouvrage le plus complet possible et de permettre au lecteur d'y trouver les références nécessaires à l'interprétation des résultats de simulation.

Le problème de la réflexion et de la transmission d'une onde plane sur une interface plane entre deux milieux homogènes peut être résolu de façon exacte. Lorsque l'interface est irrégulière, on a recours à des solutions approchées permettant l'intégration des champs électrique et magnétique vectoriels sur un élément de surface déterminé. Mais ces approximations ne sont envisageables que lorsque les dimensions de l'élément diffusant sur l'interface sont soit beaucoup plus petites, soit beaucoup plus grandes que la longueur d'onde de l'onde incidente.

Lorsqu'une onde électromagnétique heurte une surface limitant deux milieux semi-infinis, une partie de l'énergie incidente est rediffusée vers le milieu supérieur et le reste est transmis dans le milieu inférieur. Dans le cas particulier où le milieu inférieur est homogène, ou considéré comme tel, on se trouve face au problème de la diffusion de surface puisque la diffusion se situe uniquement à la limite de la surface. Une illustration qualitative de la diffusion d'un sol rugueux est montrée sur la figure 1.1.

Onde incidente

Figure de diffusion



Lisse

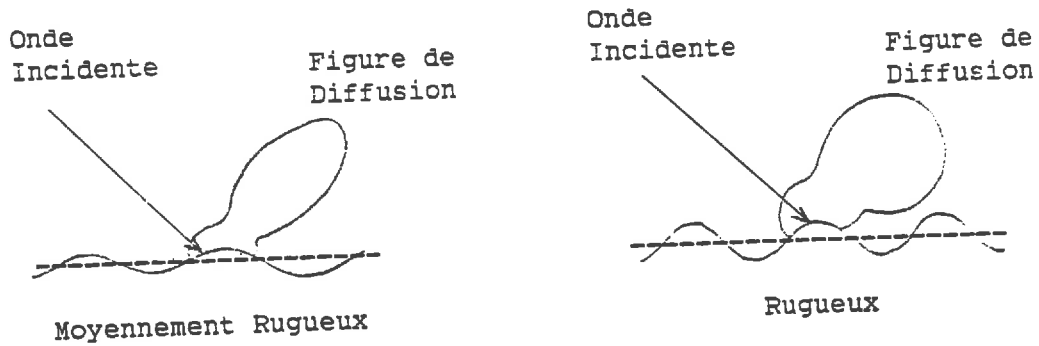


FIGURE 1.1

On remarque que l'amplitude de la diffusion suivant la direction spéculaire décroît alors que la rétrodiffusion augmente lorsque la surface tend à devenir plus rugueuse.

Un radar monostatique (transmission et réception localisées au même endroit) reçoit la composante rétrodiffusée de l'énergie diffusée. Ainsi, un radar monostatique ne devrait, théoriquement, recevoir aucun signal retour d'une surface lisse (spéculaire) sauf à l'incidence normale. Qualitativement, la relation entre la rugosité du sol et la diffusion de la surface peut être illustrée par la figure 1.2.

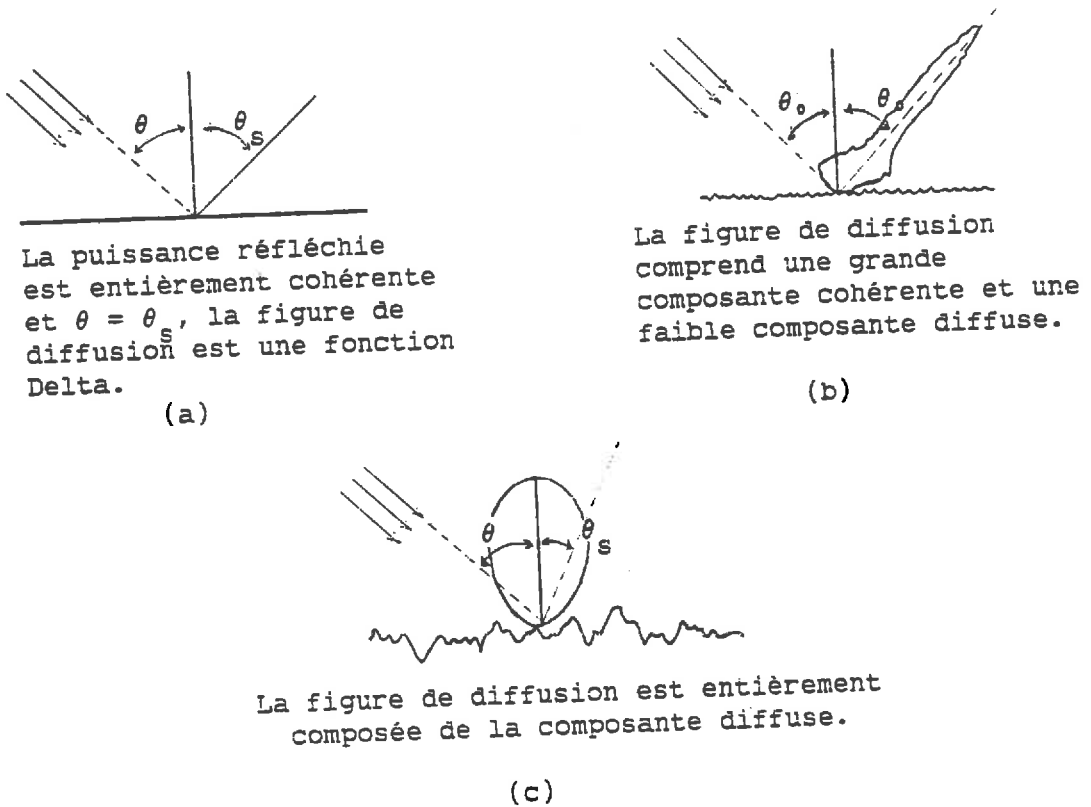


FIGURE 1.2
(D'après Ulaby & al., 1981)

Lorsque la rugosité de la surface augmente, la composante cohérente (spéculaire) devient négligeable et finit par être complètement inexistante dans le cas d'une surface très rugueuse (fig. 1.2c).

Une surface donnée qui peut sembler très rugueuse pour les ondes optiques, apparaîtra très lisse pour les micro-ondes. Ceci est dû au fait que le degré de rugosité d'une surface aléatoire est caractérisé en terme de paramètres statistiques qui sont mesurés en unités de longueur d'onde.

Les deux paramètres fondamentaux, communément utilisés pour caractériser la rugosité de surface, sont l'écart type des variations de la hauteur de la surface et la longueur de corrélation.

On notera s l'écart-type des hauteurs et L la longueur de corrélation de la surface. Cette dernière est définie comme étant la valeur pour laquelle :

$$\rho(L) = 1/e \approx 0.37$$

où ρ est la fonction de corrélation de la surface.

Une approche du problème consiste à assimiler la diffusion de la surface au rayonnement d'une antenne, en faisant jouer à la longueur de corrélation de la surface le rôle de la longueur d'antenne. Dès lors, il devient possible de prévoir la forme générale de la figure de diffraction en considérant le diagramme de rayonnement de l'antenne. Ainsi plus la longueur de corrélation de la surface est grande, plus la surface est lisse et plus la forme du signal rétrodiffusé est directionnelle. En effet, la longueur de corrélation permet d'estimer la dépendance statistique de deux points sur la surface. Si deux points sont séparés par une distance horizontale supérieure à L , alors leurs hauteurs peuvent être considérées comme statistiquement indépendantes l'une de l'autre. Dans le cas extrême d'une surface parfaitement lisse, chaque point de la surface est corrélé à tout autre point avec un coefficient de corrélation égal à 1, et dans ce cas, $L = \infty$. D'autre part, plus l'écart type des hauteurs de la surface est grande et plus la surface est rugueuse.

On considérera par la suite que le sol se comporte comme un diélectrique homogène. Cette hypothèse est discutable dans la mesure où elle ne tient pas compte de la diffusion de volume. Et, bien que les valeurs d'humidité de surface limitent la longueur de pénétration des ondes à quelques millimètres, il n'est peut-être pas exact de considérer que le phénomène de diffusion observé provient uniquement d'une diffusion de surface. Il ne rentre cependant pas dans le cadre de cette étude de développer un nouveau modèle de la section efficace de rétrodiffusion. Aussi, nous adopterons l'hypothèse du diélectrique homogène, comme il est couramment fait dans la littérature, mais sans oublier les limitations qu'elle impose dans la représentativité des résultats.

1.2 LA PUISSANCE RECUE ET LES COEFFICIENTS DE DIFFUSION

Lorsqu'un radar voit une cible isolée de section efficace σ , la puissance reçue par le récepteur est donnée par [2]:

$$(1-1) \quad P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \sigma \frac{A_r}{4\pi R^2}$$

avec P_t : puissance transmise (W)

G_t : gain en puissance de l'antenne de transmission

σ : section efficace radar de la cible (m²)

R : distance entre le radar et la cible (m)

A_r : ouverture de l'antenne de réception (m²)

Dans le cas d'une cible étendue, l'équation radar s'écrit:

$$(1-2) \quad P_r = \iint_{A_0} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3 R^4} dS$$

λ : longueur d'onde incidente

G_r : gain en puissance de l'antenne de réception

σ^0 (m²/m²) est la section efficace de diffusion moyenne par unité de surface et A_0 l'aire illuminée. Dans le cas général, σ^0 est fonction des paramètres du système (fréquence, polarisation, angle de visée) et des paramètres de la cible (rugosité de la surface et permittivité). Pour expliciter la dépendance avec la polarisation, on peut écrire l'équation précédente sous la forme:

$$(1-3) \quad P_{pq} = \iint_{A_0} \frac{P_{qt} G_{qt} G_{pr} \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{pq}^0 dS$$

avec la convention suivante:

p \Leftrightarrow polarisation reçue
q \Leftrightarrow polarisation transmise

1.3 CALCUL DE LA SECTION EFFICACE DE RETRODIFFUSION A PARTIR DES MESURES DE LA PUISSANCE MOYENNE

On remarque que pour établir σ° à partir des mesures de P_t et P_r , il est nécessaire de connaître les diagrammes d'antennes et la distance R et ensuite de procéder à l'inversion.

Dans le cas particulier où σ° peut être pris constant sur la largeur du faisceau d'antenne, on a

$$(1-4) \quad \sigma^\circ \approx \frac{\pi P_r}{I_0 P_t}$$

avec

$$(1-5) \quad I_0 = \iint_{A_0} \frac{1}{R^2} G_{tn} G_{rn} dS$$

et

$$(1-6) \quad G_{tn}, G_{rn} = \frac{G_t}{G_{t_0}}, \frac{G_r}{G_{r_0}} \text{ respectivement}$$

où G_{t_0} et G_{r_0} sont les valeurs maximales de G_t et G_r

(1-5) définit la surface pondérée associée aux gains des antennes.

Le signal réfléchi par une surface de rugosité moyenne est composé d'une partie, dite cohérente, qui correspond à la réflexion spéculaire et d'une partie, dite incohérente, représentant la réflexion diffuse. Ainsi, avec une antenne à faisceau étroit, l'équation (1-4) peut fournir une bonne estimation de σ° pour des angles d'incidence près de la verticale. A l'incidence normale, il est possible d'obtenir une composante cohérente significative dans le signal radar retour à moins que l'écart-type des hauteurs de la surface soit plus grand qu'un quart de la longueur d'onde incidente. Dans ce cas, on observe un changement significatif de la valeur moyenne de la puissance mesurée selon que les observations sont faites à la normale ou légèrement en dehors de la normale à la surface. Ceci entraîne une forte variation de σ° en fonction de θ . Il n'est donc plus constant, à l'intérieur d'une porte radar, sur l'élément de surface dS .

Dans ce cas, l'équation (1-4) n'est plus satisfaisante pour estimer σ° . On ne peut plus, en effet, le sortir de l'intégrale.

1.4 DIFFUSION D'UNE SURFACE ONDULEE

Parmi les nombreuses théories de la diffusion de surface, celle de Kirchhoff ou d'optique physique est la plus largement utilisée [3]. Cette théorie est applicable aux surfaces ayant de faibles ondulations et où la dimension horizontale moyenne est grande par rapport à la longueur d'onde incidente. On peut supposer que le champ total en tout point de la surface peut être calculé comme si l'onde incidente se heurtait à un plan infini tangent à ce point. Ceci est l'hypothèse de base de la méthode de Kirchhoff. Malgré cela, l'évaluation analytique reste difficile. Il est donc nécessaire d'établir d'autres hypothèses simplificatrices pour obtenir des solutions analytiques. Deux types d'approximations peuvent être considérés:

(1) L'approximation de la phase stationnaire pour des surfaces ayant un grand écart-type des hauteurs [4],[5].

(2) L'approximation scalaire des expressions du champ pour des surfaces de faible pente et avec un écart-type des hauteurs petit ou moyen.

La formulation vectorielle de la méthode de Kirchhoff, [6],[7],[8],[9], est basée sur le théorème de Green stipulant que le champ diffusé en tout point d'une région sans source, entourée par une surface fermée, peut être exprimé en terme de champ tangent à la surface. Ce qui, mathématiquement, s'écrit sous la forme:

$$(1-7) \quad \vec{E}^s = K \hat{n}_s \times \int [\hat{n} \times \vec{E} - \eta_s \hat{n}_s \times (\hat{n} \times \vec{H})] \exp(jk_s \vec{r} \cdot \hat{n}_s) ds$$

où le facteur temps $\exp(j\omega t)$ est sous-entendu.

avec $K = -jk_s \exp(-jk_s R_o) / (4\pi R_o)$, terme de propagation

\hat{n}_s : vecteur unitaire dans la direction diffusée

\hat{n} : vecteur unitaire normal à l'interface du milieu dans lequel la diffusion est considérée

η_s : impédance intrinsèque du milieu dans lequel \vec{E} est évalué

k_s : nombre d'onde du milieu dans lequel \vec{E} est évalué

R_o : distance entre le centre de l'aire illuminée et le point d'observation

\vec{E}, \vec{H} : champs électrique et magnétique totaux sur l'interface

L'intégrale sur l'élément dS se fait sur un plan infini tangent. L'équation (1-7) indique que lorsque les champs tangents, $\hat{n} \times E$ et $\hat{n} \times H$, sont établis, le champ diffusé peut être calculé.

1.4.1 DETERMINATION DES CHAMPS TANGENTS

Pour trouver les champs tangents sur l'interface, il est commode de travailler sur une structure locale de référence. Si on suppose que l'onde incidente s'écrit:

$$(1-8) \quad \vec{E}^i = \hat{a} E_0 \exp(-jk_1 \hat{n}_i \cdot \vec{r})$$

avec \hat{a} : vecteur unitaire de polarisation
 \hat{n}_i : vecteur unitaire du milieu incident
 k_1 : nombre d'onde dans le milieu 1

on peut définir une structure locale de référence, comme le montre la figure 1.3, avec les vecteurs unitaires suivants:

$$(1-9a) \quad \hat{t} = \hat{n}_i \times \hat{n}_1 / |\hat{n}_i \times \hat{n}_1|$$

$$(1-9b) \quad \hat{d} = \hat{n}_i \times \hat{t}$$

$$(1-9c) \quad \hat{n}_i = \hat{t} \times \hat{d}$$

où \hat{n}_1 est le vecteur unitaire normal à l'interface du milieu 1

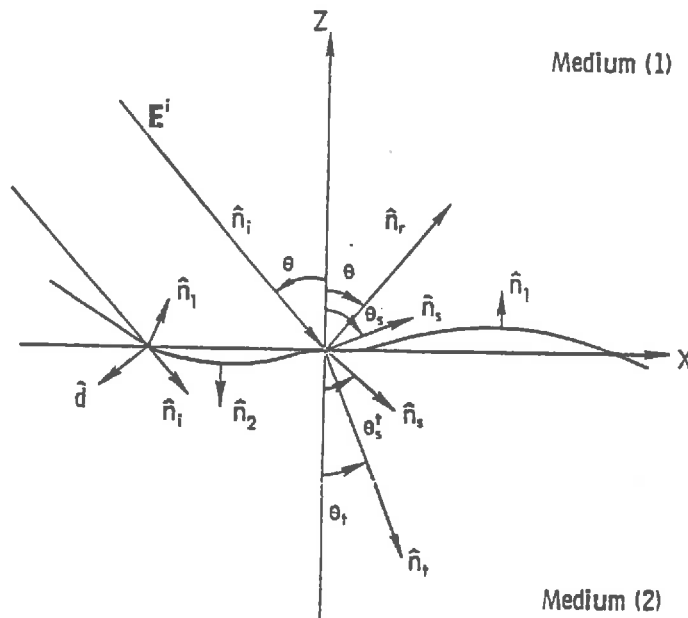


FIGURE 1.3 : Géométrie du problème de la diffusion de surface (d'après Ulaby et al., 1981)

Localement, l'amplitude de l'onde incidente peut être exprimée par deux composantes, l'une horizontale et l'autre verticale:

$$(1-10) \quad \vec{E}_\perp^i = (\hat{a} \cdot \hat{t}) \hat{t} E_0$$

$$(1-11) \quad \vec{H}_\perp^i = \hat{n}_1 \times [(\hat{a} \cdot \hat{t}) \hat{t} E_0] / \eta_1 = (\hat{a} \cdot \hat{t}) \hat{a} E_0 / \eta_1$$

$$(1-12) \quad \vec{E}_{//}^i = (\hat{a} \cdot \hat{d}) \hat{d} E_0$$

$$(1-13) \quad \vec{H}_{//}^i = -(\hat{a} \cdot \hat{d}) \hat{t} E_0 / \eta_1$$

η_1 : impédance intrinsèque du milieu 1

Sous l'approximation du plan tangent, on fait l'hypothèse que le champ total en un point de la surface est égal à la somme du champ incident et du champ réfléchi par un plan infini tangent à ce point.

$$(1-14) \quad \hat{n}_1 \times \vec{E}_\perp = \hat{n}_1 \times (\vec{E}_\perp^i + \vec{E}_\perp^r) = \hat{n}_1 \times \vec{E}_\perp^i (1 + R_\perp)$$

$$(1-15) \quad \begin{aligned} \hat{n}_1 \times \vec{H}_\perp &= \hat{n}_1 \times (\vec{H}_\perp^i + \vec{H}_\perp^r) \\ &= \hat{n}_1 \times [\hat{n}_1 \times \vec{E}_\perp^i + \hat{n}_r \times \vec{E}_\perp^i R_\perp] / \eta_1 \\ &= -[(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_r) \vec{E}_\perp^i + (\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_1) \vec{E}_\perp^i R_\perp] / \eta_1 \\ &= -(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_r) (1 - R_\perp) \vec{E}_\perp^i / \eta_1 \end{aligned}$$

avec R_\perp : coefficient de réflexion de Fresnel pour une polarisation horizontale et dans la géométrie considérée.

De la même façon:

$$(1-16) \quad \hat{n}_1 \times \vec{H}_{//} = \hat{n}_1 \times \vec{H}_{//}^i (1 + R_{//})$$

$$(1-17) \quad \hat{n}_1 \times \vec{E}_{//} = \eta_1 (\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_i) \vec{H}_{//}^i (1 - R_{//})$$

avec $R_{//}$: coefficient de réflexion de Fresnel pour une polarisation verticale et dans la géométrie considérée.

En additionnant les champs tangentiels électrique et magnétique, horizontal et vertical, on obtient les champs électrique et magnétique totaux:

$$(1-18) \quad \hat{n}_1 \times \vec{E} = [(1+R_\perp)(\hat{a} \cdot \hat{t})(\hat{n}_1 \times \hat{t}) - (1-R_{//})(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_i)(\hat{a} \cdot \hat{d})\hat{t}] E_0$$

$$(1-19) \quad \eta_1 (\hat{n}_1 \times \vec{H}) = -[(1-R_\perp)(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_i)(\hat{a} \cdot \hat{t})\hat{t} + (1+R_{//})(\hat{a} \cdot \hat{d})(\hat{n}_1 \times \hat{t})] E_0$$

En utilisant la continuité des champs tangents à l'interface, le champ diffusé dans le milieu 1 (ou le milieu 2) peut être calculé à l'aide de (1-18) et (1-19).

Les conditions de validité de l'approximation de Kirchhoff sont données par [6] :

$$k_1 L > 6 \quad \text{et} \quad L^2 > 2.76 s \lambda$$

où L est la longueur de corrélation et s l'écart-type des hauteurs de la surface.

1.4.2 CHAMPS DIFFUSES ET COEFFICIENTS DE DIFFUSION

Pour obtenir le champ diffusé dans le milieu 1, on reporte les expressions (1-18) et (1-19) dans l'équation (1-7):

$$(1-20) \quad \vec{E}^s = k \hat{n}_s \times \int [\hat{n}_1 \times \vec{E} - \eta_1 \hat{n}_s \times (\hat{n}_1 \times \vec{H})] \exp(jk_1 (\hat{n}_s - \hat{n}_1) \cdot \vec{r}') ds'$$

Pour obtenir (1-20), il est nécessaire que les champs tangentiels à la surface puissent être sommés sur l'aire illuminée. Cette équation représente le champ diffusé formulé sous l'approximation du plan tangent, ou de Kirchhoff.

Le calcul direct du champ diffusé donné par l'équation (1-20) est théoriquement possible mais reste, en pratique, et pour des raisons de calcul numérique, difficilement concevable. Or aucune solution analytique n'a pu être obtenue à partir de (1-20) sans autres hypothèses simplificatrices. Deux approximations seront envisagées par la suite : l'approximation de la phase stationnaire et l'approximation scalaire des champs.

a) L'approximation de la phase stationnaire

La condition de validité de l'approximation de la phase stationnaire est donnée par [4], [5] :

$$(q_z s)^2 > 10$$

L'utilisation de cette approximation suppose que la diffusion ne peut exister que selon les directions pour lesquelles il y a des points spéculaires sur la surface. On exclut donc les effets de diffraction locale.

Les relations approchées sont obtenues à partir de la phase Q de l'expression (1-20) :

$$(1-21) \quad Q = k_1 (\hat{n}_s - \hat{n}_1) \cdot \vec{r}' \equiv q_x x' + q_y y' + q_z z'$$

avec :

$$(1-22a) \quad \hat{n}_s = \hat{x} \sin\theta_s \cos\phi_s + \hat{y} \sin\theta_s \sin\phi_s + \hat{z} \cos\theta_s$$

$$(1-22b) \quad \hat{n}_i = \hat{x} \sin\theta \cos\phi + \hat{y} \sin\theta \sin\phi - \hat{z} \cos\theta$$

$$(1-23a) \quad q_x = k_1 (\sin\theta_s \cos\phi_s - \sin\theta \cos\phi)$$

$$(1-23b) \quad q_y = k_1 (\sin\theta_s \sin\phi_s - \sin\theta \sin\phi)$$

$$(1-23c) \quad q_z = k_1 (\cos\theta_s + \cos\theta)$$

Les dérivées partielles de la phase Q selon les coordonnées du vecteur directeur de l'onde diffusée, r' , sont fonction de l'angle que fait r' avec r , vecteur directeur de l'onde incidente. Or, lorsque l'on se trouve dans le cas de la réflexion spéculaire, cet angle est nul donc sa tangente (définie par $\partial z'/\partial x'$ et $\partial z'/\partial y'$) est nulle. On est alors dans le cas de la phase stationnaire.

En effet, la phase Q est dite stationnaire en un point M' de dS' si sa dérivée est nulle en ce point :

$$(1-24a) \quad \frac{\partial Q}{\partial x'} = 0 = q_x + q_z \frac{\partial z'}{\partial x'} \implies \frac{\partial z'}{\partial x'} = - \frac{q_x}{q_z}$$

$$(1-24b) \quad \frac{\partial Q}{\partial y'} = 0 = q_y + q_z \frac{\partial z'}{\partial y'} \implies \frac{\partial z'}{\partial y'} = - \frac{q_y}{q_z}$$

$\hat{n}_1 \times \vec{E}$ et $\hat{n}_1 \times \vec{H}$ sont fonctions des dérivées de la surface or ces dérivées sont indépendantes de dS' puisqu'égalées à $-q_x/q_z$ et $-q_y/q_z$.

On peut donc extraire $\hat{n}_1 \times \vec{E}$ et $\hat{n}_1 \times \vec{H}$ de l'intégrale (1-20).

Ainsi, sous l'approximation de la phase stationnaire, le champ diffusé s'écrit :

$$(1-25) \quad \vec{E}^s = K \hat{n}_s \times [\hat{n}_1 \times \vec{E} - \eta_1 \hat{n}_s \times (\hat{n}_1 \times \vec{H})] \int \exp[jk_1 (\hat{n}_s - \hat{n}_1) \cdot \vec{r}'] ds'$$

La section efficace de diffusion d'une cible étendue dans une direction donnée, σ° , est le rapport entre la puissance diffusée totale, $|\vec{E}^s|^2$, d'un diffuseur isotrope équivalent qui génère la même densité de puissance dans la direction considérée, et la puissance incidente totale de l'aire illuminée.

Mathématiquement, le coefficient de diffusion peut s'écrire sous la forme :

$$(1-26) \quad \sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi L^2 \operatorname{Re}\{\langle |E_{pq}^S|^2 \rangle / \eta_s^*\}}{A_0 \operatorname{Re}\{|E_0|^2 / \eta_1^*\}}$$

où A_0 est l'aire illuminée et L la distance du point d'observation au centre de A_0 .

$\operatorname{Re}\{\}$ représente l'opérateur partie réelle, $\langle \rangle$ est le symbole pour la moyenne d'ensemble et $*$ pour le complexe conjugué.

L'expression de la puissance diffusée totale est donnée par:

$$\langle E_{pq}^S E_{pq}^{S*} \rangle = \frac{|k_1 E_0 U_{pq}|^2}{(4\pi R_0)^2} \langle |I_1|^2 \rangle$$

Où U_{pq} sont les facteurs de polarisation.

Nous supposons par la suite que le milieu de diffusion (milieu 1) est sans perte.

Pour obtenir la valeur de σ^0 , il est nécessaire de calculer la valeur moyenne de $|I_1|^2$ où I_1 est donné par:

$$I_1 = \int \exp[jk_1(\hat{n}_s - \hat{n}_i) \cdot \vec{r}'] ds'$$

Si l'on suppose que la surface aléatoire est un processus gaussien, on peut écrire:

$$(1-27) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \iint \langle \exp[jk_1(\hat{n}_s - \hat{n}_i) \cdot (\vec{r}' - \vec{r}'')] \rangle ds' ds''$$

Si on veut exprimer (1-27) dans le système de coordonnées établi sur la figure 1.3, on écrit :

$$ds' = dx' \cdot dy' / (\hat{n}_i \cdot \hat{z}) = q \cdot dx' \cdot dy' / |q_z|$$

$$\text{avec } q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2$$

Ainsi:

$$(1-28) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{q^2}{q_z^2} \iiint \exp[jq_x(x' - x'') + jq_y(y' - y'')] \times \\ \langle \exp[jq_z(z(x', y') - z(x'', y''))] \rangle dx' dy' dx'' dy''$$

Si on suppose que $z(x, y)$ est un processus aléatoire gaussien stationnaire, de valeur moyenne nulle, de variance s^2 et de coefficient de corrélation ρ , on peut écrire :

$$\langle \exp [jq_z(z(x',y')-z(x'',y''))] \rangle = \exp [-q_z^2 s^2(1-\rho)]$$

Le coefficient de corrélation d'un processus aléatoire est une fonction des variables d'espace. Pour un processus stationnaire, il ne dépend que de la différence des variables.

Soit $u = x' - x''$ et $v = y' - y''$

Si on suppose que la surface illuminée est un carré de côté $2L$, on peut écrire (1-28) sous la forme :

$$(1-29) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{q_z^2}{q_z^2} \int_{-L}^L \int_{-L}^L \int_{-L-x''}^{L-x''} \int_{-L-y''}^{L-y''} \exp[jq_x u + jq_y v - q_z^2 s^2(1-\rho)] \times \\ du dv dx'' dy''$$

En utilisant l'identité (Annexe 1-A) :

$$\int_{-L}^L \int_{-L-x''}^{L-x''} \exp(jq_x u) f(u) du dx'' = \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|) f(u) \exp(jq_x u) du$$

(1-29) peut s'exprimer sous la forme :

$$(1-30) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{q_z^2}{q_z^2} \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|)(2L - |v|) \exp(jq_x u + jq_y v) \times \\ \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] du dv$$

Pour pouvoir simplifier cette expression, on est amené à faire de nouvelles hypothèses:

.1. La rugosité de la surface est isotrope, c'est-à-dire que la fonction de corrélation, ρ , ne dépend que de la coordonnée radiale r .

.2. $(q_z s)^2$ est suffisamment grand pour que sa contribution à l'intégrale ne soit significative que pour de petites valeurs de u et v .

On peut alors supposer:

$$|u| \ll 2L \text{ et } |v| \ll 2L$$

L'intégration de (1-30) est simplifiée par un passage en coordonnées polaires (r, ϕ) .

On pose $u = r \cos \phi$, $v = r \sin \phi$ et $r^2 = u^2 + v^2$

L'élément différentiel $du \cdot dv$ s'écrira alors :

$$du \cdot dv = r dr d\phi$$

Le terme de phase peut être développé comme suit. On pose:

$$Q = j (q_x u + q_y v)$$

$$\text{et } \begin{cases} q_t^2 = q_x^2 + q_y^2 \\ \cos \phi_0 = q_x / q_t \\ \sin \phi_0 = q_y / q_t \end{cases}$$

On obtient alors : $Q = j q_t r \cos(\phi - \phi_0)$

On pose $\alpha = \phi - \phi_0$ et on intègre (1-30) sur α :

$$(1-31) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{q^2}{q_z^2} (2L)^2 \int_0^{2L} \int_0^{2\pi} \exp(jq_t r \cos \alpha) \exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] r dr d\alpha$$

On peut développer $\rho(r)$ en série de Taylor et se limiter aux deux premiers ordres (hypothèse 2) :

$$\rho(r) \approx \rho(0) + r \rho'(0) + \frac{r^2}{2} \rho''(0)$$

Par propriété de la fonction de corrélation :

$$\rho(0) = 1 \quad \text{et} \quad \rho'(0) = 0$$

Ainsi (1-31) devient :

$$(1-32) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{q^2}{q_z^2} (2L)^2 \int_0^{2L} \int_0^{2\pi} \exp(jq_t r \cos \alpha) \times \exp[-q_z^2 s^2 |\rho''(0)| r^2/2] r dr d\alpha$$

$$(1-33) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = 2\pi \frac{q^2}{q_z^2} (2L)^2 \int_0^{2L} J_0(q_t r) \exp[-q_z^2 s^2 |\rho''(0)| r^2/2] r dr$$

Où J_0 est la fonction de Bessel d'ordre zéro.

Puisque l'intégrande dans (1-33) devient négligeable pour de grandes valeurs de r , on peut porter la borne supérieure ($2L$) à l'infini sans pour autant affecter le résultat d'une erreur significative. Il devient alors possible d'intégrer l'équation (1-33) en utilisant l'identité suivante, relative aux fonctions de Bessel :

$$(1-34) \quad \int_0^{+\infty} x^{n+1} \exp(-\alpha x^2) J_n(\beta x) dx = \frac{\beta^n}{(2\alpha)^{n+1}} \exp\left[-\frac{\beta^2}{4\alpha}\right]$$

On obtient :

$$\langle |I_1|^2 \rangle = \frac{2\pi q^2}{q_z^2} (2L)^2 \frac{1}{q_z^2 s^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_z^2}{2q_z^2 s^2 |\rho''(0)|}\right]$$

Soit :

$$(1-35) \quad \langle |I_1|^2 \rangle = \frac{2\pi A_0 q^2}{q_z^2 s^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_x^2 + q_y^2}{2q_z^2 s^2 |\rho''(0)|}\right]$$

où $A_0 = (2L)^2$ est l'aire illuminée.

Or

$$(1-36) \quad \langle E_{pq}^S E_{pq}^{S*} \rangle = \frac{|k_1 E_0 U_{pq}|^2}{(4\pi R_0)^2} \langle |I_1|^2 \rangle$$

où les valeurs de U_{pq} sont explicitées dans l'Annexe 1-B.

En reportant (1-35) dans (1-36), on obtient :

$$(1-37) \quad \langle E_{pq}^S E_{pq}^{S*} \rangle = \frac{|k_1 E_0 U_{pq}|^2}{(4\pi R_0)^2} \frac{2\pi A_0 q^2}{q_z^2 s^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_x^2 + q_y^2}{2q_z^2 s^2 |\rho''(0)|}\right]$$

La section efficace de diffusion d'une cible étendue s'écrit :

$$(1-38) \quad \sigma_{pq}^0 = \frac{4\pi R^2 \operatorname{Re}\{\langle |E_{pq}^S|^2 \rangle / \eta_s^* \}}{A_0 \operatorname{Re}\{|E_0|^2 / \eta_1^* \}}$$

Soit

$$(1-39) \quad \sigma_{pq}^0 = \frac{|k_1 q U_{pq}|^2}{2q_z^4 s^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{q_x^2 + q_y^2}{2q_z^2 s^2 |\rho''(0)|}\right]$$

Si on se place dans le cas de la rétrodiffusion, on a :

$$\theta_s = \theta, \phi_s = \pi \text{ et } \phi = 0$$

$$\text{donc } \left[\begin{array}{l} q_x = -2 k_1 \sin\theta \\ q_y = 0 \\ q_z = 2 k_1 \cos\theta \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \begin{array}{l} U_{pp} = R_{pp} \frac{q |q_z|}{k_1 q_z} \\ U_{pq} = 0 \end{array}$$

$$\text{soit } q = (q_x^2 + q_y^2 + q_z^2)^{1/2} = 2 k_1$$

La section efficace de rétrodiffusion s'écrit :

$$(1-40) \quad \sigma_{pp}^{\circ}(\theta) = \frac{|R_{pp}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta s^2 |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2 s^2 |\rho''(0)|}\right]$$

$$(1-41) \quad \sigma_{pq}^{\circ}(\theta) = 0$$

Si on pose $m^2 = s^2 |\rho''(0)|$, où m correspond à l'écart-type des pentes de la surface, on peut réécrire (1-40) sous la forme:

$$\sigma_{pp}^{\circ}(\theta) = \frac{|R_{pp}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta m^2} \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2 m^2}\right]$$

$R_{pp}(0)$ est le coefficient de réflexion de Fresnel évalué à l'incidence normale.

La section efficace de rétrodiffusion dépolarisée, σ_{pq}° , est nulle puisque l'on a négligé la diffusion multiple sur l'élément de volume [10]. Dans le cas de la diffusion polarisée, il n'y a pas de distinction entre les polarisations horizontale et verticale puisque le coefficient de Fresnel est évalué à l'incidence normale.

L'équation (1-40) n'est valable que pour les surfaces ayant un écart-type des hauteurs suffisamment grand. La section efficace de rétrodiffusion donnée par (1-40) est uniquement fonction des pentes de la surface. Elle est indépendante de la forme de la fonction de corrélation de cette surface. Ceci provient de l'hypothèse $(q_z s)^2$ grand. On montre, [11], que pour les surfaces où $(q_z s)^2 \ll 1$, la section efficace de rétrodiffusion est proportionnelle à la transformée de Fourier de la fonction de corrélation de la surface, qui représente le spectre de puissance. Ceci est la théorie de Bragg. Lorsque $(q_z s)^2$ est suffisamment grand pour que (1-40) soit valable, alors la diffusion est purement incohérente.

Lorsque $(q_z s)^2$ décroît, la forme de la fonction de corrélation devient de plus en plus importante. On a vu, en effet, que la longueur de corrélation augmente lorsque la surface tend à devenir lisse. Il n'est plus possible, alors, d'approximer $\rho(r)$ par un développement limité en $r=0$. Dans ce cas, on voit apparaître de l'énergie de diffusion dans la composante cohérente et, dans la limite où $(q_z s)^2$ tend vers zéro, on a de la réflexion cohérente pure.

Pour examiner une telle situation ainsi que le comportement de la section efficace de rétrodiffusion dans cette zone de transition, on applique aux champs tangentiels une autre approximation, l'approximation scalaire des champs.

b) L'approximation scalaire des champs.

La validité de l'approximation scalaire des champs, [3], suppose que l'écart type des pentes de la surface, noté m , soit inférieur ou de l'ordre de 0.25. Par définition, l'écart type des pentes d'un processus aléatoire gaussien, $z(x)$, de moyenne nulle et de variance s , est donné par :

$$m = [-s^2 \rho''(0)]^{1/2}$$

Où $\rho''(0)$ est la dérivée seconde de la fonction d'autocorrélation de $z(x)$ au point $x=0$.

Dans le paragraphe précédent, il a été établi l'expression de la section efficace de rétrodiffusion pour de grands écart-types des hauteurs, (1-40). Cette équation représente une diffusion purement non cohérente. Un tel résultat ne peut pas s'appliquer aux surfaces où $(q_z s)^2$ est inférieur ou égal à 4.

Nous avons vu, en effet, que lorsque l'écart-type des hauteurs de la surface était inférieur ou de l'ordre du quart de la longueur d'onde de l'onde incidente, il était possible d'obtenir une composante cohérente significative dans le signal radar retour.

Ainsi, la condition $s \leq \lambda/4$ peut s'écrire $ks \leq \pi/2$. Or, en rétrodiffusion, $q_z = 2k \cos\theta$, donc $ks \leq \pi/2$ est approximativement équivalent à $q_z s \leq 2$, soit $(q_z s)^2 \leq 4$.

De telles surfaces engendrent de la diffusion cohérente et incohérente. Pour examiner ce type de sols, nous nous limiterons aux surfaces ayant de faibles pentes et en particulier nous supposerons :

(1) Les termes de pente qui correspondent à la réflexion spéculaire locale du signal sur les pentes de la surface pourront être ignorés dans le système de coordonnées vectorielles unitaires (\hat{t}, \hat{d}) . Ces pentes sont assimilables à des facettes dont l'inclinaison dépend de la rugosité du terrain.

(2) La normale à la surface locale \hat{n}_1 (définie sur la figure 1.3) s'écrira : $\hat{n}_1 = -\hat{x} Z_x - \hat{y} Z_y + \hat{z}$, où Z_x et Z_y représentent les pentes de la surface dans les directions x et y .

Ces deux hypothèses permettent de réduire la formulation vectorielle de Kirchhoff à la formulation scalaire dans le cas de la diffusion polarisée. Sous cette approximation, l'expression du champ diffusé peut être réécrite sous la forme:

$$(1-42) \quad E_{pq}^S = K E_0 \int \bar{U}_{pq} \, ex \, dS'$$

où

$$(1-43) \quad ex = \exp(jk_1(\hat{n}_s - \hat{n}_1) \cdot \vec{r}')$$

avec les termes \bar{U}_{pq} définis comme suit:

$$(1-44a) \quad \bar{U}_{hh} = [\hat{v}_s \cdot (\hat{n}_1 \times \vec{E}^S) + \hat{h}_s \cdot (\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H}^S)] \times \\ [(\hat{x} \cos\theta_s \cos\phi_s + \hat{y} \cos\theta_s \sin\phi_s - \hat{z} \sin\theta_s) \cdot (\hat{n}_1 \times \vec{E}^S) \\ + (\hat{y} \cos\phi_s - \hat{x} \sin\phi_s) \cdot \eta_1 (\hat{n}_1 \times \vec{H}^S)] / E_0$$

$$(1-44b) \quad \bar{U}_{vh} = [\hat{v}_s \cdot \eta_1 (\hat{n}_1 \times \vec{H}^S) - \hat{h}_s \cdot (\hat{n}_1 \times \vec{E}^S)] / E_0$$

$$(1-44c) \quad \bar{U}_{vv} = [\hat{v}_s \cdot (\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H}^S) - \hat{h}_s \cdot (\hat{n}_1 \times \vec{E}^S)] / E_0$$

$$(1-44d) \quad \bar{U}_{hv} = [\hat{v}_s \cdot (\hat{n}_1 \times \vec{E}^S) + \hat{h}_s \cdot (\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H}^S)] \times$$

où \hat{v}_s et \hat{h}_s sont les vecteurs de polarisation des ondes diffusées.

Pour obtenir la section efficace de rétrodiffusion donnée par l'équation (1-38), on doit connaître $\langle \vec{E}^S \cdot \vec{E}^{S*} \rangle$. Pour cela on a besoin de calculer l'intégrale :

$$(1-45) \quad I = \iint \langle \bar{U}_{pq} \cdot \bar{U}_{pq}^* \exp[jk_1(\hat{n}_s - \hat{n}_1) \cdot (\vec{r} - \vec{r}')] \rangle \, ds \, ds'$$

Si on développe les termes \bar{U}_{pq} , précédemment définis, sous forme scalaire, on obtient:

$$(1-46a) \quad \bar{U}_{hh} = -R_{\perp_0}(\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi) + \\ \{ R_{\perp_0}[\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{\perp_1}(\cos\theta + \cos\theta_s) \times \\ \cos(\phi_s - \phi) \} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$(1-46b) \quad \bar{U}_{vh} = - R_{\perp 0} (1 + \cos\theta \cos\theta_s) \sin(\phi_s - \phi) - \\ [R_{\perp 0} \sin\theta \cos\theta_s + R_{\perp 1} (1 + \cos\theta \cos\theta_s)] \times \\ \sin(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$(1-46c) \quad \bar{U}_{vv} = - R_{//0} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi) + \\ \{ R_{//0} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{//1} (\cos\theta + \cos\theta_s) \} \times \\ \cos(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$(1-46d) \quad \bar{U}_{hv} = - R_{//0} (1 + \cos\theta \cos\theta_s) \sin(\phi_s - \phi) - \\ [R_{//0} \sin\theta \cos\theta_s + R_{//1} (1 + \cos\theta \cos\theta_s)] \times \\ \sin(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

Avec:

$$(1-47a) \quad R_{\perp 0} = (\eta_2 \cos\theta - \eta_1 \cos\theta_t) / (\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \cos\theta_t)$$

$$(1-47b) \quad R_{\perp 1} = -R_{\perp 0} (\eta_2 \sin\theta + \eta_1 \sin\theta_t) / (\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \sin\theta_t)$$

$$(1-47c) \quad R_{//0} = (\eta_1 \cos\theta - \eta_2 \cos\theta_t) / (\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t)$$

$$(1-47d) \quad R_{//1} = -[\eta_1 \sin\theta - \eta_2 \sin\theta_t - R_{//0} (\eta_1 \sin\theta + \eta_2 \sin\theta_t)] \\ / (\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t)$$

Le détail des calculs permettant de passer des équations (1-44) aux équations (1-46) est donné dans l'Annexe 1-C.

On remarque que tous les \bar{U}_{pq} sont de la forme:

$$(1-48) \quad \bar{U}_{pq} = a_0 + a_1 Z_x + a_2 Z_y$$

où les a_i sont des coefficients dépendant de la polarisation :

Polarisation HH:

$$a_0 = - R_{\perp 0} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi)$$

$$a_1 = a \cos\phi$$

$$a_2 = a \sin\phi$$

$$a = R_{\perp 0} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{\perp 1} (\cos\theta_s + \cos\theta) \cos(\phi_s - \phi)$$

Polarisation VH:

$$a_0 = -R_{\perp_0} (1 + \cos\theta \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi)$$

$$a_1 = a \cos\phi$$

$$a_2 = a \sin\phi$$

$$a = [-R_{\perp_0} \sin\theta \cos\theta_s - R_{\perp_1} (1 + \cos\theta \cos\theta_s)] \sin(\phi_s - \phi)$$

Polarisation VV:

$$a_0 = R_{//_0} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi)$$

$$a_1 = a \cos\phi$$

$$a_2 = a \sin\phi$$

$$a = R_{//_1} (\cos\theta_s + \cos\theta) \cos(\phi_s - \phi) - R_{//_0} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)]$$

Pour la polarisation HV, les coefficients sont les mêmes que pour VH sauf que R_{\perp_0} et R_{\perp_1} sont remplacés par $R_{//_0}$ et $R_{//_1}$.

On peut développer le terme $\bar{U}_{pq} \bar{U}_{pq}^*$ au premier ordre:

$$(1-49) \quad \bar{U}_{pq} \bar{U}_{pq}^* \approx a_0 a_0^* + a_0 a_1^* Z'_x + a_0^* a_1 Z'_x + a_0 a_2^* Z'_y + a_0^* a_2 Z'_y$$

Si on reporte le premier terme du développement (1-49) dans l'équation (1-45), on obtient :

$$(1-50) \quad I_0 = \iint \langle a_0 a_0^* \exp[jk_1 (\hat{n}_s - \hat{n}_i) \cdot (\vec{r} - \vec{r}')] \rangle ds ds'$$

où la phase $Q = k_1 (\hat{n}_s - \hat{n}_i) \cdot \vec{r}'$ peut être développée selon les équations (1-21), (1-22) et (1-23).

Pour exprimer (1-50) dans les coordonnées rectangulaires montrées sur la figure 1.3, on écrit:

$$ds' = dx' \cdot dy' / (\hat{n}_i \cdot \hat{z}) = q dx' \cdot dy' / |q_z|$$

$$\text{où } q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2$$

Ainsi :

$$(1-51) \quad I_0 = \frac{q^2}{q_z^2} |a_0|^2 \iiint \exp[jq_x(x' - x'') + jq_y(y' - y'')] \times \\ \langle \exp[jq_z(z(x',y') - z(x'',y''))] \rangle \\ dx' dy' dx'' dy''$$

Cette intégrale est semblable à celle de l'équation (1-28), aussi la démarche de calcul sera identique. En suivant le raisonnement précédent, on pourra écrire (1-51) sous la forme :

$$(1-52) \quad I_0 = \frac{q^2}{q_z^2} |a_0|^2 \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|)(2L - |v|) \exp(jq_x u + jq_y v) \times \\ \exp[-q_z^2 s^2(1 - \rho)] du dv$$

où ρ est le coefficient de corrélation du processus aléatoire $z(x,y)$ supposé gaussien et stationnaire.

On s'est placé dans le cas des surfaces ayant de petites pentes, on peut donc poser:

$$(q / q_z)^2 \approx 1$$

puisque le carré des pentes de surface peut être négligé par rapport à l'unité.

D'autre part, les valeurs de u et v sont limitées par la valeur de la longueur de corrélation de la surface. Or, la taille de l'aire illuminée est beaucoup plus grande que la longueur de corrélation donc (1-52) peut être approximée par :

$$(1-53) \quad I_0 = |a_0|^2 A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(jq_x u + jq_y v) \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] du dv$$

Pour résoudre l'équation (1-53), on passe en coordonnées polaires : $(u,v) \rightarrow (\xi, \phi)$

$$u = \xi \cos\phi \quad \xi^2 = u^2 + v^2 \\ v = \xi \sin\phi \quad 2 \xi d\xi = 2 u du + 2 v dv$$

$$\text{tg}\phi = v/u$$

L'élément différentiel s'écrit $du dv = \xi d\xi d\phi$
et le terme de phase $Q = j q_t \xi \cos(\phi - \phi_0)$

$$\text{avec } q_t^2 = q_x^2 + q_y^2$$

$$\text{et } \cos\phi_0 = q_x / q_t$$

$$\sin\phi_0 = q_y / q_t$$

$$\text{Donc } I_0 = |a_0|^2 A_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \exp(jq_x u + jq_y v) du dv$$

s'écrira :

$$(1-54) \quad I_0 = |a_0|^2 A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \exp(jq_t \xi \cos(\phi - \phi_0)) \xi d\xi d\phi$$

On pose $\alpha = \phi - \phi_0$ et on intègre sur α :

$$(1-55) \quad I_0 = |a_0|^2 A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \exp(jq_t \xi \cos\alpha) \xi d\xi d\alpha$$

Soit

$$(1-56) \quad I_0 = 2\pi |a_0|^2 A_0 \int_0^{+\infty} \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] J_0(q_t \xi) \xi d\xi$$

$$\text{Or } q_t = (q_x^2 + q_y^2)^{\frac{1}{2}} = 2k \sin\theta \quad \text{en rétrodiffusion}$$

Donc

$$(1-57) \quad I_0 = 2\pi |a_0|^2 A_0 \int_0^{+\infty} \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] J_0(2k \sin\theta \cdot \xi) \xi d\xi$$

L'équation (1-57) rend compte de la diffusion cohérente et incohérente.

La composante cohérente correspond à la limite de l'intégrale quand $\xi \rightarrow +\infty$.

Dans ce cas $\rho(\xi) \rightarrow 0$ et $\exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \rightarrow \exp[-q_z^2 s^2]$. On remarque que les termes rendant compte du processus aléatoire de la surface disparaissent et que lorsque $q_z^2 s^2$ tend vers 0, on se retrouve dans le cas d'une surface lisse, l'équation (1-52) étant réduite aux termes de phase :

$$(1-58) \quad I_0 = \frac{q^2}{q_z^2} |a_0|^2 \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|)(2L - |v|) \exp(jq_x u + jq_y v) \times \exp[-q_z^2 s^2] du dv$$

Le calcul de I_0 , donné par l'équation (1-58), est détaillé dans l'annexe 1-D. On montre que la composante cohérente de σ^0

peut s'écrire sous la forme :

$$(1-59) \quad \sigma_{\text{coh}}^{\circ} = \pi k^2 |a_o|^2 \delta(q_x) \delta(q_y) \exp(-q_z^2 s^2)$$

où $\delta(q_x)$ et $\delta(q_y)$ sont des distributions de Dirac.

Ainsi, $\sigma_{\text{coh}}^{\circ}$ ne sera différent de zéro que pour $\theta = \theta_s = 0$.

Dans cette étude, l'angle de visée est supérieur à 11° . Dans ces conditions, la composante cohérente n'intervient plus de façon significative dans le signal retour et peut donc être supprimée de l'équation (1-57).

Ainsi, l'équation représentant la diffusion incohérente s'écrira:

$$(1-60) \quad I_o = 2\pi |a_o|^2 A_o \int_0^{+\infty} (\exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] - \exp[-q_z^2 s^2]) \times \\ J_o(2k\sin\theta \xi) \xi d\xi$$

Pour obtenir la valeur du coefficient de diffusion correspondant, on écrit :

$$(1-61) \quad \langle E^S \cdot E^{S*} \rangle = |K E_o|^2 I_1 = \frac{|k E_o|^2}{(4\pi R)^2} I_1$$

et on insère la valeur obtenue dans l'équation (1-38) :

$$(1-62) \quad \sigma_{\text{inc}}^{\circ} = \frac{4\pi R^2}{A_o |E_o|^2} \frac{|k E_o|^2}{(4\pi R)^2} I_1$$

On obtient :

$$(1-63) \quad \sigma_{\text{inc}}^{\circ} = \frac{1}{2} |k a_o|^2 \int_0^{+\infty} (\exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] - \exp[-q_z^2 s^2]) \times \\ J_o(2k\sin\theta \xi) \xi d\xi$$

Or, en rétrodiffusion, $|a_o|^2$ s'écrit :

$$|a_o|^2 = |R_{pp}|^2 (2 \cos\theta)^2$$

Ainsi

$$(1-64) \quad \sigma_{\text{inc}}^{\circ} = 2 k^2 |R_{pp}|^2 \cos^2\theta \int_0^{+\infty} (\exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] - \exp[-q_z^2 s^2]) \times \\ J_o(2k\sin\theta \xi) \xi d\xi$$

Une autre contribution au coefficient de diffusion total vient des termes de pente développés dans (1-49). Il est démontré dans l'Annexe 1-E que les moyennes d'ensembles satisfont à la relation suivante:

$$\langle Z_x \exp[jq_z(z - z')] \rangle = \langle Z'_x \exp[jq_z(z - z')] \rangle$$

Ainsi, l'intégrale des termes de pente dans la direction x, s'écrit:

$$(1-65) \quad I_{S_1} = \iint \langle (a_o a_1^* Z'_x + a_o^* a_1 Z_x) \exp[jk_1(\hat{n} - \hat{n}_i) \cdot (\vec{r} - \vec{r}')] \rangle ds ds'$$

$$I_{S_1} = -2jq_z s^2 \operatorname{Re}\{a_o a_1^*\} \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|)(2L - |v|) \frac{\partial \rho}{\partial u} \times \\ \exp[jq_x u + jq_y v - q_z^2 s^2(1-\rho)] du dv$$

$$(1-66) \quad I_{S_1} = 4\pi A_o q_z s^2 \operatorname{Re}\{a_o a_1^*\} \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} q_x (q_x^2 + q_y^2)^{-\frac{1}{2}} \times \\ J_1(\xi \sqrt{q_x^2 + q_y^2}) \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \xi d\xi$$

où J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre.

Le détail des calculs qui permettent de passer de l'équation (1-65) à (1-66) est fourni dans l'Annexe 1-F.

De la même façon, les termes de pente dans la direction y s'écriront:

$$(1-67) \quad I_{S_2} = 4\pi A_o q_z s^2 \operatorname{Re}\{a_o a_2^*\} \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} q_y (q_x^2 + q_y^2)^{-\frac{1}{2}} \times \\ J_1(\xi \sqrt{q_x^2 + q_y^2}) \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \xi d\xi$$

On obtient l'intégrale due aux termes de pentes en sommant (1-66) et (1-67) :

$$(1-68) \quad I_s = 4\pi A_0 q_z s^2 \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} \operatorname{Re}\{a_0 (q_x a_1^* + q_y a_2^*)\} \times \\ J_1(\xi \sqrt{q_x^2 + q_y^2}) \exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] \xi d\xi$$

En rétrodiffusion, on a $\theta = \theta_s$, $\phi_s = \pi$ et $\phi = 0$, donc les coefficients a_i s'écrivent :

$$a_0 = 2 R_{pp_0} \cos\theta$$

$$a_1 = a$$

$$a_2 = 0$$

$$a = 2 (R_{pp_0} \sin\theta + R_{pp_1} \cos\theta)$$

Et

$$q_x = -2k \sin\theta$$

$$q_y = 0$$

$$q_z = 2k \cos\theta$$

On a alors :

$$\operatorname{Re}\{a_0 a_1^* + a_0 a_2^*\} = \operatorname{Re}\{a_0 a_1^*\}$$

$$= 4 |R_{pp_0}|^2 \cos\theta \sin\theta + 4 \operatorname{Re}\{R_{pp_0} R_{pp_1}^*\} \cos^2\theta$$

Si on insère (1-68) dans le terme du coefficient de diffusion dû aux effets de pente de la surface, on obtient:

$$(1-69) \quad \sigma_{\text{pent}}^0 = -8k \cos\theta (ks)^2 [|R_{pp_0}|^2 \cos\theta \sin\theta + \operatorname{Re}\{R_{pp_0} R_{pp_1}^*\} \cos^2\theta] \\ \times \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} J_1(2k \sin\theta \xi) \exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] \xi d\xi$$

Les expressions (1-64) et (1-69) montrent que les composantes non cohérentes tendent vers zéro quand ks tend vers zéro. Ainsi, pour une interface plane, il ne reste que la composante cohérente et son intensité totale est donnée par les coefficients de réflexion de Fresnel.

1.5 APPLICATION AUX SURFACES NATURELLES

La plupart des surfaces naturelles que l'on rencontre ne sont pas homogènes, que ce soit physiquement (texture du sol) ou géométriquement (profil de la surface). Seul un petit nombre présente une seule échelle de rugosité.

Il sera donc nécessaire, pour établir des comparaisons, de s'assurer que les données ont été recueillies dans des régions statistiquement quasi-homogènes. D'autre part, il conviendra de vérifier que la longueur d'onde utilisée permet de supposer la permittivité constante. En effet, si la longueur de pénétration des ondes est suffisamment faible, on peut considérer le gradient d'humidité nul. On se trouve, alors, dans le cas théorique de la diffusion sur un diélectrique homogène. Cette hypothèse impose que la contribution de la diffusion de volume soit négligeable, et en particulier qu'il n'y ait pas de couverture végétale, ni d'autres types d'hétérogénéités en surface.

Dans ces conditions, l'effet, supposé dominant, est la diffusion de surface. On peut alors décrire la surface rugueuse à l'aide d'un ou plusieurs processus stationnaires aléatoires.

Pour essayer de rendre compte le mieux possible de cette rugosité de terrain, nous utiliserons une fonction de corrélation de la surface à deux échelles. On la posera égale à (Ulaby, 1981) :

$$(1-70) \quad \rho(\xi) = \exp\left[-\xi^2 / (1^4 + L^2\xi^2)^{1/2}\right]$$

avec $\xi^2 = u^2 + v^2$

La longueur de corrélation équivalente de cette surface sera donnée par :

$$(1-71) \quad l_e = \left[\{ L^2 + (L^4 + 4 l^4)^{1/2} \} / 2 \right]^{1/2}$$

L représente la grande échelle de rugosité, l la petite. Cette longueur de corrélation équivalente est, en fait, une donnée purement mathématique qui n'a pas de réalité physique.

Cette fonction de corrélation a la caractéristique d'être différentiable. D'autre part, on remarque que :

Quand $\xi \rightarrow \infty$ $\rho(\xi) \rightarrow \exp(-\xi/L)$

Et quand $\xi \rightarrow 0$ $\rho(\xi) \rightarrow \exp(-\xi^2/l^2)$

Ainsi, selon la valeur de ξ , la fonction de corrélation peut être approchée soit par une gaussienne, soit par une fonction exponentielle, qui sont deux formes usuelles de la fonction de corrélation.

Pour obtenir les valeurs des différents coefficients de diffusion, on utilisera les équations (1-64) et (1-69). On se placera dans le cas de la rétrodiffusion, c'est à dire :

$$\theta = \theta_s, \quad \phi = 0 \text{ et } \phi_s = \pi$$

La composante incohérente est donnée par l'équation (1-64).

Les coefficients de Fresnel sont définis comme suit:

* En polarisation HH

$$R_{\perp 0} = \frac{\eta_2 \cos\theta - \eta_1 \cos\theta_t}{\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \cos\theta_t} = \frac{\cos\theta - (\epsilon - \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}}{\cos\theta + (\epsilon - \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}}$$

où ϵ est la constante diélectrique complexe du milieu considéré $\epsilon = \epsilon' + j \epsilon''$, ϵ' représente la partie réelle et ϵ'' la partie imaginaire,

et

$$R_{\perp 1} = -R_{\perp 0} (\eta_2 \sin\theta + \eta_1 \sin\theta_t) / (\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \sin\theta_t)$$

* En polarisation VV

$$R_{//0} = \frac{\eta_1 \cos\theta - \eta_2 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t} = \frac{\cos\theta - (1/\epsilon - \sin^2\theta/\epsilon^2)^{\frac{1}{2}}}{\cos\theta + (1/\epsilon - \sin^2\theta/\epsilon^2)^{\frac{1}{2}}}$$

et

$$R_{//1} = -[\eta_1 \sin\theta - \eta_2 \sin\theta_t - R_{//0} (\eta_1 \sin\theta + \eta_2 \sin\theta_t)] / (\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t)$$

La composante due aux termes de pentes est donnée par l'équation (1-69).

On a posé : $\rho(\xi) = \exp\{-\xi^2 / (1 + L^2 \xi^2)^{\frac{1}{2}}\}$

Donc :

$$\frac{\partial \rho}{\partial \xi} = \frac{-2\xi (1^4 + L^2 \xi^2)^{\frac{1}{2}} + L^2 \xi^3 (1^4 + L^2 \xi^2)^{-\frac{1}{2}}}{1^4 + L^2 \xi^2} \rho(\xi)$$

La composante due aux termes de pentes s'écrit donc sous la forme :

$$(1-72) \quad \sigma_p^0 = -8k \cos \theta (ks)^2 \left[|R_{pp_0}|^2 \cos \theta \sin \theta + \operatorname{Re}\{R_{pp_0} R_{pp_1}^*\} \cos^2 \theta \right] \\ \times \int_0^{+\infty} J_1(2k \sin \theta \xi) \exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] \xi \times \\ \frac{-2\xi (1^4 + L^2 \xi^2)^{\frac{1}{2}} + L^2 \xi^3 (1^4 + L^2 \xi^2)^{-\frac{1}{2}}}{1^4 + L^2 \xi^2} \rho(\xi) d\xi$$

Nous avons présenté, dans ce chapitre, deux approximations possibles pour calculer le champ diffusé par une interface irrégulière, à partir de la méthode de Kirchhoff.

Le choix de l'une ou l'autre de ces approximations dépend, d'une part, du profil de la surface, et d'autre part de l'angle de visée avec lequel on examine cette surface. Leurs limites de validité sont regroupées dans le tableau ci-dessous:

Approximation de Kirchhoff

$$kL > 6 \quad \text{et} \quad L^2 > 2.76 s \lambda$$

Approximation de la phase stationnaire

$$(q_z s)^2 > 10$$

Approximation scalaire des champs

$$[-s^2 \rho''(0)]^{\frac{1}{2}} < 0.25$$

Avec:

λ longueur d'onde de l'onde incidente

k nombre d'onde

L longueur de corrélation de la surface

s écart-type des hauteurs de la surface

$\rho''(0)$ dérivée seconde de la fonction d'autocorrélation
de la surface, prise en $x=0$

$$q_z = k (\cos \theta_s + \cos \theta)$$



ANNEXE 1-A

Etablissement de l'identité :

$$\int_{-L}^L \int_{-L-x''}^{L-x''} \exp(jq_x u) f(u) du dx'' = \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|) f(u) \exp(jq_x u) du$$

Soit
$$I = \int_{-L}^L \int_{-L-x''}^{L-x''} \exp(jq_x u) f(u) du dx''$$

On pose :

$$\int_{-L-x''}^{L-x''} \exp(jq_x u) f(u) du = F(L - x'') - F(-L - x'')$$

Alors

$$I = \int_{-L}^L [F(L - x'') - F(-L - x'')] dx''$$

En intégrant par parties, avec :

$$U = F(L - x'') - F(-L - x'') \text{ et } dV = dx''$$

On obtient :

$$I = L \int_{-2L}^{2L} \exp(jq_x u) f(u) du - \int_{-L}^L \left[\frac{dF}{du} \frac{du}{dx''} - \frac{dF}{du'} \frac{du'}{dx''} \right] x'' dx''$$

On pose :

$$I_2 = \int_{-L}^L \left[\frac{dF}{du} \frac{du}{dx''} - \frac{dF}{du'} \frac{du'}{dx''} \right] x'' dx''$$

Calcul de I_2

$$I_2 = \int_{-L}^L \left[- \exp[jq_x(L-x'')] F(L-x'') + \exp[jq_x(-L-x'')] F(-L-x'') \right] x'' dx''$$

En effectuant le changement de variables suivant :

$$L - x'' = u \text{ et } -dx'' = du$$

On obtient :

$$-I_2 = - \int_{2L}^0 \exp(jq_x u) (L - u) du + \int_0^{-2L} \exp(jq_x u) f(u) (-L - u) du$$

$$-I_2 = \int_{-2L}^0 \exp(jq_x u) (L + u) du + \int_0^{2L} \exp(jq_x u) f(u) (L - u) du$$

Soit
$$I_2 = - \int_{-2L}^{2L} \exp(jq_x u) f(u) (L - |u|) du$$

Donc

$$I = \int_{-2L}^{2L} \exp(jq_x u) f(u) (2L - |u|) du$$

ANNEXE 1-B

Valeurs des facteurs de polarisation dans les expressions du champ diffusé sous l'approximation de la phase stationnaire.

$$U_{hh} = \frac{\hat{n}_s \cdot \vec{E}}{K I_1 E_0} \quad \text{où } \hat{n}_s = \hat{\phi}$$

$$U_{hh} = \frac{\alpha |\alpha_z| [R_{//} (\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{n} \cdot \hat{n}_s) - R_{\perp} (\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{v} \cdot \hat{n}_s)]}{k_1 \alpha_z [(\hat{n} \cdot \hat{v})^2 + (\hat{n} \cdot \hat{n})^2]}$$

$$U_{vh} = \frac{\hat{v}_s \cdot \vec{E}}{K I_1 E_0} \quad \text{où } \hat{v}_s = \hat{\theta}$$

$$U_{vh} = \frac{\alpha |\alpha_z| [R_{//} (\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{n} \cdot \hat{n}_s) - R_{\perp} (\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{v} \cdot \hat{n}_s)]}{k_1 \alpha_z [(\hat{n} \cdot \hat{v})^2 + (\hat{n} \cdot \hat{n})^2]}$$

$$U_{hv} = \frac{\alpha |\alpha_z| [R_{//} (\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{v} \cdot \hat{n}_s) - R_{\perp} (\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{n} \cdot \hat{n}_s)]}{k_1 \alpha_z [(\hat{n} \cdot \hat{v})^2 + (\hat{n} \cdot \hat{n})^2]}$$

$$U_{vv} = \frac{\alpha |\alpha_z| [R_{//} (\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{v} \cdot \hat{n}_s) - R_{\perp} (\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i)(\hat{n} \cdot \hat{n}_s)]}{k_1 \alpha_z [(\hat{n} \cdot \hat{v})^2 + (\hat{n} \cdot \hat{n})^2]}$$

Avec $\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i = -\sin\theta \sin(\phi_s - \phi)$

$\hat{n} \cdot \hat{n}_s = \sin\theta_s \sin(\phi_s - \phi)$

$\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i = \sin\theta \cos\theta_s \cos(\phi_s - \phi) + \cos\theta \sin\theta_s$

$\hat{v} \cdot \hat{n}_s = \cos\theta \sin\theta_s \cos(\phi_s - \phi) + \sin\theta \cos\theta_s$

En rétrodiffusion $\phi = 0$ et $\phi_s = \pi$

Donc $\hat{n}_s \cdot \hat{n}_i = \hat{n} \cdot \hat{n}_s = 0$

$$\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i = -\sin\theta \cos\theta_s + \cos\theta \sin\theta_s = \sin(\theta_s - \theta)$$

$$\hat{v} \cdot \hat{n}_s = -\cos\theta \sin\theta_s + \cos\theta_s \sin\theta = \sin(\theta - \theta_s)$$

Soit $\hat{v}_s \cdot \hat{n}_i = -\hat{v} \cdot \hat{n}_s$

Ainsi les expressions des facteurs de polarisations se réduisent à:

$$U_{hh} = -R_{\perp} \frac{q |q_z|}{k_1 q_z} \frac{\sin(\theta_s - \theta)}{\sin(\theta - \theta_s)} = R_{\perp} \frac{q |q_z|}{k_1 q_z}$$

$$U_{vh} = 0$$

$$U_{hv} = 0$$

$$U_{vv} = -R_{//} \frac{q |q_z|}{k_1 q_z} \frac{\sin(\theta_s - \theta)}{\sin(\theta - \theta_s)} = -R_{//} \frac{q |q_z|}{k_1 q_z}$$

ANNEXE 1-C

Valeurs des facteurs de polarisation dans les expressions du champ diffusé sous l'approximation scalaire des champs.

Lorsque l'on ne tient pas compte des termes de pente dans le système de coordonnées locales, les changements de polarisation en un point donné sont ignorés. Dans ce cas, les champs diffusés polarisés que l'on est amené à calculer ont la même forme que ceux obtenus en utilisant l'intégrale scalaire de Helmholtz [3]. Ainsi, on peut approximer le système de coordonnées locales par:

$$\hat{n} \approx \hat{x} \sin\theta \cos\phi + \hat{y} \sin\theta \sin\phi - \hat{z} \cos\theta$$

$$\hat{t} \approx \hat{x} \sin\phi - \hat{y} \cos\phi$$

$$\hat{a} \approx -(\hat{x} \cos\theta \cos\phi + \hat{y} \cos\theta \sin\phi + \hat{z} \sin\theta)$$

et la normale à la surface locale par :

$$\hat{n}_1 \approx -\hat{x} Z_x - \hat{y} Z_y + \hat{z}$$

Pour la polarisation horizontale, les produits de vecteurs dans les équations (1-18) et (1-19) deviennent:

$$\hat{a} \cdot \hat{t} = \hat{n} \cdot \hat{t} = -1$$

$$\hat{n}_1 \times \hat{t} = \hat{x} \cos\phi + \hat{y} \sin\phi + \hat{z} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_1 = -[\cos\theta + \sin\theta (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)]$$

$$\hat{a} \cdot \hat{a} = 0$$

Pour cette même polarisation, une des formes du coefficient de Fresnel est :

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos\theta_1 - \eta_1 \cos\theta_{t1}}{\eta_2 \cos\theta_1 + \eta_1 \cos\theta_{t1}}$$

où θ_1 et θ_{t1} sont les angles d'incidence et de transmission locales.

On peut appliquer le développement en série de Taylor à R_{\perp} en fonction des pentes de la surface Z_x et Z_y suivant les directions x et y. On obtient :

$$R_{\perp} = R_{\perp_0} - R_{\perp_0} \left[\frac{\eta_2 \sin\theta + \eta_1 \sin\theta_t}{\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \cos\theta_t} \right] (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$\approx R_{\perp_0} + R_{\perp_1} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

avec

$$R_{\perp_0} = \frac{\eta_2 \cos\theta - \eta_1 \cos\theta_t}{\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \cos\theta_t}$$

et $R_{\perp_1} = - R_{\perp_0} \frac{\eta_2 \sin\theta + \eta_1 \sin\theta_t}{\eta_2 \cos\theta + \eta_1 \cos\theta_t}$

On peut, de la même façon, développer le coefficient de Fresnel en polarisation verticale:

$$R_{//} \approx R_{//_0} + R_{//_1} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

avec

$$R_{//_0} = \frac{\eta_1 \cos\theta - \eta_2 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t}$$

et $R_{//_1} = - [\eta_1 \sin\theta - \eta_2 \sin\theta_t - R_{//_0}(\eta_1 \sin\theta + \eta_2 \sin\theta_t)] \times$
 $(\eta_1 \cos\theta + \eta_2 \cos\theta_t)^{-1}$

Ces approximations pour R_{\perp} et $R_{//}$ ne sont applicables que lorsque l'écart quadratique des pentes de la surface est inférieure à 0.25 et lorsque l'on se trouve loin de l'angle de Brewster de telle façon que la différence entre R_{\perp} et $R_{//}$ ne soit pas trop importante.

Les équations (1-18) et (1-19) peuvent s'écrire sous la forme:

$$\hat{n}_1 \times \vec{E} = - (1 + R_{\perp_0}) [\hat{x} \cos\phi + \hat{y} \sin\phi + \hat{z} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)] E_0$$

$$- R_{\perp_1} (\hat{x} \cos\phi + \hat{y} \sin\phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi) E_0$$

$$\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H} = [- (1 - R_{\perp_0}) \cos\theta + [R_{\perp_1} \cos\theta - (1 - R_{\perp_0}) \sin\theta] \times$$

$$(Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)] (\hat{x} \sin\phi - \hat{y} \cos\phi) E_0$$

Dans le cas de la polarisation verticale $\hat{a} \cdot \hat{t} = 0$ et $\hat{a} \cdot \hat{d} = 1$, les champs tangents deviennent alors:

$$\hat{n}_1 \times \vec{E} = [(1 - R_{//0}) \cos\theta - [R_{//1} \cos\theta - (1 - R_{//0}) \sin\theta] \times \\ (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)] (\hat{x} \sin\phi - \hat{y} \cos\phi) E_0$$

$$\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H} = - (1 + R_{//0}) [\hat{x} \cos\phi + \hat{y} \sin\phi + \hat{z} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)] E_0 \\ - R_{//1} (\hat{x} \cos\phi + \hat{y} \sin\phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi) E_0$$

En remplaçant les valeurs des champs tangents dans les équations (1-44), on obtient:

$$\bar{U}_{hh} = - R_{\perp 0} \cos\theta_s \cos(\phi_s - \phi) + [R_{\perp 0} \sin\theta_s - R_{\perp 1} \cos\theta_s \cos(\phi_s - \phi)] \times \\ (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi) - R_{\perp 0} \cos\theta \cos(\phi_s - \phi) - \\ [R_{\perp 0} \sin\theta - R_{\perp 1} \cos\theta] \cos(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi - Z_y \sin\phi)$$

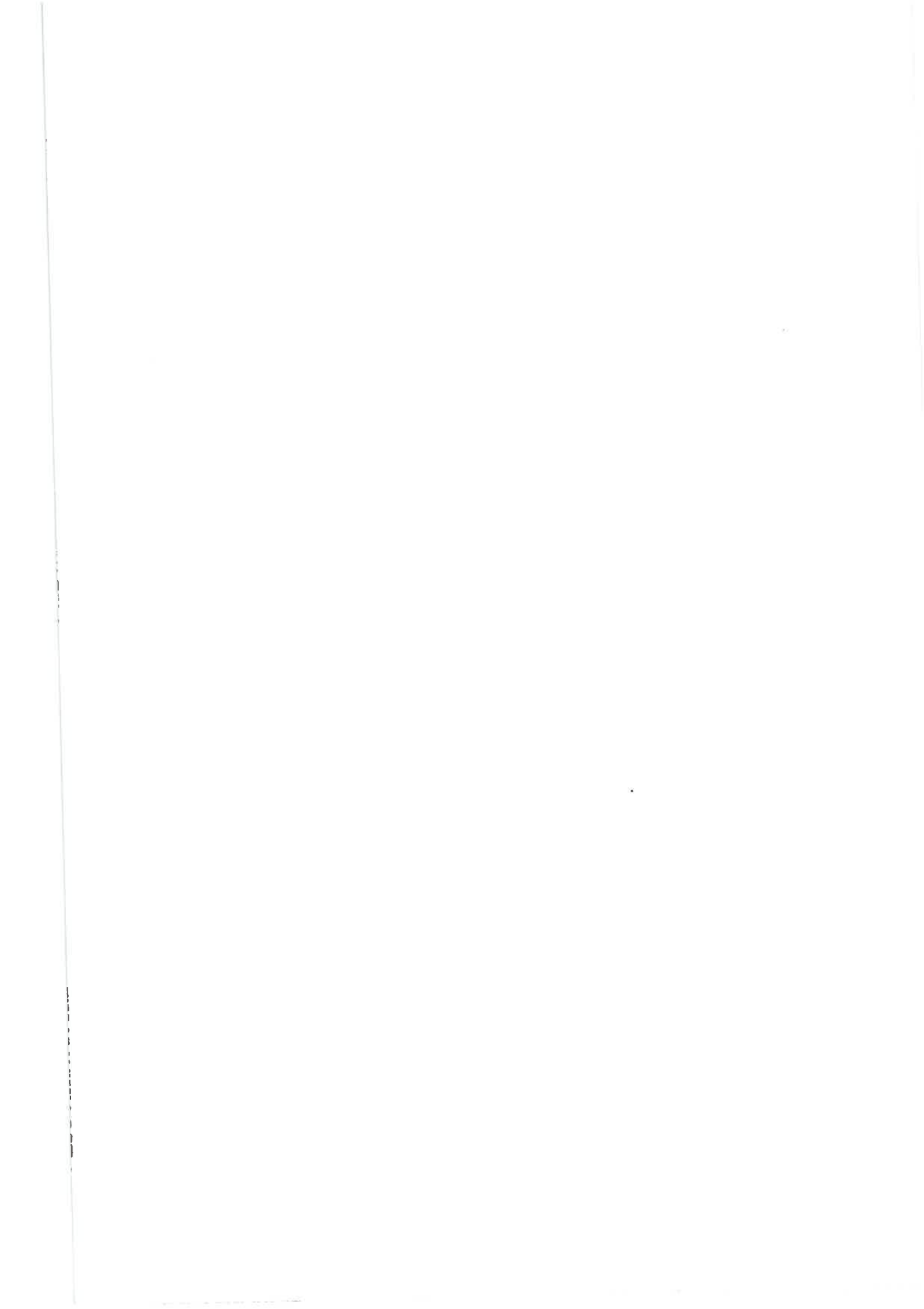
$$\bar{U}_{hh} = - R_{\perp 0} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi) + \\ \{ R_{\perp 0} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{\perp 1} (\cos\theta + \cos\theta_s) \times \\ \cos(\phi_s - \phi) \} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

On a pris $\hat{n}_1 \times \vec{E}^s$ et $\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H}^s$ approximativement égaux à $\hat{n} \times \vec{E}$ et $\eta_1 \hat{n}_1 \times \vec{H}$ auxquels on a soustrait le terme de champ incident. De la même façon, on obtient :

$$\bar{U}_{vh} = - R_{\perp 0} (1 + \cos\theta \cos\theta_s) \sin(\phi_s - \phi) - \\ [R_{\perp 0} \sin\theta \cos\theta_s + R_{\perp 1} (1 + \cos\theta \cos\theta_s)] \times \\ \sin(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$\bar{U}_{vv} = - R_{//0} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi) + \\ \{ R_{//0} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{//1} (\cos\theta + \cos\theta_s) \times \\ \cos(\phi_s - \phi) \} (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$

$$\bar{U}_{hv} = - R_{//0} (1 + \cos\theta \cos\theta_s) \sin(\phi_s - \phi) - \\ [R_{//0} \sin\theta \cos\theta_s + R_{//1} (1 + \cos\theta \cos\theta_s)] \times \\ \sin(\phi_s - \phi) (Z_x \cos\phi + Z_y \sin\phi)$$



ANNEXE 1-D

Calcul de la composante cohérente du coefficient de diffusion

On a :

$$(1D-1) \quad I_{\text{co}} = \frac{q_z^2}{q_z^2} |a_0|^2 \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} (2L - |u|)(2L - |v|) \exp(jq_x u + jq_y v) \times \exp[-q_z^2 s^2] du dv$$

Et d'autre part :

$$(1D-2) \quad \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} |u| \exp(jq_x u + jq_y v) du dv = \frac{2 \sin 2q_y L}{q_y} \left[\frac{4L}{q_x} \sin 2q_x L - \frac{2}{q_x^2} (1 - \cos 2q_x L) \right]$$

$$(1D-3) \quad \int_{-2L}^{2L} \int_{-2L}^{2L} \exp(jq_x u + jq_y v) du dv = \frac{4}{q_x q_y} \sin 2q_x L \sin 2q_y L$$

$$(1D-4) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\sin q}{q} \right)^2 dq = \pi$$

Si on applique (1D-2) et (1D-3) à (1D-1), on obtient, après simplifications :

$$(1D-5) \quad I_{\text{co}} = |a_0|^2 \exp(-q_z^2 s^2) (4/q_x^2 q_y^2) (1 - \cos 2q_x L) (1 - \cos 2q_y L) = |a_0|^2 \exp(-q_z^2 s^2) 8L^4 \left(\frac{\sin q_x L}{q_x L} \right)^2 \left(\frac{\sin q_y L}{q_y L} \right)^2$$

En utilisant, d'une part, le théorème de Greenberg [12] :

||| Si $\int_{-a}^a W(x) dx = 1$, où $W(x)$ est une fonction non négative
alors $LW(x)$ est une distribution de Dirac.

Et, d'autre part, l'identité (1D-4), on peut écrire, pour L grand

$$\frac{L}{\pi} \left(\frac{\sin q_x L}{q_x L} \right)^2 = \delta(q_x) \quad \text{et} \quad \frac{L}{\pi} \left(\frac{\sin q_y L}{q_y L} \right)^2 = \delta(q_y)$$

Ainsi, on peut approximer (1D-5) par :

$$(1D-6) \quad I_{00} \approx |a_0|^2 \exp(-q_z^2 s^2) (4\pi L)^2 \delta(q_x) \delta(q_y)$$

Pour calculer le coefficient de diffusion correspondant à ce terme, on prendra :

$$(1D-7) \quad \langle |E_{pq}^S|^2 \rangle = |KE_0|^2 I_{00}$$

On obtient donc, pour un milieu sans perte :

$$(1D-8) \quad c_{\text{coh}}^0 = \frac{k^2 |a_0|^2}{4\pi A_0} \exp(-q_z^2 s^2) (4\pi L)^2 \delta(q_x) \delta(q_y)$$

$$= \pi k^2 |a_0|^2 \exp(-q_z^2 s^2) \delta(q_x) \delta(q_y)$$

ANNEXE 1-E

Calcul intégral relatif aux moyennes d'ensemble.

Soit $z(x,y)$ la fonction de surface d'un processus aléatoire stationnaire gaussien, s^2 sa variance et $\rho(x - x', y - y')$ son coefficient de corrélation.

La fonction caractéristique de $z - z'$ est alors définie comme suit [13]:

$$(1E-1) \quad \begin{aligned} \langle \exp[jq_z(z - z')] \rangle &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp[jq_z(z - z')] p(z, z') dz dz' \\ &= \exp\{-q_z^2 s^2 [1 - \rho(x - x', y - y')]\} \end{aligned}$$

où $p(z, z')$ est la fonction densité conjointe de probabilité de la surface et q une constante.

Si on suppose que l'ordre de dérivation et d'intégration peut être interchangé et en différentiant les deux membres de (1E-1) par rapport à x , on obtient:

$$(1E-2) \quad \begin{aligned} \iint_{-\infty}^{+\infty} jq_z \frac{\partial z}{\partial x} \exp[jq_z(z - z')] p(z, z') dz dz' \\ = q_z^2 s^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} \exp[-q_z^2 s^2 (1 - \rho)] \end{aligned}$$

On pose $u = x - x'$, $v = y - y'$ et $Z_x = \frac{\partial z}{\partial x}$

Alors, on peut réécrire (1E-2) sous la forme:

$$(1E-3) \quad \begin{aligned} \iint_{-\infty}^{+\infty} Z_x \exp[jq_z(z - z')] p(z, z') dz dz' \\ = -jq_z s^2 \frac{\partial \rho}{\partial u} \exp[q_z^2 s^2 (1 - \rho)] \\ = \langle Z_x \exp[jq_z(z - z')] \rangle \end{aligned}$$

De la même façon, on peut obtenir les relations suivantes:

$$\langle Z'_x \exp[jq (z - z')] \rangle = \langle Z_x \exp[jq (z - z')] \rangle$$

$$\begin{aligned} \langle z'_y \exp[jq (z - z')] \rangle &= \langle z_y \exp[jq (z - z')] \rangle \\ &= -jq_z s^2 \frac{\partial \rho}{\partial v} \exp\{q_z^2 s^2 [1 - \rho(u, v)]\} \end{aligned}$$

ANNEXE 1-F

Développement du calcul de la composante de la section efficace de rétrodiffusion due aux termes de pente.

On a :

$$I_s = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{Re} \left\{ a_0 \left(a_1^* \frac{\partial \rho}{\partial u} + a_2^* \frac{\partial \rho}{\partial v} \right) \right\} \exp[-q_z^2 s^2 (1 - \rho)] \times \\ \exp(jq_x u + jq_y v) du dv$$

On procède au même changement de variables que pour résoudre l'équation (1-53) : $(u, v) \rightarrow (\phi, \xi)$.

Alors I_s peut s'écrire sous la forme :

$$I_s = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \operatorname{Re} \left\{ a_0 \left(a_1^* \cos \phi + a_2^* \sin \phi \right) \right\} \exp[-q_z^2 s^2 (1 - \rho)] \times \\ \frac{\partial \rho}{\partial \xi} \exp[jq_t \xi \cos(\phi - \phi_0)] \xi d\xi d\phi$$

On pose $\alpha = \phi - \phi_0$, et on intègre sur α :

$$I_s = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} \operatorname{Re} \left\{ a_0 \left(a_1^* \cos(\alpha + \phi_0) + a_2^* \sin(\alpha + \phi_0) \right) \right\} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} \times \\ \exp[-q_z^2 s^2 (1 - \rho)] \exp[jq_t \xi \cos \alpha] \xi d\xi d\alpha$$

On a :

$$a_1^* (\cos \alpha \cos \phi_0 - \sin \alpha \sin \phi_0) + a_2^* (\sin \alpha \cos \phi_0 + \sin \phi_0 \cos \alpha) = \\ \cos \phi_0 (a_1^* \cos \alpha + a_2^* \sin \alpha) + \sin \phi_0 (-a_1^* \sin \alpha + a_2^* \cos \alpha)$$

Si on se limite, dans un premier temps, à l'intégrale sur α , on peut écrire :

$$I_{s\alpha} = \int_0^{2\pi} \frac{q_x}{q_t} (a_1^* \cos\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha + \int_0^{2\pi} \frac{q_x}{q_t} (a_2^* \sin\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha$$

$$+ \int_0^{2\pi} \frac{q_y}{q_t} (-a_1^* \cos\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha + \int_0^{2\pi} \frac{q_y}{q_t} (a_2^* \sin\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha$$

avec $\beta = q_t \xi$

Ce qui se réduit à :

$$I_{s\alpha} = \int_0^{2\pi} \frac{q_x}{q_t} (a_1^* \cos\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha + \int_0^{2\pi} \frac{q_y}{q_t} (a_2^* \cos\alpha) e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha$$

$$I_{s\alpha} = \left(\frac{q_x a_1^* + q_y a_2^*}{q_t} \right) \int_0^{2\pi} \cos\alpha e^{j\beta \cos\alpha} d\alpha$$

$$I_{s\alpha} = \left(\frac{q_x a_1^* + q_y a_2^*}{q_t} \right) \times 2\pi j J_1(\beta)$$

Donc :

$$I_s = \text{Re} \left\{ \left(\frac{q_x a_1^* + q_y a_2^*}{q_t} \right) \right\} 2\pi j \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} \exp[-q_t^2 s^2 (1 - \rho)] \times J_1(q_t \xi) \xi d\xi$$

En rétrodiffusion : $\theta_s = \theta$, $\phi_s = \pi$ et $\phi = 0$

donc

$$\begin{cases} q_x = -2 k \sin\theta \\ q_y = 0 \\ q_z = 2 k \cos\theta \end{cases}$$

$$a_0 = - R_{pp} (\cos\theta + \cos\theta_s) \cos(\phi_s - \phi) = 2 R_{pp} \cos\theta$$

$$a_1 = a \cos\phi = a$$

$$\begin{aligned} a &= R_{pp} [\sin\theta_s - \sin\theta \cos(\phi_s - \phi)] - R_{pp_1} (\cos\theta_s + \cos\theta) \cos(\phi_s - \phi) \\ &= 2 (R_{pp} \sin\theta + R_{pp_1} \cos\theta) \end{aligned}$$

$$\text{D'autre part } q_t^2 = q_x^2 + q_y^2 = q_x^2$$

$$\text{Donc } |q_t| = |q_x|, \text{ or } q_t \geq 0 \text{ et } q_x \leq 0$$

$$\text{Ainsi } q_t = - q_x$$

On a :

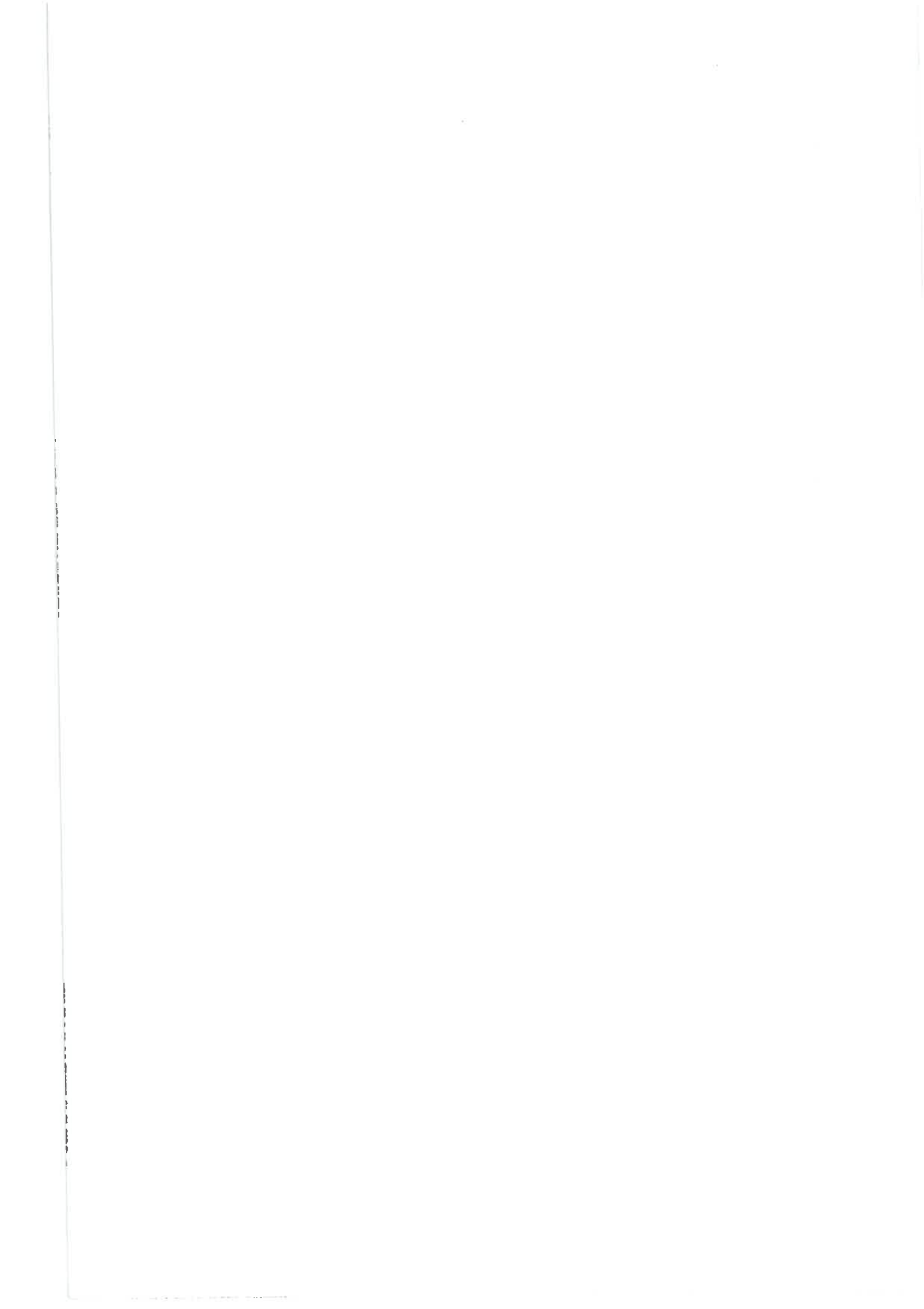
$$\begin{aligned} \Re\{-a_0 a_1^*\} &= \Re\{-2 (2R_{pp} \cos\theta) (R_{pp}^* \sin\theta + R_{pp_1}^* \cos\theta)\} \\ &= -4 \{ |R_{pp}|^2 \cos\theta \sin\theta + \Re\{R_{pp} R_{pp_1}^*\} \cos^2\theta \} \end{aligned}$$

I_s devient :

$$\begin{aligned} I_s &= -4 [|R_{pp_0}|^2 \cos\theta \sin\theta + \Re\{R_{pp_0} R_{pp_1}^*\} \cos^2\theta] \times \\ & 2\pi j \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} J_1(2k \sin\theta \xi) \exp[-q_z^2 s^2(1-\rho)] \xi d\xi \end{aligned}$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Ulaby F.T., R.K. Moore & A.K. Fung, 1982: "Microwave Remote Sensing : Active and Passive, Vol.II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory ", Ch.12, Reading, MA : Addison-Wesley.
- [2] Moore, R. K., 1970 : "Ground Echo", in Radar Handbook, M. I. Skolnik, ed. Mc Graw-Hill, New-York, Chapter 25.
- [3] Beckmann, P. & A. Spizzichino, 1963 : "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Pergamon Press, New-York.
- [4] Sancer, M. I., 1969 : "Shadow Corrected Electromagnetic Scattering from a Randomly Rough Surface", IEEE Trans. Ant. and Prop., 17, pp 577-585.
- [5] Wu, S. T. & A. K. Fung, 1972 : "A Noncoherent Model for Microwave Emissions and Backscattering from Sea Surface", J. Geophys. Res., 77, pp 5917-5929.
- [6] Sancer, M. I., 1968 : "An Analysis of the Vector Kirchhoff Equations and the Associated Boundary-Line Change", Radio Science, 3, pp 141-144.
- [7] Silver, S., 1947 : "Microwave Antenna Theory and Design", M.I.T. Radiation Lab., series 12, Mc Graw-Hill, New-York, p 161.
- [8] Stratton, J. A., 1941 : "Electromagnetic Theory", Mc Graw-Hill, New-York, pp 464-469.
- [9] Tai, C. T., 1972 : "Kirchhoff Theory : Scalar, Vector or Dyadic ?", IEEE Trans. Ant. and Prop., pp 114-115.
- [10] Fung, A. K. & H. J. Eom, 1981 : "Multiple Scattering and Depolarisation by a Randomly Rough Surface", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-29, N° 3, pp 463-471.
- [11] Rice, S. O., 1951 : "Reflection of Electromagnetic Waves from Slightly Rough Surfaces", Communications in pure and applied Mathematics, 4, pp 361-378.
- [12] Greenberg, M. D., 1971 : "Application of Green's Functions in Science and Engineering", Prentice-Hall, Inc., p 15.
- [13] Davenport, W. B. & W. L. Root, 1958 : "Random Signal and Noise", Mc Graw-Hill, New-York, Chapter 8.



Chapitre 2

LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

"Ne transmettez à ceux qui vous lisent que l'expérience qui se dégage de la douleur"

Lautréamont

2.1 INTRODUCTION

Le CRPE et l'Unité Système Agraire et Développement (SAD) Paris-Grignon de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) ont organisé une campagne de Télédétection du 15 Mars à fin Avril 1984 dont l'objectif était l'utilisation d'un diffusiomètre hyperfréquence afin d'étudier l'effet du drainage souterrain sur la vitesse de ressuyage des sols.

Cette expérience se situe dans un programme plus vaste de mise au point de références techniques sur l'évaluation des jours disponibles pour les travaux, adaptées aux différents types de fonctionnement des exploitations que l'on peut distinguer dans une petite région agricole.

Les données expérimentales obtenues à l'aide du diffusiomètre ERASME d'une part et des prélèvements in situ d'autre part, permettront la validation du modèle exposé au chapitre 5. Les bases théoriques de ce modèle ont été développées dans le chapitre 1.

Le Radar ERASME (Etudes Radar des Sols et de la MER) conçu et réalisé au CRPE avec l'appui financier du CNES est ordinairement installé sur l'hélicoptère de type Alouette II du CNET. Il doit permettre la mise au point d'algorithmes thématiques liés à l'utilisation de l'imagerie radar quantifiée [1].

Actuellement, il est utilisé pour la recherche des applications d'un diffusiomètre en bande C, en particulier pour l'étude des vents à la surface de l'océan, de la cartographie des glaces et du contenu en humidité des sols. Ces thèmes seront ceux exploités par ERS-1. Leur multiplicité a nécessité une conception souple de l'appareil permettant aux utilisateurs de varier les configurations de polarisation et d'incidence.

Dans le cadre de notre programme, l'objectif de mesure de l'humidité de surface impose la configuration suivante: Bande C à 5.3 GHz, angle d'incidence inférieur à 20° et polarisations d'émission et de réception horizontales [2],[3],[4].

Après une présentation du site expérimental, nous détaillerons les caractéristiques techniques, le principe de fonctionnement et l'acquisition des données du radar ERASME. Nous expliciterons ensuite comment, à partir du spectre de

puissance du signal reçu, on calcule la distance de la cible. Enfin, nous présenterons dans leur ensemble, les antennes, le porteur et le matériel au sol qui a permis d'obtenir des vérités terrain.

2.2 LE SITE EXPERIMENTAL

L'étude a été menée dans la région de NOYON, au Nord-Est de l'Oise. Ce choix d'emplacement a été guidé par les raisons suivantes:

- C'est une région du Bassin Parisien où le drainage agricole s'avère nécessaire et où l'on trouve facilement des couples de situations drainée - non drainée.

- On y trouve également une grande variation de types de sols, ce qui permet de faire porter l'étude sur des sols de différentes textures. Il a été ainsi retenu des parcelles à tendance limoneuse et d'autres à tendance argileuse.

- C'est enfin une des zones d'action de l'unité SAD de l'INA-PG dans laquelle les agriculteurs sont particulièrement sensibles au problème du drainage et à l'évaluation de son efficacité.

Il a été retenu quatre couples de situation drainée - non drainée, les deux individus d'un même couple se caractérisant par :

- Le même type de labour,
- La proximité géographique,
- Une tension de l'eau dans le sol identique. Cette tension dépend de la nature physique du sol.

Sur ces quatre couples sélectionnés, deux faisaient l'objet de prélèvements au sol simultanément aux mesures radar. Ce sont les résultats obtenus sur l'un de ces deux là que nous étudierons par la suite.

2.3 LE RADAR ERASME

2.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

ERASME est un Radar FM-CW (Frequency Modulated - Continuous Wave), à visée latérale, fonctionnant en bande C, [5]. Ses caractéristiques techniques sont données en Table 1.

Type	FM-CW
Frequency	5.35 GHz (C-band)
Transmitted power	15 mW (11.6 dbm)
Modulation	Triangular - Period 6 ms
Bandwidth	220 MHz (adjustable)
Transmitting antenna	Corrugated horn Gain 18.3 db 3 db beamwidth 12.6°
Receiving antenna	Planar dipoles array Gain 25.2 db (VV) 23.2 db (HH) beamwidth 2.3° x 5.6° (VV) 1.8° x 8.5° (HH)
Receiver gain	101.3 db \pm 0.4
Signal processing	FFT analyzer. 512 pts. 500 Hz resolution Synchronized with the modulation waveform. Available bands : 120-220 kHz 150-250 kHz 240-340 kHz
Internal calibration	Data recorded on CCT Bulk acoustic wave device delay 2 μ sec. Attenuation 61.5 db Coupler attenuation 30 db
Ancillary data	Clock Flight parameters (pitch, roll, heading, pressure altimeter). 8 analog data lines

TABLE 1 : Caractéristiques d'ERASME

- EMISSION

C'est une émission entretenue, modulée linéairement en fréquence. La fréquence centrale est 5.35 GHz de modulation triangulaire ± 100 MHz environ et de période de répétition 6ms. La pente de modulation est de 8.10^{10} Hz/s et la puissance d'émission à l'antenne de 15 mW. Une partie du signal émis est envoyée dans un dispositif à onde acoustique de volume, appelé ligne à retard, qui simule une cible à 300 mètres. Ceci permet de contrôler les variations de gain de l'ensemble du radar et d'établir ainsi un étalonnage relatif du système ainsi qu'un étalonnage de la relation fréquence / distance du radar.

- RECEPTION

Le gain du récepteur est de 77 dB. L'analyse se fait sur une fenêtre de 100 KHZ à partir de 150 KHZ. Elle est assurée par un transformateur de Fourier numérique donnant 200 points de spectre en 3 ms. Le temps d'analyse correspondant à l'acquisition de 512 échantillons temporels est de 2 ms. Ceci correspond à 1.2 fois la fréquence de Shannon pour 100 KHZ.

- ACQUISITION

Un micro-processeur assure simultanément l'acquisition des 200 points de spectre et des paramètres de service comme, par exemple, l'heure, le roulis, le tangage, le cap et l'altitude du porteur. L'enregistrement est fait sur une bande magnétique compatible avec l'ordinateur.

- SCHEMA DE PRINCIPE

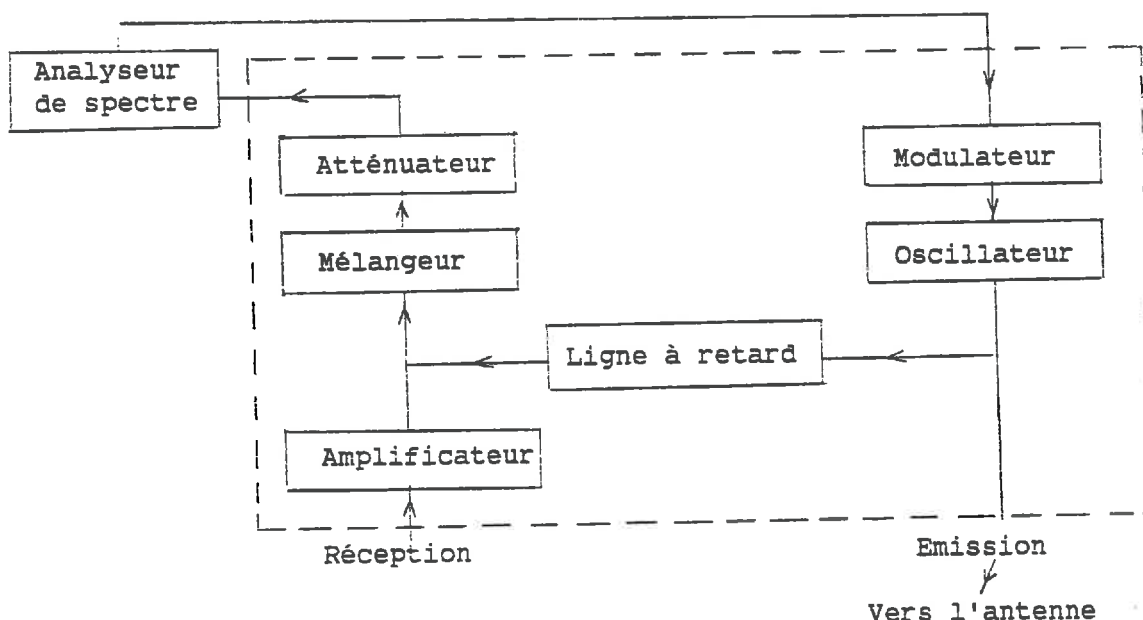


FIGURE 2.1 Schéma de principe

On trouvera un schéma plus détaillé en Annexe 2-A.

2.3.2 RELATION ENTRE LA DISTANCE DE LA CIBLE ET LE SPECTRE DE PUISSANCE DU SIGNAL RECU

L'onde émise est modulée en fréquence sur une largeur de bande B. A la réception, le signal est envoyé dans un mélangeur dont le rôle est d'établir une différence de fréquence entre le signal reçu et le signal émis à un instant donné t. Cette différence de fréquence, appelée fréquence relative, permet de sélectionner les signaux en fonction de la distance qu'ils ont parcourue.

La figure 2.2 donne l'allure générale de la fréquence relative.

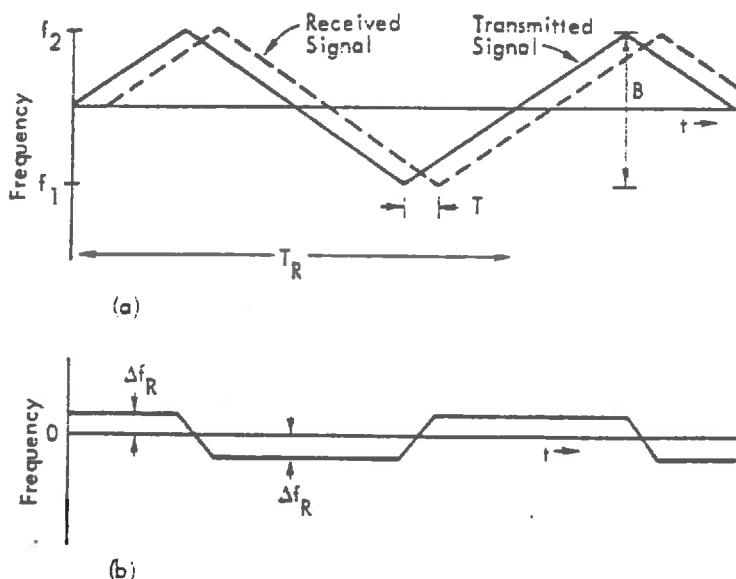


FIGURE 2.2: (a) Fréquences émise et reçue pour une cible ponctuelle ayant un retard T.

(b) Fréquence relative en sortie.

Supposons une cible ponctuelle à une distance r , alors la fréquence résultante peut être reliée à la distance de la cible par la relation:

$$(2-1) \quad F_i = \frac{4 B r}{c T_r}$$

avec B : largeur de bande
 c : vitesse de l'onde électromagnétique
 T_r : période de répétition

La résolution en distance radiale, δr , s'écrira:

$$(2-2) \quad \delta r = \frac{c T_r}{4 B} \delta f$$

où δf est la différence de fréquence qui ne peut être déterminée avec une précision supérieure à $2/T_i$ pour un temps d'intégration $T_i < T_r$

Cette condition sur le temps d'intégration est imposée par la prise en compte du temps de stabilisation du signal modulé.

Ainsi

$$(2-3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta f_{\min} = \frac{2}{T_i} \\ \delta r_{\min} = \frac{c}{2 B} \end{array} \right.$$

La période de répétition T_r égale 6 ms. On intègre sur un temps $T_i = 4$ ms et on a $B = 161$ MHz.

On obtient: $\delta r = 0.94$ mètre
 $\delta f = 500$ Hz

La figure 2.3 représente la géométrie de la mesure dans le plan perpendiculaire à la vitesse du porteur contenant l'axe de l'antenne de réception.

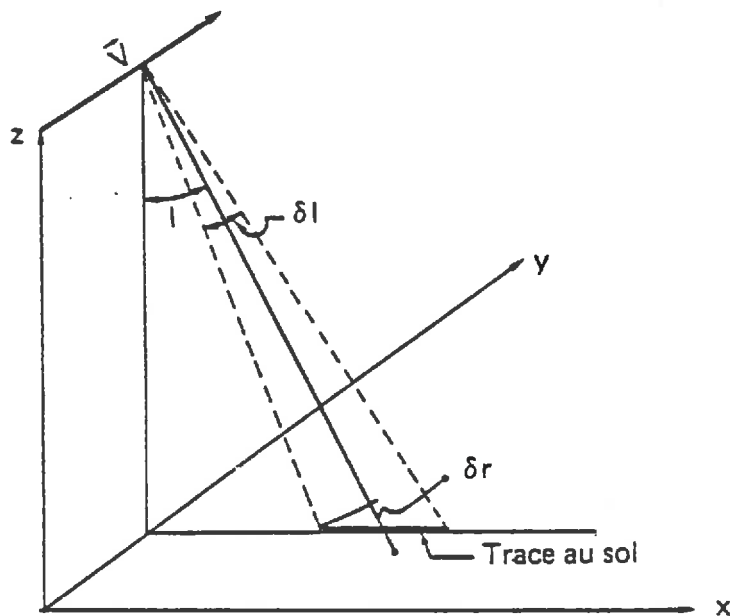


FIGURE 2.3 Géométrie nominale de la mesure

Le rapport entre, d'une part l'inclinaison I de l'antenne de réception et, d'autre part la trace au sol l correspondant à une ouverture δI et à une altitude h du porteur s'écrit:

$$(2-4) \quad l = \frac{2 h \delta I}{\cos^2 I}$$

La valeur de δI peut être déduite de relations géométriques sur la figure 2.3. On montre que:

$$(2-5) \quad \delta I = \frac{\delta r}{2 \operatorname{tg} I (r - \delta r/2)}$$

A titre d'exemple, la trace au sol correspondant à la résolution en distance radiale $\delta r = 0.94$ m pour $h = 360$ m et $I = 17^\circ$, serait $l = 3.44$ m.

La valeur de l'angle d'incidence est liée à l'altitude par la relation:

$$(2-6) \quad \cos I = \frac{h}{r} = \frac{F_0}{F}$$

où F_0 est la fréquence liée à l'altitude.

Cette relation est déduite de l'équation (2-1) qui stipule que F est proportionnelle à r , le coefficient de proportionnalité étant une constante définie par le système.

Ainsi pour une variation Δh en altitude, on aura:

$$(2-7) \quad \delta I \sin I = - \frac{\Delta h}{r} = - \frac{\Delta F_0}{F}$$

En reprenant les mêmes paramètres que précédemment, on montre qu'une variation de 1 mètre sur la hauteur entraîne une incertitude de 0.25° sur l'angle d'incidence.

La procédure de mesure est la suivante:

L'organe d'acquisition et de traitement lit à intervalles réguliers le signal à la sortie des filtres après détection quadratique. Il recherche, dans l'ordre des fréquences croissantes, le premier filtre contenant du signal (premier écho de sol en provenance de la verticale), ce qui lui permet de calculer l'altitude du porteur avec une précision δh qui dépend de la largeur des filtres. Il calcule alors la fréquence de battement correspondant à l'inclinaison choisie.

L'analyse du spectre étant faite à l'aide de filtres jointifs de largeur unique b , on peut sélectionner les filtres donnant le signal en provenance de la région du sol recherchée ($I \pm \delta I$).

2.4 LES ANTENNES

Le système comporte quatre antennes : deux pour l'émission et deux pour la réception.

Pour l'émission, on utilise des cornets qui sont des antennes à diffraction et pour la réception, des antennes plates formées d'un réseau de dipôles.

Le champ électromagnétique rayonné par un dipôle est polarisé, la polarisation du rayonnement est donnée par la direction du vecteur champ électrique. Celui-ci a une composante perpendiculaire (ou horizontale) au dipôle et une composante parallèle (ou verticale) au dipôle.

Il est possible de mesurer l'une ou l'autre de ces composantes. On appelle polarisation HH (respectivement VV) un couple d'antennes qui émet et reçoit la composante horizontale (respectivement verticale) du champ électrique.

Dans le système utilisé, un couple émission-réception fonctionne en polarisation HH et l'autre en polarisation VV.

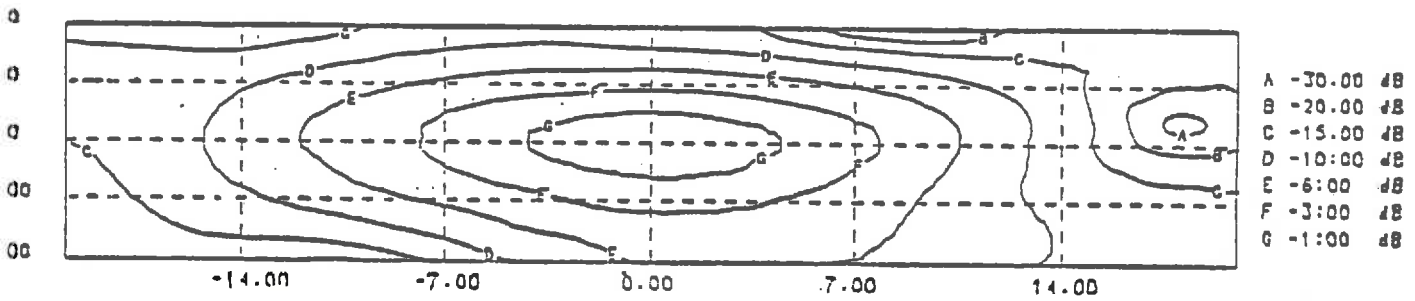
On peut aussi mesurer les polarisations croisées (VH ou HV) pour évaluer le degré de dépolarisation d'une cible.

- CARACTERISTIQUES DES ANTENNES

Les antennes sont solidaires du porteur. Elles sont inclinées à $17^{\circ}28'$ et ont un angle de piqué de $8^{\circ}21'$ (valeurs mesurées) par rapport à la verticale et ce pour compenser celui de l'hélicoptère.

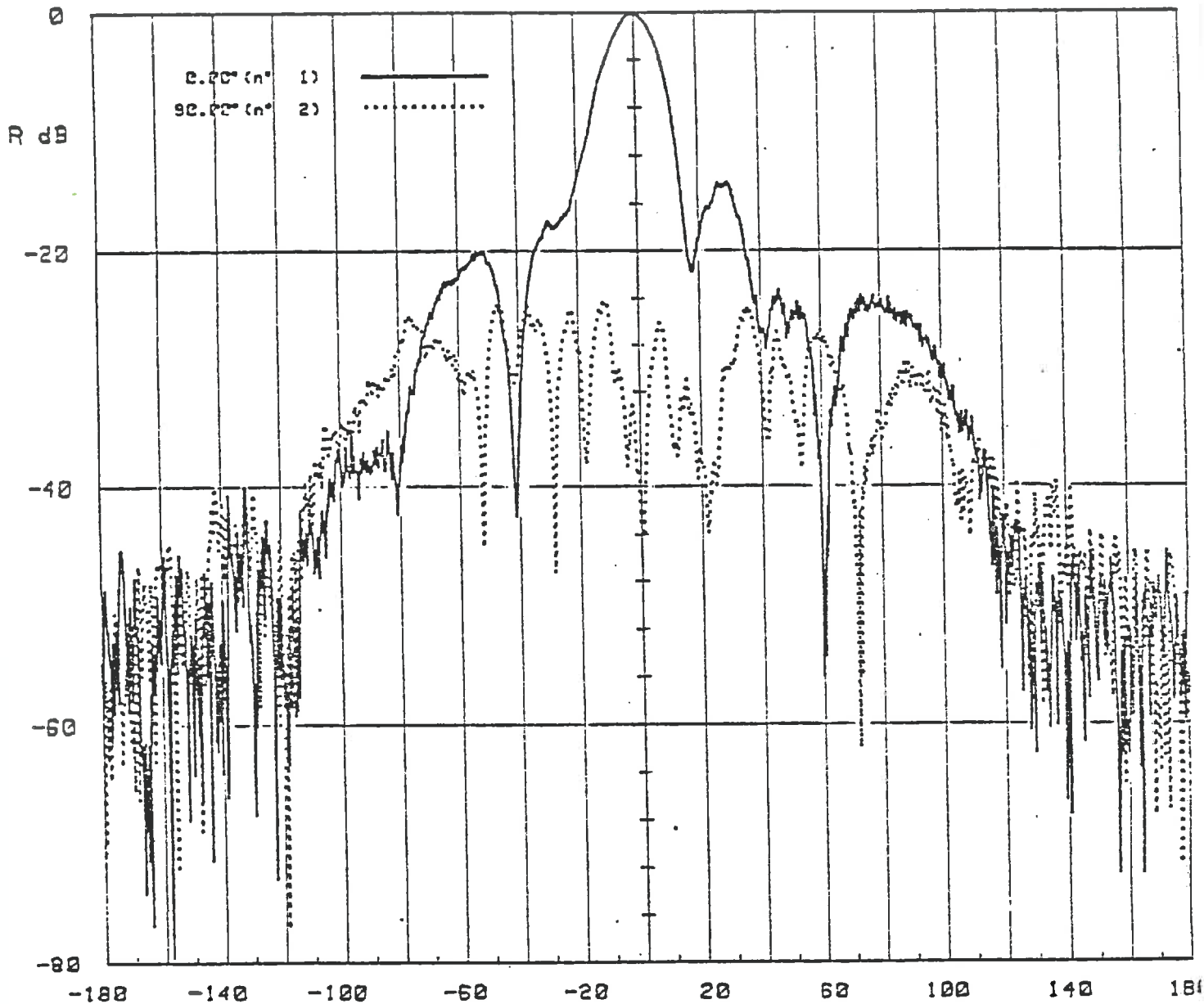
* Les antennes d'émission sont constituées d'un cornet ayant un gain de 18.2 dB. Les ouvertures à 1 dB et à 3 dB du cornet doivent pouvoir contenir les ouvertures à 1 dB et à 3 dB des antennes de réception compte tenu de l'effet de parallaxe. L'ouverture du faisceau à 3 dB est de $12^{\circ}6'$.

* Les antennes de réception sont des antennes plates formées de 80 dipôles. Leur gain maximal est de 23.2 dB en polarisation HH et 25.2 dB en polarisation VV, elles présentent un diagramme dissymétrique (figures 2.4a et 2.4b). L'axe de l'antenne est donc pointé sur l'inclinaison $17^{\circ}28'$ dans un plan perpendiculaire au déplacement du porteur. La forme du lobe des antennes de réception est donc fonction du degré de protection que l'on désire contre la distance ambiguë (lobe arrière) et de l'élargissement admissible (effet Doppler sur les bords du lobe dû à la vitesse du porteur). Ces contraintes doivent tenir compte de l'effet du tangage (accentuation du décalage Doppler) et du roulis (apparition de la composante ambiguë ou disparition du signal à l'incidence 0°). Les demi-ouvertures du faisceau sont respectivement $1.8^{\circ} \times 8.5^{\circ}$ en HH et $2.3^{\circ} \times 5.6^{\circ}$ en VV.



FICHIER: OF53F1 DATA: AA
NR-FREQ: 1 FREQ: 5350.00 MHz NORME A: 1.40 (EMAX) ANT 1 REC V CDR ROUG H

FIGURE 2.4a : Diagramme de l'antenne de réception en polarisation HH. Représentation en coordonnées rectangulaires.



SCFIN (Dep

FIGURE 2.4b : Diagramme de l'antenne de réception en polarisation HH. Représentation en coordonnées polaires. La courbe en pointillés donne le diagramme en polarisations croisées.

Le roulis et le tangage entraînent une variation de l'intergain des antennes d'émission et de réception sur la zone observée au sol. Des corrections de gain sont donc nécessaires. Nous les étudierons lors du traitement des données.

2.5 LE PORTEUR

Le porteur utilisé est l'hélicoptère Alouette II du CNET pour des raisons de facilités d'installation. Les paramètres optimaux, par temps calme et vent régulier pour ce type de porteur sont les suivants (source: IGN, service avion du CNET):

Altitude	:	360 mètres
Variation d'altitude	:	± 10 mètres
Vitesse de translation	:	40 m/s (75 Noeuds)
Angle de piqué	:	$\approx 7^\circ$ (fonction de la vitesse relative de l'air)
Angle de roulis moyen	:	$< 5^\circ$ (en vol stabilisé)
Angle de tangage moyen	:	$< 1.5^\circ$ " "

On notera, pour l'altitude de vol, que les considérations de champ proche limitent à 50 mètres l'altitude minimale de vol.

2.6 LE MATERIEL AU SOL

Parallèlement aux mesures radar, un suivi quasi-journalier de l'humidité de surface a pu être obtenu à l'aide de prélèvements. Pour cela, chaque parcelle a été échantillonnée de manière à obtenir un ensemble de données significatif. Sur chacun des sites, nous avons prélevé six groupes d'échantillons. L'espacement de ces groupes est fonction de l'emplacement des drains sur les parcelles drainées et aléatoire sur les parcelles non drainées. Par exemple, sur le site de Sterlin, dont un plan de drainage est fourni en Annexe 2-B; l'espacement prévu entre deux groupes est de quinze mètres. Un groupe d'échantillons comporte trois mesures: l'une est faite dans le creux du labour, les deux autres sur le sommet. Chaque site comporte donc dix-huit échantillons.

Le but de ces mesures est de connaître l'humidité des six premiers centimètres de surface. Pour cela on utilise une boîte calibrée aux dimensions voulues, on la remplit avec une dose de terre qui se trouve en surface et on vide le contenu dans un récipient que l'on ferme hermétiquement si celui-ci doit être stocké avant la pesée. Ces récipients dont le poids à vide est connu, sont pesés avec le contenu de terre humide. On les place ensuite dans une étuve à 105° C pendant 24 heures.

Dès leur sortie, ils sont pesés de nouveau. on obtient ainsi le poids de terre sèche.

Le taux d'humidité est alors donné par:

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{\text{P. de Terre humide} - \text{P. de terre sèche}}{\text{P. de terre sèche} - \text{Tare}}$$

Ce taux d'humidité est mesuré pour chaque échantillon. On calcule ensuite une humidité moyenne sur chaque parcelle ainsi que son écart type.

Le tableau 2 résume les mesures effectuées durant la campagne. \bar{W} correspond à l'humidité moyenne sur un champ, n au nombre d'échantillons représentatifs et s à l'écart type.

L'analyse granulométrique des sites a donnée les résultats suivants:

	STERLIN	VAGNIEZ
Argile : < 2 μ	35%	18%
Limon fin : 2 - 20 μ	18%	22.8%
Limon grossier : 20 - 50 μ	23.6%	45.1%
Sable fin : 50 - 200 μ	12%	12.1%
Sable grossier : 200 - 2000 μ	4%	5.5%

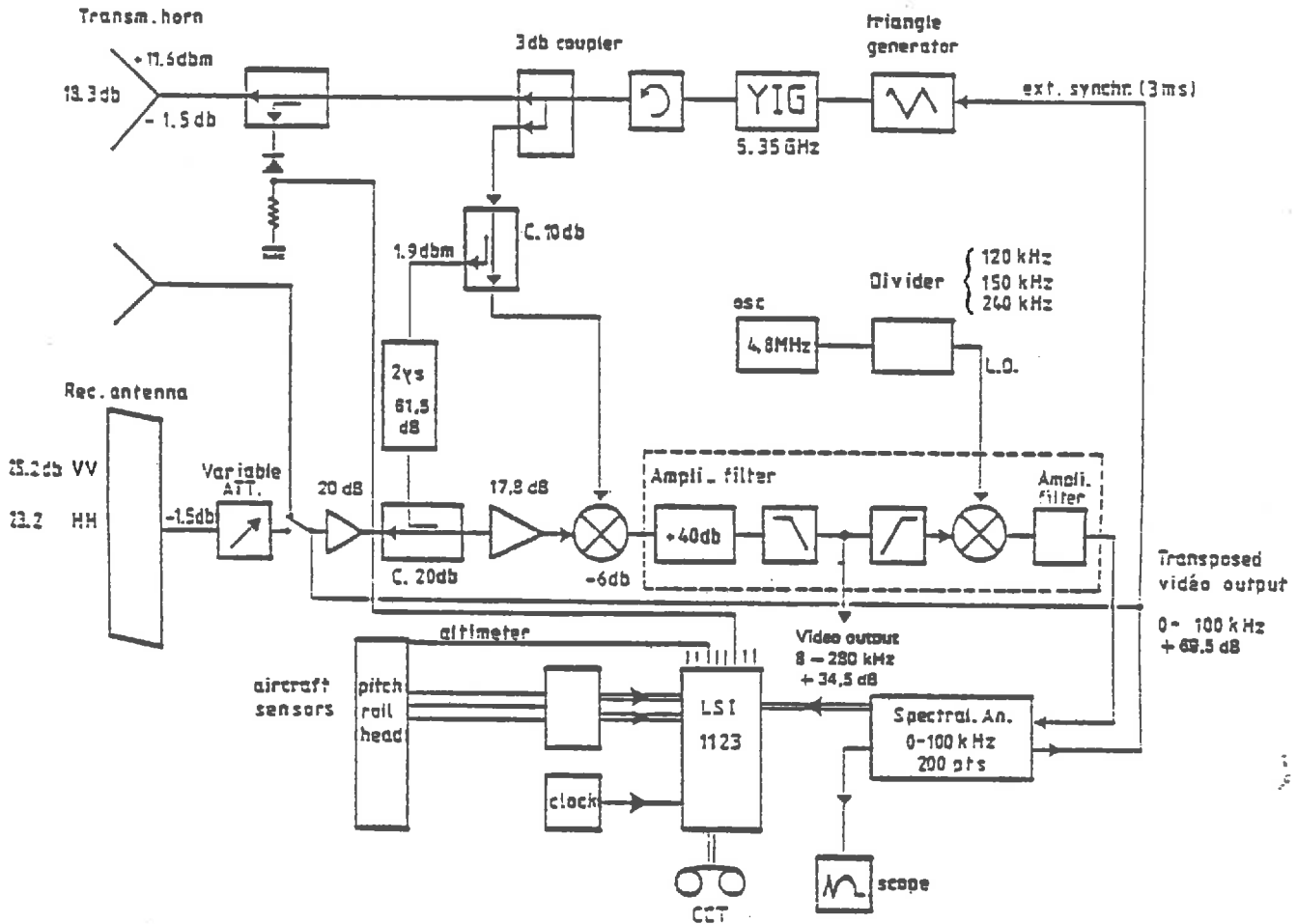


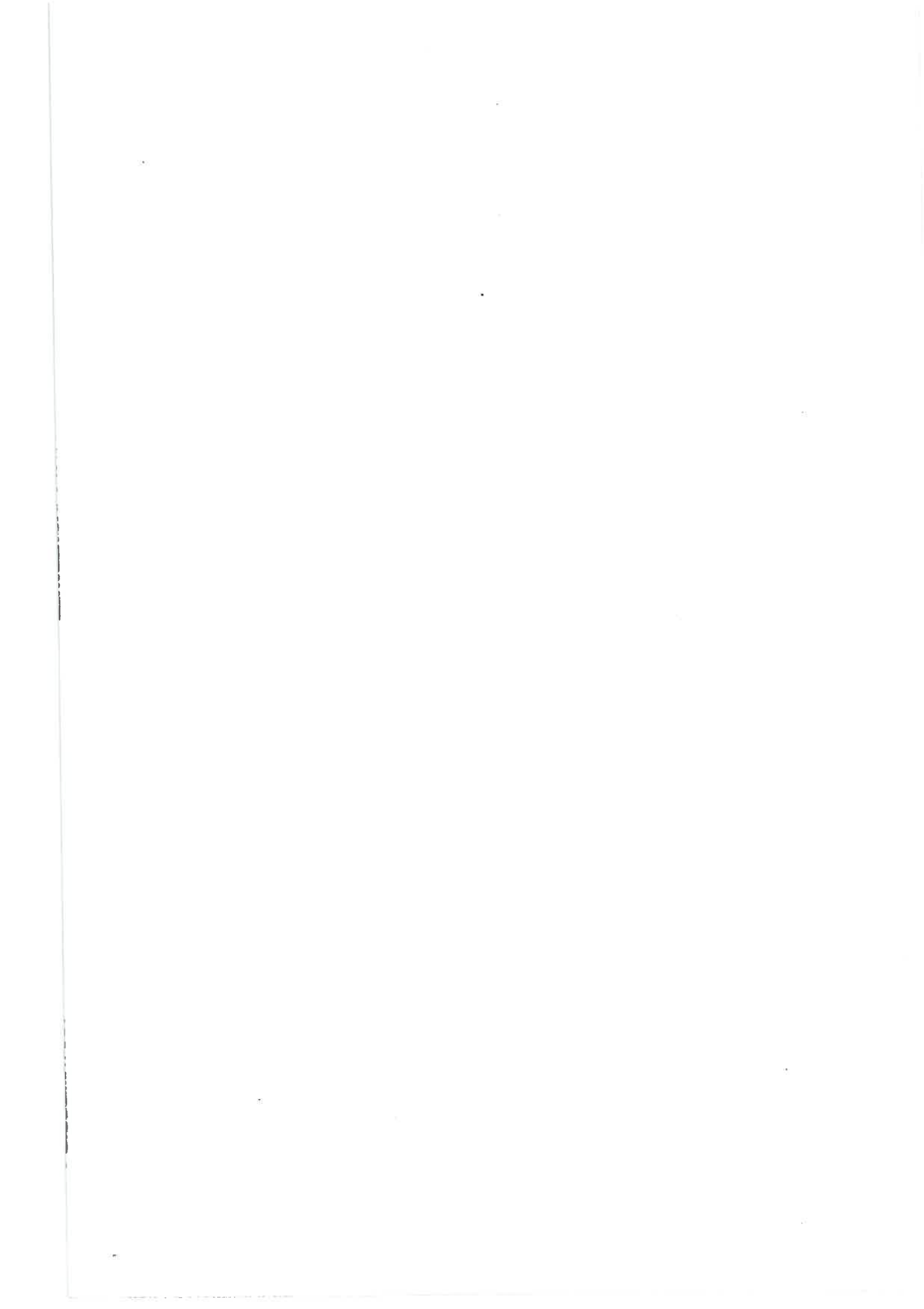
DATE	STERLIN						VAGNIEZ					
	Non Drainé			Drainé			Non Drainé			Drainé		
	n	\bar{W}	s	n	\bar{W}	s	n	\bar{W}	s	n	\bar{W}	s
16 /03	17	21.94	1.30	17	20.04	1.49	10	18.80	1.29	18	18.51	0.81
19 /03	16	21.27	1.27	17	18.09	1.38	17	18.23	0.72	17	19.13	1.15
20 /03	17	21.46	1.44	17	17.98	1.46	18	17.73	1.43	18	17.50	1.30
21 /03	18	22.48	2.86	18	18.39	2.21	18	16.92	0.96	18	18.27	0.82
22 /03	16	23.80	2.97	17	16.48	1.28	18	17.13	0.98	18	18.70	1.88
26 /03	18	28.26	2.58	17	24.07	1.87	15	21.56	0.77	15	20.94	0.64
27 /03	15	28.32	1.79	15	22.43	1.94	18	21.03	0.74	18	21.23	0.53
28 /03	9	30.43	1.82	18	22.64	1.12						
9 /04	9	24.35	1.18	9	19.33	0.81	9	20.84	0.76	9	20.54	0.98
10 /04							18	23.39	1.52	18	23.22	1.33
11 /04	12	28.00	2.44	18	21.26	1.57	17	22.97	1.11	18	23.18	0.78
12 /04	18	23.39	2.12	18	18.28	1.86	18	20.27	0.53	18	20.14	0.92
13 /04	18	25.17	1.77	18	18.23	1.30	17	18.62	0.99	18	18.02	1.11
17 /04	12	16.48	1.18	12	13.86	1.41						
18 /04	6	15.94	1.51	6	13.05	1.63	6	10.85	1.92	6	12.10	2.20

TABLEAU 2 : Résultats, exprimés en pourcentages, des mesures d'humidité effectuées par prélèvements des six premiers centimètres de surface du sol.

ANNEXE 2-A

Schéma de principe du radar IRASME





ANNEXE 2-B

Plan de drainage du site de Sterlin





REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bernard, R & D. Vidal-Madjar, 1983 : "ERASME : diffusiomètre hélicopté en bande C, application à la mesure de l'humidité des sols", Proceedings of EARSel Symposium on Remote Sensing Applications for Environmental Studies. Brussels, Belgium, 26-29 April 1983, p 59-64.
- [2] Ulaby, F.T, P.P Batlivala & M.C Dobson, 1978 : "Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture", Part. I, Bare Soil, IEEE Trans. GE-16(4), pp 286-295.
- [3] Ulaby, F.T, P.P Batlivala & M.C Dobson, 1979 : "Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture", Part. II, Vegetation covered soil, IEEE Trans. GE-17(2), pp 33-40.
- [4] Ulaby, F.T, R.K Moore & A.K Fung, 1982 : "Microwave Remote Sensing Active", Vol. 2, Addison-Wesley Publishing Company Reading, Massachusetts.
- [5] Bernard, R, D. Vidal-Madjar, F. Baudin & G. Laurent, 1986 : "Data Processing and Calibration for an Airborne Scatterometer", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24, N° 5, pp 709-716

Chapitre 3

LE TRAITEMENT DES DONNEES RADAR

"L'homme n'a pas les données
nécessaires pour répondre aux
questions qu'il s'adresse"
Renan

3.1 INTRODUCTION

Le traitement des données radar doit permettre, d'une part l'évaluation de l'altitude du porteur sur chacun des enregistrements obtenus et, d'autre part, de calculer la valeur de la section efficace de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence à partir de la puissance reçue.

Pour cela nous utiliserons l'équation radar qui, appliquée au radar ERASME, s'écrit, pour une porte donnée [1] :

$$(3-1) \quad P_{ri} = A P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} G_{oe} G_{or} \iint_{S_i} \frac{G_{er}(l,m)}{d^4} \sigma^0(x,y) ds$$

Avec P_{ri} = puissance reçue
 P_t = puissance émise
 A = gain du récepteur
 λ = longueur d'onde
 S_i = surface de résolution pour la porte i
 d = distance de la cible
 G_{oe} et G_{or} : gains maxima des antennes émettrice et réceptrice.
 $G_{er}(l,m)$: gain relatif tenant compte de l'aller et du retour des ondes, fonction de la direction de la cible (l,m) dans le référentiel lié à l'antenne.

$\sigma^0(x,y)$: section de rétrodiffusion au point (x,y)

l et m sont deux angles liés aux axes de l'antenne qui permettent de caractériser la direction de la cible; m (respectivement l) est l'angle que fait la projection de la droite cible-antenne avec la projection de l'axe principal du lobe sur le plan perpendiculaire (respectivement parallèle) à la vitesse de l'hélicoptère.

Pour pouvoir sortir $\sigma^0(x,y)$ de l'intégrale, on le considère constant sur toute la surface S (approximation réaliste sauf pour les angles compris entre 0° et $5^\circ-6^\circ$). S est la surface interceptée par une porte radar. Cela simplifie le calcul de l'intégrale (3-1), qui est évaluée en utilisant

les paramètres radar pré-établis et les variables de service enregistrées (roulis, tangage). On démontre que l'erreur résiduelle d'estimation de σ^0 due à des erreurs sur la géométrie de la mesure est inférieure à 0.5 dB [1].

Les dimensions de la surface de résolution, pour une porte i , peuvent être calculées à l'aide de l'équation suivante:

$$(3-2) \quad L_i = \frac{\delta r}{\sin\theta}$$

où L_i représente la largeur de la porte i et δr la résolution en distance radiale.

3.2 ETUDE DU SPECTRE

L'analyse du spectre est assurée par un analyseur numérique utilisant la transformée de Fourier rapide. La variation instantanée de la puissance du signal après filtrage à bande étroite est due aux évanouissements provenant de la rugosité du sol et des variations d'attitude du porteur.

L'ordre de grandeur des périodes d'oscillation du porteur est de 10 secondes, il est donc réaliste de le considérer stationnaire pendant 200 ms.

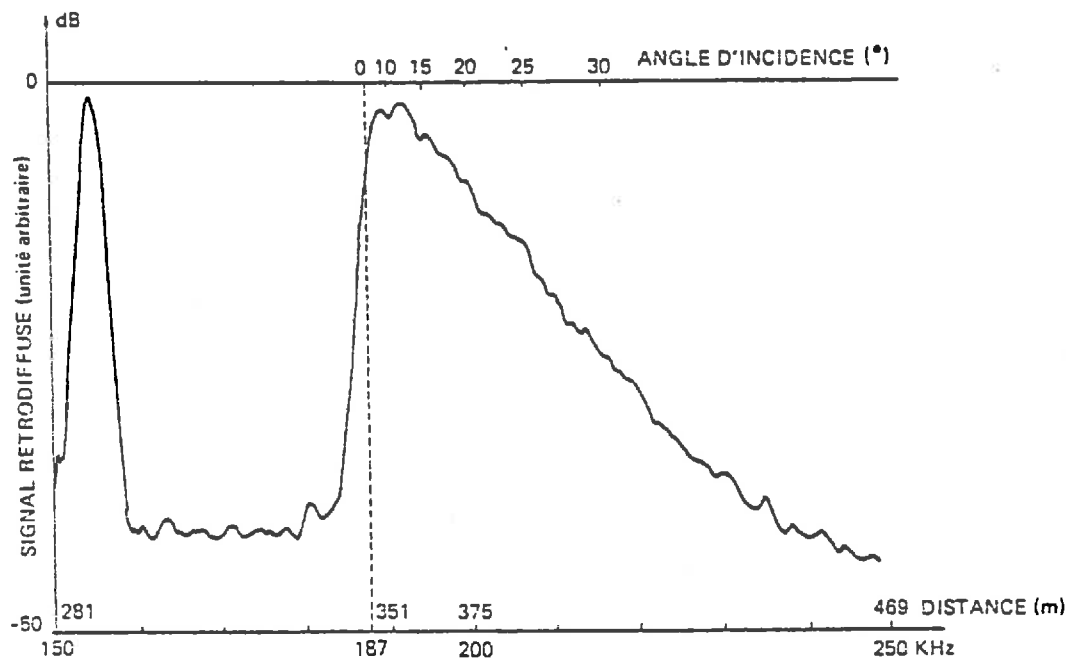


FIGURE 3.1 Exemple d'un spectre obtenu par ERASME

La figure 3.1 montre un spectre tel qu'il peut être obtenu après lecture des données sur la bande magnétique. Le premier pic correspond au signal provenant de la ligne à retard. Le second pic au signal provenant du sol. Le maximum ne correspond pas exactement à la distance du sol, ou altitude. Sur la figure 3.1, l'altitude est de 351 mètres.

Plusieurs phénomènes contribuent avec une importance comparable à la forme de ce deuxième pic :

- L'effet de distance
- L'effet d'incidence
- L'effet du gain de l'antenne dans la direction d'observation.
- L'effet de surface observée

L'effet du lobe explique la décroissance lente aux hautes fréquences conjointement à l'augmentation de la distance (le gain diminuant sur les bords du lobe).

La surface observée est d'autant plus importante que l'angle d'incidence est faible. Ceci a pour effet de compenser l'atténuation due au fait que l'on ne soit pas au centre du lobe.

Un exemple de l'effet d'incidence est montré sur la figure 3.2. On peut voir deux spectres pour lesquels la valeur du roulis est très différente.

* Sur la figure 3.2a, l'incidence est de $44^{\circ}77$ ($17^{\circ} + 27^{\circ}77$) et la réponse du sol est très faible. Ceci provient du fait que le signal reçu est convolué avec le lobe d'antenne et, à 44° , celui-ci a une valeur proche de -20 dB.

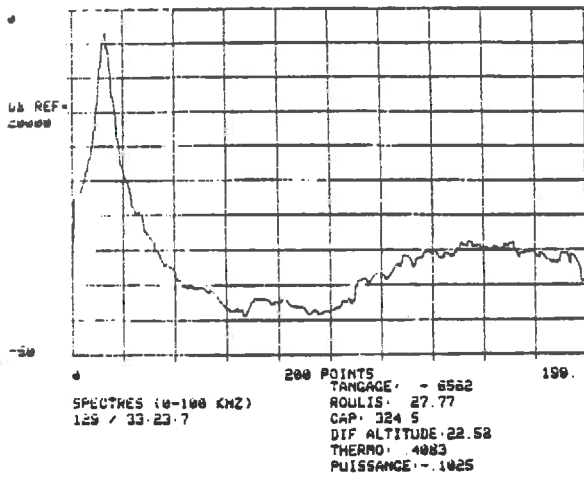
* Sur la figure 3.2b, l'incidence est de $0^{\circ}98$ ($17^{\circ} - 16^{\circ}12$). On se trouve au maximum du lobe et le signal provenant du sol est quasi-spéculaire.

Un exemple de l'effet de distance est donné sur la figure 3.3.

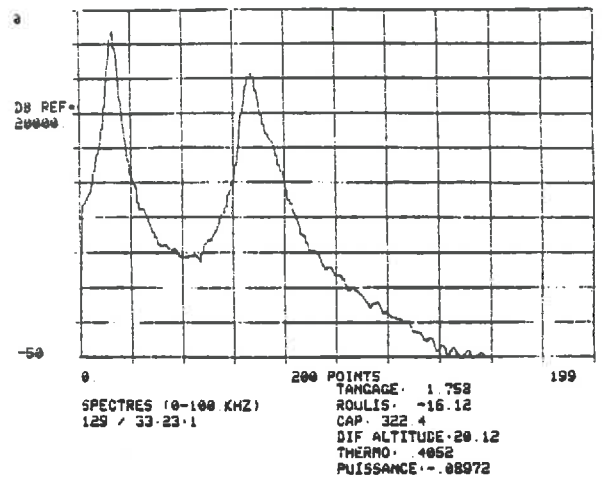
* La figure 3.3a montre un spectre obtenu à une altitude proche de 450 mètres. On remarque que l'écho du sol est très éloigné du pic de la ligne à retard.

* Sur la figure 3.3b, on voit un spectre enregistré à une altitude supérieure à 500 mètres. Le second pic n'apparaît plus car le décalage en fréquence est supérieur au nombre de filtres utilisés.

Les valeurs du roulis montrées sur la figure 3.2 sont volontairement élevées. En utilisation normale du porteur, elles sont inférieures à 2 degrés en moyenne. Le roulis a pour effet de modifier la position d'une cible à une incidence donnée, dans le lobe d'antenne. Cela se répercute sur les valeurs l et m et donc du gain en ce point, $G_{er}(l,m)$ [2].

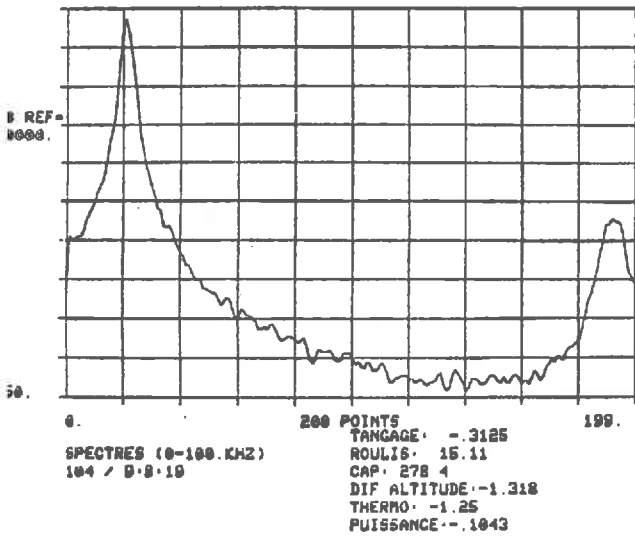


(a)

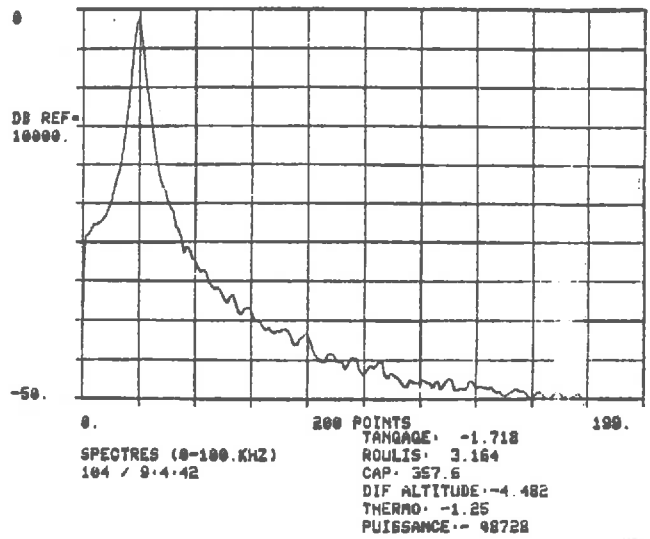


(b)

FIGURE 3.2 : Effet de l'incidence sur l'allure du spectre.



(a)



(b)

FIGURE 3.3 : Effet de la distance sur l'allure du spectre.

Le tangage n'apporte, au premier ordre, qu'une variation de la position de l'aire illuminée. En effet, la résolution longitudinale est définie par le lobe d'antenne. On n'a donc pas de pointage longitudinal mais une intégration sur le lobe. Le tangage tend à décaler l'emplacement du lobe et à modifier sa surface au sol. Ceci est un effet du deuxième ordre par rapport au roulis. Pour des angles d'incidence supérieurs à 10° et un tangage compris entre $+5^\circ$ et -5° , on pourrait considérer l'erreur comme négligeable [3]. Cependant, on en tient compte.

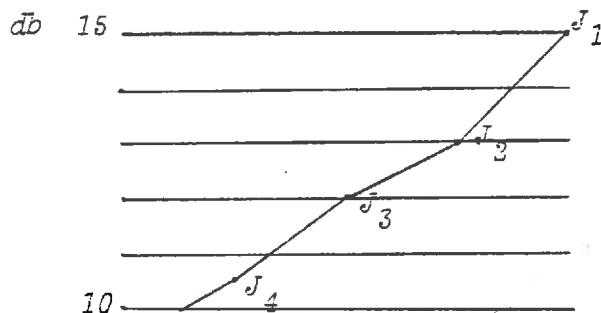
3.3 RECHERCHE DE L'ALTITUDE

L'altitude est le premier paramètre que l'on cherche à déterminer après l'acquisition des données. En effet, c'est lui qui permettra de déterminer la position du champ dans le lobe d'antenne. C'est pourquoi on utilise le radar en tant qu'altimètre.

Lorsque l'antenne pointe près de la verticale ($i < 20^\circ$), il est possible de déterminer l'altitude directement grâce à la forme du signal, à la fréquence correspondant au premier retour radar. La précision relative sur la valeur de l'altitude est de l'ordre de la largeur d'un filtre, c'est-à-dire ± 1 mètre [1].

La valeur de la section efficace de rétrodiffusion à l'incidence 0° sera la superposition de la composante de réflexion spéculaire et du diagramme d'antenne.

Le critère choisi pour évaluer la position de l'altitude est relatif à la pente du spectre. Pour cela, un programme a été mis au point (programme "sol", R. Bernard et D. Vidal-Madjar) pour chercher la valeur maximum dans le pic de réponse et à partir de ce point, mesurer la chute en dB en se déplaçant vers les fréquences décroissantes. Lorsque deux couples successifs de points présentent une chute supérieure à 1.5 dB, on considère que le premier de ces quatre points est le premier écho de sol. Ceci peut se représenter par un schéma :



La chute entre J_1 et J_2 est de 2 dB, celle entre J_3 et J_4 de 1.5 dB, donc J_1 sera repéré comme étant l'altitude.

Le seuil a été choisi après évaluation de la pente de la ligne à retard qui représente la réponse percussive du radar. Celle-ci, dans le cas de la ligne à retard, a un niveau de l'ordre de 40 dB au dessus du bruit propre du radar et accuse une chute supérieure à 2 dB. Le signal provenant du sol étant plus faible et donc, pouvant être perturbé par le bruit, on a fixé un seuil inférieur (1.5 dB).

Ce critère s'est révélé satisfaisant pour les résultats obtenus lors de la campagne de Noyon. Il tombe cependant en défaut lorsque le roulis devient supérieur à 10°. On se trouve alors à une incidence de 27° et le gain des antennes a chuté de près de 20 dB donc la réponse est trop faible pour que l'on puisse obtenir une pente respectant le seuil de 1.5 dB.

3.4 CORRECTIONS DE GAIN DES ANTENNES ET DE SURFACE AU SOL

Pour obtenir la valeur de la section efficace de rétrodiffusion, il faut intégrer l'équation radar. On a vu précédemment que cette résolution nécessitait la connaissance de l'élément de surface sur lequel l'intégration doit se faire. Cette surface dépend de l'altitude, de l'incidence et des lobes d'antennes.

L'altitude ayant été déterminée et les diagrammes d'antennes étant connus, il reste à calculer la puissance du signal reçu pour un angle d'incidence donné. Cet angle est entièrement dépendant du roulis et du tangage du porteur. On va donc créer un fichier qui comportera toutes les valeurs de l'intégrale de l'équation radar pour un angle de visée de $17^\circ \pm 10^\circ$, un roulis de $\pm 6^\circ$ et un tangage de $\pm 4^\circ$. Il sera ainsi possible de résoudre l'équation radar par interpolation si l'on se trouve dans l'une quelconque de ces configurations.

Le dépouillement fournit les valeurs de $\sigma^0(i)$ pour i variant de 8° à 27° par pas de deux degrés toutes les 200 ms après intégration sur plusieurs portes radar successives. Le nombre de ces portes dépend de l'angle d'incidence. L'équation (2-4) permet de déterminer la trace au sol pour une incidence donnée et l'équation (3-2), la largeur d'une porte pour cette même incidence.

Par exemple : pour une altitude $h = 360$ m
une incidence $\theta = 17^\circ$
un pas $\Delta\theta = 2^\circ$

On aura une trace au sol $\Delta l = 2h \Delta\theta / \cos^2\theta \approx 27$ m

Et une largeur de porte $L_1 = \delta r / \sin\theta \approx 3$ m

Ainsi, dans ce cas, l'intégration de l'équation radar se fera sur 9 portes.

3.5 REPERAGE DE LA ROUTE SUIVIE PAR LE PORTEUR

On désire pouvoir repérer sur le spectre le signal rétrodiffusé par une cible ponctuelle. Pour cela, on utilise un trièdre métallique qui peut être assimilé à une cible ponctuelle. Ce trièdre est placé au centre d'un terrain nu. La trajectoire de l'hélicoptère est évaluée en fonction de son altitude et de l'incidence des antennes pour s'assurer que la cible est effectivement dans la zone de mesures (lobes d'antennes).

Une caméra reliée à un magnétoscope et fixée sur le support des antennes permet de filmer la trace au sol sur laquelle sont faites les mesures radar. La zone filmée est de dimensions largement supérieures à la partie couverte par le radar. Il faut donc délimiter la trace utile. Pour cela, on repère, sur l'écran de télévision, la ligne correspondant à une incidence de 17° . Cet étalonnage est possible grâce aux mesures faites avec le trièdre. L'enregistrement vidéo est synchronisé avec une horloge. On peut ainsi repérer simultanément sur le spectre et sur l'écran la réponse de la cible et coller sur ce dernier un marqueur qui permettra ultérieurement de situer la zone de mesures pendant la visualisation des champs. On note, lors du défilement des films, l'heure de début et l'heure de fin de passage sur un site (en séparant les parcelles drainées et non drainées) pour ne traiter par la suite que la partie utile des données.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Bernard, R., D. Vidal-Madjar, F. Baudin & G. Laurent, 1986: "Data processing and calibration for an airborne scatterometer", IEEE Trans, GE-RS, pp 709-716.

[2] Jackson, T.J., A. Chang & T.J. Schmugge, 1981 : "Aircraft active microwave measurements for estimating soil moisture", Photogram. Engin. and Remote Sensing, N° 47, pp 801-805.

[3] Bernard, R., P. Martin & D. Vidal-Madjar, 1981 : "Specifications des performances minimales pour un diffusiomètre en bande C destiné à la mesure de l'humidité des sols", document de travail CRPE 11075.

Chapitre 4

LES PARAMETRES DE SOL

*"l'humidité rouille les hommes comme
les fusils"*

Barbusse

4.1 INTRODUCTION

Nous avons présenté de façon qualitative, dans le premier chapitre, les deux paramètres fondamentaux qui caractérisent la rugosité d'une surface : la longueur de corrélation, L , et l'écart-type des hauteurs, s .

Ces deux valeurs sont essentielles à connaître puisque ce sont elles qui permettront de valider le choix de l'une ou l'autre des approximations possibles, à savoir l'approximation de la phase stationnaire ou l'approximation scalaire des champs. Nous exposerons donc leurs formulations mathématiques et leurs valeurs expérimentales dans la première partie de ce chapitre.

Le troisième paramètre de surface qui intervient dans la valeur du signal rétrodiffusé est la constante diélectrique du milieu. En micro-ondes, celle-ci est fortement dépendante du contenu en humidité du sol et, dans une moindre mesure, de la composition granulométrique du sol. On détaillera dans la seconde partie de ce chapitre le modèle utilisé pour évaluer la constante diélectrique connaissant l'humidité de surface.

4.2 PARAMETRES CARACTERISANT LA RUGOSITE DE LA SURFACE

L'écart type des hauteurs de la surface (s) et la longueur de corrélation (L) décrivent la variation statistique de la composante aléatoire de la hauteur par rapport à une surface de référence. Cette surface de référence peut être soit périodique si le sol présente un labour avec des sillons, soit la surface moyenne s'il n'existe que des variations aléatoires. Le choix d'une surface de référence périodique implique que l'on puisse, en pratique, clairement séparer les deux échelles de rugosité.

La figure 4.1 montre le profil de la surface obtenu expérimentalement sur le site de Sterlin. La mesure a été effectuée avec un "peigne" d'une longueur de deux mètres et comportant 153 dents mobiles. L'emplacement a été choisi de manière arbitraire sur le champ mais le peigne a été orienté parallèlement à la visée du radar.

L'écart type des hauteurs est calculé à partir des 153

points de mesures. Il est donné par l'expression :

$$(4-1) \quad s = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N (z_i)^2 - N (\bar{z})^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{où } \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$$

z_i correspond à la hauteur de la $i^{\text{ème}}$ dent du peigne.

Sa position x_i s'écrit :

$$x_i = i \times \frac{L_0}{N} \quad \text{où } L_0 \text{ est la longueur du peigne.}$$

L'écart type correspondant au profil montré sur la figure 4.1 est le suivant : $s = 2.76 \text{ cm}$.

La longueur de corrélation de la surface est évaluée à l'aide de la fonction d'autocorrélation normalisée qui, dans le cas d'un phénomène stationnaire, est définie par:

$$(4-2) \quad \rho(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i z_{j+i-1} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N+1-j} z_i \sum_{i=1}^{N+1-j} z_{j+i-1}}{\left(\sum_{i=1}^{N+1-j} z_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N+1-j} z_i \sum_{i=1}^{N+1-j} z_i \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{j=1}^N z_j^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j \sum_{j=1}^N z_j \right)^{\frac{1}{2}}}$$

où $x' = (j - 1) \Delta x$ et j est un entier ≥ 1 .

La figure 4.2 montre la fonction d'autocorrélation obtenue à partir du profil de la figure 4.1.

La longueur de corrélation L de la surface est ordinairement définie comme étant le déplacement x' pour lequel $\rho(x')$ égal $1/e$.

Soit $\rho(L) = \frac{1}{e} \approx 0.37$ comme indiqué sur la figure 4.2.

Dans ce cas particulier $L \approx 23 \text{ cm}$.

PROFIL DE LA SURFACE (STERLIN)

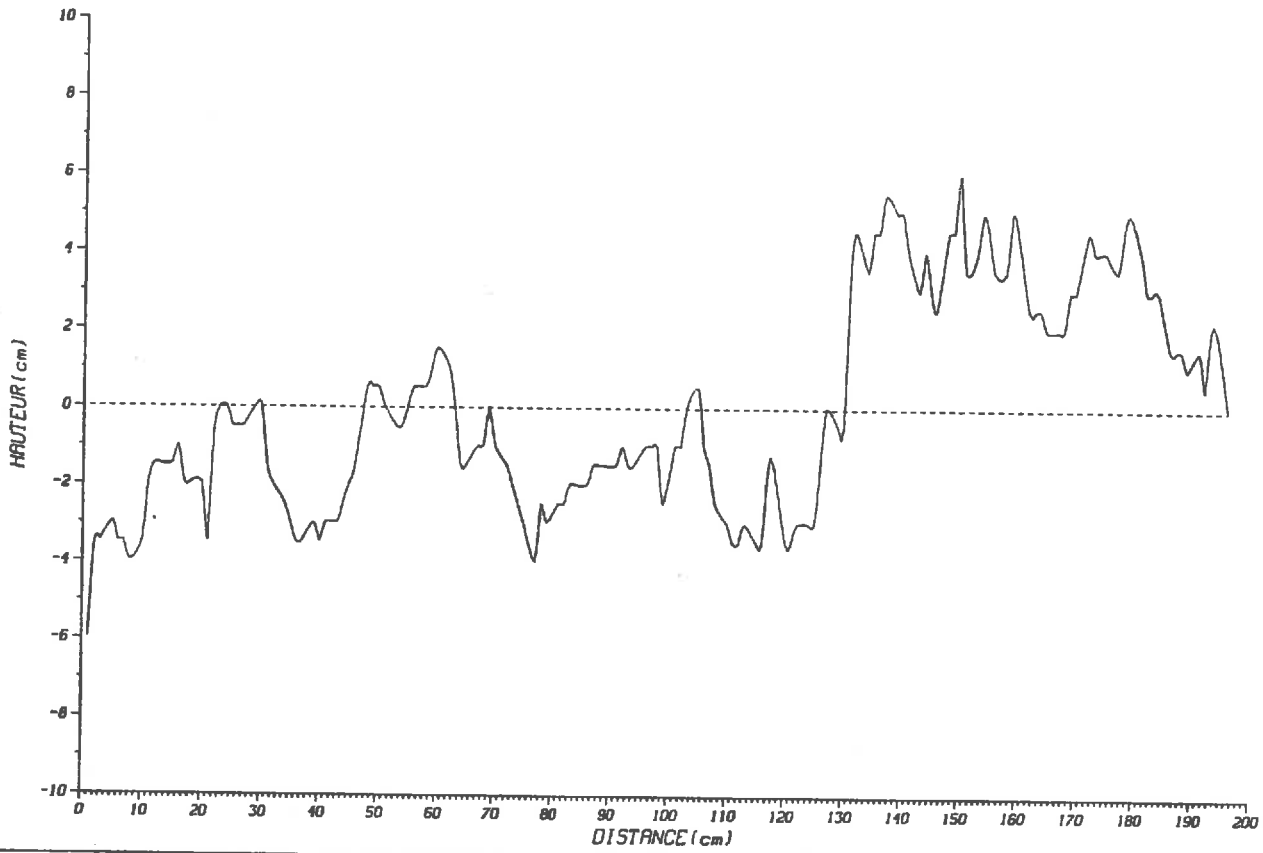


FIGURE 4.1 : Profil de la surface mesuré sur le site de STERLIN

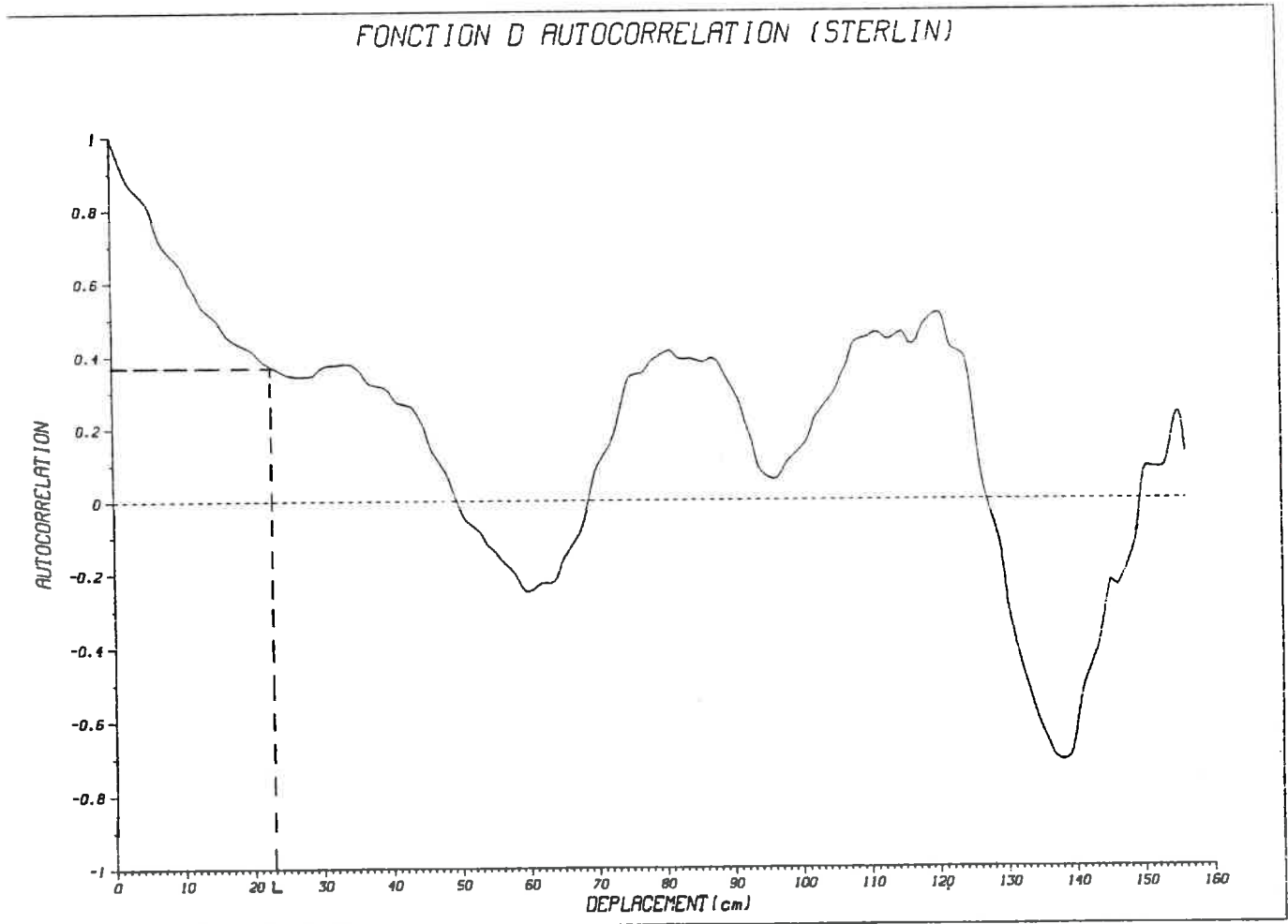


FIGURE 4.2 : Fonction d'autocorrélation de la surface obtenue à l'aide du profil de la fig.4.1. L correspond à la longueur de corrélation

4.3 CONSTANTE DIELECTRIQUE ET HUMIDITE DE SURFACE

4.3.1 CHOIX DU MODELE

De nombreux travaux ont montré que, pour les sols nus, les caractéristiques dominantes qui affectent l'émissivité sont la rugosité de la surface et la constante diélectrique du sol.

Les propriétés diélectriques des sols ont été largement étudiées en utilisant des techniques de laboratoire. Des modèles, à la fois théoriques et expérimentaux, ont été développés et vérifiés dans le but de représenter les effets de l'humidité de surface, de la texture du sol, de la densité de masse et de la salinité sur la constante diélectrique [1],[2]. Ces modèles supposent que le sol est un mélange homogène des trois phases : solide, liquide et gazeuse. D'autres auteurs [3] considèrent que, dans le cas du labour, le sol est un mélange de deux phases : les agrégats et le vide.

Par la suite, nous appliquerons le modèle de Wang & Schmutge [1] dans lequel la constante diélectrique est évaluée à partir des contributions du sol, de l'air et de l'eau.

L'eau dans le sol est envisagée comme étant séparée en deux parties de part et d'autre d'une humidité de transition (W_t), dont certaines valeurs sont données dans le tableau 4.2. Ces auteurs supposent, en se basant sur la forme des courbes obtenues en laboratoire, que, pour des contenus en eau W_c inférieurs à W_t , la plupart des molécules d'eau sont fortement liées aux particules du sol. Il est alors difficile de les polariser et la masse d'eau donne une constante diélectrique plus faible que celle de l'eau libre. Ainsi, pour $W_c \leq W_t$, l'eau contenue dans le sol semble se comporter comme de la glace. D'autre part, ils mettent en évidence que les propriétés diélectriques de l'eau liée et la valeur de W_t sont dépendantes de la texture du sol.

Wang & Schmutge [1] ont trouvé que la meilleure forme du modèle était l'approche volumétrique. Pour celle-ci, la constante diélectrique de chaque composante de l'équation mixte est pondérée par son volume fractionnaire.

Ce modèle présente trois avantages:

- Il permet d'expliquer la majorité des phénomènes observés en laboratoire.
- Les données d'entrée nécessaires à sa mise en oeuvre sont facilement disponibles dans la plupart des situations.
- Sa fiabilité est reconnue.

Cependant, la forme analytique du mélange présentée dans cette étude souffre de son caractère empirique.

Le choix de ce modèle [1] pour cette étude au détriment de deux autres [2], [3] tient aux points suivants :

- Il nécessite un nombre réduit de données, dont on avait une idée par ailleurs.

- Les caractéristiques des sols utilisés pour la validation de ce modèle sont similaires à celles des sols de notre expérience.

La figure 4.3 montre un exemple des résultats obtenus par Wang & Schmugge [1] à 5 GHz, avec la formulation définie ci-dessous.

4.3.2 FORMULATION DU MODELE

Soit W_c le contenu en eau du sol et W_t la valeur de l'humidité de transition

$$* \text{ Si } W_c \leq W_t$$

alors

$$(4-3) \quad \epsilon = W_c \epsilon_x + (P - W_c) \epsilon_a + (1 - P) \epsilon_r$$

$$\text{où } \epsilon_x = \epsilon_i + (\epsilon_w - \epsilon_i) \gamma \frac{W_c}{W_t}$$

$$* \text{ Si } W_c > W_t$$

alors

$$(4-4) \quad \epsilon = W_t \epsilon_x + (W_c - W_t) \epsilon_w + (P - W_c) \epsilon_a + (1 - P) \epsilon_r$$

$$\text{où } \epsilon_x = \epsilon_i + (\epsilon_w - \epsilon_i) \gamma$$

Avec P : porosité du sol sec

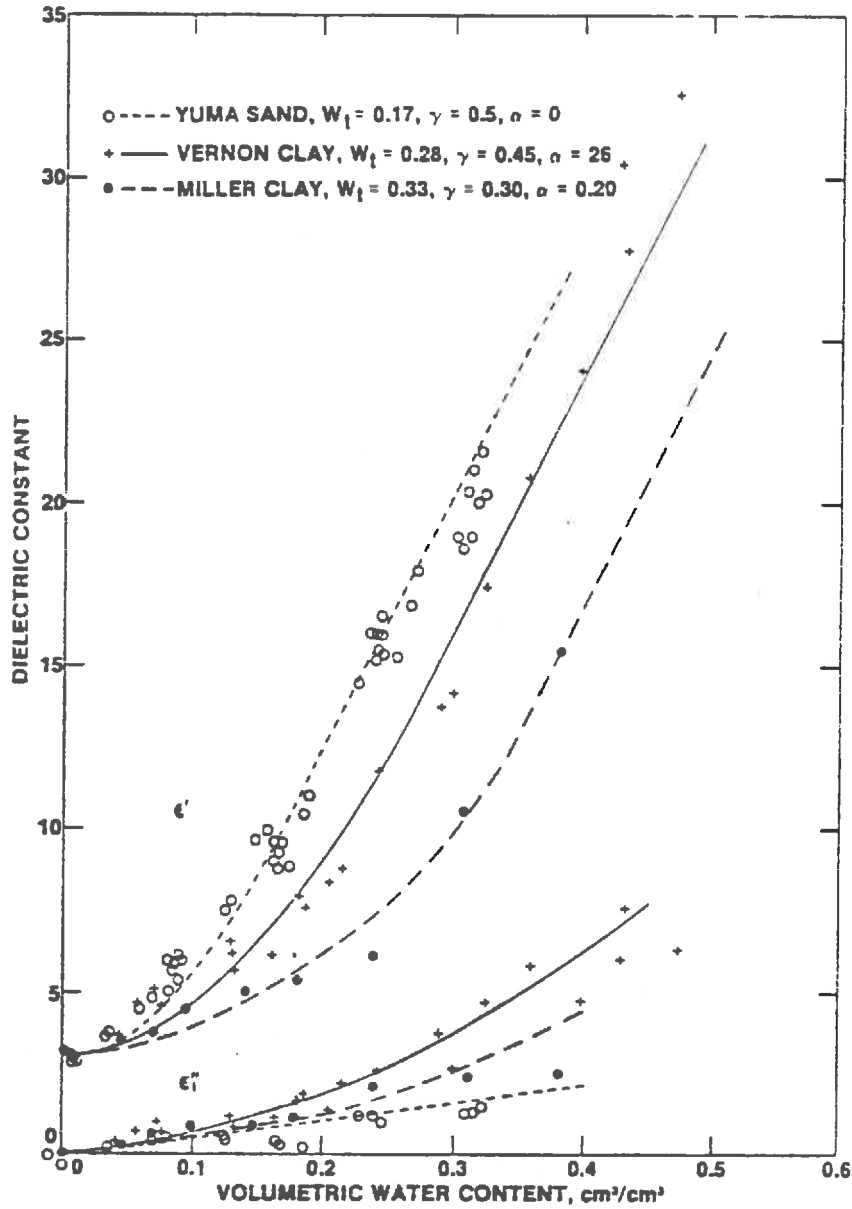
ϵ_a : Constante diélectrique de l'air

ϵ_r : " " de la terre sèche

ϵ_w : " " de l'eau

ϵ_i : " " de la glace

ϵ_x : " " de l'eau initialement absorbée



ϵ' représente la partie réelle de la constante diélectrique et ϵ'' la partie imaginaire.

FIGURE 4.3

Comparaison entre la constante diélectrique calculée à l'aide du modèle empirique [1] et les valeurs mesurées à 5 GHz d'après Wang & Schmugge, 1980.

Les valeurs des différentes constantes diélectriques en fonction de la fréquence sont regroupées dans le tableau 4.1.

CONSTANTES DIELECTRIQUES	BANDE S	BANDE C	BANDE X
ϵ_a	1 + 0j	1 + 0j	1 + 0j
ϵ_r	5.5 + 0.2j	5.5 + 0.2j	5.5 + 0.2j
ϵ_w	79 - 7j	70 - 18j	52 - 33j
ϵ_i	3.2 + 0.1j	3.2 + 0.1j	3.2 + 0.1j

ϵ_i est indépendante de la fréquence pour $F \geq 1$ GHz

TABLEAU 4.1

Le tableau 4.2 montre les différents types de sols utilisés par Wang & Schmugge [1] pour la validation de leur modèle.

L'analyse granulométrique effectuée sur le site de Sterlin et dont les résultats sont exposés à la section 2-6 se rapproche de celle du site H7. Il est donc raisonnable d'utiliser les valeurs de γ et de W_t trouvées par Wang & Schmugge [1] pour le site de Sterlin, dans le cadre de notre étude, où γ est un paramètre choisi pour que les équations (4-3) et (4-4) correspondent le mieux possible aux données expérimentales et W_t dépend de la composition du sol.

On prendra donc : $W_t = 0.31 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ et $\gamma = 0.35$

W_p correspond au point de flétrissement, c'est-à-dire à la valeur du contenu en eau lorsque la tension de l'eau dans le sol est égale à -15 Bars.

Sa valeur numérique a été calculée à l'aide de l'expression suivante [1] :

$$W_p = 0.06774 - 0.00064 C_s + 0.00478 C_a$$

où C_s représente le contenu en sable et C_a le contenu en argile du sol.

Soil type	Texture (percent)			Wilting ¹ point WP (cm ³ /cm ³)	Transition ² moisture W _t (cm ³ /cm ³)	γ*	α ³	Remarks
	Sand	Silt	Clay					
M5	88.0	7.3	4.7	0.034	0.20	0.40	0	Measurement frequency = 5 GHz (Wang <i>et al.</i> , 1978)
F2	56.0	26.7	17.3	0.115	0.22	0.40	0	
H7	19.3	46.0	34.7	0.220	0.31	0.35	0	
Harlingen clay	2.0	37.0	61.0	0.358	0.31	0.30	0	
Yuma sand	100.0	0	0	0.004	0.17	0.50	0	
Eufaula fine sand	90.0	7.0	3.0	0.024	0.16	0.50	0	Measurement frequency = 1.412 GHz (Lundien, 1971)
Dougherty fine sand	82.0	14.0	4.0	0.034	0.17	0.50	0	
Minco very fine sand	70.0	22.0	8.0	0.051	0.17	0.50	0	
Openwood street silt	22.0	70.0	8.0	0.092	0.23	0.50	8	
Chickasha loam	58.0	28.0	14.0	0.098	0.22	0.40	8	
Zaneis loam	48.0	36.0	16.0	0.114	0.22	0.40	8	
Collinville loam	45.0	39.0	16.0	0.115	0.23	0.40	8	
Kirkland silt loam	26.0	56.0	18.0	0.137	0.20	0.40	8	
Tabler silt loam	22.0	56.0	22.0	0.159	0.19	0.40	8	
Vernon clay loam	16.0	56.0	28.0	0.192	0.28	0.45	26	
Long lake clay	6.0	54.0	40.0	0.255	0.26	0.40	26	
Sand	86.0	7.0	7.0	0.046	0.20	0.40	0	Measurement frequency = 1.4 GHz (Newton, 1977)
Samples 4 and 5	40.0	26.0	34.0	0.205	0.30	0.30	22	
Samples 7 and 18	36.0	29.0	35.0	0.212	0.28	0.30	16	
Samples 14 and 15	52.0	9.0	39.0	0.221	0.30	0.30	18	
Sample 13	44.0	12.0	44.0	0.250	0.31	0.30	22	
Miller clay	3.0	35.0	62.0	0.361	0.33	0.30	20	

TABLEAU 4.2 : Différents types de sols utilisés pour les mesures de constantes diélectriques en tant que fonction de l'humidité de surface à 1.4 GHz et 5 GHz.
(d'après Wang & Schmutge, 1980)

* Effet d'une variation de la température sur la constante diélectrique.

L'influence de la température sur la valeur de la constante diélectrique du sol a été étudiée par Hallikainen & al. [4]. Ils ont montré qu'un abaissement de la température au dessous de 0°C (passage de +23°C à -11°C) provoque une nette diminution de la partie réelle, ϵ' , et imaginaire, ϵ'' , de la constante diélectrique. Cet effet est expliqué par la transformation en glace d'une partie de l'eau contenue dans le sol. Cependant, plusieurs raisons nous permettent de négliger l'influence de la température sur la constante diélectrique dans le cadre de notre expérience:

* La période expérimentale se situe entre le 16 Mars et le 18 Avril. On peut penser que la valeur moyenne de la température en surface n'a pas varié de plus de 5°C.

* D'autre part, nous avons effectué, à l'aide du modèle de simulation, une étude théorique de la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation relative de la constante diélectrique complexe du sol, dans le but d'évaluer l'erreur commise par une méconnaissance de la température en surface. Pour cela, nous avons soumis la constante diélectrique (partie réelle et partie imaginaire) à une variation relative de $\pm 10\%$, compte tenu que le passage d'une température de 0°C à +5°C provoque une variation de l'ordre de +10% sur la partie imaginaire et de l'ordre de +1% sur la partie réelle de la constante diélectrique de l'eau libre (en bande C). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.3.

W en cm ³ /cm ³	$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$	$\Delta\sigma^\circ$ HH	$\Delta\sigma^\circ$ VV
0.1	$\epsilon' \approx 4$ $\pm 10\%$ de ϵ'	0.57 dB	0.60 dB
	$\epsilon'' \approx -0.3$ $\pm 10\%$ de ϵ''	0.005 dB	0.005 dB
0.3	$\epsilon' \approx 10$ $\pm 10\%$ de ϵ'	0.29 dB	0.29 dB
	$\epsilon'' \approx -1.7$ $\pm 10\%$ de ϵ''	0.010 dB	0.015 dB
0.5	$\epsilon' \approx 23$ $\pm 10\%$ de ϵ'	0.13 dB	0.13 dB
	$\epsilon'' \approx -5$ $\pm 10\%$ de ϵ''	0.010 dB	0.015 dB

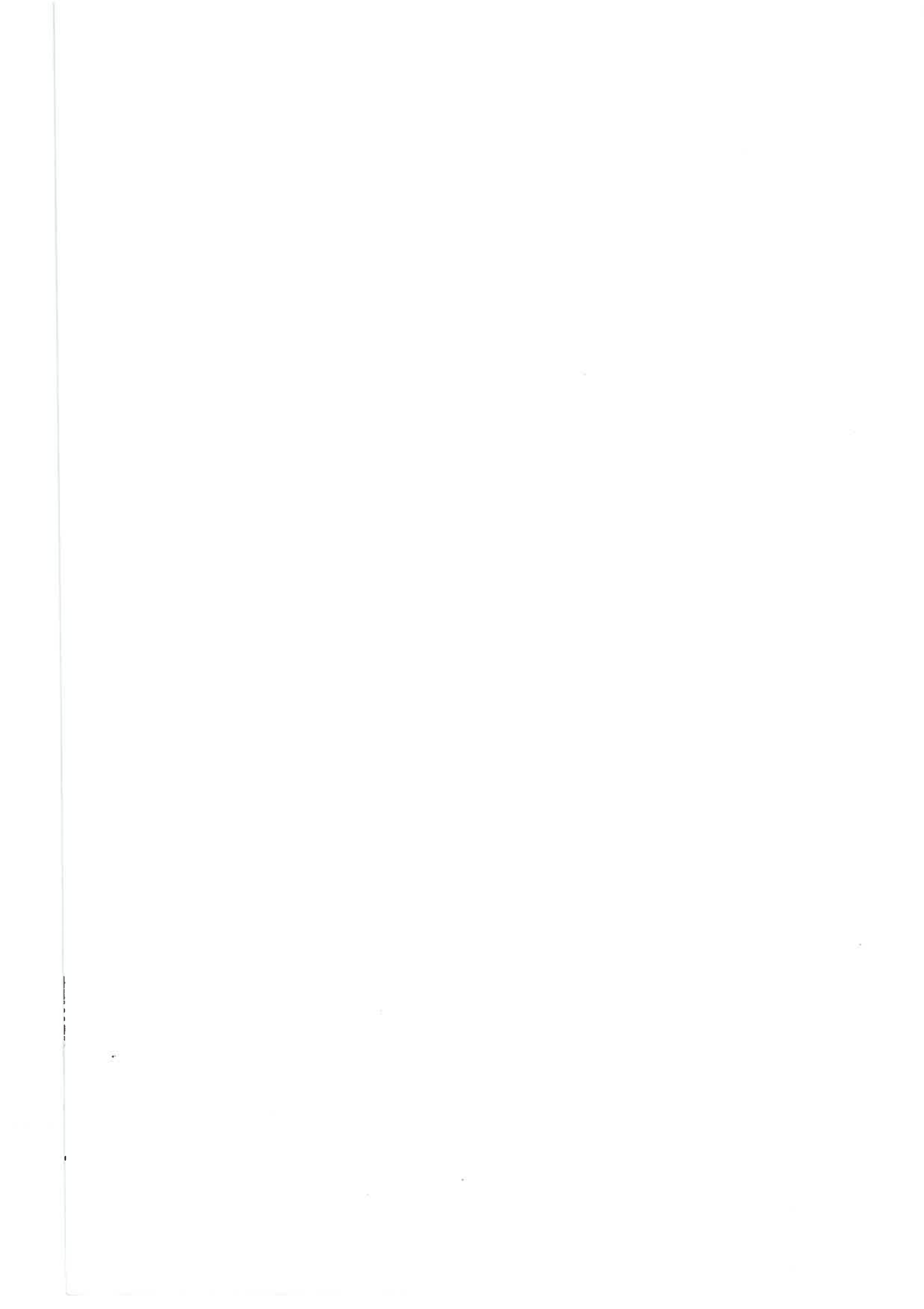
TABLEAU 4.3

W correspond à l'humidité de surface, exprimée en cm^3/cm^3 , ϵ' à la partie réelle et ϵ'' à la partie imaginaire de la constante diélectrique du sol, calculée avec le modèle de Wang & Schmugge [1] et $\Delta\sigma^\circ$ HH (respectivement VV) à la variation de la section efficace de rétrodiffusion mesurée en polarisation horizontale (respectivement verticale). Ces résultats montrent que l'effet d'une telle variation sur la section efficace de rétrodiffusion peut être négligé sans affecter le résultat d'une erreur significative.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Wang, J. R. & T. J. Schmugge, 1980 : "An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of the water content" IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. GE-18, N°4, pp 288-295.
- [2] Dobson, M. C., F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen & El-Rayes, 1985 : "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II : Dielectric mixing models", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. GE-23, pp 35-46.
- [3] Jackson, T. J. & P. E. O'Neill, 1986 : "Microwave dielectric model for aggregated soils", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. GE-24, N°6, pp 920-929.
- [4] Hallikainen, M. T., F. T. Ulaby, M. C. Dobson, El-Rayes & L.K. Wu, 1985 : "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I : Empirical models and experimental observations", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. GE-23, pp 25-34



Chapitre 5

VERIFICATION EXPERIMENTALE DU MODELE

"Dans l'ordre des faits, ce qui n'est pas expérimental n'est pas scientifique"

Renan

5.1 INTRODUCTION

Nous avons vu, dans le premier chapitre, les bases théoriques de la diffusion d'une surface aléatoire. L'expression de la section efficace de rétrodiffusion a été présentée sous deux formes, selon que l'on utilise l'approximation de la phase stationnaire ou l'approximation scalaire des champs. Le choix de l'une ou l'autre de ces approximations est fixé, d'une part, par la rugosité de la surface et, d'autre part, par l'angle de visée du porteur. En effet, le principe de la phase stationnaire ne peut s'appliquer qu'à des sols sur lesquels il existe des points spéculaires. Or, le nombre probable de ces points diminue lorsque l'angle d'incidence augmente ou lorsque la surface tend à devenir lisse.

Le site de Sterlin, sur lequel s'est déroulée une partie de l'expérience du printemps 1984, présentait une surface moyennement rugueuse (écart-type des hauteurs ≈ 2.7 cm et longueur de corrélation de la surface ≈ 23 cm). Et, d'autre part, l'angle d'incidence du porteur variait de 11° à 25° . En tenant compte de ces deux conditions, des simulations, utilisant l'un et l'autre des modèles, ont été effectuées.

La figure 5.1 montre les résultats obtenus avec l'approximation de la phase stationnaire, en utilisant les paramètres de surface précédemment cités. On remarque que la pente de la courbe théorique $\sigma^\circ(\theta)$ est beaucoup plus élevée que celle de la courbe expérimentale. Ceci est dû au fait que, pour des angles supérieurs à 15° , la surface ne présente quasiment plus de points permettant la réflexion spéculaire.

Les résultats obtenus avec l'approximation scalaire des champs ont montré une meilleure estimation des valeurs mesurées. Cette conclusion est en accord avec l'étude comparative, effectuée par Engman [1], sur l'évaluation de ces modèles.

Nous présenterons, dans ce chapitre, la formulation numérique de ce modèle ainsi que ses limites de validité. Puis, nous comparerons les résultats obtenus avec le radar ERASME et ceux calculés à l'aide du modèle de simulation. Pour cela, nous utiliserons les paramètres de sols spécifiques au site de Sterlin. Une discussion sur la validité et les limites de ce modèle conclura le chapitre.

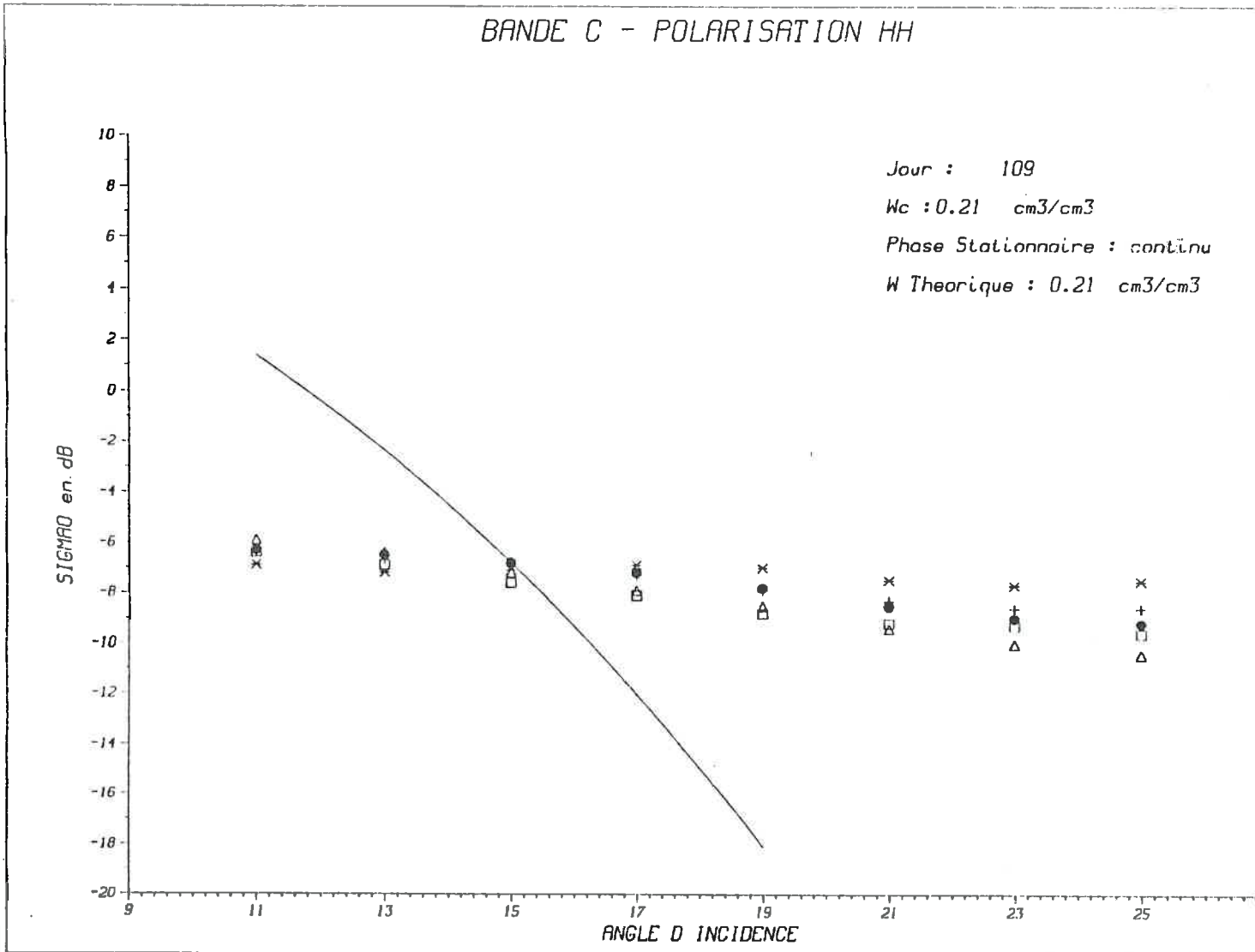


FIGURE 5.1 : Résultats obtenus avec l'approximation de la phase stationnaire.
Les points représentent les mesures et la courbe les valeurs calculées.

5.2 METHODES NUMERIQUES UTILISEES ET LIMITES DE VALIDITE

La section efficace de rétrodiffusion, sous l'approximation scalaire des champs, comprend une composante incohérente qui, dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne des hauteurs, s'écrit :

$$(5-1) \quad \sigma_{inc}^o = 2 k^2 |R_{pp}|^2 \cos^2 \theta \int_0^{+\infty} (\exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] - \exp[-q_z^2 s^2]) \times J_0(2k \sin \theta \xi) \xi d\xi$$

Avec $q_z = 2k \cos \theta$ et s l'écart-type des hauteurs de la surface.

Et une composante due aux termes de pentes :

$$(5-2) \quad \sigma_p^o = - 8k \cos \theta (ks)^2 [|R_{pp_0}|^2 \cos \theta \sin \theta + \operatorname{Re}\{R_{pp_0} R_{pp_1}^*\} \cos^2 \theta] \times \int_0^{+\infty} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} J_1(2k \sin \theta \xi) \exp[-q_z^2 s^2 (1-\rho)] \xi d\xi$$

Ces deux expressions ont été établies au chapitre 1.

Les limites de validité de ces équations sont celles de l'approximation scalaire des champs: $(-s^2 \rho''(0))^2 \leq 0.25$.

Les intégrales des équations (5-1) et (5-2) ont été calculées par la méthode des accroissements finis. Le pas a été fixé, de façon empirique, à :

$$\Delta \xi = 1 / (100 ks)^2$$

où k est le nombre d'onde et s l'écart-type des hauteurs de la surface.

L'intégration a été poursuivie jusqu'à ce que la valeur absolue de la fonction à intégrer soit inférieure à 10^{-10} . Nous avons pu appliquer ce critère puisqu'il s'agit d'une fonction continuellement décroissante. La borne supérieure dépend donc des paramètres de la surface et des paramètres radar.

Dans le cas particulier des valeurs expérimentales obtenues sur le site de Sterlin et avec les caractéristiques de fonctionnement d'ERASME, la borne supérieure se situait dans l'intervalle : 10cm - 20 cm. On peut, dans ces conditions,

approcher la fonction de corrélation par la courbe d'équation:

$$(5-3) \quad \rho(\xi) = \exp(-\xi/L)$$

où L représente la longueur de corrélation.

Pour vérifier que l'on se trouve effectivement dans les limites de l'approximation scalaire des champs, on peut calculer la valeur numérique de l'écart-type des pentes:

$$[-s^2 \rho''(0)]^{1/2} = s/L = 2.7/23 \approx 0.12 < 0.25$$

La figure 5.2 compare la courbe théorique $\rho(\xi)$ avec la fonction de corrélation établie à partir des mesures expérimentales.

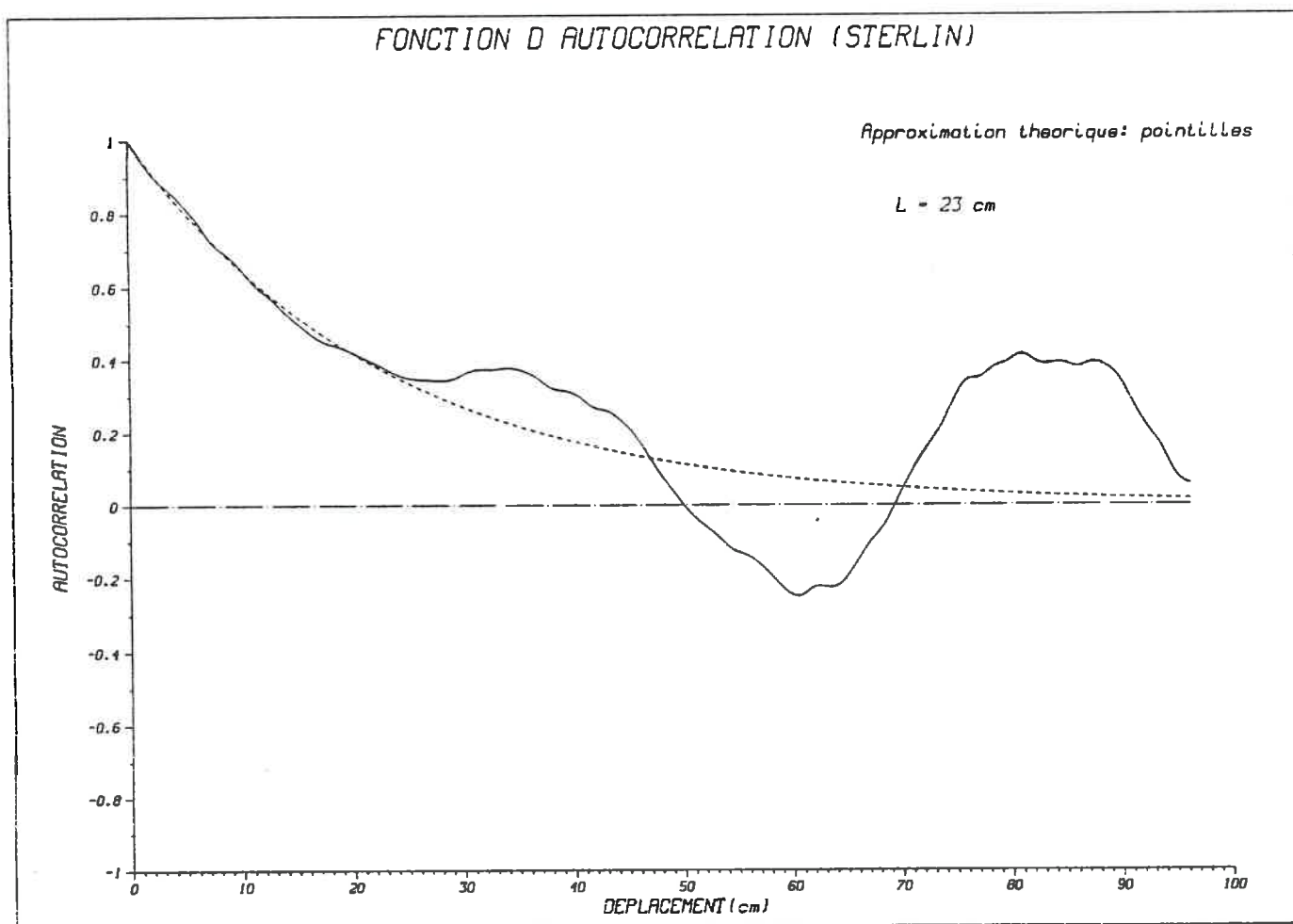


FIGURE 5.2 Comparaison entre la courbe théorique $\rho(\xi)$ et la fonction de corrélation calculée à partir de la mesure du profil.

En prenant la fonction de corrélation définie par l'équation (5-3), nous faisons abstraction de la modulation à grande échelle, probablement due aux sillons du labour. Si nous avions voulu en tenir compte, deux solutions s'offraient à nous :

* Soit utiliser directement la fonction de corrélation obtenue à partir du profil de la surface, mais dans ce cas il aurait fallu que la mesure du profil soit faite sur une longueur suffisamment grande pour qu'elle puisse être considérée infinie.

* Soit prendre celle définie par l'équation (5-3) mais imposer à la section efficace de rétrodiffusion une modulation du type [2] :

$$(5-4) \quad \sigma^0 = \frac{1}{L} \int_0^L \sigma^0(\theta_{loc}) dx$$

avec $\theta_{loc} = \arctg(A 2\pi k \sin 2\pi kx) + i$

où i représente l'angle de visée de l'antenne et A l'amplitude de la modulation.

Une illustration de la géométrie d'une telle modulation est donnée par la figure 5.3.

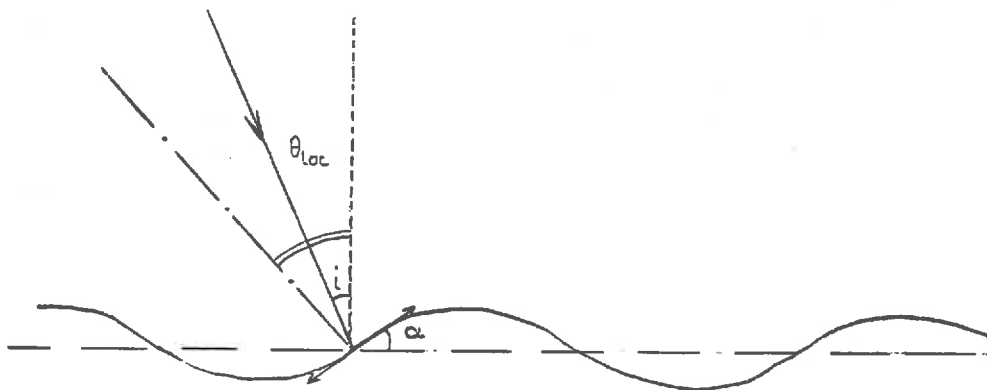


FIGURE 5.3

La fonction de modulation, présentée sur la figure 5.3, s'écrit:

$$f(x) = -A \cos 2\pi kx$$

Donc, la tangente au point M sera :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{df}{dx} = A 2\pi k \sin 2\pi kx$$

Cependant, nous avons obtenus, en appliquant l'équation (5-4), des résultats totalement discordants avec le phénomène observé. Ceci est dû au fait que la période de répétition de la modulation à grande échelle est de l'ordre de grandeur de la longueur de corrélation de la surface.

Une étude de la sensibilité de la section efficace à la forme de la fonction de corrélation a montré que l'allure de la courbe $\sigma^0(\theta)$ est fortement sensible à la dérivée première de la fonction de corrélation à l'origine. Sur la figure 5.4, on a tracé différentes fonctions de corrélation et sur la figure 5.5, on a représenté les courbes $\sigma^0(\theta)$ correspondant à ces fonctions. On remarque que les valeurs de $\rho(x)$, pour x proche de 0, déterminent l'allure générale de $\sigma^0(\theta)$. Ainsi, il semble justifié d'utiliser l'équation (5-3) pour approcher la fonction de corrélation.

Les fonctions de Bessel, J_0 et J_1 , ont été calculées à l'aide des programmes de la librairie Nag (Logiciels mathématiques disponibles sur le système informatique du CNET).

5.3 RESULTATS OBTENUS AVEC LE RADAR ERASME

Les figures 5.6.a, 5.6.b et 5.6.c montrent des exemples de mesures de sections efficaces de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence obtenues avec le radar ERASME en polarisation HH.

Chaque figure regroupe les mesures recueillies durant une même journée. Un point sur le graphe représente la valeur moyenne de $\sigma^0(\theta)$, pour θ fixé, lors d'un passage sur le site. Les différentes formes points correspondent aux différents passages réalisés sur le champ. Certains ont été effectués Nord-Sud, Sud-Nord et d'autres Est-Ouest, Ouest-Est. On remarque que la direction du vol ne modifie pas l'allure de la courbe. En particulier, il n'apparaît pas d'effets dus aux sillons du labour.

On remarque que la section efficace de rétrodiffusion est une fonction décroissante de l'angle d'incidence. En effet, plus l'angle d'incidence augmente et moins la surface offre de plans perpendiculaires à l'onde incidence permettant la réflexion spéculaire. D'autre part, on note que le niveau moyen de la courbe $\sigma^0(\theta)$ augmente avec l'humidité. Cet effet est dû aux coefficients de Fresnel. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 6.

Il convient de préciser que les mesures expérimentales d'humidité prenaient en compte les six premiers centimètres de la surface, profondeur largement supérieure dans la majorité des cas à la profondeur de pénétration des ondes dans le sol.

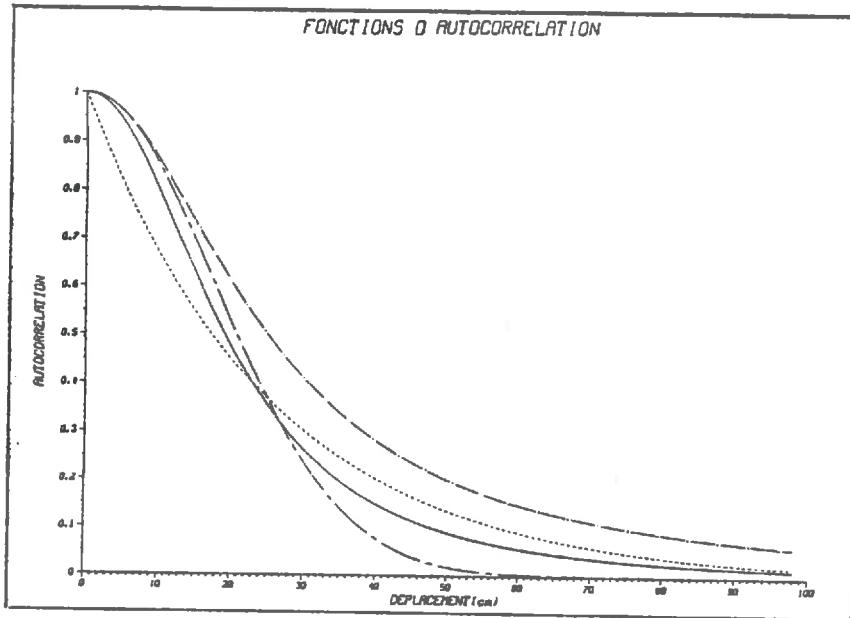


FIGURE 5.4 Différentes fonctions de corrélation:

- $(1 + x^2/L^2)^{-3/2}$
- - - - - $(1 + x^2/L^2)^{-1}$
- . - . - $\exp(-x^2/L^2)$
- $\exp(-x/L)$

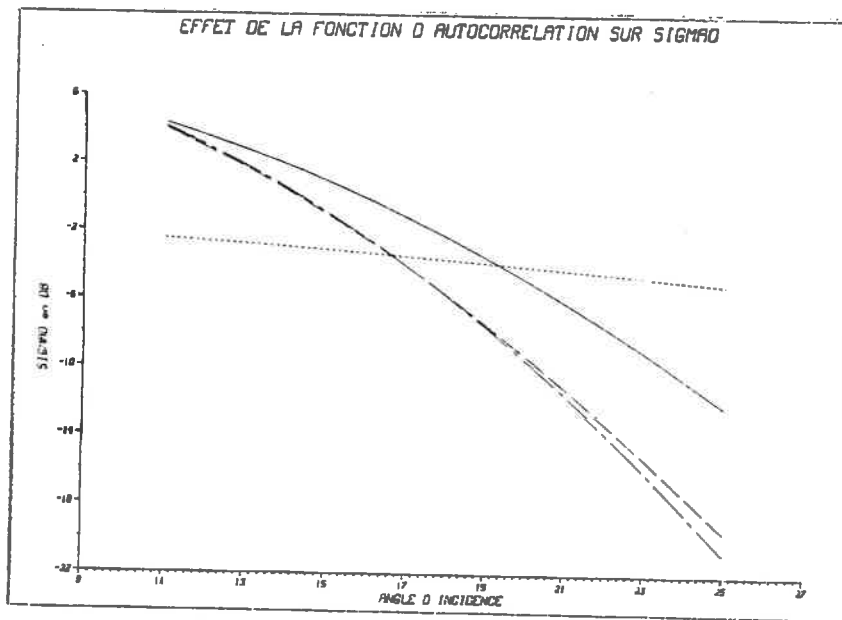
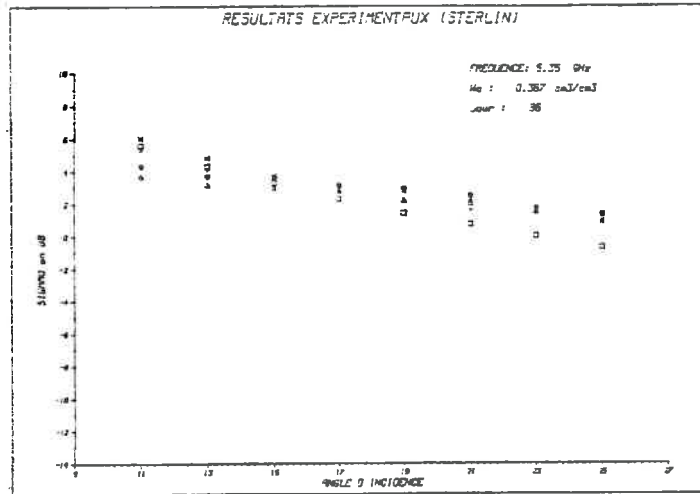
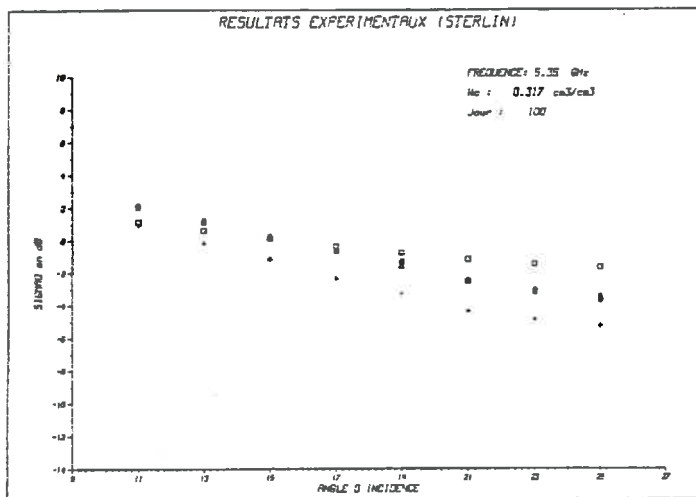


FIGURE 5.5 Effet de la fonction de corrélation sur la forme de la courbe $\sigma^0(\theta)$. Les légendes sont identiques à celles de la fig. 5.4.

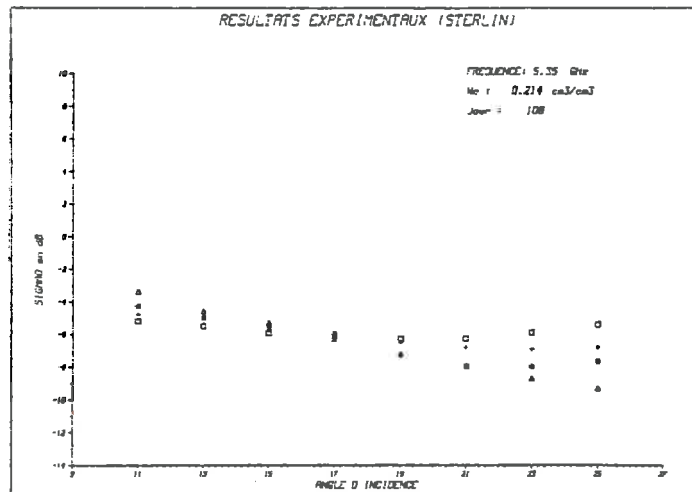
(a)



(b)



(c)



FIGURES 5.6 Exemples de mesures de sections efficace de rétrodiffusion, en fonction de l'angle d'incidence, obtenues avec le radar ERASME. (Bande C - Polarisation HH)

(a) Le 26 Mars 1984 Wc = 0.37 cm³/cm³

(b) Le 9 Avril 1984 Wc = 0.32 cm³/cm³

(c) Le 17 Avril 1984 Wc = 0.21 cm³/cm³

Ces mesures de terrains doivent donc être considérées comme des valeurs à titre indicatif permettant de suivre l'évolution de l'humidité de surface durant la période expérimentale plutôt que comme les valeurs réelles prises en compte par le radar. Il a donc été nécessaire, parfois, de réajuster la valeur de l'humidité de surface mesurée pour obtenir, avec le modèle, des résultats concordant avec ceux de l'expérience.

D'autre part, le profil de la surface a été relevé sur le terrain à la fin de la période expérimentale (Jour 109). La comparaison entre les valeurs calculées et les données mesurées sur le site ne peut donc s'effectuer qu'autour de cette date. En effet, même si la rugosité est un paramètre lentement variable avec le temps (en dehors de toute période de labour), sa valeur n'est pas une constante. Elle a été modifiée lors de la période de pluie qui a précédé la date du relevé du profil.

Les paramètres de rugosité de surface utilisés pour la modélisation du signal sont donc $k_s = 3$ et $k_L = 26$.

Les figures 5.7.a et 5.7.b comparent les valeurs théoriques obtenues à l'aide du modèle de simulation et celles mesurées sur le site expérimental.

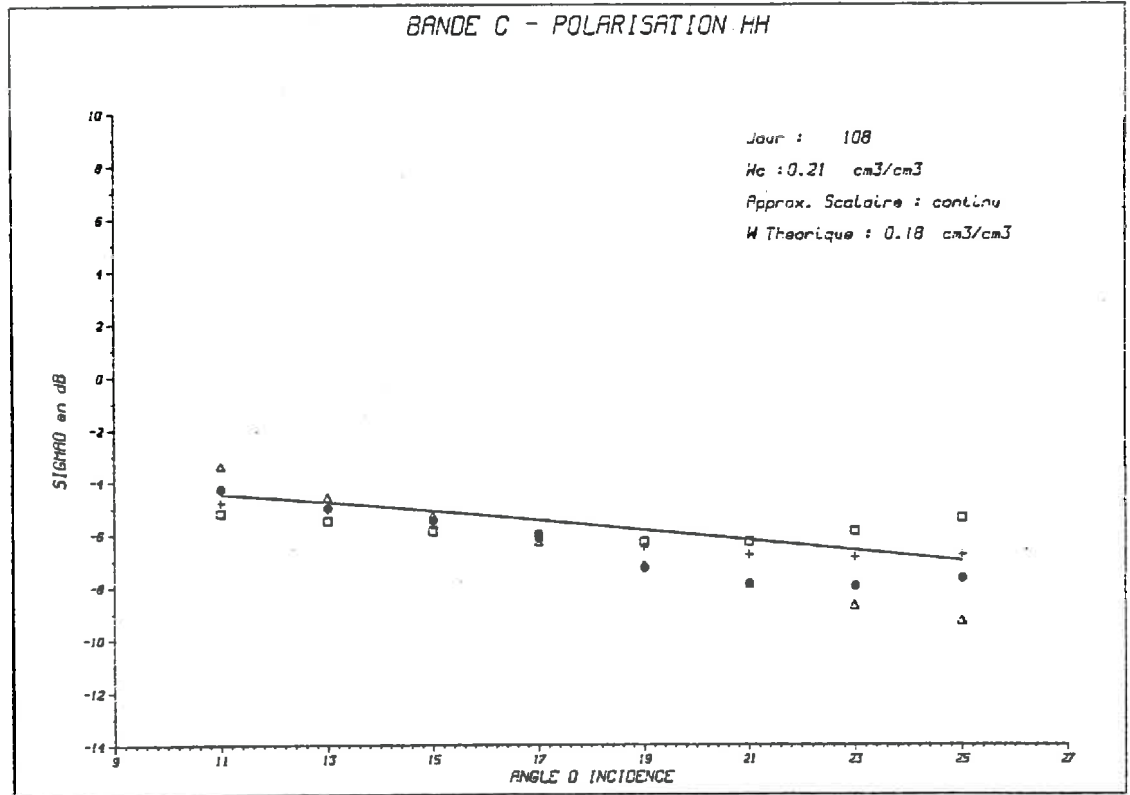
On note une bonne concordance entre les deux résultats. Dans les deux cas, il a été nécessaire d'entrer dans le modèle une valeur théorique de l'humidité légèrement inférieure à la valeur mesurée. Sur la figure 5.7.a (respectivement 5.7.b), la valeur théorique de l'humidité est de $0.18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (respectivement $0.10 \text{ m}^3/\text{cm}^3$). Dans les deux cas, la valeur mesurée est égale à $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Cette dernière est faible, bien que prenant en compte les six premiers centimètres de la surface. On se trouvait, à cette période à 10 jours de la dernière pluie. Or, le sol s'asséchant plus rapidement en surface, il est raisonnable de penser que l'humidité interceptée par le radar était plus faible que celle obtenue par la méthode des prélèvements.

Les figures 5.8.a, 5.8.b et 5.8.c montrent les mesures de sections efficaces de rétrodiffusion obtenues en polarisation VV.

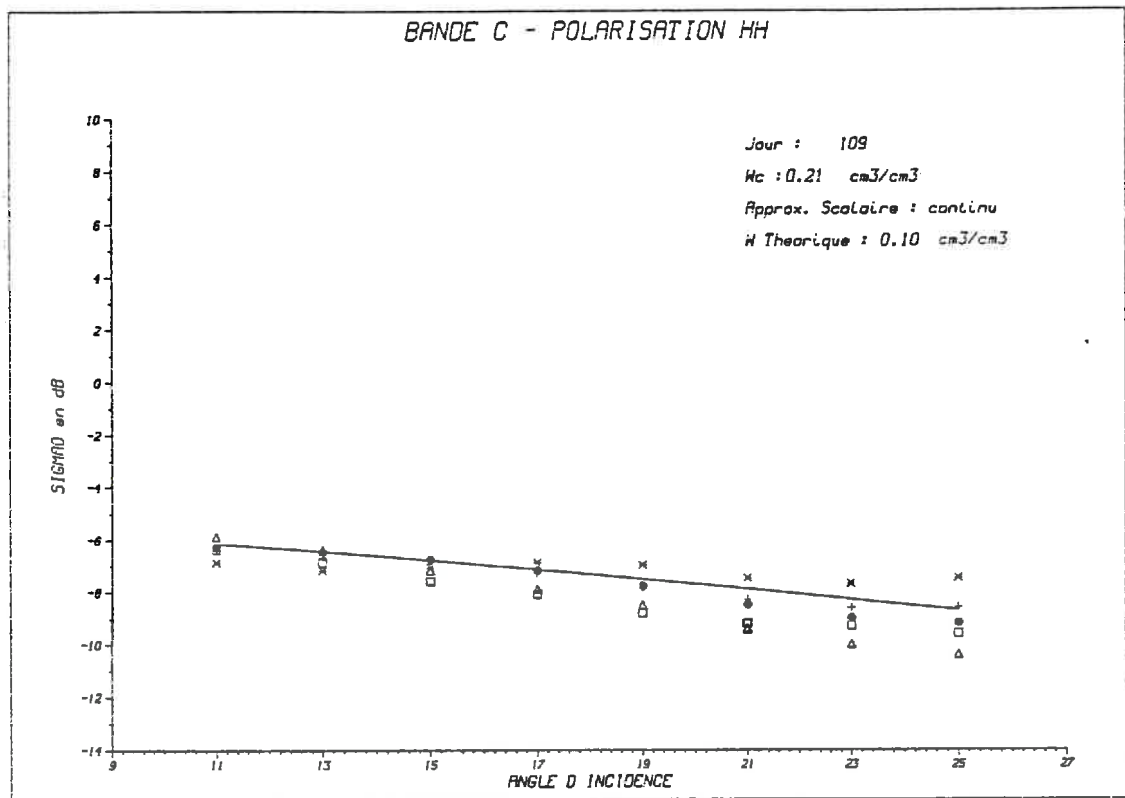
On remarque, dans certains cas, que σ^0 n'est pas une fonction strictement décroissante de θ mais passe par un maximum autour de 17° . Ceci est dû à un problème d'intégration du signal à l'intérieur du lobe d'antenne qui est dissymétrique et plus étroit que celui de l'antenne HH. Dans ce cas, la restitution en angle d'incidence nécessite de nouvelles corrections de gain car la largeur de faisceau de $\pm 10^\circ$ se trouve en dehors du lobe à 3 dB.

Les figures 5.9.a et 5.9.b comparent les valeurs théoriques obtenues à l'aide du modèle de simulation et celles mesurées sur le site expérimental. Ces comparaisons correspondent aux mêmes jours que celles effectuées en polarisation HH (Figures 5.7.a et 5.7.b).

(a)

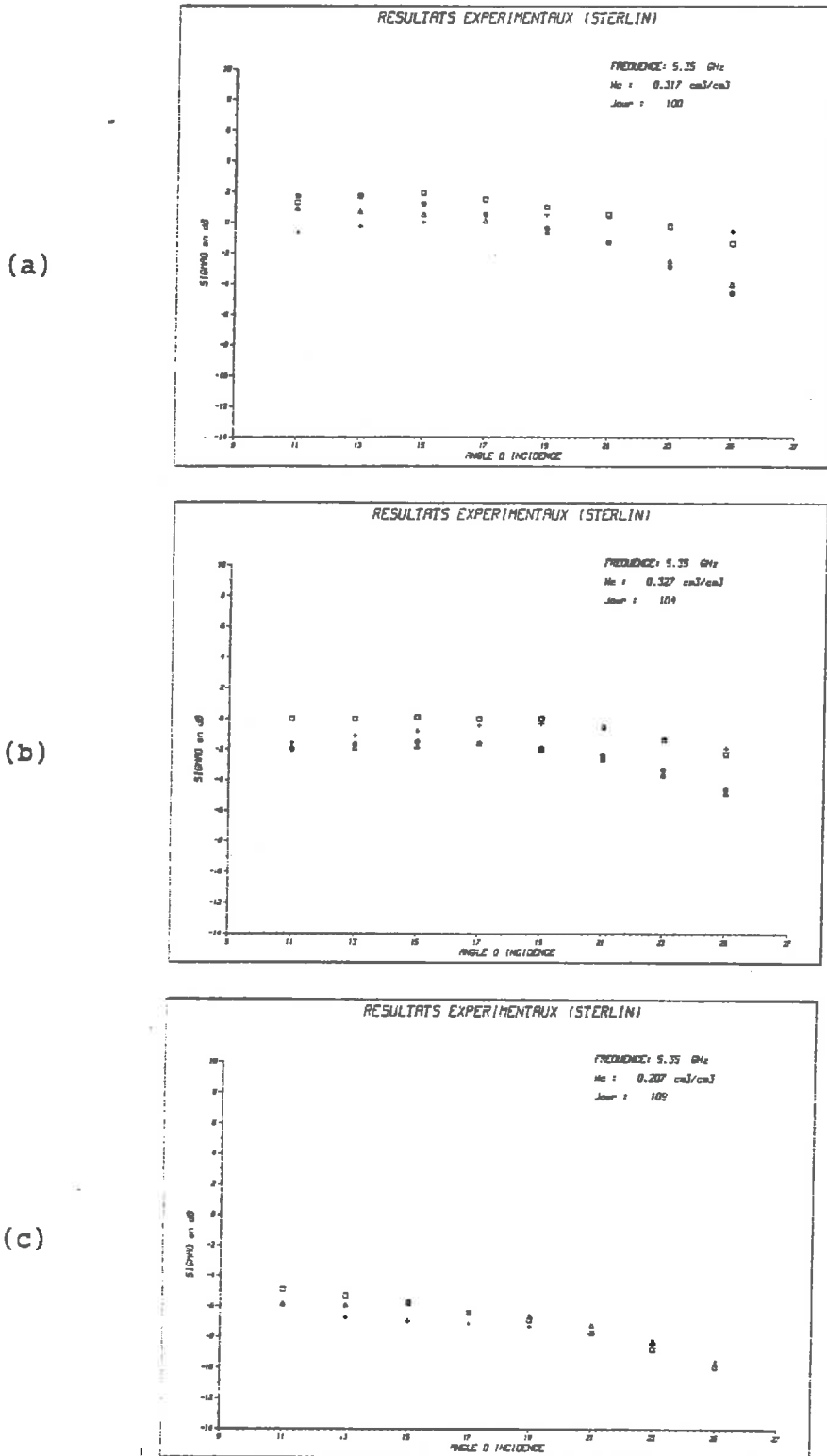


(b)



FIGURES 5.7 Comparaison entre les valeurs théoriques obtenues avec le modèle de simulation et celles mesurées sur le site de Sterlin. (Bande C - polarisation HH)

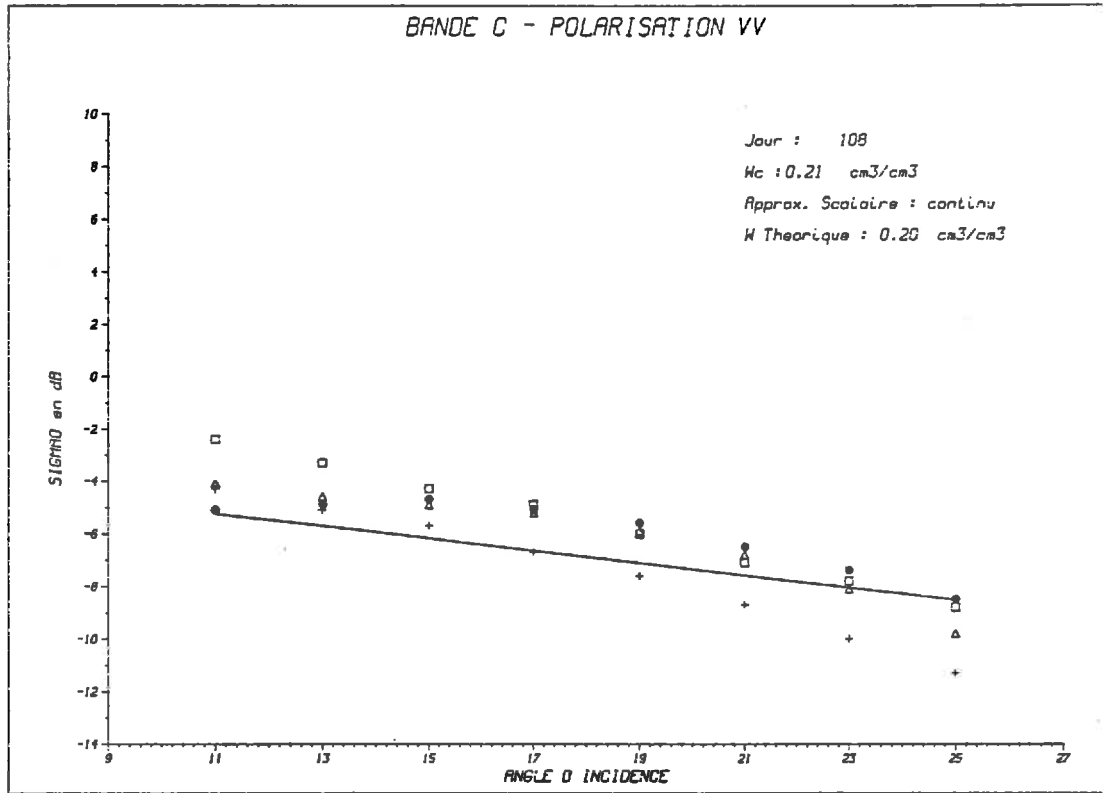
(a) Le 17 Avril 1984 Wc = 0.21 cm³/cm³
(b) Le 18 Avril 1984 Wc = 0.21 cm³/cm³



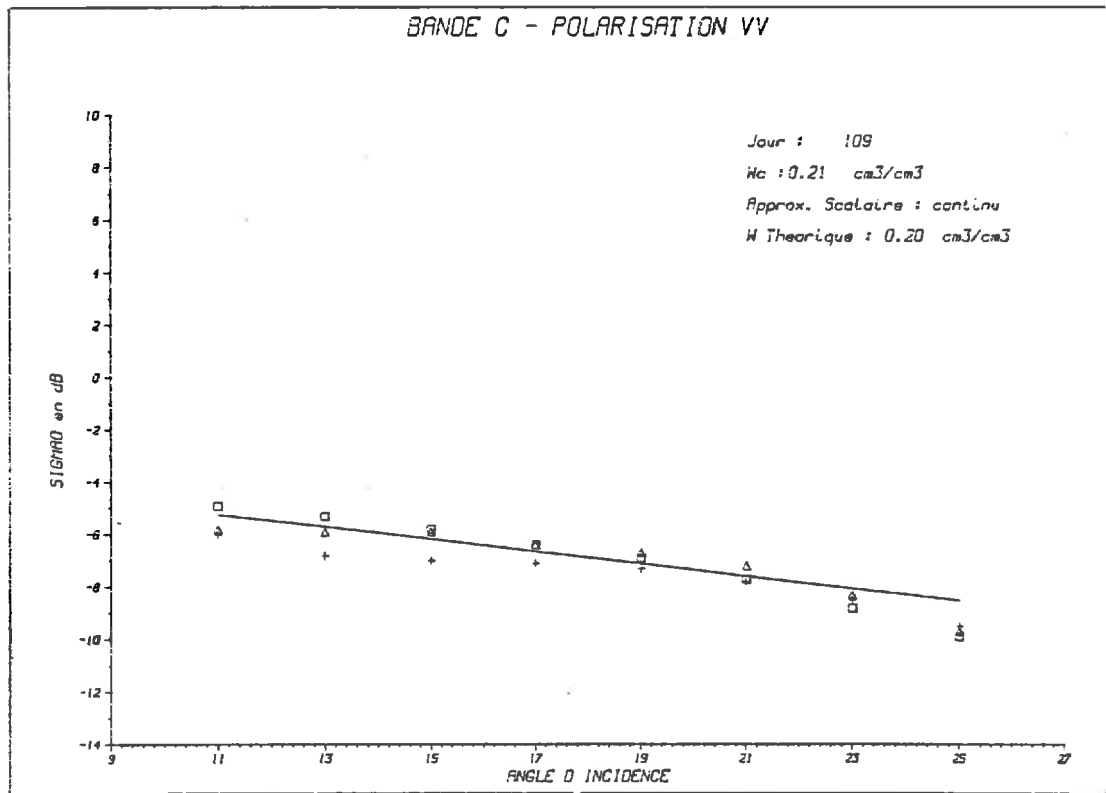
FIGURES 5.8 Exemples de mesures de sections efficace de rétrodiffusion, en fonction de l'angle d'incidence, obtenues avec le radar ERASME. (Bande C - Polarisation VV)

(a) Le 9 Avril 1984 $Wc = 0.32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
(b) Le 13 Avril 1984 $Wc = 0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
(c) Le 18 Avril 1984 $Wc = 0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

(a)



(b)



FIGURES 5.9 Comparaison entre les valeurs théoriques obtenues avec le modèle de simulation et celles mesurées sur le site de Sterlin. (Bande C - polarisation VV)
(a) Le 17 Avril 1984 Wc = 0.21 cm³/cm³
(b) Le 18 Avril 1984 Wc = 0.21 cm³/cm³

On note, dans les deux cas de polarisation (HH et VV) une meilleure concordance entre les mesures et la théorie pour le jour 109 (date à laquelle a été effectuée la mesure du profil). On ne remarque pas, à cette date, de différences sensibles entre les résultats obtenus en HH et ceux obtenus en VV.

5.4 INTERPRETATION

Deux remarques sont à faire concernant les résultats obtenus par simulation:

1) La rugosité affecte la pente de $\sigma^0(\theta)$. Plus le sol est lisse et plus la pente de $\sigma^0(\theta)$ est élevée. L'explication en a été donnée à la section 4.1 du chapitre 4.

2) L'humidité augmente le niveau général de la courbe $\sigma^0(\theta)$ sans en affecter la pente. Ce phénomène a déjà été observé sur les figures 5.6 qui présentent les résultats expérimentaux.

Ainsi, on ne peut espérer obtenir des résultats théoriques concordant avec la figure 5.6.a qu'en modifiant les paramètres de rugosité, puisque la pente de $\sigma^0(\theta)$ est supérieure à celle des figures 5.7. Et plus exactement en leur donnant des valeurs qui tendraient à rendre le sol plus lisse. Cependant, il semble peu probable que la surface soit plus rugueuse en fin de période plutôt qu'au début, sans qu'il n'y ait eu aucune intervention agricole. Plusieurs hypothèses peuvent être posées, sans qu'aucune d'elles n'ait pu être confirmée:

Première hypothèse:

L'humidité augmente non seulement le niveau général de la courbe $\sigma^0(\theta)$ mais aussi la pente.

La figure 5.10 montre la valeur de la pente en dB, correspondant à $\sigma^0(11^\circ) - \sigma^0(25^\circ)$, en fonction de l'humidité, pour la polarisation HH. Les points représentent les valeurs expérimentales et la droite est le résultat de la régression linéaire sur l'ensemble des points. Le coefficient de corrélation associé à cette régression est égal à 0.48. Cette valeur est à peine suffisante pour pouvoir affirmer que la corrélation linéaire entre la pente de $\sigma^0(\theta)$ et l'humidité est significative. On note cependant, une tendance de la pente à croître avec l'humidité.

Nous ne possédons pas suffisamment de données en polarisation VV pour effectuer la même étude, le résultat n'étant pas, dans ce cas, statistiquement représentatif.

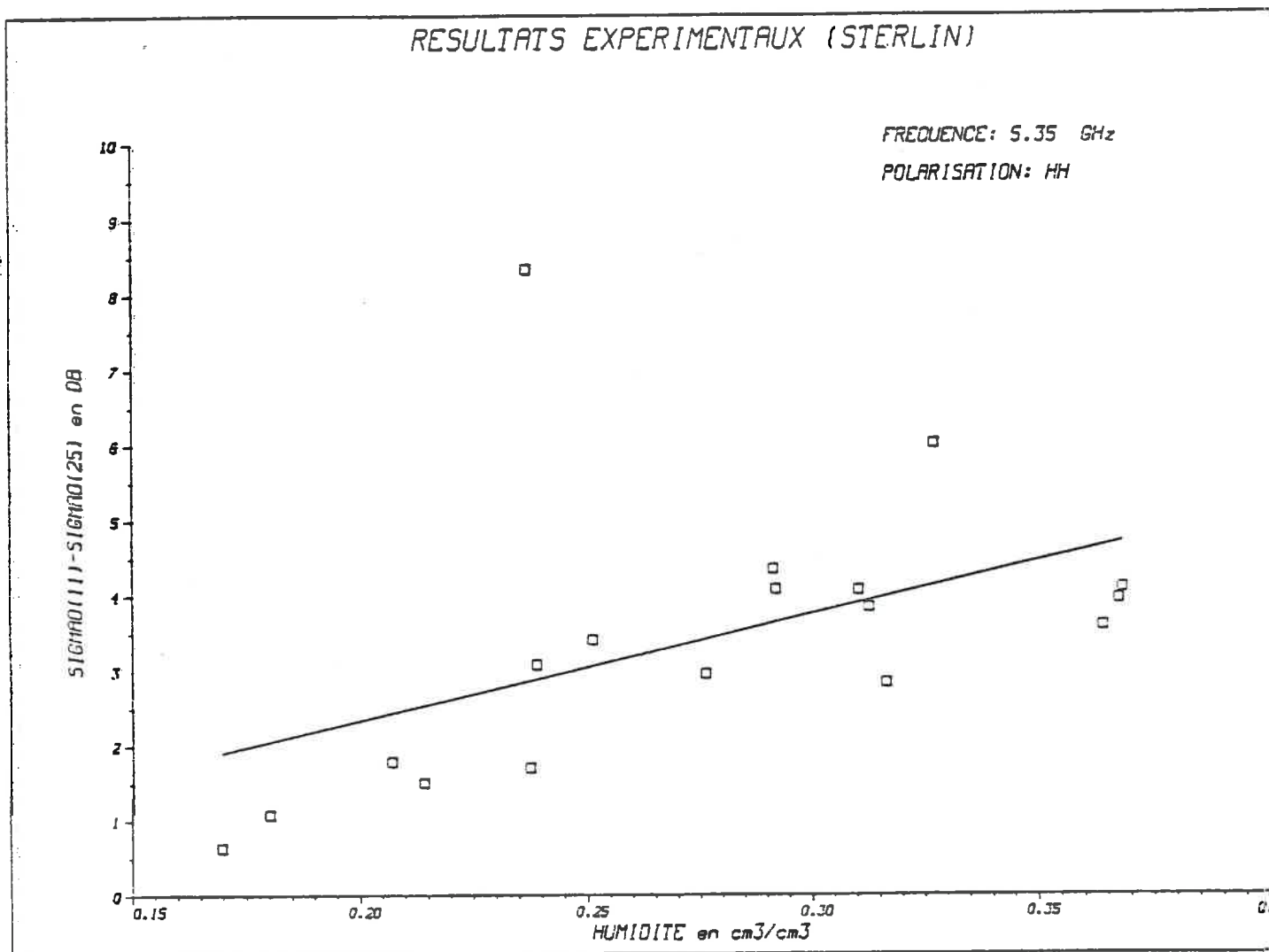
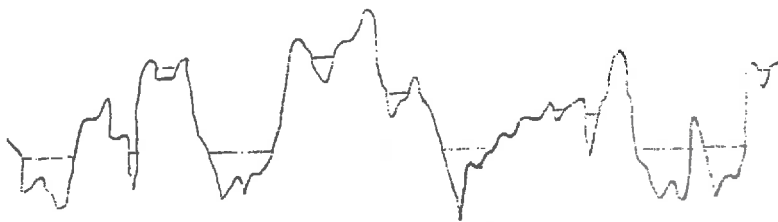


FIGURE 5.10 Valeurs de la pente, en dB, correspondant à $\sigma^{\circ}(11^{\circ})-\sigma^{\circ}(25^{\circ})$, en fonction de l'humidité.

Deuxième hypothèse:

Les mesures présentées sur la figure 5.2.a ont été effectuées en pleine période de pluie. Tous les microsillons de la surface étaient alors remplis d'eau et la profondeur de pénétration des ondes dans ces zones était minimale (de l'ordre du millimètre). Ainsi, on peut penser que l'effet de rugosité était atténué car les micro-ondes pénétraient de façon irrégulière dans le sol, selon qu'elles heurtent un sillon recouvert d'eau ou bien une motte de terre. On peut essayer de représenter ce phénomène par le schéma ci dessous.



On voit que la surface "vue" par les micro-ondes semble plus lisse que la surface réelle.

Troisième hypothèse:

Les sillons du labour, à grande échelle, étaient plus nettement marqués en début plutôt qu'en fin d'expérience (Affaissement et érosion dûs à la période de pluie, par exemple). Leur présence, dans les premiers jours de la période expérimentale, ont provoqué un effet de résonance sur le signal diffusé (du type de la résonance de Bragg) pouvant expliquer la valeur élevée de la section efficace de rétrodiffusion. Cette hypothèse est cependant peu probable car, d'une part on ne note pas d'influence de la direction de vol sur la valeur de la section efficace de rétrodiffusion et, d'autre part, l'utilisation d'une modulation à grande échelle, donnée par l'équation (5-4) n'a fourni aucun résultat concluant.

Aucune de ces hypothèses ne permet d'expliquer avec certitude le phénomène observé. Cependant, une mesure plus régulière du profil de la surface aurait pu, en partie, réduire cette incertitude.

On ne note pas, sur les résultats obtenus en polarisation VV, de modification importante de la pente de $\sigma^0(\theta)$. Il faut préciser que l'acquisition des mesures en polarisation VV a débuté 19 jours après le début de l'expérience et, en particulier, après une première grande période de pluie. Ainsi, si la variation de pente de $\sigma^0(\theta)$ est due à une modification de la rugosité au cours du temps, il est normal qu'elle s'observe de façon plus nette en polarisation HH

puisque l'intervalle de temps de mesures est largement supérieur dans cette polarisation.

En conclusion, on peut dire que le modèle de simulation rend compte de façon fiable du processus de rétrodiffusion à la surface du sol lorsque l'on se trouve dans une période temporelle où les paramètres caractérisant le terrain sont connus. L'utilisation systématique d'un modèle de simulation ne pourra donc être efficace que s'il est possible d'acquérir régulièrement les paramètres de rugosité et d'humidité permettant de suivre l'évolution du profil et le contenu en eau à la surface.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Engman E.T. & J.R. Wang, 1986: "Evaluation Roughness Models of Radar Backscatter", Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zurich, 8-11 Sept. 1986, Ref. ESA SP-254.

[2] Ulaby, F. T., F. Kouyate & A. K. Fung, 1981: "A Backscatter model for a randomly perturbed periodic surface", IEEE Digest Vol. II, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'81), Washington DC, pp 1280-1293.



Chapitre 6

SIMULATIONS SUR TERRAINS PLATS

"Elles simuleront l'ivresse de la passion, si elles ont un grand intérêt à vous tromper"
Diderot

6.1 INTRODUCTION

Nous avons vu précédemment que la section efficace de rétrodiffusion, $\sigma^0(\theta)$, était fortement dépendante de la rugosité du sol et du contenu en eau à la surface et, dans une moindre mesure, du type de sol.

Plusieurs équipes, [1], [2], [3], ont montré que, pour des angles d'incidence compris entre 10° et 15° , σ^0 est approximativement indépendante de la rugosité de la surface et de la couverture végétale, mais reste fortement sensible au contenu en eau. Ces études ont été conduites pour des fréquences dans la région de 1-8 GHz. Elles ont conclu que les paramètres optimaux en vue d'une mesure de l'humidité sont :

Fréquence \approx 5 GHz

$7^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$

Polarisation HH

Cependant, pour des raisons d'efficacité, les satellites de type ERS ne fonctionneront qu'avec des angles d'incidence supérieurs à 20° . En effet, la haute résolution ne peut être obtenue qu'avec des angles d'incidence élevés. Ceci est dû à l'effet de surface observée dont nous avons déjà parlé au chapitre 3.

Ce chapitre vise à estimer la meilleure configuration possible pour mesurer l'humidité de surface, compte tenu des paramètres de fonctionnement de ce genre de satellites.

Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle exposé au chapitre 5, utilisant des méthodes numériques identiques.

La fonction de corrélation de la surface, supposée gaussienne, a été choisie égale à (Ulaby, 1981) :

$$\rho(\xi) = \exp[-\xi^2 / (1 + L^2 \xi^2)^{1/2}]$$

où l est une constante, telle que $kl = 1$; ceci pour limiter le nombre de paramètres à évaluer lorsque l'on veut comparer les données expérimentales et les valeurs calculées,

[4], sans perdre pour autant la généralité de la description.

6.2 ETUDE DE LA SENSIBILITE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION A UNE VARIATION RELATIVE DES PARAMETRES DE SURFACE.

La section efficace de rétrodiffusion est une fonction des paramètres de la surface, pour une configuration radar donnée. On peut l'écrire sous la forme $\sigma^0(k_s, k_L, W)$.

- W correspond à l'humidité de surface exprimée en cm^3/cm^3

- k_s à l'écart-type des hauteurs rapporté à la longueur d'onde (k nombre d'onde et s écart-type des hauteurs)

- k_L à la longueur de corrélation de la surface rapportée à la longueur d'onde

L'étude de la variation relative de $\sigma^0(k_s, k_L, W)$ par rapport à l'écart-type des hauteurs, la longueur de corrélation et l'humidité peut fournir des renseignements intéressants sur la sensibilité du signal à une variation de surface.

Nous étudierons successivement ces trois cas en imposant à chaque paramètre une variation de 10% autour de sa valeur moyenne. Les résultats obtenus sont présentés dans des tableaux. Ces derniers sont regroupés en annexe, à la fin du volume.

Les expressions nécessaires au calcul de chacune de ces valeurs sont données par les équations (6-1) et (6-2).

* En puissance

$$(6-1) \quad \left(\frac{\Delta \sigma^0}{\sigma^0} \right)_{x,y,z \pm \delta z} = \frac{\sigma^0(x, y, z + \delta z) - \sigma^0(x, y, z - \delta z)}{2 \sigma^0(x, y, z)}$$

* En dB

$$(6-2) \quad \left(\frac{\Delta \sigma^0}{\sigma^0} \right)_{x,y,z \pm \delta z} = 10 \times \text{Log} \left[\frac{\sigma^0(x, y, z + \delta z)}{\sigma^0(x, y, z)} \right]$$

où x , y et z prennent successivement les valeurs de W , k_s ou k_L .

Les variations relatives sont calculées par rapport à l'un de ces paramètres, en fixant les deux autres.

Trois bandes de fréquence ont été utilisées :

S à 2.25 GHz
C à 5.35 GHz
X à 9.00 GHz

Pour chacune de ces fréquences, les simulations ont été effectuées dans les deux polarisations HH et VV et pour quatre angles d'incidence (20°, 30°, 35° et 40°).

6.2.1 VARIATION RELATIVE DE LA LONGUEUR DE CORRELATION

Trois longueurs de corrélation de la surface ont été envisagées:

- * L ≈ 9 cm soit $kL \approx 4$ en bande S
 $kL \approx 10$ en bande C
 $kL \approx 17$ en bande X
- * L ≈ 18 cm soit $kL \approx 8$ en bande S
 $kL \approx 20$ en bande C
 $kL \approx 34$ en bande X
- * L ≈ 36 cm soit $kL \approx 17$ en bande S
 $kL \approx 40$ en bande C
 $kL \approx 67$ en bande X

Ces valeurs numériques ont été choisies en fonction de ce que l'on trouve dans la littérature, d'une part, et d'autre part parce qu'elles délimitent l'intervalle dans lequel se trouvent les mesures expérimentales. Sur le site de Sterlin, L égale 23 cm donc $kL \approx 26$ en bande C.

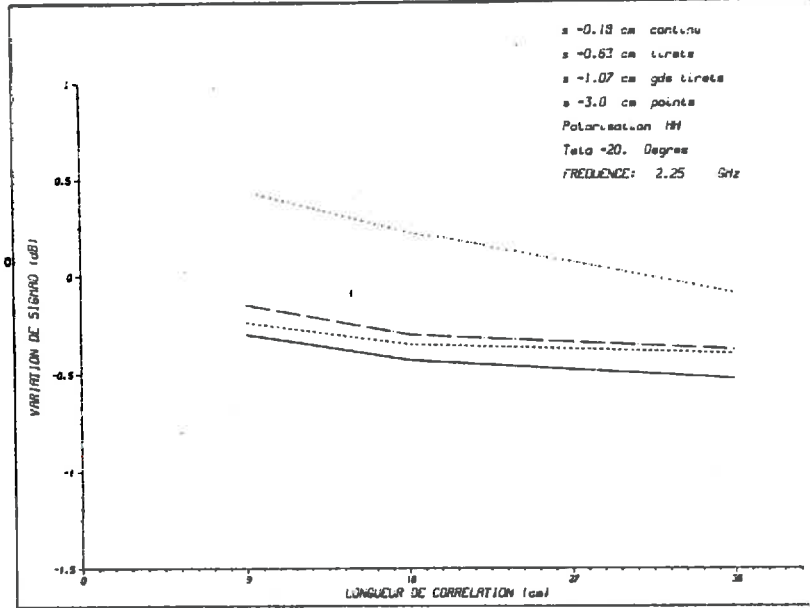
On appellera, par la suite, $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/kL$ la variation relative de σ^0 en fonction de kL .

De façon générale et pour une configuration donnée, on remarque que :

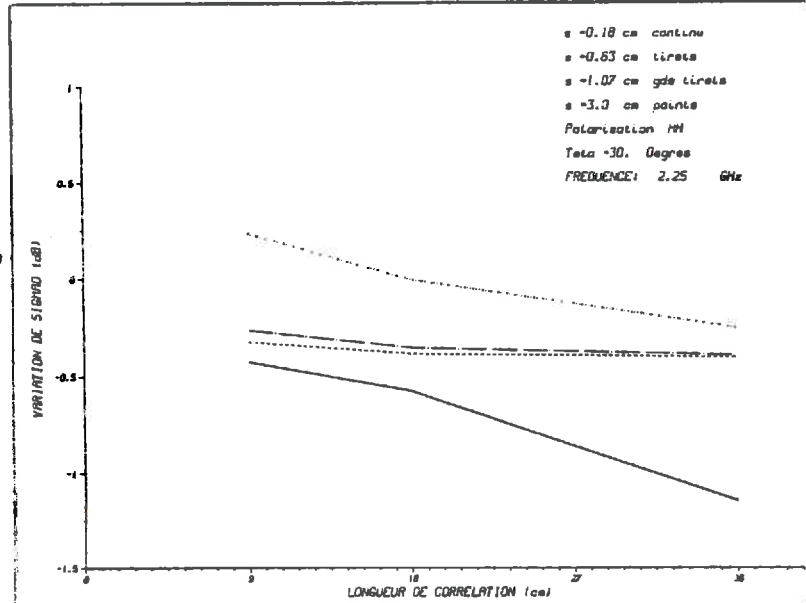
- 1) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/kL$ est indépendant de l'humidité de surface
- 2) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/kL$ diminue lorsque k_s augmente
- 3) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/kL \ll (\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_s$

Les figures 6.1, 6.2 et 6.3 donnent l'allure de $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$ en fonction de L pour différentes valeurs de s.

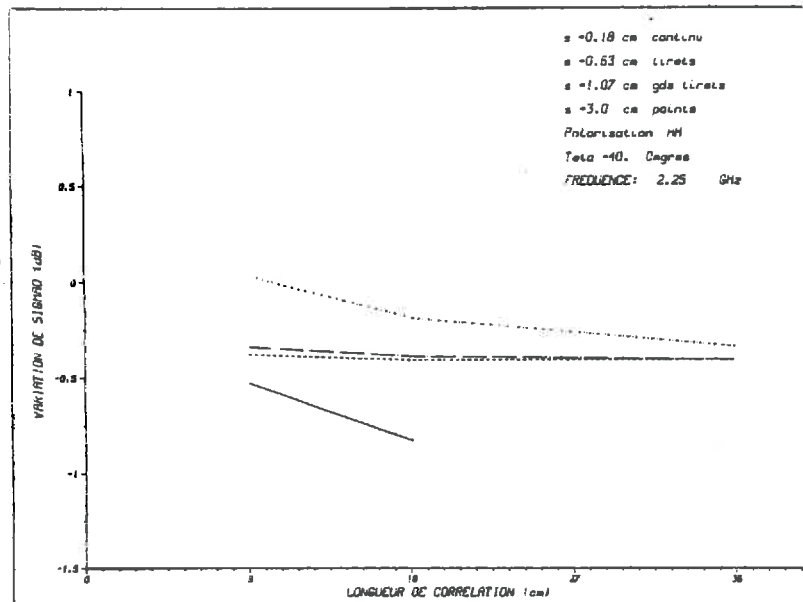
(a) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



(b) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$

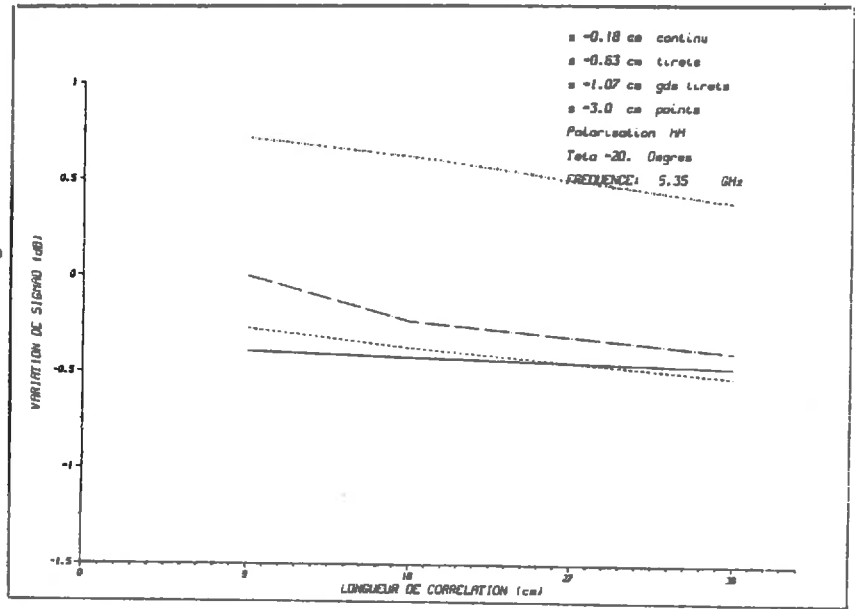


(c) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$

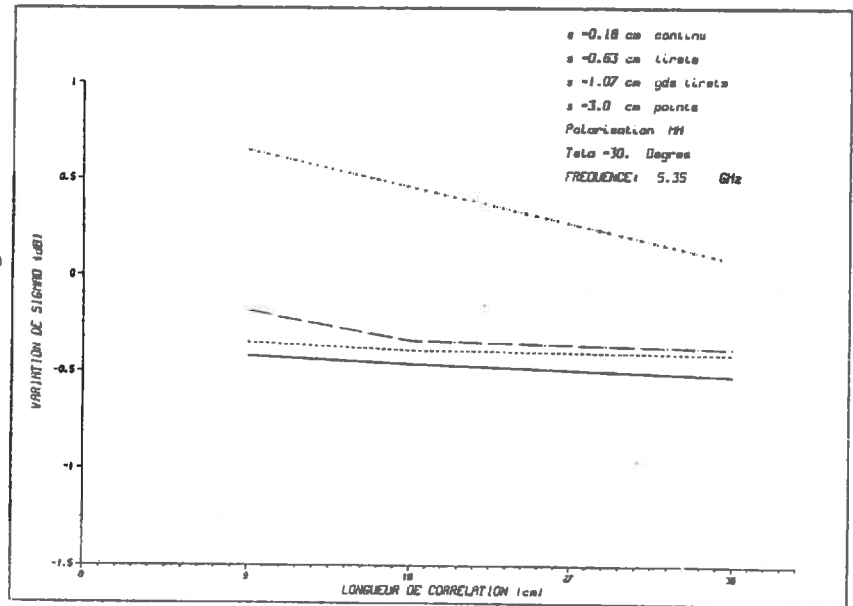


FIGURES 6.1 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

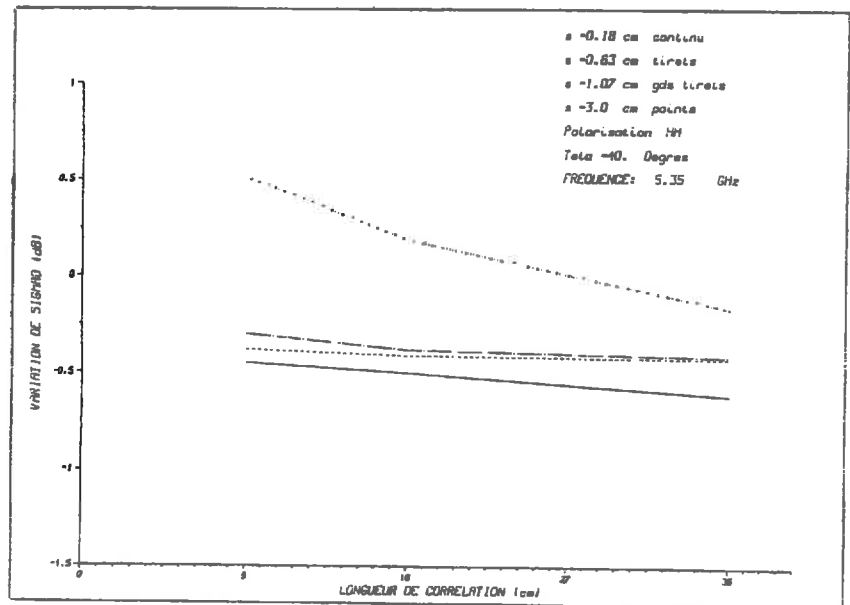
Bande C - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



Bande C - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$

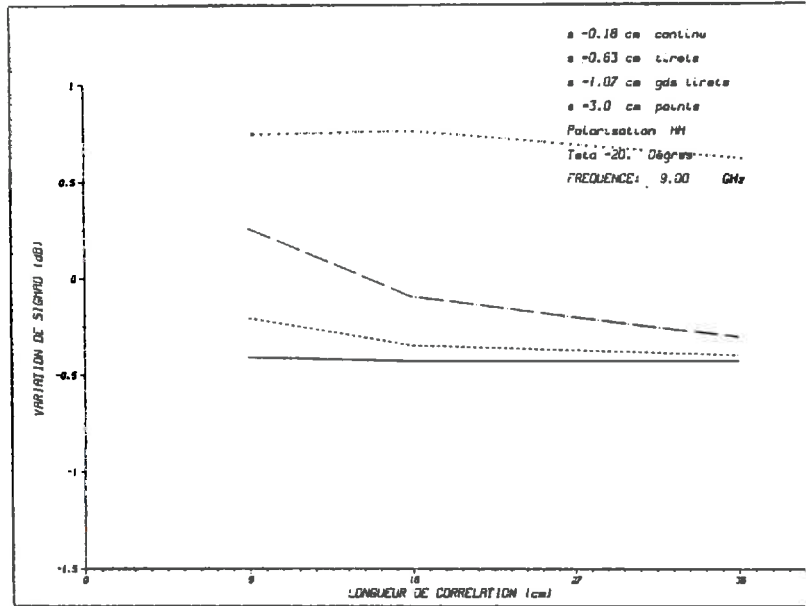


Bande C - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$

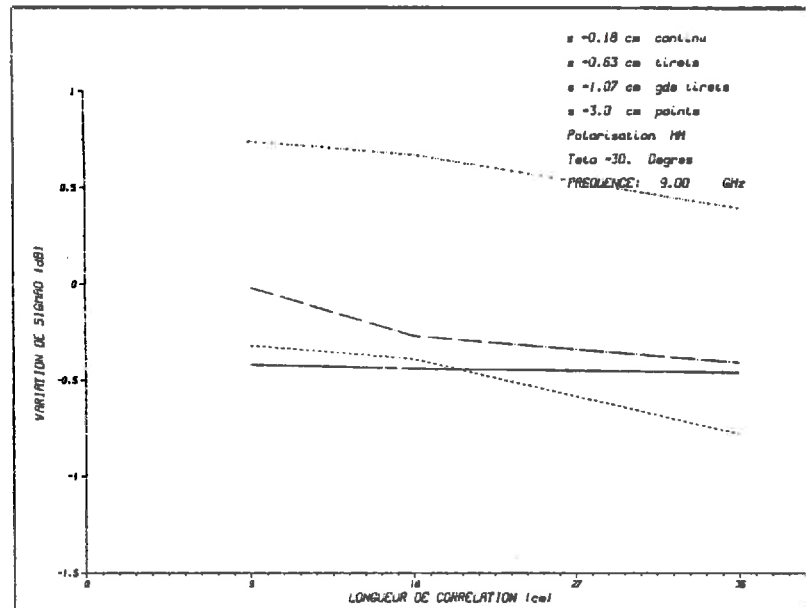


FIGURES 6.2 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

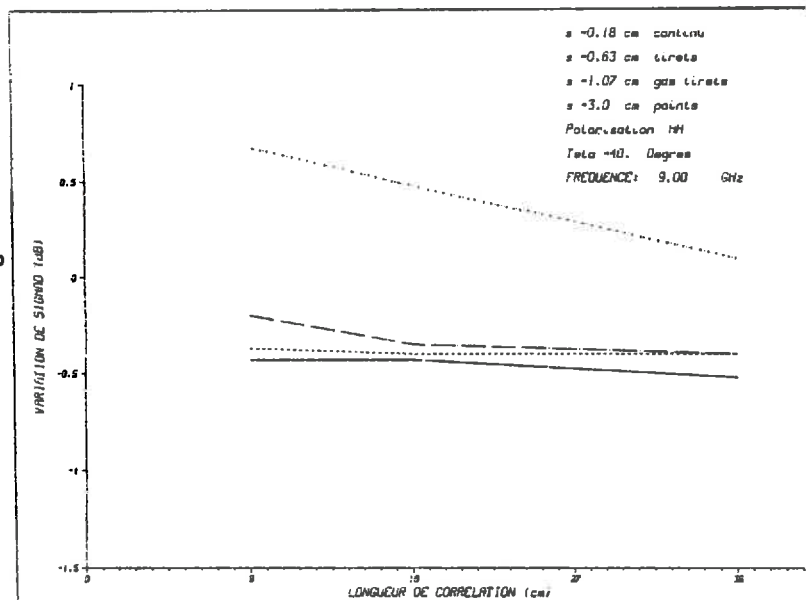
(a) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



(b) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$



(c) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$



FIGURES 6.3 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de kL , en fonction de L exprimée en cm.

Les figures 6.1.a, 6.1.b et 6.1.c présentent les résultats obtenus en bande S pour des angles d'incidence égaux à 20°, 30° et 40°. Les figures 6.2.a, 6.2.b et 6.2.c correspondent aux résultats obtenus en bande C et les figures 6.3.a, 6.3.b et 6.3.c à ceux obtenus en bande X.

On remarque que la variation relative change de signe lorsque le sol devient très rugueux, elle devient alors positive. En effet, lorsque le sol est très rugueux, la réflexion de l'onde incidente se fait sur des éléments de surface trop inclinés pour permettre un retour de l'onde dans la direction spéculaire. Cet effet est accentué aux faibles angles d'incidence. Le changement de signe de cette variation intervient, à $\theta = 40^\circ$, pour une valeur de l'écart-type des hauteurs plus élevée qu'à $\theta = 20^\circ$.

6.2.2 VARIATION RELATIVE DE L'ECART-TYPE DES HAUTEURS

Quatre valeurs de l'écart-type des hauteurs de la surface ont été envisagées:

* $s \approx 0.18$ cm	soit	$k_s \approx 0.08$	en bande S
		$k_s \approx 0.20$	en bande C
		$k_s \approx 0.34$	en bande X
* $s \approx 0.63$ cm	soit	$k_s \approx 0.29$	en bande S
		$k_s \approx 0.70$	en bande C
		$k_s \approx 1.18$	en bande X
* $s \approx 1.07$ cm	soit	$k_s \approx 0.50$	en bande S
		$k_s \approx 1.20$	en bande C
		$k_s \approx 2.02$	en bande X
* $s \approx 3.00$ cm	soit	$k_s \approx 1.40$	en bande S
		$k_s \approx 3.40$	en bande C
		$k_s \approx 5.70$	en bande X

De la même façon que précédemment, ces choix numériques ont été guidés par ceux trouvés dans la littérature. En effet, les sols sont ordinairement classés en trois groupes :

- * peu rugueux $k_s \leq 0.3$
- * moyennement rugueux $0.3 \leq k_s \leq 3$
- * très rugueux $k_s > 3$

D'autre part, ils contiennent, là encore, les valeurs expérimentales mesurées sur le site de l'expérience. Sur le champ de Sterlin, s est de l'ordre de 2.7 cm, donc $k_s \approx 3$ en bande C.

On appellera, par la suite, $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/ks$ la variation relative de σ^0 en fonction de ks .

De façon générale et pour une configuration donnée, on remarque que :

- 1) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/ks$ est indépendant de l'humidité de surface
- 2) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/ks$ augmente lorsque kL augmente
- 3) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/ks$ prend, dans presque tous les cas, la valeur la plus élevée de l'ensemble des variations relatives.

Les figures 6.4, 6.5 et 6.6 donnent l'allure de $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$ en fonction de s pour trois valeurs différentes de L . Les figures 6.4.a, 6.4.b et 6.4.c présentent les résultats obtenus en bande S pour des valeurs de l'angle d'incidence égales à 20° , 30° et 40° ; les figures 6.5.a, 6.5.b et 6.5.c ceux obtenus en bande C et les figures 6.6.a, 6.6.b et 6.6.c ceux obtenus en bande X.

On remarque que, pour $\theta = 20^\circ$, la bande X est sensible à la longueur de corrélation lorsque l'écart-type des hauteurs prend des valeurs intermédiaires ($s \approx 1$ cm, qui correspond à une rugosité moyenne). Cette sensibilité tend à disparaître lorsque s prend des valeurs extrêmes ($s \approx 0.2$ cm, cas du sol très lisse ou $s \approx 3$ cm, cas du sol très rugueux). A l'inverse, la bande S est sensible à la longueur de corrélation de la surface lorsque s prend des valeurs extrêmes. Cette sensibilité s'amenuise lorsque s prend des valeurs intermédiaires.

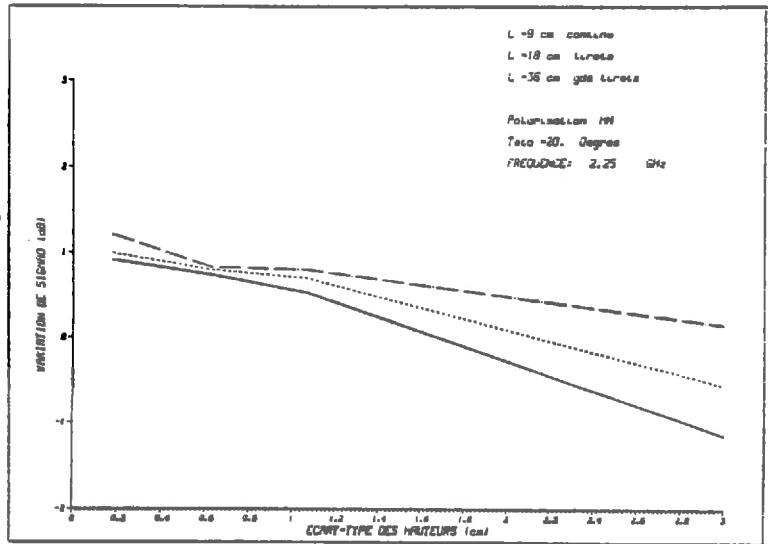
Lorsque l'angle d'incidence augmente, les trois bandes de fréquence donnent des résultats similaires pour $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$, à savoir ceux de la bande S à 20° .

6.2.3 DERIVEE PAR RAPPORT A L'HUMIDITE DE SURFACE

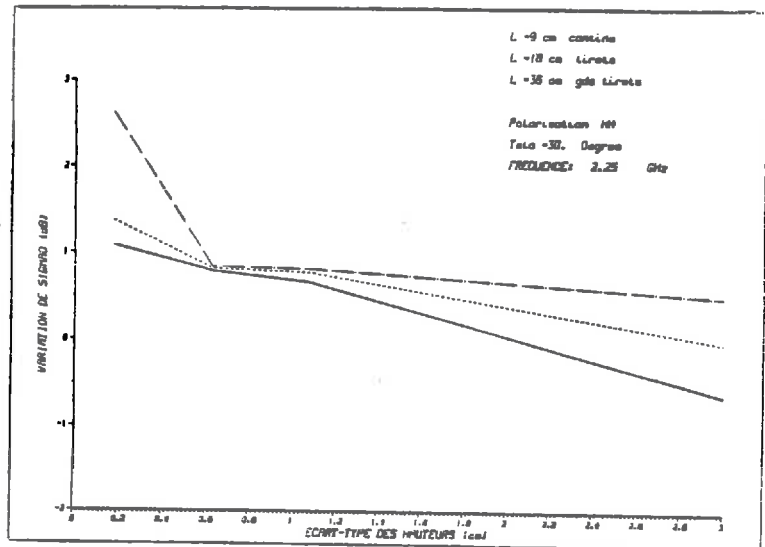
Trois valeurs de l'humidité de surface ont été envisagées:

- * $W = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
- * $W = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
- * $W = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

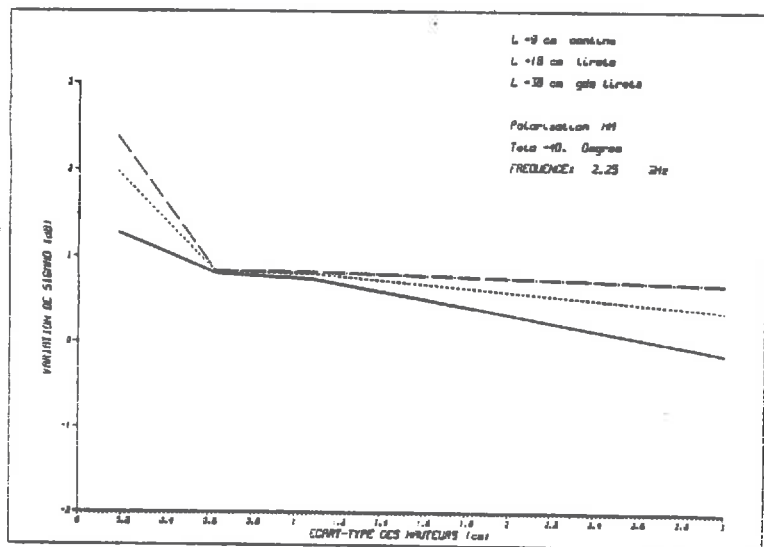
(a) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



(b) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$

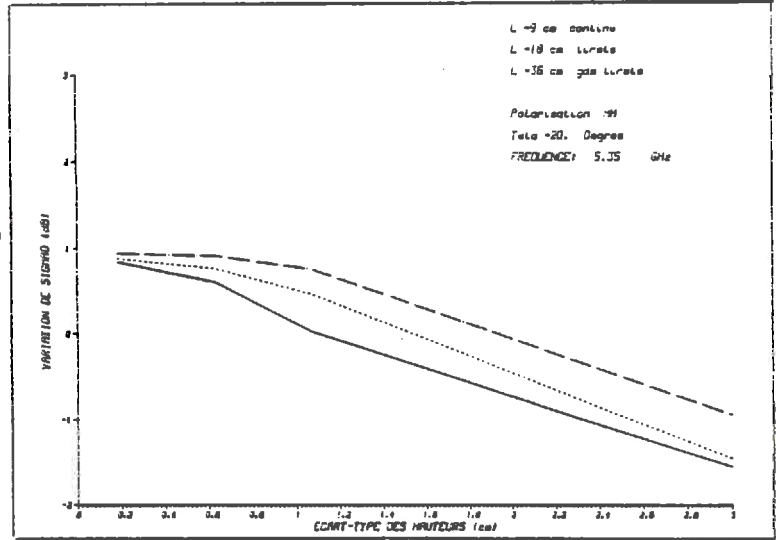


(c) Bande S - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$

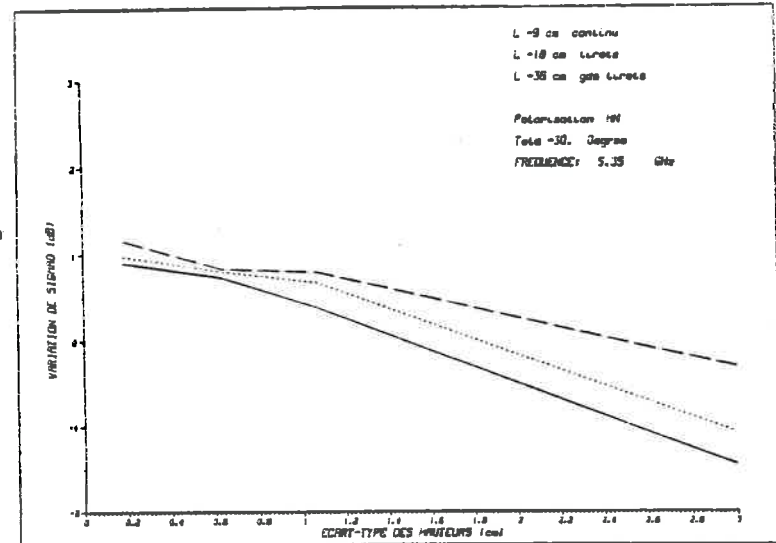


FIGURES 6.4 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimé en cm.

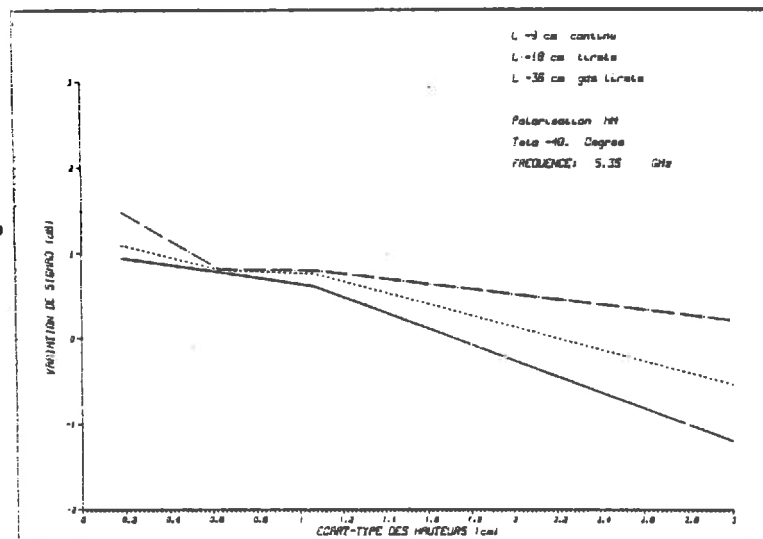
(a) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



(b) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$

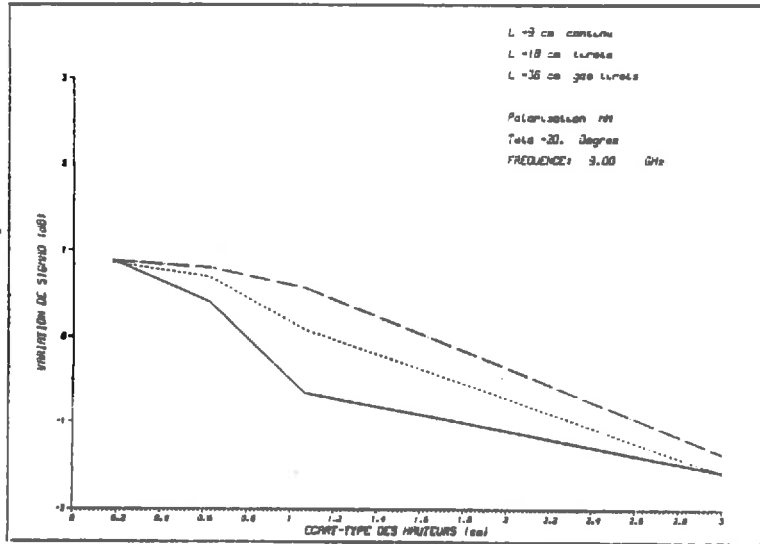


(c) Bande C - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$

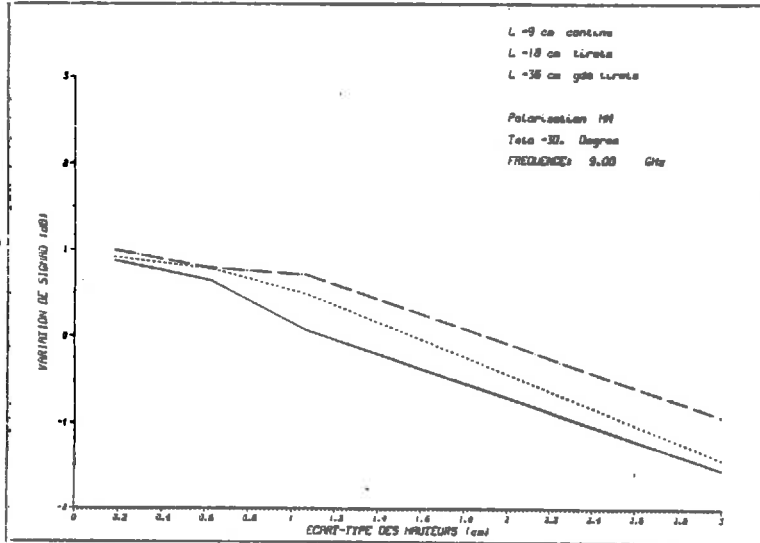


FIGURES 6.5 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimé en cm.

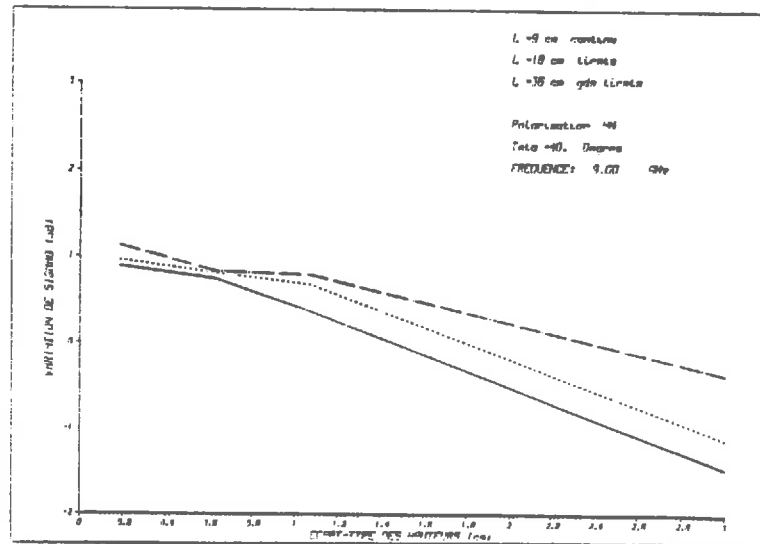
(a) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 20^\circ$



(b) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 30^\circ$



(c) Bande X - Polarisation HH - $\theta = 40^\circ$



FIGURES 6.6 Variation relative de σ^0 , en dB, pour une variation de $\pm 10\%$ de k_s , en fonction de s exprimé en cm.

Ces valeurs numériques ont été choisies en tenant compte des résultats obtenus lors des mesures de l'humidité sur le site de l'expérience. Ces dernières varient de $0.12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

On appellera, par la suite, $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ la variation relative de σ^0 en fonction de W .

De façon générale et pour une configuration donnée, on remarque que :

- 1) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ est indépendant de k_s et de k_L , ce qui prouve que l'humidité est une variable séparable.
- 2) $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ est maximum pour une humidité moyenne ($W = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) et minimum pour une humidité faible ($W = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)
- 3) Les valeurs de $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ sont souvent du même ordre de grandeur que celles de $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_L$ mais restent toujours inférieures à $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_s$.

Au regard de ces résultats, nous pouvons faire les constatations suivantes:

* Les variations de σ^0 en fonction des paramètres de sol sont, dans leurs grandes lignes, indépendantes de la fréquence du radar. L'effet de la fréquence est, essentiellement, de changer l'amplitude de la variation.

* Les paramètres de rugosité (k_L, k_s) n'interagissent pas avec l'humidité. Ce résultat est intéressant, d'autant qu'il n'est pas évident, a priori. Effectivement, dans l'expression de $\sigma^0(\theta)$, l'humidité n'intervient que dans les coefficients de Fresnel qui sont indépendants de la rugosité. Mais, ces coefficients ne sont pas factorisables. Ils ne peuvent donc pas être aisément séparés des termes de rugosité.

* Parmi les paramètres de rugosité, σ^0 est davantage sensible à une variation de k_s qu'à une même variation de k_L .

6.3 INFLUENCE DE LA CONFIGURATION RADAR

Pour des paramètres de surface fixés, σ^0 varie en fonction de la configuration radar, c'est-à-dire de l'angle d'incidence, de la fréquence et de la polarisation.

On a vu, au chapitre 5, que σ^0 diminue lorsque l'angle d'incidence augmente. On a noté aussi que la section efficace de rétrodiffusion mesurée en polarisation verticale est plus faible que celle mesurée en polarisation horizontale. D'autre part, sa valeur est d'autant plus élevée que la fréquence est élevée.

On va, maintenant, regarder plus en détail l'effet de chacun de ces paramètres de fonctionnement radar sur les résultats précédents.

* Effet de l'angle d'incidence

Pour une fréquence et une polarisation données:

- 1) On n'observe aucune influence sur $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ en HH, mais une augmentation sensible de la valeur de ce rapport en VV lorsque l'angle d'incidence augmente.
- 2) On remarque que lorsque θ augmente, $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_L$ et $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_S$ augmentent dans le cas des sols peu ou moyennement rugueux ($k_S \leq 3$) et diminuent dans le cas des sols très rugueux ($k_S > 3$).

* Effet de la polarisation

Pour une fréquence et un angle d'incidence donnés:

- 1) On n'observe aucune influence sur $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_S$ et $(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/k_L$ ce qui laisserait supposer que ces variations sont indépendantes de la polarisation.
- 2) Pour un angle d'incidence faible:

$(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0})/W$ est indépendant de la polarisation

Pour un angle d'incidence élevé ($\theta \approx 40^\circ$):

$(\frac{\Delta\sigma^0_{VV}}{\sigma^0})/W$ est sensiblement plus élevé que $(\frac{\Delta\sigma^0_{HH}}{\sigma^0})/W$.

Ce résultat est important et nous y reviendrons par la suite.

* Effet de la fréquence

Pour une polarisation et un angle d'incidence donnés:

On n'observe pas d'influence notable de la fréquence sur

$$\left(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0}\right)/W, \left(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0}\right)/kL \text{ et } \left(\frac{\Delta\sigma^0}{\sigma^0}\right)/ks.$$

Ceci est dû au fait que les paramètres de rugosité sont rapportés à la longueur d'onde. Ainsi la dépendance en fréquence n'apparaît plus que dans les coefficients de Fresnel et dans le nombre d'onde, k , qui est un facteur multiplicatif dans l'expression de la section efficace de rétrodiffusion.

6.4 ETUDE DU RAPPORT $\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}$

On a vu, au paragraphe précédent, que la polarisation avait un effet sur $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$ aux grands angles d'incidence. Ceci provient du fait que l'humidité et la polarisation sont deux paramètres qui interviennent dans les coefficients de Fresnel et seulement dans ceux-ci.

Sur les figures 6.7, il est tracé le rapport R_{hh} / R_{vv} en fonction de θ pour les mêmes valeurs d'humidité et de fréquences que précédemment.

On remarque que:

- 1) R_{hh} / R_{vv} augmente avec l'angle d'incidence
- 2) R_{hh} / R_{vv} augmente avec la fréquence
- 3) R_{hh} / R_{vv} augmente lorsque l'humidité diminue

Ces constatations permettent de penser que le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ pourrait, à incidence élevée, prendre des valeurs différentes selon le contenu en eau à la surface, valeurs qui auraient tendance à être indépendantes de la rugosité. En effet, en utilisant les équations (1-64) et (1-69) établies au chapitre 1, on peut écrire:

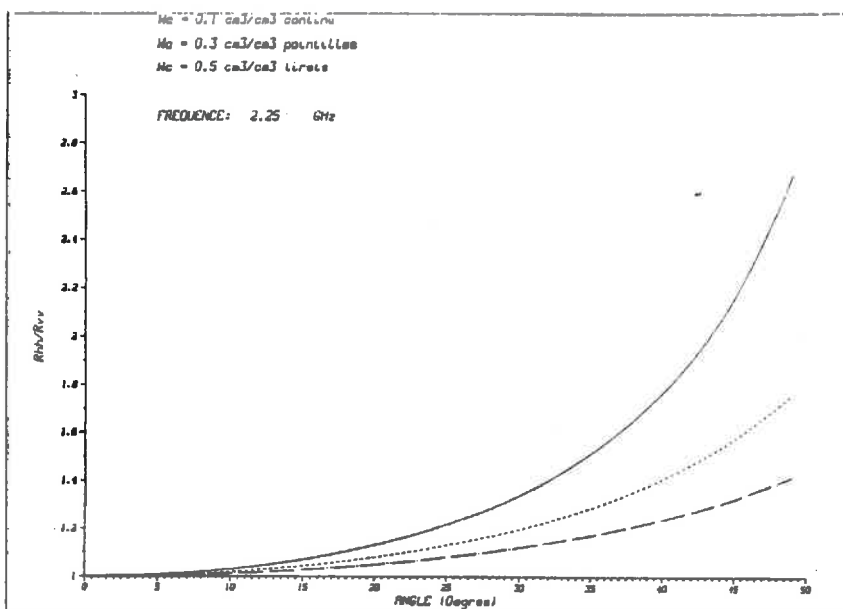
$$\frac{\sigma_{inc\ hh}^0}{\sigma_{inc\ vv}^0} = \frac{|R_{hh}|^2}{|R_{vv}|^2}$$

et

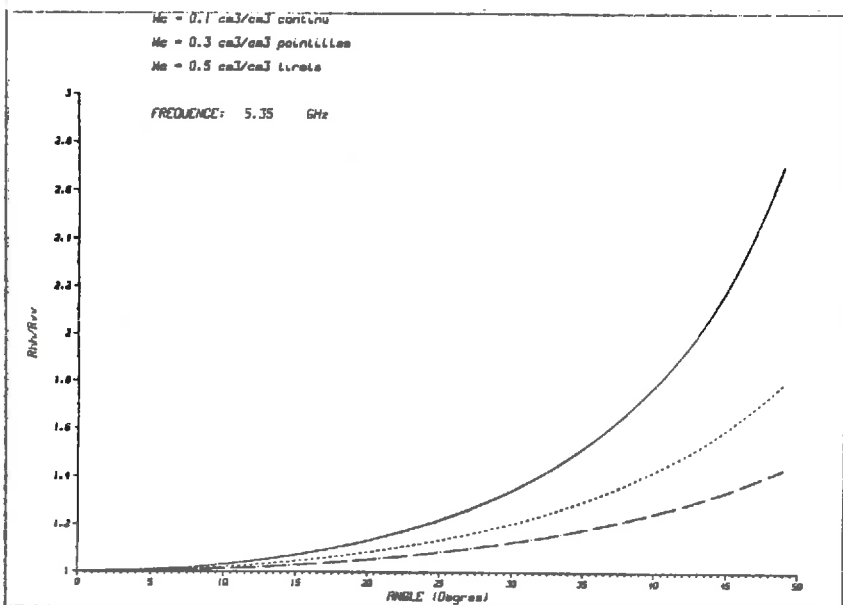
$$\frac{\sigma_{pen\ hh}^0}{\sigma_{pen\ vv}^0} = \frac{|R_{hh}|^2 \cos\theta \sin\theta + \Re\{R_{hh} R_{hh}^*\} \cos^2\theta}{|R_{vv}|^2 \cos\theta \sin\theta + \Re\{R_{vv} R_{vv}^*\} \cos^2\theta}$$

On remarque que chacune de ces composantes est fortement dépendante du rapport $|R_{hh} / R_{vv}|^2$ et que les termes rendant compte de la rugosité ont disparu. On peut donc s'attendre à ce que cette influence persiste dans le rapport des sections efficaces totales (terme incohérent + terme de pentes).

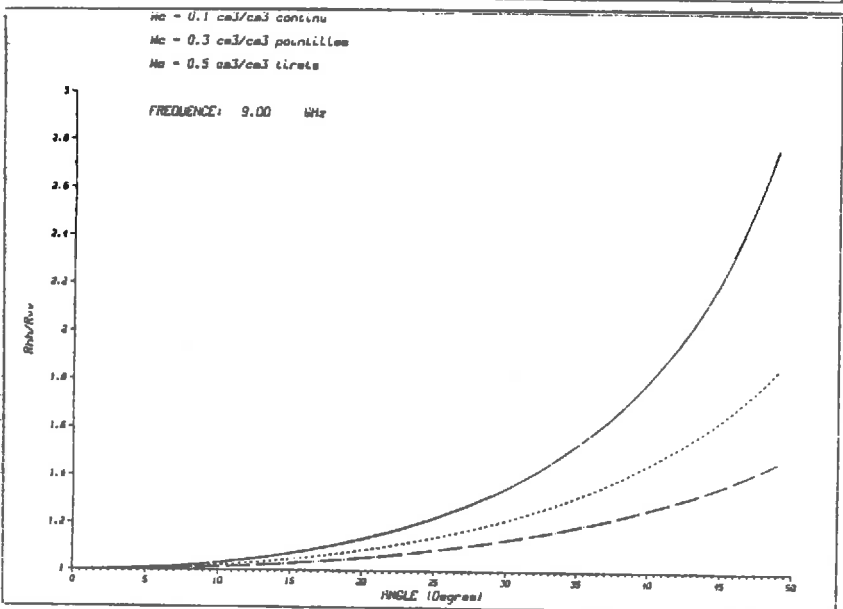
(a)



(b)



(c)



FIGURES 6.7 Allure du rapport des coefficients de Fresnel R_{hh}/R_{vv} , en fonction de θ , pour 3 valeurs de l'humidité de surface.

$W_c = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

(a) Bande S (b) Bande C (c) Bande X

Les figures 6.8 donnent l'allure du rapport $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ obtenu par simulation. On remarque qu'aux grands angles d'incidence, il semble possible de distinguer des sols ayant une humidité différente, indépendamment de leur rugosité.

La figure 6.9 montre les valeurs du rapport $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ obtenues avec les données expérimentales sur le site de Sterlin. On note que lorsque θ augmente, la dispersion des points s'accroît. Ceux qui correspondent à un sol sec ont tendance à prendre les plus fortes valeurs, ceux qui proviennent de mesures sur un sol très humide prennent de faibles valeurs. Nous ne possédons pas, à l'heure actuelle de mesure au delà de 27° nous permettant de vérifier si cette tendance s'accroît aux grands angles. Cependant, les résultats théoriques, obtenus par simulation, confirment ces hypothèses. On note, d'autre part, que ce rapport prend, aux angles d'incidence faibles, des valeurs inférieures à 1. Ceci peut être expliqué par un étalonnage inadéquat du radar dans les deux polarisations.

Cette figure impose, malgré tout, certaines réserves. En effet, la dispersion des points à 25° est nettement supérieure à celle prévue par les résultats de simulation. D'autres phénomènes sont peut-être venus s'ajouter à celui prévu théoriquement. On peut, en particulier, penser à l'effet observé sur la figure 5.10. Si la pente de $\sigma^{\circ}(\theta)$ est effectivement dépendante de l'humidité de surface, alors cela doit se retrouver dans le rapport des sections efficaces de rétrodiffusion.

Les tableaux 6.4 donnent les valeurs du rapport $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ pour les trois bandes de fréquences. On peut faire les remarques suivantes :

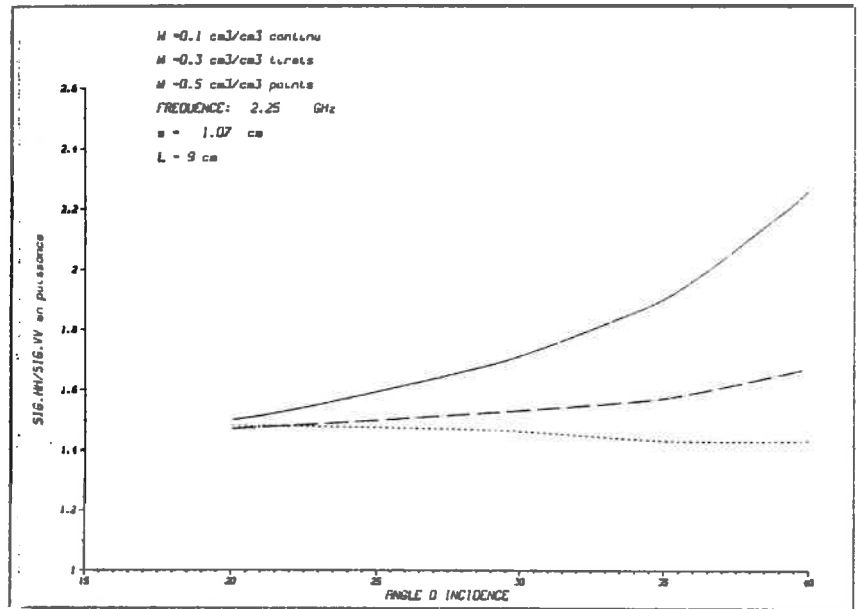
1) Pour de grands angles d'incidence, l'écart entre les valeurs obtenues sur un sol sec ($W = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) et celles obtenues sur un sol très humide ($W = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) s'accroît avec la fréquence.

2) $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ est indépendant de k_s et k_L (sauf dans le cas d'une surface lisse).

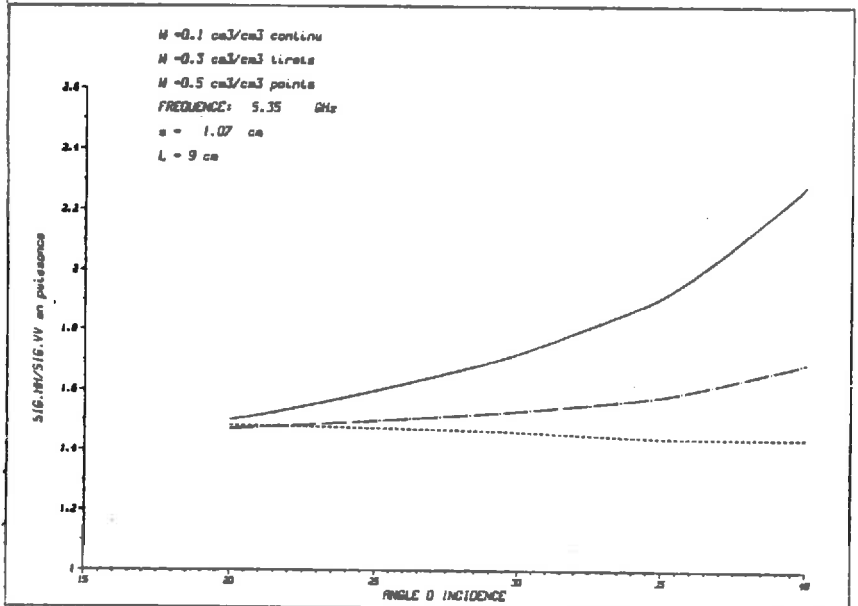
ETUDE DE LA VARIATION RELATIVE DE $\sigma_{hh}^{\circ} / \sigma_{vv}^{\circ}$ EN FONCTION DES PARAMETRES DE SURFACE

Les tableaux 6.5, 6.6 et 6.7 présentent les résultats obtenus pour les quatre angles d'incidence et les trois bandes de fréquence. Les variations relatives ont été obtenues en faisant varier W , k_s et k_L de $\pm 10\%$ autour de leur valeur moyenne. Les résultats sont exprimés en puissance.

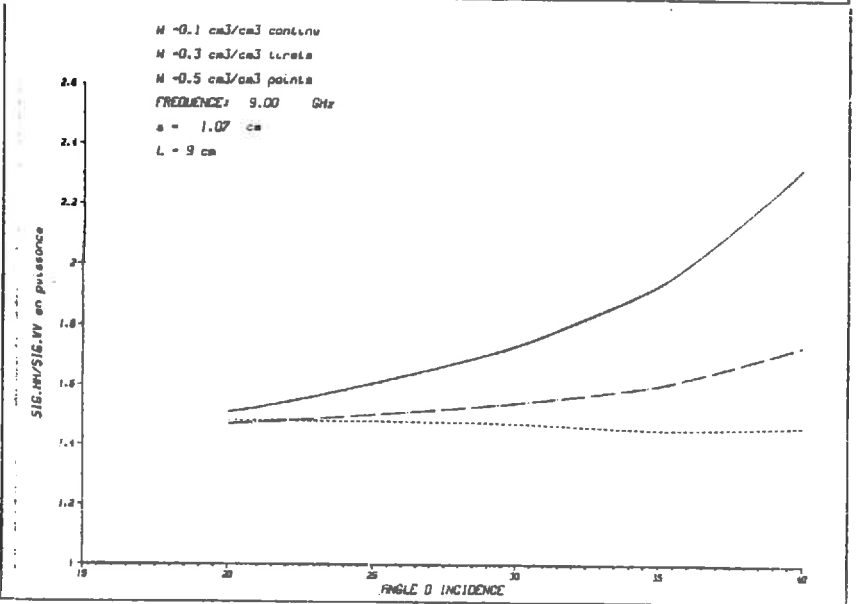
(a)



(b)



(c)



FIGURES 6.8 Allure du rapport des coefficients de diffusion $\sigma_{hh}^{0} / \sigma_{vv}^{0}$, en fonction de θ , pour 3 valeurs de l'humidité de surface.

$Wc = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 (a) Bande S (b) Bande C (c) Bande X

RESULTATS EXPERIMENTAUX (STERLIN)

FREQUENCE: 5.35 GHz

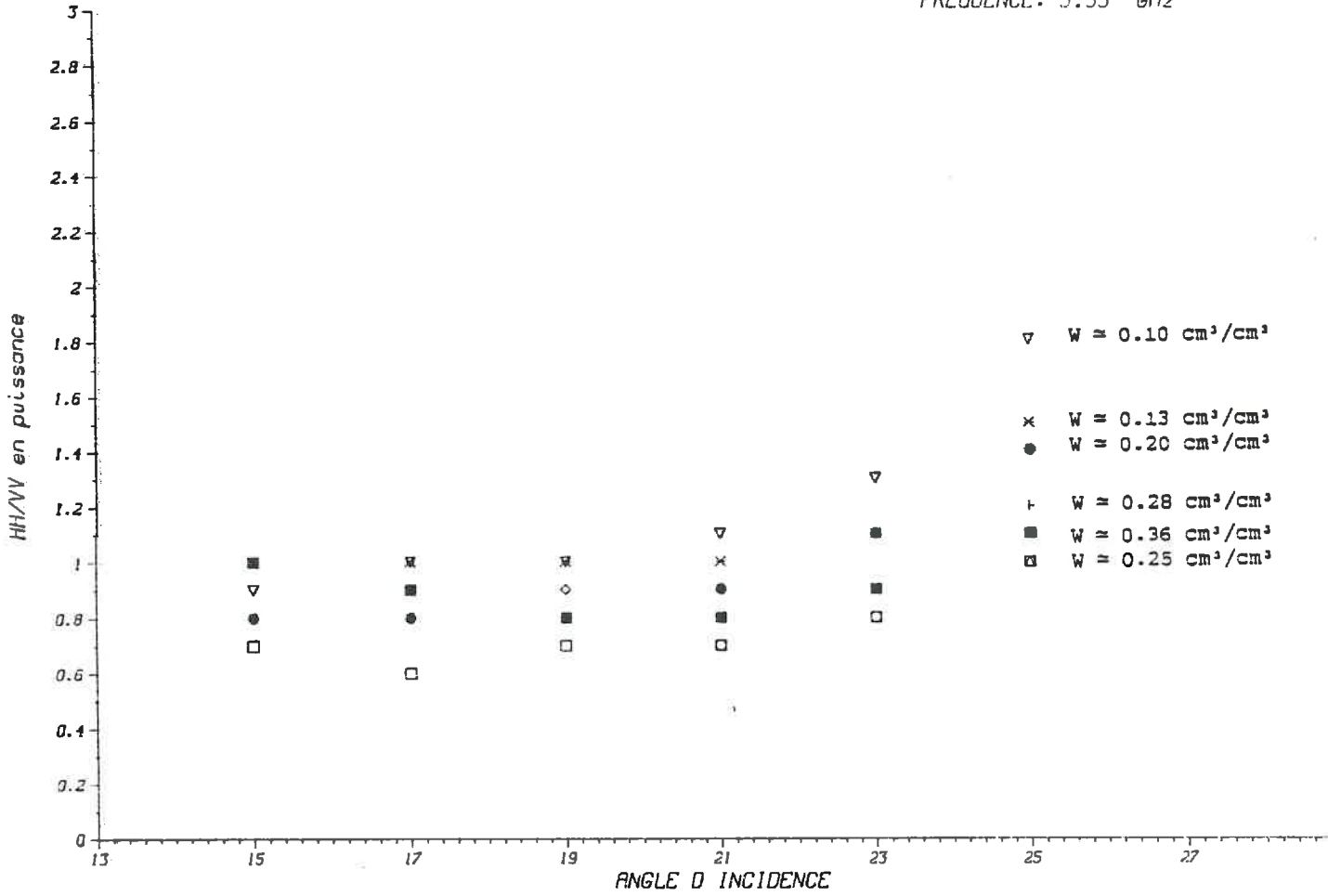


FIGURE 6.9 Valeurs du rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$, obtenues à l'aide des données expérimentales, en fonction de θ .

Résultats obtenus en bande S (F = 2.25 GHz)

1) Le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ reste sensible aux paramètres de rugosité (essentiellement k_s) dans le cas des surfaces très lisses. IL faut noter que, dans ce cas, σ^0 est toujours inférieur à - 20 dB, voire inférieur à - 30 dB. Ainsi, dans le but d'une application pratique, il semble illusoire de pouvoir détecter une variation sensible du signal aux paramètres de sol si celui-ci est du même ordre de grandeur que le bruit propre du radar.

2) La sensibilité de $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ à l'humidité de surface augmente avec l'angle d'incidence. Elle est maximale pour une humidité moyenne ($W = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

Résultats obtenus en bande C (F = 5.35 GHz)

La même constatation que précédemment est à faire au sujet de la sensibilité de $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ aux paramètres de rugosité dans le cas du sol lisse, mais elle n'intervient cette fois que de façon modérée pour $\theta < 35^\circ$. En effet, la section efficace de rétrodiffusion mesurée en bande C a une valeur supérieure à celle mesurée en bande S.

La sensibilité à l'humidité de surface a le même ordre de grandeur et évolue de façon similaire qu'en bande S.

Résultats obtenus en bande X (F = 9.0 GHz)

1) $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ reste davantage sensible à une variation d'humidité plutôt qu'à une variation de la rugosité (sauf dans le cas d'une surface "parfaitement" lisse - $k_s = 0.34$ et $k_L = 67$ - et d'une humidité très faible - $W = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ - à une incidence de 40° ; dans ce cas, $\sigma_{hh}^0 = -36 \text{ dB}$).

2) L'écart de ces variations s'accroît, pour différentes humidités, par rapport aux résultats obtenus dans les autres bandes de fréquence.

3) La sensibilité du rapport est maximale pour une humidité moyenne ($W = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

6.5 DISCUSSION ET SELECTION DES PARAMETRES RADAR

Les résultats des simulations, présentés dans les premières sections de ce chapitre, permettent certaines conclusions.

1) Quelle que soit la configuration choisie, si l'on n'utilise qu'un angle d'incidence, qu'une fréquence et qu'une polarisation, il n'est pas possible de déterminer si les variations du signal reçu sont dues à une modification d'un et d'un seul paramètre de sol.

2) Le couplage de deux fréquences n'apporte aucune indication supplémentaire puisque l'effet de la fréquence est de modifier la sensibilité du signal à tous les paramètres de sol pris dans leur ensemble.

3) Le couplage de deux polarisations peut apporter une information sur l'humidité de surface. Nous verrons plus loin quelle est la configuration qui fournit une sensibilité optimale.

Nous étudierons, par la suite, les informations que peut apporter le couplage de deux angles d'incidence.

6.5.1 SELECTION DES PARAMETRES RADAR EN VUE D'UNE MESURE DE LA RUGOSITE.

De même que le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ atténue l'effet de la rugosité et accentue celui de l'humidité, on peut supposer que le rapport $\sigma_{pp}^0 / \sigma_{pp}^0$ (où σ_{pp}^0 est une mesure faite au même endroit, mais avec un angle de visée ou une fréquence différente) restera très sensible à la rugosité mais le sera beaucoup moins à l'humidité.

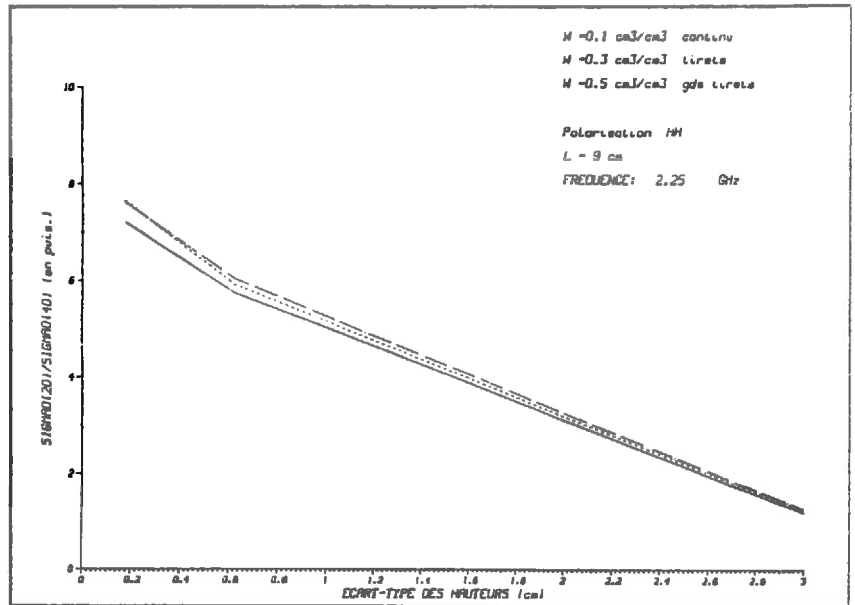
Une étude dans ce sens a montré que le maximum de sensibilité aux paramètres de rugosité était obtenu en faisant le rapport $\sigma_{hh}^0(20^\circ) / \sigma_{hh}^0(40^\circ)$.

Le choix de la polarisation horizontale a permis de réduire la sensibilité à l'humidité.

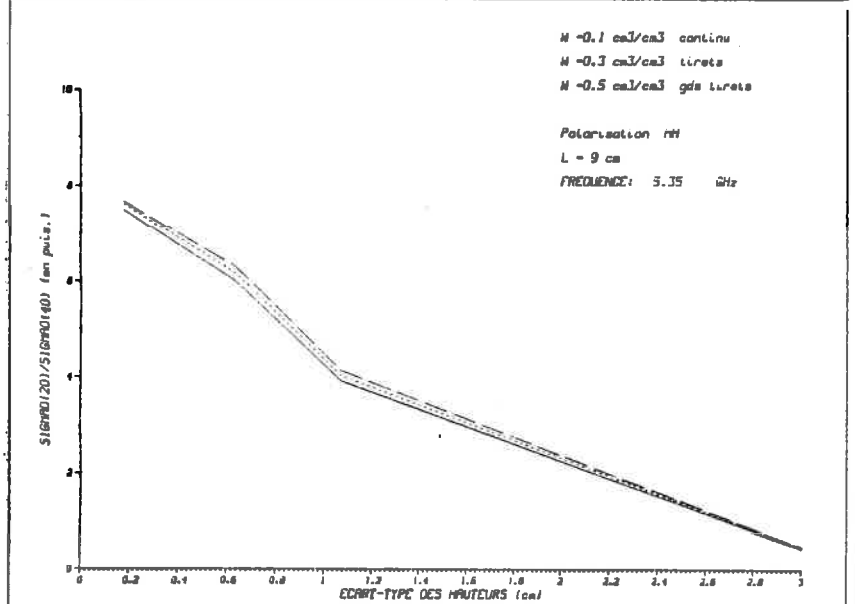
Les valeurs de ce rapport, exprimées en puissance, ainsi que leur sensibilité aux variations des paramètres de surface, sont regroupées dans le tableau 6.8 pour la bande S, dans le tableau 6.9 pour la bande C et dans le tableau 6.10 pour la bande X.

La figure 6.10.a (respectivement 6.10.b et 6.10.c) montre la variation en puissance de $\sigma^0(20^\circ) / \sigma^0(40^\circ)$ en fonction de l'écart-type des hauteurs pour les différentes valeurs de l'humidité en bande S (respectivement bande C et X). On remarque que le rapport est très peu sensible à l'humidité mais varie fortement avec s. On note que le rapport prend des valeurs d'autant plus élevées que l'écart-type des hauteurs est faible. D'autre part, on remarque une discontinuité de la pente de $\sigma^0(20^\circ) / \sigma^0(40^\circ)$ en fonction de l'écart-type des hauteurs qui est fortement accentuée lorsque la fréquence augmente.

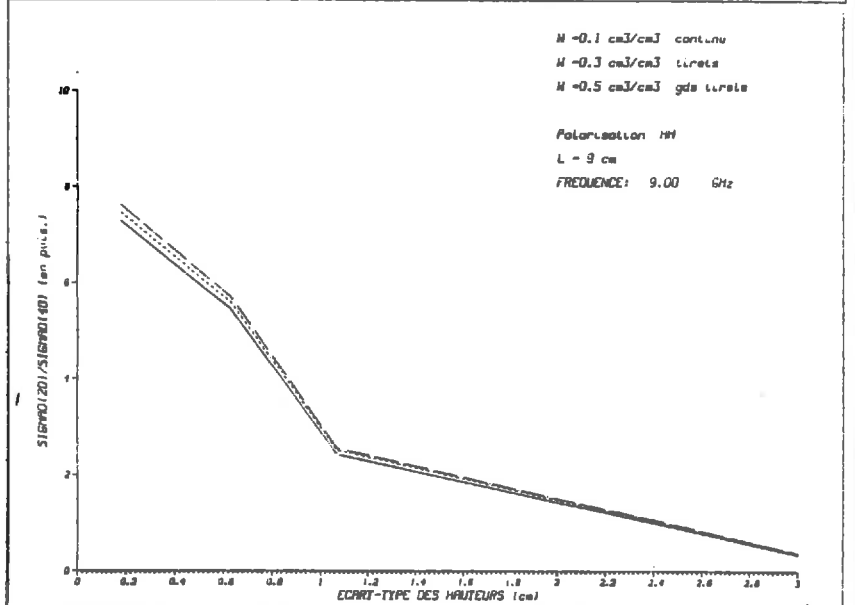
(a)



(b)



(c)



FIGURES 6.10 Variation relative de $\sigma^0(20^\circ)/\sigma^0(40^\circ)$ en fonction de s (cm), pour trois valeurs de de l'humidité de surface.

$W_c = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 (a) Bande S (b) Bande C (c) Bande X

En effet, pour $F = 2.25$ GHz, on observe une pente quasi constante alors que, pour $F = 9$ GHz, la pente est très forte pour les petites valeurs de s (sols lisses) et faible pour les grandes valeurs de s (sols rugueux). Il devient, dans ce cas, plus difficile d'obtenir une différenciation nette entre les sols rugueux.

La bande C offre une pente suffisamment élevée pour toutes les valeurs de l'écart-type des hauteurs permettant la distinction entre sols lisses et rugueux.

Ainsi, la configuration radar optimale pour une mesure de la rugosité semble être:

- Fréquence: Bande S ou C ($2 \text{ GHz} \leq F \leq 5 \text{ GHz}$)
- Deux angles d'incidence: 20° et 40°
- Polarisation HH

6.5.2 SELECTION DES PARAMETRES RADAR EN VUE D'UNE MESURE DE L'HUMIDITE

L'étude, exposée à la section 6.4, a montré la sensibilité du rapport $\sigma_{hh}^\circ / \sigma_{vv}^\circ$ à l'humidité de surface aux grands angles d'incidence. On a montré aussi, que ce rapport était faiblement dépendant de la rugosité.

L'examen des tableaux 6.4.a, 6.4.b et 6.4.c montre que l'écart entre les valeurs du rapport obtenu sur un sol sec et celles obtenues sur un sol très humide, pour un angle d'incidence donné, est maximal pour la fréquence $F = 9.0$ GHz.

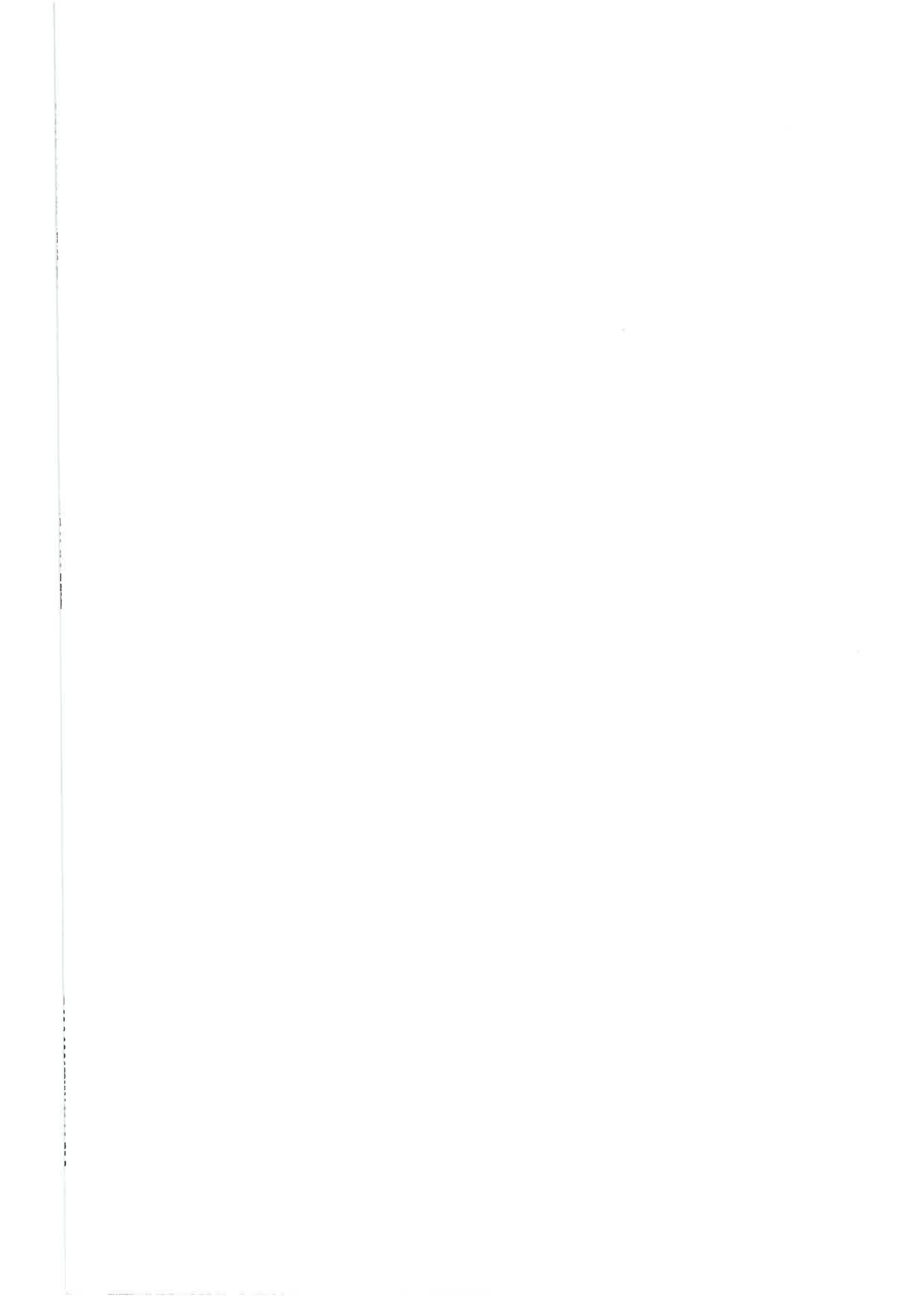
Ainsi, la configuration radar optimale en vue d'une mesure de l'humidité de surface semble être:

- Fréquence: Bande X ($F \approx 9 \text{ GHz}$)
- Angle d'incidence $\geq 35^\circ$
- Polarisations HH et VV



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Ulaby, F. T.; P. P. Batlivala & M. C. Dobson, 1978 : "Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture, Part. I: Bare Soil", IEEE Trans. Geosci. Electr., GE-16, pp 286-295.
- [2] Ulaby, F. T.; G. A. Bradley & M. C. Dobson, 1979 : "Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture, Part. II: Vegetation Covered Soil", IEEE Trans. Geosci. Electr., GE-17, pp 33-40.
- [3] Dobson, M. C. & F. . Ulaby, 1981 : " Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil moisture and Soil Texture, Part. III: Soil Tension", IEEE Trans. Geosci. Rem. SEns., GE-19, pp 51-61.
- [4] Ulaby, F. T.; R. K. Moore & A. K. Fung, 1982 : "Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory", Chap. 12, Reading, MA: Addison-Wesley.



Chapitre 7

SIMULATIONS SUR LES CHAMPS EN PENTE

"Une pente inévitable nous entraîne
et nous perd"

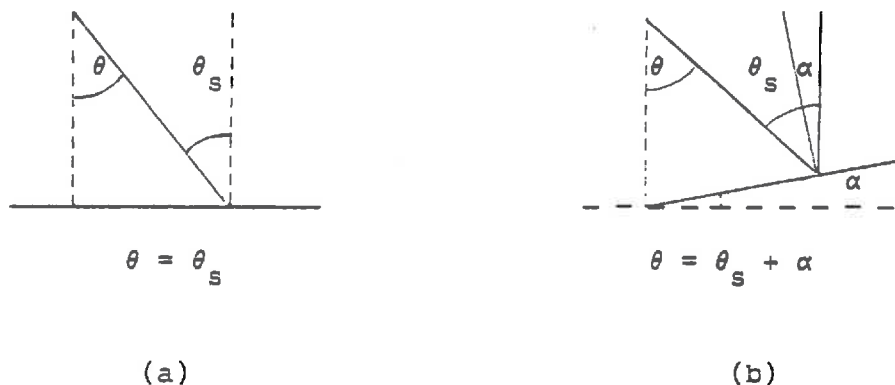
Rousseau

7.1 INTRODUCTION

L'écart-type des hauteurs a été défini au chapitre 4 par rapport à un plan moyen horizontal. C'est sur cette base que les simulations, présentées au chapitre 6, ont été effectuées. On a supposé alors que l'angle de visée du radar, θ , était égal à l'angle de diffusion au sol, θ_s , puisque l'on se trouve dans le cas de la rétrodiffusion.

Cependant, le plan moyen d'un champ, à moyenne échelle, n'est pas, dans la majorité des cas, un plan parfaitement horizontal. Ou, plus précisément, il n'y a pas de parallélisme exact entre le géoïde et la surface au sol.

La figure 7.1 décrit la géométrie de la rétrodiffusion dans le cas d'un plan horizontal (a) et dans le cas d'un sol incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (b).



Rétrodiffusion sur un plan horizontal.

Rétrodiffusion sur un plan incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale.

FIGURE 7.1

Nous allons, dans ce chapitre, essayer d'estimer la variation du signal rétrodiffusé lorsque l'on prend en compte l'inclinaison du sol par rapport à un plan moyen horizontal.

L'intérêt d'une telle étude se justifie lorsque l'on cherche à comparer deux images radar. L'imagerie rapporte toutes les mesures à un même plan horizontal. Il peut être intéressant de savoir si les variations observées d'une scène à l'autre sont dues à une modification des paramètres de sol ou bien à une modification de l'angle d'incidence.

Nous présenterons les résultats des simulations effectuées dans les trois bandes de fréquence (S, C, X), dans les deux polarisations (HH et VV) et pour cinq angles d'incidence (20°, 25°, 30°, 35° et 40°).

La variation imposée à l'angle de visée est fixée à $\pm 3^\circ$, c'est à dire à une inclinaison du sol, α , égale à $\pm 3^\circ$ par rapport à l'horizontale (considérée ici comme niveau de référence).

Les paramètres de sol (humidité de surface, écart-type des hauteurs et longueur de corrélation de la surface) prennent les mêmes valeurs que celles fixées au chapitre 6. Les résultats sont exprimés en dB. Ils ont été évalués en utilisant l'expression (7-1).

$$(7-1) \quad \frac{\Delta\sigma^\circ}{\sigma^\circ} = 10 \times \log \left[\frac{\sigma^\circ(\theta + \Delta\theta)}{\sigma^\circ(\theta)} \right]$$

7.2 ANALYSE DES RESULTATS DE SIMULATION

La section efficace de rétrodiffusion est une fonction décroissante de θ , ce qui explique que les résultats obtenus à l'aide de l'équation (7-1) soient négatifs.

* Résultats obtenus en bande S

Le tableau 7.1 regroupe les valeurs obtenues en polarisation HH. On peut faire les remarques suivantes :

1) L'effet d'angle d'incidence est indépendant de l'humidité de surface.

2) La variation du signal décroît lorsque θ augmente.

3) La variation due à l'effet de pente diminue avec la rugosité. Cette constatation s'explique par le fait que lorsque la rugosité augmente, le sol tend vers une surface lambertienne et le signal diffusé n'a plus aucune composante directionnelle privilégiée. Aussi, une modification de l'angle de visée n'a pas d'effet sur le signal retour.

La figure 7.2 donne l'allure de la variation relative de $\sigma^\circ(\theta)$, en dB, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$ en polarisation HH. La courbe a été tracée pour différentes valeurs de l'écart-type des hauteurs, mais pour une longueur de corrélation donnée.

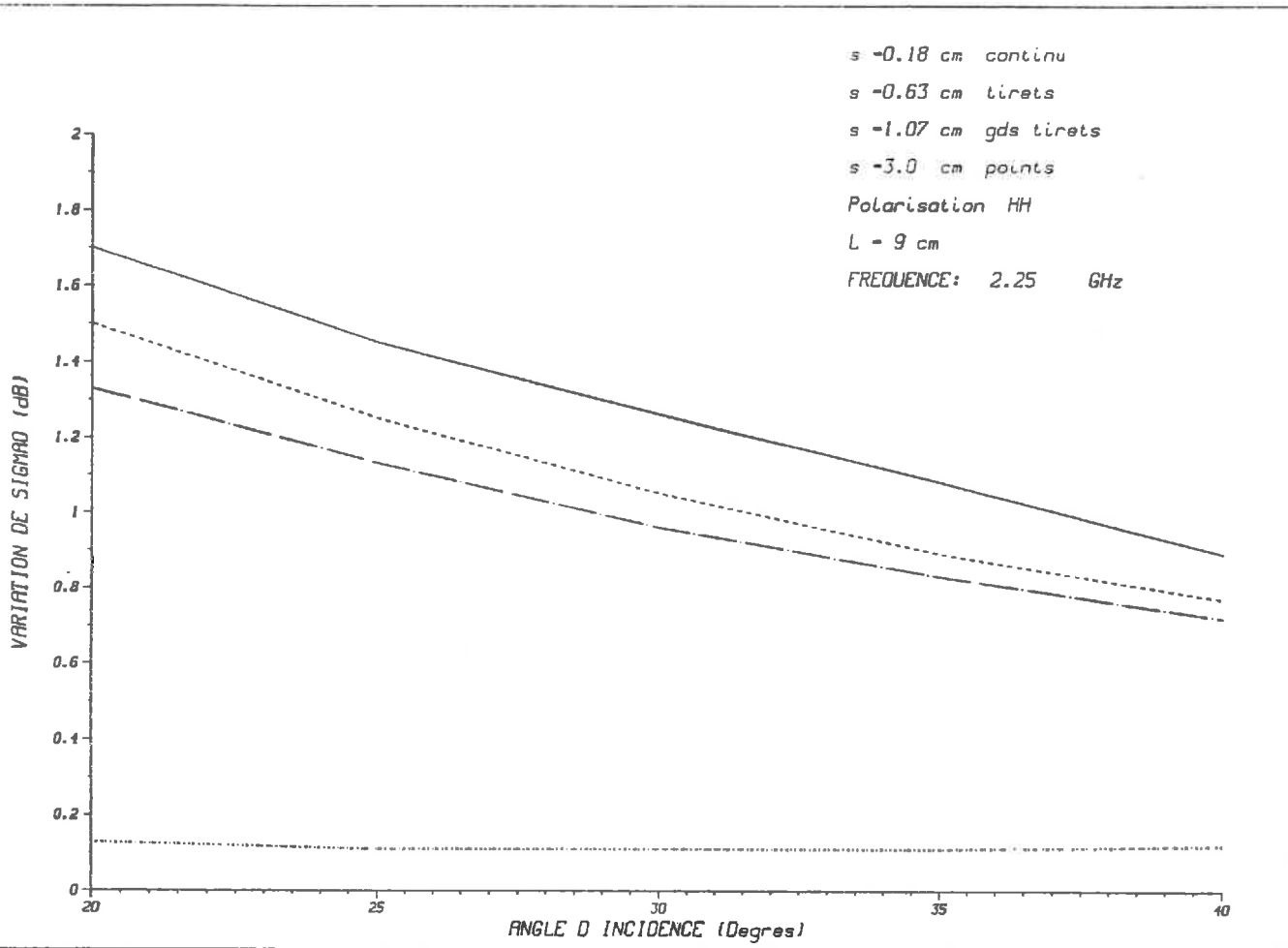


FIGURE 7.2 Variation relative de $\sigma^0(\theta)$, en dB, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$, $L = 9$ cm et différentes valeurs de s , en polarisation HH et bande S.

Dans le tableau 7.2, on lit les résultats obtenus en polarisation VV. On remarque:

1) La variation due à l'effet de pente est sensible à l'humidité. Elle décroît lorsque l'humidité de surface augmente.

2) Cette variation diminue avec la rugosité et devient pour $\theta = 40^\circ$, quasiment indépendante de la valeur de celle-ci.

3) Elle est en tout point supérieure à celle obtenue en polarisation HH.

La figure 7.3 donne l'allure de la variation relative de σ° pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$ en polarisation VV, avec les mêmes paramètres de rugosité que ceux de la figure 7.2.

* Résultats obtenus en bande C

Le tableau 7.3 (respectivement 7.4) donne les résultats obtenus en bande C pour la polarisation HH (respectivement VV). On ne note pas de différences significatives avec ceux obtenus en bande S.

* Résultats obtenus en bande X

Ils sont regroupés dans le tableau 7.5 pour la polarisation HH et dans le tableau 7.6 pour la polarisation VV. On ne note pas de différences significatives avec ceux obtenus précédemment.

En conclusion, on peut dire que la variation de la section efficace de rétrodiffusion due à une variation de l'angle d'incidence est indépendante de la fréquence. Elle est peu sensible à l'humidité de surface en polarisation HH et elle décroît lorsque la rugosité augmente.

7.3 INFLUENCE SUR LES RESULTATS PRECEDENTS

Au chapitre 6, nous avons présenté deux configurations radar possibles, l'une en vue d'une mesure de l'humidité de surface, l'autre en vue d'une mesure de la rugosité. Nous allons voir, dans cette section, l'influence de l'effet de pente sur chacune de ces configurations.

* Sensibilité du rapport $\sigma_{hh}^\circ / \sigma_{vv}^\circ$ à une variation de l'angle d'incidence.

Les tableaux 7.7, 7.8 et 7.9 regroupent les résultats obtenus dans les trois bandes de fréquence (S, C et X).

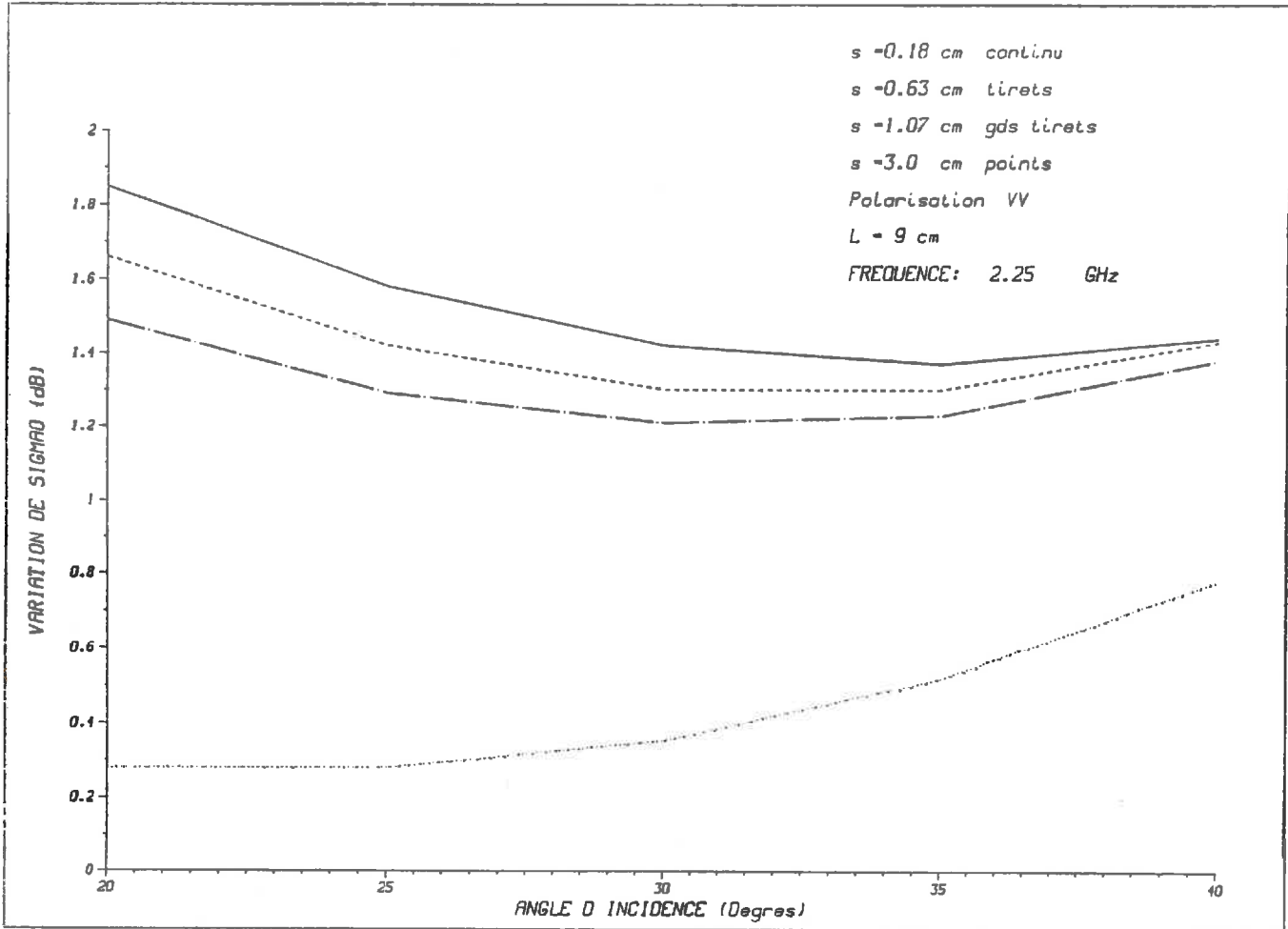


FIGURE 7.3 Variation relative de $\sigma^0(\theta)$, en dB, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$, $L = 9$ cm et différentes valeurs de s , en polarisation VV et bande S.

Les valeurs sont exprimées en pourcentage. Elles correspondent à la variation en puissance du rapport.

On constate, au regard de ces tableaux, une faible influence de la fréquence sur le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$. Ceci est compatible avec ce que nous avons dit précédemment. En effet, si la variation relative de la section efficace en fonction de l'angle d'incidence n'est sensible à la fréquence ni en polarisation HH, ni en polarisation VV, il semble cohérent que le rapport des polarisations ne modifie pas cette sensibilité.

L'étude de ces tableaux permet les remarques suivantes:

1) La variation du rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ due à l'effet de pente est très peu sensible à la rugosité.

2) Cette variation est fortement dépendante de l'humidité. Elle est maximale ($\approx 13\%$) dans le cas d'un sol sec ($W = 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) et minimale ($\approx 1\%$) dans le cas d'un sol très humide ($W = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

Ces variations sont positives, la polarisation VV étant plus sensible à l'effet de pente que la polarisation HH.

Il sera donc nécessaire de prendre en considération la variation de l'angle d'incidence aussi bien lors de la comparaison de deux images radar que lors de l'étude du rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$. Il ne peut, en aucun cas, être négligé puisque son effet est souvent supérieur à celui d'une variation d'humidité.

Nous avons cherché à vérifier si les résultats obtenus en bande C et présentés dans le tableau 7.8, pouvaient expliquer l'effet observé sur la figure 6.9. On avait, effectivement, remarqué que la différenciation des valeurs de $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ en fonction de l'humidité apparaissaient pour des angles d'incidence inférieurs à ceux prévu par les résultats de simulation. Or, à $\theta = 25^\circ$, la variation due à une modification de l'angle d'incidence est significative et pourrait influencer de façon sensible sur les résultats observés. La lecture du tableau 7.8 montre que, dans le cas d'un sol très sec ($W \approx 0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), la variation relative du rapport, pour $\Delta\theta = \pm 3^\circ$, est égale à 3.81% alors que dans le cas d'un sol très humide ($W \approx 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), elle est égale à -0.49%.

En utilisant le plan de drainage du site de Sterlin, fourni en Annexe 2-B, il a été possible d'évaluer la pente du terrain. L'inclinaison moyenne du champ est de l'ordre de 0.5° (dénivellation de 3 m sur une longueur comprise entre 300 et 400 m). Cette valeur est trop faible pour supposer que l'effet de pente puisse avoir contribué à la dispersion des points expérimentaux sur la figure 6.9.

* Sensibilité du rapport $\sigma^0(20^\circ) / \sigma^0(40^\circ)$ à une variation de l'angle d'incidence.

Le tableau 7.10 regroupe les résultats obtenus dans les trois bandes de fréquence (S, C et X) pour la polarisation HH.

Les valeurs sont exprimées en pourcentage. Elles correspondent à la variation en puissance du rapport.

L'étude de ce tableau permet les remarques suivantes:

1) L'humidité de surface n'a pas d'influence sur la variation relative du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$, quelque soit la valeur de la fréquence.

2) La variation due à un effet de pente est d'autant plus importante que le sol est lisse.

3) Cette variation est d'autant plus dépendante de la rugosité que la valeur de la fréquence est élevée.

Les figures 7.4 et 7.5 montrent la variation en puissance (exprimée en pourcentage) du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$ en fonction de l'écart-type des hauteurs, pour les trois bandes de fréquence.

Sur la figure 7.4, la longueur de corrélation a été fixée à 9 cm et sur la figure 7.5 à 18 cm.

Ainsi, et de la même façon que précédemment, il sera nécessaire de prendre en considération la variation de l'angle d'incidence lors de l'étude du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$. Son effet est presque toujours supérieur à celui d'une variation des paramètres de rugosité.



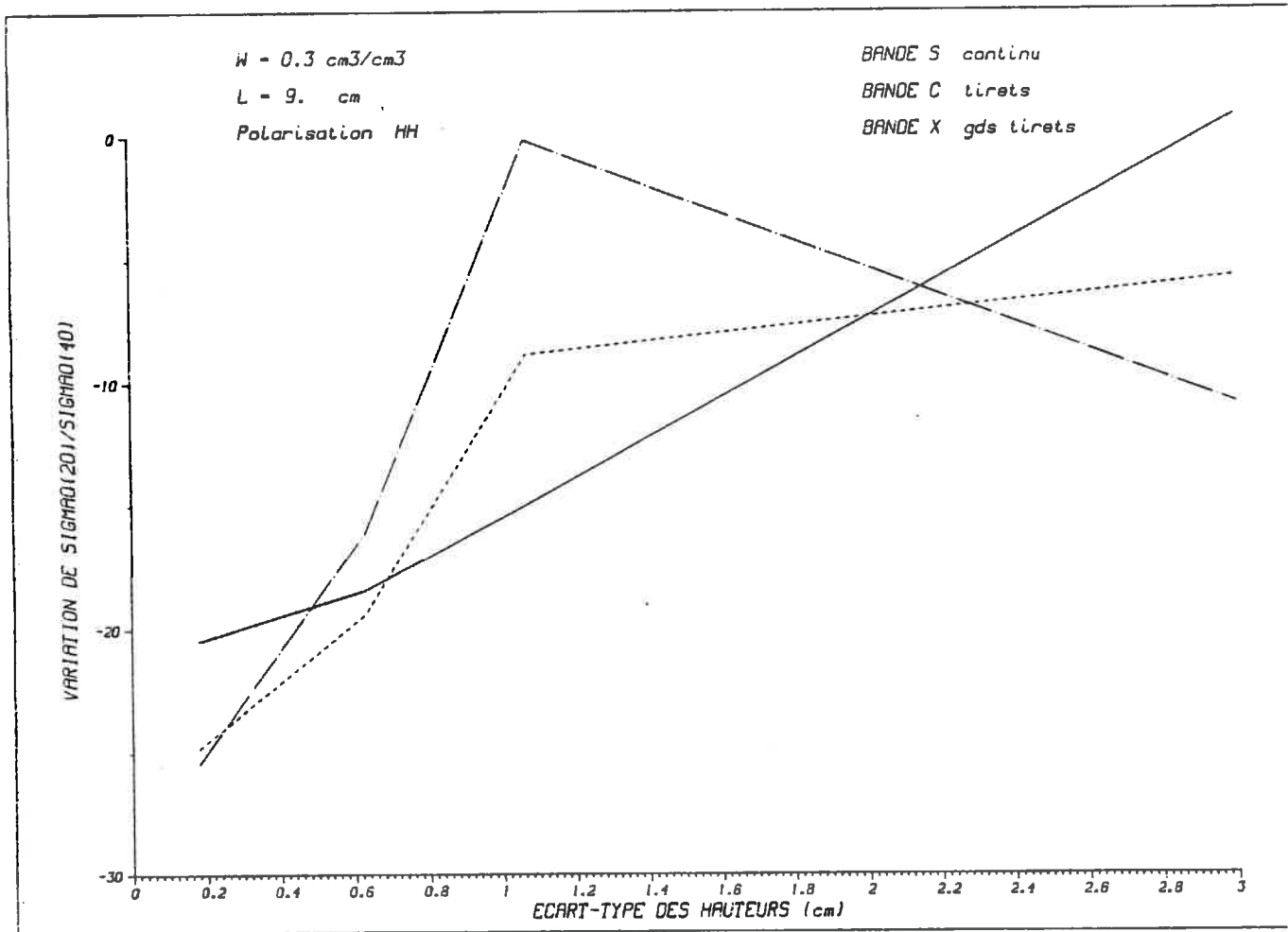


FIGURE 7.4 Variation relative de $\sigma^o(20^\circ)/\sigma^o(40^\circ)$, en fonction de s, exprimée en puissance, pour les 3 bandes de fréquence (S,C,X). L = 9cm

Polarisation HH et $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

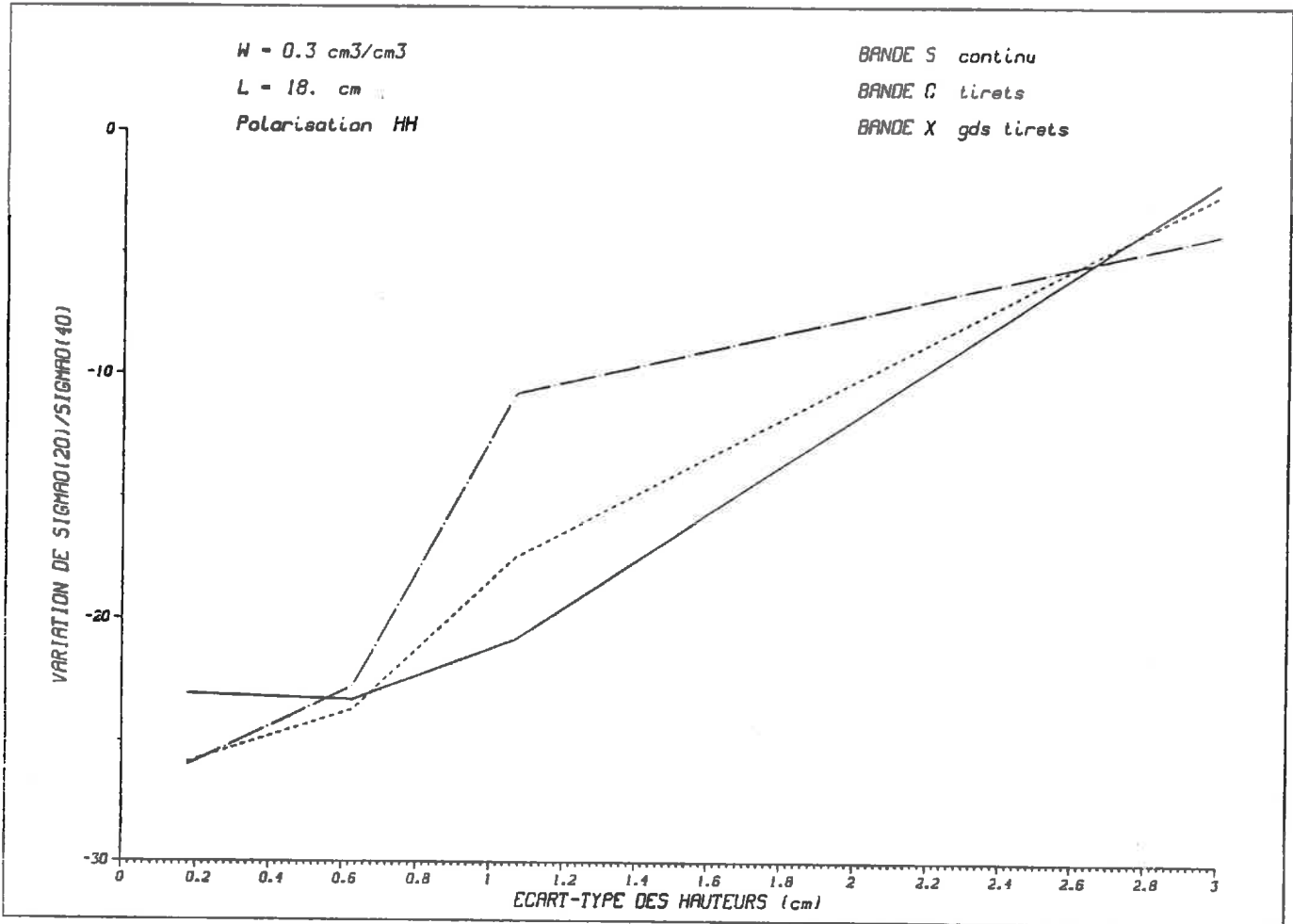


FIGURE 7.5 Variation relative de $\sigma^0(20^\circ)/\sigma^0(40^\circ)$, en fonction de s, exprimée en puissance, pour les 3 bandes de fréquence (S,C,X). L = 18cm

Polarisation HH et $W_c = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

CONCLUSION GENERALE

"Tout finit bien puisque tout finit"
Chardonne

Nous avons exposé, dans ce travail, une étude théorique de la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation relative des paramètres de sols. Elle a été principalement axée sur la sensibilité à la rugosité et à l'humidité de surface des sols nus.

Dans cet objectif, nous avons présenté un modèle de simulation de la section efficace de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence dont la fiabilité a déjà été mise en évidence par plusieurs auteurs. Nous avons cependant voulu vérifier le bien fondé de son application sur les surfaces naturelles avant de poursuivre au delà notre étude.

Pour cela, nous avons utilisé les résultats de mesures de coefficient de diffusion sur un labour, lors de l'expérience organisée par le C.R.P.E. et l'I.N.R.A. au printemps 1984. La comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées a montré une bonne concordance entre la théorie et la mesure, bien que les données de terrain dont nous disposions ne fussent pas acquises de façon optimale.

En effet, l'utilisation du modèle de simulation suppose la connaissance de trois paramètres de sol : la rugosité, l'humidité et la texture.

* La valeur de la rugosité a été obtenue à l'aide d'une mesure du profil de la surface. Cette étude a montré qu'il est nécessaire de faire plusieurs mesures de profil lors d'une campagne expérimentale, essentiellement avant et après les périodes de pluie. Une mesure ponctuelle dans le temps ne peut servir de référence pour toute la durée de l'expérience.

* La valeur de l'humidité a été obtenue à l'aide de prélèvements quasi journaliers. Ces mesures prenaient en compte les six premiers centimètres de la surface et ne pouvaient donc fournir qu'une estimation de l'humidité réelle en surface. Cependant, ce suivi s'est avéré utile pour évaluer la variation du contenu en eau durant la période expérimentale.

* La texture a été mise en évidence grâce à une analyse granulométrique effectuée sur le terrain. La détermination de la composition du sol a permis la modélisation de la constante diélectrique en fonction de l'humidité de surface en accord avec le modèle empirique développé par Wang & Schmugge.

Il a été aisé de pallier la méconnaissance de l'humidité à la superficie du sol en se référant à des constatations physiques simples (vitesse de ressuyage de la surface, en particulier). Le problème s'est avéré plus délicat en ce qui

concerne la rugosité. Nous avons soumis, à cet égard, plusieurs hypothèses. Elles pourraient faire l'objet d'une étude plus détaillée, assortie d'une vérification expérimentale.

De plus, il serait souhaitable de développer un modèle de diffusion de volume qui permettrait de rendre compte, d'une façon probablement plus exacte, du phénomène observé. Il semble, en effet, plus juste de considérer le sol comme un milieu poreux plutôt que comme un diélectrique homogène.

L'acquisition et l'analyse des résultats de simulation constituent la partie la plus importante de ce travail. Le but consistait à définir les caractéristiques d'une éventuelle charge utile supportée par un satellite, dans le cadre d'une mission destinée à l'étude des sols. Dans cet objectif, ce travail a permis certaines conclusions quant aux configurations optimales et minimales en vue d'une mesure de l'humidité de surface par diffusiomètre hyperfréquence.

Nous avons montré, en particulier, que les mesures faites avec un radar fonctionnant avec un seul angle d'incidence ($\theta > 20^\circ$), une seule polarisation et une seule fréquence ne permettraient pas l'évaluation de l'humidité de surface, et ce quelles que soient les valeurs de ces paramètres. Il a donc fallu faire appel à des configurations mixtes.

Une étude théorique préalable a orienté notre choix vers un couplage des polarisations. Les résultats, obtenus par simulation, du rapport des sections efficaces mesurées, d'une part, en polarisation horizontale et, d'autre part, en polarisation verticale, ont montré une forte sensibilité à l'humidité de surface aux dépens de la rugosité. La vérification expérimentale a pu être amorcée avec les mesures de terrain que nous possédions et a confirmé ces hypothèses. Cependant, les données recueillies sur le site n'offraient pas les caractéristiques optimales nécessaires à la validation des résultats de simulation. En effet, l'étude du rapport des polarisations montre une nette différenciation des sols, selon leur contenu en eau, pour des angles d'incidence élevés ($\theta > 35^\circ$). Or, les mesures de sections efficaces de rétrodiffusion n'ont été effectuées, sur le terrain, que pour des angles inférieurs à 27° .

Au regard de ces constatations, nous pouvons soumettre, comme ouverture de cette étude, une campagne de mesures qui permettrait de justifier, ou non, l'applicabilité de cette configuration pour l'évaluation de l'humidité de surface.

Nous avons proposé, par ailleurs, une configuration possible pour la détermination de la rugosité de surface. Elle nécessite la mise en place de deux antennes, fonctionnant en polarisation horizontale, et visant chacune le même élément de surface mais sous des angles d'incidence différents. Cependant, si les résultats de simulation présentent une très forte sensibilité à la rugosité, ils ne semblent pas permettre une évaluation fiable de chacun des paramètres caractérisant le

profil (longueur de corrélation et écart-type des hauteurs de la surface) pris séparément. En effet, ces deux paramètres influent de façon significative sur le signal et sont difficilement séparables. Nous avons noté, néanmoins, une importance prépondérante de l'écart-type des hauteurs. De même que précédemment, cette configuration pourrait faire l'objet d'une application expérimentale, puisque la rugosité de surface est un paramètre important dans le comportement hydrologique des sols.

Enfin, nous avons étudié l'effet d'une variation de l'angle d'incidence sur la section efficace de rétrodiffusion. L'intérêt d'une telle étude est de permettre l'évaluation de l'erreur commise, lors de la comparaison d'images ou de données radar, lorsque les différentes scènes n'ont pas été perçues sous le même angle de visée. Nous avons appliqué les résultats obtenus par simulation, aux configurations, jugées optimales, dont il était question précédemment. Ainsi, nous avons pu noter l'importance d'un tel effet et, à défaut de pouvoir le contrer expérimentalement, nous proposons d'en tenir compte lors d'une étude comparative.



ANNEXES

ANNEXE I

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Etude de la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation relative des paramètres de surface.

Chaque tableau présente les résultats pour une configuration radar particulière (fréquence, polarisation et angle d'incidence fixés).

- σ^0 (dB) correspond à la valeur de la section efficace de rétrodiffusion exprimée en dB

- σ^0 (puis) à la valeur de la section efficace de rétrodiffusion exprimée en puissance

- $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$ à la variation relative de la section efficace de rétrodiffusion pour une variation de $\pm 10\%$ de l'humidité de surface

- $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/k_s$ à la variation relative de la section efficace de rétrodiffusion pour une variation de $\pm 10\%$ de l'écart-type des hauteurs de la surface

- $(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/k_L$ à la variation relative de la section efficace de rétrodiffusion pour une variation de $\pm 10\%$ de la longueur de corrélation de la surface.

Pour chacune de ces variations relatives, deux résultats sont donnés : le premier, écrit en %, correspond à la valeur exprimée en puissance; le second correspond à la valeur exprimée en dB.

Les expressions nécessaires au calcul de chacune de ces valeurs sont données par les équations (6-1) et (6-2).

Trois bandes de fréquence ont été utilisées :

S à 2.25 GHz
C à 5.35 GHz
X à 9.00 GHz

Pour chacune de ces fréquences, les simulations ont été effectuées dans les deux polarisations HH et VV et pour quatre angles d'incidence (20° , 30° , 35° et 40°).

Les tableaux sont numérotés comme suit :

Tableau 6.1.a	Bande S	Polarisation HH	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.1.a'	Bande S	Polarisation VV	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.1.b	Bande S	Polarisation HH	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.1.b'	Bande S	Polarisation VV	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.1.c	Bande S	Polarisation HH	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.1.c'	Bande S	Polarisation VV	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.1.d	Bande S	Polarisation HH	Angle d'incidence 40°
Tableau 6.1.d'	Bande S	Polarisation VV	Angle d'incidence 40°
Tableau 6.2.a	Bande C	Polarisation HH	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.2.a'	Bande C	Polarisation VV	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.2.b	Bande C	Polarisation HH	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.2.b'	Bande C	Polarisation VV	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.2.c	Bande C	Polarisation HH	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.2.c'	Bande C	Polarisation VV	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.2.d	Bande C	Polarisation HH	Angle d'incidence 40°
Tableau 6.2.d'	Bande C	Polarisation VV	Angle d'incidence 40°
Tableau 6.3.a	Bande X	Polarisation HH	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.3.a'	Bande X	Polarisation VV	Angle d'incidence 20°
Tableau 6.3.b	Bande X	Polarisation HH	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.3.b'	Bande X	Polarisation VV	Angle d'incidence 30°
Tableau 6.3.c	Bande X	Polarisation HH	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.3.c'	Bande X	Polarisation VV	Angle d'incidence 35°
Tableau 6.3.d	Bande X	Polarisation HH	Angle d'incidence 40°
Tableau 6.3.d'	Bande X	Polarisation VV	Angle d'incidence 40°

FREQUENCY: 2.25 GHz			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 20°				
W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.08		4	-24.48	0.0036	5.2%	0.23	22.6%	0.91	-7.1%	-0.30
		8	-27.12	0.0019	5.2%	0.23	25.0%	0.99	-10.2%	-0.43
		17	-30.83	0.0008	5.2%	0.23	31.9%	1.21	-12.7%	-0.53
0.1	0.29	4	-13.44	0.0453	5.1%	0.22	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-15.59	0.0276	5.1%	0.22	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-18.58	0.0139	5.1%	0.22	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
0.50		4	-9.67	0.1080	5.1%	0.22	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-11.25	0.0749	5.1%	0.22	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-13.96	0.0402	5.1%	0.22	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-10.49	0.0893	5.1%	0.22	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-7.86	0.1640	5.1%	0.22	-10.6%	-0.57	5.6%	0.23
		17	-7.18	0.1910	5.1%	0.22	5.3%	0.14	-1.7%	-0.09
0.08		4	-20.73	0.0084	10.7%	0.50	22.5%	0.91	-7.0%	-0.30
		8	-23.37	0.0046	10.7%	0.50	24.8%	0.99	-10.2%	-0.42
		17	-27.05	0.0020	10.8%	0.51	31.3%	1.19	-12.6%	-0.52
0.3	0.29	4	-9.71	0.1070	10.6%	0.50	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-11.86	0.0651	10.6%	0.50	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-14.86	0.0327	10.6%	0.50	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
0.50		4	-5.94	0.2550	10.6%	0.50	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-7.52	0.1770	10.6%	0.50	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-10.23	0.0949	10.6%	0.50	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-6.76	0.2110	10.8%	0.50	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-4.13	0.3860	10.6%	0.50	-10.6%	-0.57	5.6%	0.23
		17	-3.46	0.4510	10.6%	0.50	5.3%	0.14	-1.7%	-0.09
0.08		4	-18.64	0.0137	6.3%	0.25	22.4%	0.91	-7.0%	-0.30
		8	-21.27	0.0075	6.4%	0.25	24.6%	0.98	-10.1%	-0.42
		17	-24.93	0.0032	6.4%	0.25	30.8%	1.18	-12.5%	-0.52
0.5	0.29	4	-7.62	0.1730	6.3%	0.24	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-9.78	0.1050	6.3%	0.24	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-12.77	0.0529	6.3%	0.24	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
0.50		4	-3.85	0.4120	6.3%	0.24	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-5.44	0.2860	6.3%	0.24	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-8.14	0.1530	6.3%	0.24	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-4.67	0.3410	6.3%	0.24	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-2.04	0.6250	6.3%	0.24	-10.6%	-0.57	5.6%	0.23
		17	-1.37	0.7300	6.3%	0.24	5.3%	0.14	-1.7%	-0.09

Tableau 6.1.a

FREQUENCY: 2.25 GHz			POLARISATION: VV			ANGLE D'INCIDENCE: 20°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/W$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/ks$		$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/kL$		
0.08		4	-26.29	0.0024	5.4%	0.23	23.2%	0.93	-7.1%	-0.31
		8	-28.98	0.0013	5.4%	0.23	26.0%	1.03	-10.5%	-0.44
		17	-32.83	0.0005	5.3%	0.23	34.7%	1.30	-13.4%	-0.56
0.1	0.29	4	-15.21	0.0302	5.4%	0.23	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-17.36	0.0184	5.4%	0.23	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-20.35	0.0092	5.4%	0.23	19.8%	0.82	-9.7%	-0.82
0.50		4	-11.43	0.0719	5.4%	0.23	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-13.02	0.0499	5.4%	0.23	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-15.72	0.0268	5.4%	0.23	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-12.26	0.0595	5.4%	0.23	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-9.62	0.1090	5.4%	0.23	-10.6%	-0.57	6.0%	0.23
		17	-8.95	0.1270	5.4%	0.23	5.3%	.14	-1.7%	-0.09
0.08		4	-22.48	0.0057	10.6%	0.49	23.3%	0.94	-7.1%	-0.31
		8	-25.18	0.0030	10.5%	0.49	26.2%	1.03	-10.5%	-0.44
		17	-29.05	0.0012	10.4%	0.49	35.3%	1.32	-13.6%	-0.57
0.3	0.29	4	-11.39	0.0727	10.6%	0.50	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-13.54	0.0443	10.6%	0.50	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-16.53	0.0222	10.6%	0.50	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
0.50		4	-7.61	0.1730	10.6%	0.50	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-9.20	0.1200	10.6%	0.50	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-11.90	0.0645	10.6%	0.50	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-8.44	0.1430	10.6%	0.50	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-5.80	0.2630	10.6%	0.50	-10.6%	-0.57	6.0%	0.23
		17	-5.13	0.3070	10.6%	0.50	5.3%	0.14	-1.7%	-0.09
0.08		4	-20.44	0.0090	6.0%	0.23	23.4%	0.94	-7.2%	-0.31
		8	-23.15	0.0048	6.0%	0.23	26.5%	1.04	-10.6%	-0.44
		17	-27.05	0.0020	5.9%	0.23	36.0%	1.34	-13.7%	-0.58
0.5	0.29	4	-9.33	0.1170	6.1%	0.23	17.8%	0.73	-5.5%	-0.24
		8	-11.49	0.0710	6.1%	0.23	19.2%	0.79	-8.4%	-0.35
		17	-14.48	0.0357	6.1%	0.23	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
0.50		4	-5.56	0.2780	6.1%	0.23	13.2%	0.52	-3.2%	-0.15
		8	-7.15	0.1930	6.1%	0.23	17.0%	0.69	-7.1%	-0.30
		17	-9.85	0.1040	6.1%	0.23	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
1.40		4	-6.38	0.2300	6.1%	0.23	-25.1%	-1.15	10.8%	0.44
		8	-3.75	0.4220	6.1%	0.23	-10.6%	-0.57	6.0%	0.23
		17	-3.08	0.4920	6.1%	0.23	5.3%	0.14	-1.7%	-0.09

Tableau 6.1.a'

FREQUENCE: 2.25 GHZ

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
	0.08	4	-29.56	0.0011	5.2%	0.23	27.6%	1.08	-10.2%	-0.43
		8	-33.11	0.0005	5.3%	0.23	37.1%	1.37	-13.7%	-0.58
		17	-38.94	0.0001	5.9%	0.26	85.5%	2.62	-25.9%	-1.15
0.1	0.29	4	-17.86	0.0164	5.1%	0.22	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-20.49	0.0089	5.1%	0.22	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-23.65	0.0043	5.1%	0.22	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-13.63	0.0433	5.1%	0.22	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-15.92	0.0256	5.1%	0.22	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-18.95	0.0127	5.1%	0.22	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-10.88	0.0817	5.1%	0.22	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-9.91	0.1020	5.1%	0.22	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-10.94	0.0805	5.1%	0.22	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26
0.08		4	-25.80	0.0026	10.8%	0.50	26.8%	1.05	-10.0%	-0.42
		8	-29.26	0.0012	11.0%	0.52	35.1%	1.31	-13.3%	-0.56
		17	-34.68	0.0003	12.2%	0.57	72.4%	2.32	-22.7%	-1.00
0.3	0.29	4	-14.16	0.0384	10.6%	0.49	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-16.79	0.0209	10.6%	0.49	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-19.96	0.0101	10.6%	0.49	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-9.94	0.1010	10.6%	0.49	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-12.23	0.0599	10.6%	0.49	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-15.26	0.0298	10.6%	0.49	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-7.18	0.1910	10.6%	0.49	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-6.21	0.2390	10.6%	0.49	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-7.25	0.1890	10.6%	0.49	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26
0.08		4	-23.68	0.0043	6.4%	0.25	26.4%	1.04	-9.9%	-0.42
		8	-27.09	0.0020	6.6%	0.25	33.9%	1.27	-13.0%	-0.54
		17	-32.28	0.0006	7.2%	0.28	65.8%	2.15	-21.1%	-0.92
0.5	0.29	4	-12.09	0.0619	6.3%	0.24	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-14.71	0.0338	6.3%	0.24	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-17.88	0.0163	6.3%	0.24	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-7.86	0.1640	6.3%	0.24	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-10.15	0.0966	6.3%	0.24	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-13.18	0.0481	6.3%	0.24	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-5.11	0.3090	6.3%	0.24	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-4.14	0.3860	6.3%	0.24	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-5.17	0.3040	6.3%	0.24	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26

Tableau 6.1.b

FREQUENCE: 2.25 GHz			POLARISATION: VV			ANGLE D'INCIDENCE: 30°				
W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.08		4	-31.85	0.0007	5.8%	0.25	27.2%	1.06	-10.1%	-0.43
		8	-35.35	0.0003	5.8%	0.25	36.0%	1.34	-13.5%	-0.56
		17	-40.96	0.0001	5.9%	0.26	85.5%	2.26	-25.9%	-1.15
0.1	0.29	4	-20.19	0.0096	5.8%	0.25	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-22.82	0.0052	5.8%	0.25	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-25.98	0.0025	5.8%	0.25	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-15.96	0.0253	5.8%	0.25	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-18.25	0.0150	5.8%	0.25	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-21.28	0.0074	5.8%	0.25	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-13.21	0.0478	5.8%	0.25	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-12.24	0.0597	5.8%	0.25	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-13.27	0.0471	5.8%	0.25	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26
0.08		4	-27.69	0.0017	11.7%	0.54	27.4%	1.07	-10.1%	-0.43
		8	-31.20	0.0008	11.6%	0.54	36.5%	1.35	-13.6%	-0.57
		17	-36.90	0.0002	11.1%	0.52	81.0%	2.52	-24.8%	-1.10
0.3	0.29	4	-16.00	0.0251	11.7%	0.55	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-18.63	0.0137	11.7%	0.55	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-21.80	0.0066	11.7%	0.55	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-11.78	0.0664	11.7%	0.55	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-14.07	0.0392	11.7%	0.55	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-17.10	0.0195	11.7%	0.55	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-9.02	0.1250	11.7%	0.55	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-8.05	0.1570	11.7%	0.55	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-9.09	0.1230	11.7%	0.55	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26
0.08		4	-25.43	0.0029	6.7%	0.26	27.6%	1.08	-10.2%	-0.43
		8	-28.97	0.0013	6.6%	0.25	37.0%	1.37	-13.7%	-0.58
		17	-34.79	0.0003	6.1%	0.24	84.9%	2.61	-25.8%	-1.15
0.5	0.29	4	-13.73	0.0424	6.8%	0.26	18.9%	0.78	-7.9%	-0.33
		8	-16.36	0.0231	6.8%	0.26	19.7%	0.81	-9.4%	-0.39
		17	-19.52	0.0112	6.8%	0.26	20.0%	0.83	-9.9%	-0.41
0.50		4	-9.50	0.1120	6.8%	0.26	16.3%	0.66	-6.3%	-0.27
		8	-11.80	0.0661	6.8%	0.26	18.7%	0.77	-8.7%	-0.36
		17	-14.82	0.0329	6.8%	0.26	19.7%	0.81	-9.7%	-0.40
1.40		4	-6.75	0.2110	6.8%	0.26	-12.2%	-0.63	5.9%	0.23
		8	-5.78	0.2640	6.8%	0.26	1.6%	-0.03	0.2%	-0.01
		17	-6.81	0.2080	6.8%	0.26	13.0%	0.50	-6.0%	-0.26

Tableau 6.1.b'

FREQUENCE: 2.25 GHZ

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
	0.08	4	-31.60	0.0007	5.2%	0.23	30.9%	1.18	-11.5%	-0.48
		8	-35.65	0.0003	5.5%	0.24	47.3%	1.66	-16.3%	-0.69
		17	-25.53	0.0028	5.0%	0.22	20.2%	0.83	-10.1%	-0.41
0.1	0.29	4	-19.56	0.0111	5.0%	0.22	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-22.31	0.0059	5.0%	0.22	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-25.53	0.0028	5.0%	0.22	20.2%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50	0.50	4	-15.19	0.0303	5.0%	0.22	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-17.69	0.0170	5.0%	0.22	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-20.81	0.0083	5.0%	0.22	19.8%	0.82	-9.9%	-0.40
1.40	1.40	4	-11.06	0.0784	5.0%	0.22	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-10.85	0.0823	5.0%	0.22	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-12.48	0.0567	5.0%	0.22	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31
0.3	0.08	4	-27.82	0.0017	10.8%	0.51	29.4%	1.13	-11.2%	-0.47
		8	-31.68	0.0007	11.3%	0.53	42.6%	1.53	-15.2%	-0.64
		17	-21.87	0.0065	10.4%	0.49	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50	0.29	4	-15.90	0.0257	10.4%	0.49	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-18.66	0.0136	10.4%	0.49	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-21.87	0.0065	10.4%	0.49	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50	0.50	4	-11.54	0.0702	10.4%	0.49	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-14.04	0.0394	10.4%	0.49	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-17.15	0.0193	10.4%	0.49	19.8%	0.82	-9.9%	-0.40
1.40	1.40	4	-7.40	0.1820	10.4%	0.49	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-7.19	0.1910	10.4%	0.49	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-8.83	0.1310	10.4%	0.49	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31
0.5	0.08	4	-25.70	0.0027	6.4%	0.25	28.6%	1.11	-11.0%	-0.46
		8	-29.46	0.0011	6.7%	0.26	40.1%	1.46	-14.6%	-0.62
		17	-19.82	0.0104	6.2%	0.24	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.5	0.29	4	-13.85	0.0412	6.2%	0.24	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-16.61	0.0218	6.2%	0.24	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-19.82	0.0104	6.2%	0.24	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50	0.50	4	-9.49	0.1120	6.2%	0.24	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-11.99	0.0632	6.2%	0.24	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-15.10	0.0309	6.2%	0.24	19.8%	0.82	-9.9%	-0.41
1.40	1.40	4	-5.35	0.2910	6.2%	0.24	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-5.15	0.3060	6.2%	0.24	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-6.78	0.2100	6.2%	0.24	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31

Tableau 6.1.c

FREQUENCY: 2.25 GHz POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
0.08		4	-34.19	0.0004	6.2%	0.27	28.7%	1.11	-11.0%	-0.47
		8	-37.97	0.0002	6.2%	0.27	40.4%	1.47	-14.7%	-0.62
		17	-28.31	0.0015	6.2%	0.27	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.1	0.29	4	-22.34	0.0058	6.2%	0.27	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-25.10	0.0031	6.2%	0.27	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-28.31	0.0015	6.2%	0.27	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-17.98	0.0159	6.2%	0.27	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-20.48	0.0090	6.2%	0.27	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-23.53	0.0044	6.2%	0.27	19.8%	0.82	-9.9%	-0.41
1.40		4	-13.84	0.0413	6.2%	0.27	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-13.63	0.0433	6.2%	0.27	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-15.27	0.0297	6.2%	0.27	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31
0.08		4	-29.72	0.0011	12.6%	0.59	28.8%	1.12	-11.0%	-0.46
		8	-33.52	0.0005	12.5%	0.58	40.9%	1.48	-14.8%	-0.62
		17	-23.83	0.0041	12.6%	0.59	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.3	0.29	4	-17.86	0.0164	12.6%	0.59	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-20.62	0.0087	12.6%	0.59	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-23.83	0.0041	12.6%	0.59	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-13.49	0.0447	12.6%	0.59	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-16.00	0.0251	12.6%	0.59	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-19.11	0.0123	12.6%	0.59	19.8%	0.82	-9.9%	-0.40
1.40		4	-9.36	0.1160	12.6%	0.59	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-9.15	0.1220	12.6%	0.59	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-10.78	0.0835	12.6%	0.59	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31
0.08		4	-27.29	0.0019	7.3%	0.28	29.0%	1.12	-11.1%	-0.46
		8	-31.11	0.0008	7.2%	0.28	41.4%	1.50	-14.9%	-0.63
		17	-21.38	0.0073	7.3%	0.28	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.5	0.29	4	-15.41	0.0288	7.3%	0.28	19.2%	0.79	-8.6%	-0.36
		8	-18.17	0.0153	7.3%	0.28	19.8%	0.82	-9.7%	-0.40
		17	-21.38	0.0073	7.3%	0.28	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-11.04	0.0786	7.3%	0.28	17.3%	0.70	-7.3%	-0.31
		8	-13.55	0.0442	7.3%	0.28	19.1%	0.79	-9.2%	-0.38
		17	-16.66	0.0216	7.3%	0.28	19.8%	0.82	-9.9%	-0.40
1.40		4	-6.91	0.2040	7.3%	0.28	-6.4%	-0.38	3.4%	0.13
		8	-6.70	0.2140	7.3%	0.28	6.2%	0.19	-2.2%	-0.11
		17	-6.33	0.1470	7.3%	0.28	15.3%	0.60	-7.3%	-0.31

Tableau 6.1.c'

FREQUENCY: 2.25 GHz

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/W$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/ks$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/kL$			
0.1	0.08	4	-33.33	0.0005	5.2%	0.23	34.1%	1.28	-12.6%	-0.53
		8	-37.90	0.0002	5.7%	0.25	59.6%	1.99	-13.4%	-0.83
	0.29	4	-21.00	0.0079	5.0%	0.22	19.5%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-23.85	0.0041	5.0%	0.22	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-27.10	0.0020	5.0%	0.22	20.2%	0.83	-10.1%	-0.41
	0.50	4	-16.53	0.0222	5.0%	0.22	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
8		-19.19	0.0120	5.0%	0.22	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39	
17		-22.36	0.0058	5.0%	0.22	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41	
1.40	4	-11.24	0.0751	5.0%	0.22	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03	
	8	-11.72	0.0672	5.0%	0.22	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19	
	17	-13.83	0.0414	5.0%	0.22	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34	
0.3	0.08	4	-29.56	0.0011	10.7%	0.50	31.7%	1.20	-12.1%	-0.51
		8	-33.80	0.0004	11.6%	0.54	50.4%	1.75	-17.2%	-0.73
	0.29	4	-17.42	0.0181	10.2%	0.48	19.4%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-20.27	0.0094	10.2%	0.48	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-23.51	0.0045	10.2%	0.48	20.2%	0.83	-10.1%	-0.41
	0.50	4	-12.95	0.0507	10.2%	0.48	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
		8	-15.61	0.0275	10.2%	0.48	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39
		17	-18.78	0.0132	10.2%	0.48	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41
	1.40	4	-7.66	0.1710	10.2%	0.48	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03
		8	-8.14	0.1530	10.2%	0.48	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19
		17	-10.25	0.0945	10.2%	0.48	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
	0.5	0.08	4	-27.46	0.0018	6.3%	0.24	30.4%	1.17	-11.8%
8			-31.54	0.0007	6.8%	0.26	46.2%	1.63	-16.2%	-0.69
0.29		4	-15.42	0.0287	6.0%	0.23	19.4%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-18.27	0.0149	6.0%	0.23	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-21.51	0.0071	6.0%	0.23	20.2%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-10.95	0.0803	6.0%	0.23	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
		8	-13.61	0.0435	6.0%	0.23	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39
		17	-16.78	0.0210	6.0%	0.23	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41
1.40		4	-5.66	0.2710	6.0%	0.23	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03
		8	-6.15	0.2430	6.0%	0.23	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19
		17	-8.25	0.1500	6.0%	0.23	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34

Tableau 6.1.d

FREQUENCE: 2.25 GHz POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/W$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/ks$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/kL$			
0.08		4	-36.48	0.0002	6.8%	0.30	29.4%	1.13	-11.6%	-0.48
		8	-40.43	0.0001	6.8%	0.30	42.8%	1.54	-15.4%	-0.65
0.1	0.29	4	-24.54	0.0035	6.8%	0.30	19.4%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-27.39	0.0018	6.8%	0.30	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-30.63	0.0009	6.8%	0.30	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-20.07	0.0098	6.8%	0.30	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
		8	-22.73	0.0053	6.8%	0.30	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39
		17	-25.90	0.0026	6.8%	0.30	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41
1.40		4	-14.78	0.0333	6.8%	0.30	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03
		8	-15.26	0.0298	6.8%	0.30	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19
		17	-17.37	0.0183	6.8%	0.30	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
0.08		4	-31.59	0.0007	13.8%	0.64	29.4%	1.13	-11.6%	-0.48
		8	-35.55	0.0003	13.7%	0.64	43.0%	1.54	-15.5%	-0.65
0.3	0.29	4	-19.64	0.0109	13.8%	0.64	19.4%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-22.49	0.0056	13.8%	0.64	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-25.73	0.0027	13.8%	0.64	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-15.17	0.0304	13.8%	0.64	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
		8	-17.83	0.0165	13.8%	0.64	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39
		17	-21.00	0.0079	13.8%	0.64	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41
1.40		4	-9.88	0.1030	13.8%	0.64	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03
		8	-10.36	0.0919	13.8%	0.64	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19
		17	-12.47	0.0566	13.8%	0.64	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
0.08		4	-28.92	0.0013	8.0%	0.31	29.5%	1.14	-11.6%	-0.49
		8	-35.89	0.0005	7.9%	0.31	43.3%	1.55	-15.5%	-0.66
0.5	0.29	4	-16.96	0.0201	8.0%	0.31	19.4%	0.80	-9.1%	-0.38
		8	-19.81	0.0104	8.0%	0.31	19.9%	0.82	-9.9%	-0.41
		17	-23.05	0.0050	8.0%	0.31	20.1%	0.83	-10.1%	-0.41
0.50		4	-12.41	0.0563	8.0%	0.31	18.0%	0.74	-8.1%	-0.34
		8	-15.16	0.0305	8.0%	0.31	19.4%	0.80	-9.5%	-0.39
		17	-18.33	0.0147	8.0%	0.31	19.9%	0.82	-10.0%	-0.41
1.40		4	-7.20	0.1900	8.0%	0.31	-1.0%	-0.14	1.0%	0.03
		8	-7.69	0.1700	8.0%	0.31	9.9%	0.36	-4.2%	-0.19
		17	-9.79	0.1050	8.0%	0.31	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34

Tableau 6.1.d'

FREQUENCE: 5.35 GHz

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 20°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$
0.1	0.2	10	-19.78	0.0105	4.8%	0.21	20.5% 0.84 -9.4% -0.39
		20	-22.74	0.0053	4.8%	0.21	21.5% 0.88 -10.3% -0.42
		40	-25.88	0.0026	4.8%	0.21	23.2% 0.94 -11.2% -0.47
	0.7	10	-9.64	0.1090	4.8%	0.21	15.1% 0.60 -6.2% -0.27
		20	-11.94	0.0640	4.8%	0.21	18.5% 0.76 -8.8% -0.37
		40	-14.83	0.0329	4.8%	0.21	20.0% 0.91 -11.8% -0.52
	1.2	10	-7.36	0.1840	4.8%	0.21	1.6% 0.02 -0.5% -0.00
		20	-8.16	0.1530	4.8%	0.21	12.1% 0.46 -5.3% -0.23
		40	-10.36	0.0921	4.8%	0.21	17.7% 0.75 -9.1% -0.39
3.4	10	-17.83	0.0165	4.8%	0.21	-39.4% -1.56 17.3% 0.72	
	20	-12.61	0.0548	4.8%	0.21	-34.4% -1.46 16.5% 0.63	
	40	-8.52	0.1410	4.8%	0.21	-19.8% -0.95 10.1% 0.39	
0.3	0.2	10	-16.13	0.0244	10.8%	0.50	20.5% 0.84 -9.4% -0.39
		20	-19.08	0.0124	10.8%	0.51	21.4% 0.87 -10.2% -0.42
		40	-22.22	0.0060	10.8%	0.51	23.1% 0.94 -11.1% -0.47
	0.7	10	-5.99	0.2520	10.8%	0.50	15.1% 0.60 -6.2% -0.27
		20	-8.29	0.1480	10.8%	0.50	18.5% 0.76 -8.8% -0.37
		40	-11.18	0.0762	10.8%	0.50	20.0% 0.90 -11.7% -0.52
	1.2	10	-3.71	0.4250	10.8%	0.50	1.6% 0.02 -0.5% -0.00
		20	-4.51	0.3540	10.8%	0.50	12.1% 0.46 -5.3% -0.23
		40	-6.71	0.2130	10.8%	0.50	17.7% 0.75 -9.1% -0.38
3.4	10	-14.18	0.0382	10.8%	0.50	-39.4% -1.56 17.3% 0.72	
	20	-8.96	0.1270	10.8%	0.50	-34.4% -1.46 16.5% 0.63	
	40	-4.87	0.3260	10.8%	0.50	-19.8% -0.95 10.1% 0.39	
0.5	0.2	10	-14.00	0.0399	6.5%	0.25	20.5% 0.84 -9.4% -0.39
		20	-16.94	0.0202	6.5%	0.25	21.4% 0.87 -10.2% -0.42
		40	-20.08	0.0098	6.5%	0.25	23.0% 0.93 -11.1% -0.46
	0.7	10	-3.85	0.4120	6.5%	0.25	15.1% 0.60 -6.2% -0.27
		20	-6.16	0.2420	6.5%	0.25	18.5% 0.76 -8.8% -0.37
		40	-9.04	0.1250	6.5%	0.25	20.0% 0.90 -11.6% -0.51
	1.2	10	-1.58	0.6950	6.5%	0.25	1.6% 0.02 -0.5% -0.00
		20	-2.38	0.5780	6.5%	0.25	12.1% 0.46 -5.3% -0.23
		40	-4.57	0.3490	6.5%	0.25	17.7% 0.74 -9.0% -0.38
3.4	10	-12.05	0.0624	6.5%	0.25	-39.4% -1.56 17.3% 0.72	
	20	-6.83	0.2070	6.5%	0.25	-34.4% -1.46 16.5% 0.63	
	40	-2.74	0.5330	6.5%	0.25	-19.8% -0.95 10.1% 0.39	

Tableau 6.2.a

FREQUENCE: 5.35 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 20°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.1	0.2	10	-21.57	0.0070	5.1%	0.22	20.7%	0.85	-9.5%	-0.39
		20	-24.53	0.0035	5.1%	0.22	21.8%	0.89	-10.3%	-0.43
		40	-27.71	0.0017	5.1%	0.22	23.8%	0.97	-11.4%	-0.48
	0.7	10	-11.41	0.0723	5.1%	0.22	15.1%	0.60	-6.2%	-0.27
		20	-13.71	0.0426	5.1%	0.22	18.5%	0.76	-8.8%	-0.37
		40	-16.62	0.0218	5.1%	0.22	20.1%	0.92	-12.1%	-0.54
	1.2	10	-9.13	0.1220	5.1%	0.22	1.6%	0.02	-0.5%	-0.00
		20	-9.93	0.1020	5.1%	0.22	12.1%	0.46	-5.3%	-0.23
		40	-12.14	0.0612	5.1%	0.22	17.7%	0.75	-9.2%	-0.39
3.4	10	-19.61	0.0110	5.1%	0.22	-39.4%	-1.56	17.3%	0.72	
	20	-14.38	0.0365	5.1%	0.22	-34.4%	-1.46	16.5%	0.63	
	40	-10.29	0.0936	5.1%	0.22	-19.8%	-0.95	10.1%	0.39	
0.3	0.2	10	-17.82	0.0165	10.8%	0.50	20.7%	0.85	-9.5%	-0.39
		20	-20.79	0.0083	10.8%	0.50	21.8%	0.89	-10.3%	-0.43
		40	-23.98	0.0040	10.7%	0.50	23.9%	0.97	-11.4%	-0.48
	0.7	10	-7.66	0.1710	10.8%	0.50	15.1%	0.60	-6.2%	-0.27
		20	-9.96	0.1010	10.8%	0.50	18.5%	0.76	-8.8%	-0.37
		40	-12.88	0.0516	10.8%	0.50	20.2%	0.93	-12.2%	-0.55
	1.2	10	-5.39	0.2890	10.8%	0.50	1.6%	0.02	-0.5%	-0.00
		20	-6.18	0.2410	10.8%	0.50	12.1%	0.45	-5.3%	-0.23
		40	-8.39	0.1450	10.8%	0.50	17.7%	0.75	-9.2%	-0.39
3.4	10	-15.86	0.0260	10.8%	0.50	-39.4%	-1.56	17.3%	0.72	
	20	-10.63	0.0865	10.8%	0.50	-34.4%	-1.46	16.5%	0.63	
	40	-6.54	0.2220	10.8%	0.50	-19.8%	-0.95	10.1%	0.39	
0.5	0.2	10	-15.72	0.0268	6.3%	0.24	20.7%	0.85	-9.5%	-0.39
		20	-18.69	0.0135	6.3%	0.24	21.9%	0.89	-10.3%	-0.43
		40	-21.89	0.0065	6.2%	0.24	24.1%	0.97	-11.4%	-0.48
	0.7	10	-5.56	0.2780	6.3%	0.24	15.1%	0.60	-6.2%	-0.27
		20	-7.86	0.1640	6.3%	0.24	18.5%	0.76	-8.8%	-0.37
		40	-10.78	0.0836	6.3%	0.24	20.2%	0.93	-12.3%	-0.55
	1.2	10	-3.28	0.4700	6.3%	0.24	1.6%	0.02	-0.5%	-0.00
		20	-4.08	0.3910	6.3%	0.24	12.1%	0.45	-5.3%	-0.23
		40	-6.29	0.2350	6.3%	0.24	17.7%	0.76	-9.2%	-0.39
3.4	10	-13.75	0.0421	6.3%	0.24	-39.4%	-1.56	17.3%	0.72	
	20	-8.53	0.1400	6.3%	0.24	-34.4%	-1.46	16.5%	0.63	
	40	-4.44	0.3600	6.3%	0.24	-19.8%	-0.95	10.1%	0.39	

Tableau 6.2.a'

FREQUENCY: 5.35 GHz			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 30°				
W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.1	0.2	10	-24.93	0.0032	4.8%	0.21	22.1%	0.90	-10.3%	-0.42
		20	-28.11	0.0015	4.8%	0.21	24.5%	0.98	-11.1%	-0.46
		40	-31.61	0.0007	4.9%	0.21	30.2%	1.16	-12.3%	-0.52
	0.7	10	-14.18	0.0382	4.8%	0.21	17.8%	0.73	-8.3%	-0.35
		20	-16.88	0.0205	4.8%	0.21	19.4%	0.80	-9.6%	-0.39
		40	-19.80	0.0105	4.8%	0.21	20.1%	0.83	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-10.66	0.0859	4.8%	0.21	10.4%	0.38	-4.3%	-0.19
		20	-12.56	0.0554	4.8%	0.21	16.6%	0.67	-8.0%	-0.34
		40	-15.24	0.0299	4.8%	0.21	19.0%	0.79	-9.5%	-0.38
3.4	10	-16.28	0.0236	4.8%	0.21	-35.3%	-1.46	15.8%	0.65	
	20	-11.96	0.0636	4.8%	0.21	-23.4%	-1.08	11.6%	0.46	
	40	-9.77	0.1050	4.8%	0.21	-4.6%	-0.32	2.7%	0.08	
0.3	0.2	10	-21.29	0.0074	10.7%	0.50	21.9%	0.89	-10.2%	-0.42
		20	-24.46	0.0036	10.8%	0.51	24.1%	0.97	-11.0%	-0.45
		40	-27.90	0.0016	11.0%	0.51	29.1%	1.12	-12.0%	-0.51
	0.7	10	-10.56	0.0879	10.7%	0.50	17.8%	0.73	-8.3%	-0.35
		20	-13.26	0.0472	10.7%	0.50	19.4%	0.80	-9.6%	-0.39
		40	-16.18	0.0241	10.7%	0.50	20.1%	0.83	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-7.04	0.1980	10.7%	0.50	10.4%	0.38	-4.3%	-0.19
		20	-8.94	0.1270	10.7%	0.50	16.6%	0.67	-8.0%	-0.34
		40	-11.62	0.0689	10.7%	0.50	19.0%	0.79	-9.5%	-0.38
3.4	10	-12.66	0.0542	10.7%	0.50	-35.3%	-1.46	15.8%	0.65	
	20	-8.35	0.1460	10.7%	0.50	-23.4%	-1.08	11.6%	0.46	
	40	-6.15	0.2430	10.7%	0.50	-4.6%	-0.32	2.7%	0.08	
0.5	0.2	10	-19.16	0.0121	6.5%	0.25	21.8%	0.89	-10.2%	-0.42
		20	-22.31	0.0059	6.6%	0.25	23.8%	0.96	-11.0%	-0.45
		40	-25.72	0.0027	6.7%	0.26	28.4%	1.10	-11.9%	-0.50
	0.7	10	-8.44	0.1430	6.5%	0.25	17.8%	0.73	-8.3%	-0.35
		20	-11.14	0.0769	6.5%	0.25	19.4%	0.80	-9.6%	-0.39
		40	-14.06	0.0392	6.5%	0.25	20.0%	0.82	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-4.92	0.3220	6.5%	0.25	10.4%	0.38	-4.3%	-0.19
		20	-6.82	0.2080	6.5%	0.25	16.6%	0.67	-8.0%	-0.34
		40	-9.50	0.1120	6.5%	0.25	19.0%	0.79	-9.5%	-0.38
3.4	10	-10.54	0.0883	6.5%	0.25	-35.3%	-1.46	15.8%	0.65	
	20	-6.23	0.2380	6.5%	0.25	-23.4%	-1.08	11.6%	0.46	
	40	-4.03	0.3950	6.5%	0.25	-4.6%	-0.32	2.7%	0.08	

Tableau 6.2.b

FREQUENCE: 5.35 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$
0.1	0.2	10	-27.26	0.0019	5.5%	0.24	22.0% 0.89 -10.3% -0.42
		20	-30.44	0.0009	5.5%	0.24	24.3% 0.97 -11.1% -0.46
		40	-33.90	0.0004	5.5%	0.24	29.5% 1.14 -12.1% -0.51
	0.7	10	-16.52	0.0223	5.5%	0.24	17.8% 0.73 -8.3% -0.35
		20	-19.22	0.0120	5.5%	0.24	19.4% 0.80 -9.6% -0.39
		40	-22.15	0.0061	5.5%	0.24	20.1% 0.83 -10.0% -0.41
	1.2	10	-13.00	0.0501	5.5%	0.24	10.4% 0.38 -4.3% -0.19
		20	-14.91	0.0323	5.5%	0.24	16.6% 0.67 -8.0% -0.34
		40	-17.58	0.0175	5.5%	0.24	19.0% 0.79 -9.5% -0.38
3.4	10	-18.62	0.0137	5.5%	0.24	-35.3% -1.46 15.8% 0.65	
	20	-14.31	0.0371	5.5%	0.24	-23.4% -1.08 11.6% 0.46	
	40	-12.11	0.0615	5.5%	0.24	-4.6% -0.32 2.7% 0.08	
0.3	0.2	10	-23.16	0.0048	11.9%	0.55	22.0% 0.89 -10.3% -0.42
		20	-26.34	0.0023	11.9%	0.55	24.4% 0.97 -11.1% -0.46
		40	-29.82	0.0010	11.8%	0.55	29.8% 1.15 -12.2% -0.52
	0.7	10	-12.42	0.0573	11.9%	0.56	17.8% 0.73 -8.3% -0.35
		20	-15.12	0.0307	11.9%	0.56	19.4% 0.80 -9.6% -0.39
		40	-18.04	0.0157	11.9%	0.56	20.1% 0.83 -10.0% -0.41
	1.2	10	-8.90	0.1290	11.9%	0.56	10.4% 0.38 -4.3% -0.19
		20	-10.80	0.0831	11.9%	0.56	16.6% 0.67 -8.0% -0.34
		40	-13.48	0.0449	11.9%	0.56	19.0% 0.79 -9.5% -0.38
3.4	10	-14.52	0.0353	11.9%	0.56	-35.3% -1.46 15.8% 0.65	
	20	-10.21	0.0954	11.9%	0.56	-23.4% -1.08 11.6% 0.46	
	40	-8.01	0.1580	11.9%	0.56	-4.6% -0.32 2.7% 0.08	
0.5	0.2	10	-20.84	0.0082	7.0%	0.27	22.1% 0.90 -10.3% -0.42
		20	-24.02	0.0040	7.0%	0.27	24.5% 0.98 -11.1% -0.46
		40	-27.51	0.0018	6.9%	0.27	30.1% 1.15 -12.3% -0.52
	0.7	10	-10.09	0.0979	7.0%	0.27	17.8% 0.73 -8.3% -0.35
		20	-12.79	0.0525	7.0%	0.27	19.4% 0.80 -9.6% -0.39
		40	-15.72	0.0268	7.0%	0.27	20.1% 0.83 -10.0% -0.41
	1.2	10	-6.57	0.2200	7.0%	0.27	10.4% 0.38 -4.3% -0.19
		20	-8.48	0.1420	7.0%	0.27	16.6% 0.67 -8.0% -0.34
		40	-11.15	0.0767	7.0%	0.27	19.0% 0.79 -9.5% -0.38
3.4	10	-12.19	0.0604	7.0%	0.27	-35.3% -1.46 15.8% 0.65	
	20	-7.88	0.1630	7.0%	0.27	-23.4% -1.08 11.6% 0.46	
	40	-5.68	0.2700	7.0%	0.27	-4.6% -0.32 2.7% 0.08	

Tableau 6.2.b'

FREQUENCE: 5.35 GHZ

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$
	0.2	10	-26.86	0.0021	4.8% 0.21	23.0% 0.93	-10.6% -0.44
		20	-30.16	0.0010	4.8% 0.21	26.4% 1.04	-11.6% -0.48
		40	-33.89	0.0004	5.0% 0.22	35.2% 1.32	-13.8% -0.58
0.1	0.7	10	-15.91	0.0256	4.7% 0.21	18.6% 0.76	-8.9% -0.37
		20	-18.72	0.0134	4.7% 0.21	19.6% 0.81	-9.8% -0.40
		40	-21.68	0.0068	4.7% 0.21	20.0% 0.83	-10.0% -0.41
	1.2	10	-12.03	0.0626	4.7% 0.21	13.2% 0.51	-5.8% -0.25
		20	-14.28	0.0374	4.7% 0.21	17.8% 0.73	-8.7% -0.36
		40	-17.06	0.0197	4.7% 0.21	19.4% 0.81	-9.7% -0.39
	3.4	10	-15.29	0.0296	4.7% 0.21	-31.8% -1.35	14.5% 0.60
		20	-14.46	0.0683	4.7% 0.21	-16.7% -0.82	8.5% 0.33
		40	-10.47	0.0987	4.7% 0.21	1.7% 0.03	-0.6% -0.05
	0.2	10	-23.25	0.0047	10.6% 0.50	22.6% 0.91	-10.5% -0.43
		20	-26.51	0.0022	10.7% 0.50	25.6% 1.01	-11.5% -0.47
		40	-30.15	0.0010	11.1% 0.52	33.0% 1.25	-13.3% -0.56
0.3	0.7	10	-12.34	0.0584	10.5% 0.49	18.5% 0.76	-8.9% -0.37
		20	-15.14	0.0306	10.5% 0.49	19.6% 0.81	-9.8% -0.40
		40	-18.10	0.0155	10.6% 0.49	20.0% 0.83	-10.0% -0.41
	1.2	10	-8.46	0.1430	10.5% 0.49	13.2% 0.51	-5.8% -0.25
		20	-10.70	0.0851	10.5% 0.49	17.8% 0.73	-8.7% -0.36
		40	-13.48	0.0449	10.5% 0.49	19.4% 0.81	-9.7% -0.39
	3.4	10	-11.71	0.0674	10.5% 0.49	-31.8% -1.35	14.5% 0.60
		20	-8.07	0.1560	10.5% 0.49	-16.7% -0.82	8.5% 0.33
		40	-6.89	0.2040	10.5% 0.49	1.7% 0.03	-0.6% -0.05
	0.2	10	-21.14	0.0077	6.5% 0.25	22.4% 0.91	-10.5% -0.43
		20	-24.38	0.0037	6.5% 0.25	25.1% 1.00	-11.3% -0.47
		40	-27.95	0.0016	6.7% 0.26	31.7% 1.21	-13.0% -0.54
0.5	0.7	10	-10.25	0.0945	6.4% 0.25	18.5% 0.76	-8.9% -0.37
		20	-13.05	0.0495	6.4% 0.25	19.6% 0.81	-9.8% -0.40
		40	-16.01	0.0251	6.4% 0.25	20.0% 0.83	-10.0% -0.41
	1.2	10	-6.36	0.2310	6.4% 0.25	13.2% 0.51	-5.8% -0.25
		20	-8.61	0.1380	6.4% 0.25	17.8% 0.73	-8.7% -0.36
		40	-11.39	0.0726	6.4% 0.25	19.4% 0.80	-9.7% -0.39
	3.4	10	-9.62	0.1090	6.4% 0.25	-31.8% -1.35	14.5% 0.60
		20	-5.98	0.2520	6.4% 0.25	-16.7% -0.82	8.5% 0.33
		40	-4.80	0.3310	6.4% 0.25	1.7% 0.03	-0.6% -0.05

Tableau 6.2.c

FREQUENCE: 5.35 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.1	0.2	10	-29.62	0.0011	5.9%	0.26	22.4%	0.91	-10.5%	-0.43
		20	-32.86	0.0005	5.9%	0.26	25.2%	1.00	-11.3%	-0.47
		40	-36.44	0.0002	5.9%	0.26	31.8%	1.21	-13.0%	-0.54
	0.7	10	-18.73	0.0134	5.9%	0.26	18.5%	0.76	-8.9%	-0.37
		20	-21.53	0.0070	5.9%	0.26	19.6%	0.81	-9.8%	-0.40
		40	-24.49	0.0036	5.9%	0.26	20.0%	0.83	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-14.84	0.0328	5.9%	0.26	13.2%	0.51	-5.8%	-0.25
		20	-17.09	0.0196	5.9%	0.26	17.8%	0.73	-8.7%	-0.36
		40	-19.87	0.0103	5.9%	0.26	19.4%	0.80	-9.7%	-0.39
3.4	10	-18.10	0.0155	5.9%	0.26	-31.8%	-1.35	14.5%	0.60	
	20	-14.46	0.0358	5.9%	0.26	-16.7%	-0.82	8.5%	0.33	
	40	-13.28	0.0470	5.9%	0.26	1.7%	0.03	-0.6%	-0.05	
0.3	0.2	10	-25.23	0.0030	12.8%	0.60	22.4%	0.91	-10.5%	-0.43
		20	-28.47	0.0014	12.8%	0.60	25.2%	1.00	-11.4%	-0.47
		40	-32.06	0.0006	12.7%	0.59	32.0%	1.22	-13.1%	-0.54
	0.7	10	-14.33	0.0369	12.8%	0.60	18.5%	0.76	-8.9%	-0.37
		20	-17.14	0.0193	12.8%	0.60	19.6%	0.81	-9.8%	-0.40
		40	-20.10	0.0098	12.8%	0.60	20.0%	0.83	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-10.45	0.0901	12.8%	0.60	13.2%	0.51	-5.8%	-0.25
		20	-12.69	0.0538	12.8%	0.60	17.8%	0.73	-8.7%	-0.36
		40	-15.48	0.0283	12.8%	0.60	19.4%	0.80	-9.7%	-0.39
3.4	10	-13.71	0.0426	12.8%	0.60	-31.8%	-1.35	14.5%	0.60	
	20	-10.07	0.0984	12.8%	0.60	-16.7%	-0.82	8.5%	0.33	
	40	-8.89	0.1290	12.8%	0.60	1.7%	0.03	-0.6%	-0.05	
0.5	0.2	10	-22.72	0.0053	7.5%	0.29	22.5%	0.91	-10.5%	-0.43
		20	-25.97	0.0025	7.5%	0.29	25.3%	1.00	-11.4%	-0.47
		40	-29.58	0.0011	7.5%	0.29	32.3%	1.23	-13.1%	-0.55
	0.7	10	-11.82	0.0657	7.6%	0.29	18.5%	0.76	-8.9%	-0.37
		20	-14.63	0.0344	7.6%	0.29	19.6%	0.81	-9.8%	-0.40
		40	-17.59	0.0174	7.6%	0.29	20.0%	0.83	-10.0%	-0.41
	1.2	10	-7.94	0.1610	7.6%	0.29	13.2%	0.51	-5.8%	-0.25
		20	-10.19	0.0958	7.6%	0.29	17.8%	0.73	-8.7%	-0.36
		40	-12.97	0.0505	7.6%	0.29	19.4%	0.80	-9.7%	-0.39
3.4	10	-11.20	0.7590	7.6%	0.29	-31.8%	-1.35	14.5%	0.60	
	20	-7.56	0.1750	7.6%	0.29	-16.7%	-0.82	8.5%	0.33	
	40	-6.38	0.2300	7.6%	0.29	1.7%	0.03	-0.6%	-0.05	

Tableau 6.2.c'

FREQUENCE: 5.35 GHz

POLARISATION: HH

ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$
	0.2	10	-28.49	0.0014	4.7%	0.21	23.7% 0.95 -10.9% -0.45
		20	-31.89	0.0006	4.8%	0.21	30.0% 1.10 -12.1% -0.50
		40	-35.88	0.0003	5.0%	0.22	40.8% 1.49 -15.1% -0.61
0.1	0.7	10	-17.39	0.0182	4.7%	0.20	19.0% 0.78 -9.3% -0.38
		20	-20.27	0.0094	4.7%	0.20	19.8% 0.81 -9.9% -0.41
		40	-23.24	0.0047	4.7%	0.20	20.0% 0.82 -10.1% -0.42
1.2		10	-13.26	0.0472	4.7%	0.20	15.3% 0.61 -7.1% -0.30
		20	-15.74	0.0267	4.7%	0.20	18.6% 0.76 -9.1% -0.38
		40	-18.60	0.0138	4.7%	0.20	19.8% 0.80 -9.8% -0.41
3.4		10	-14.20	0.0380	4.7%	0.20	-27.0% -1.20 12.6% 0.51
		20	-11.40	0.0724	4.7%	0.20	-9.7% -0.54 5.2% 0.19
		40	-11.20	0.0759	4.7%	0.20	7.0% 0.21 -3.3% -0.16
0.2		10	-24.93	0.0032	10.4%	0.49	23.2% 0.93 -10.8% -0.44
		20	-28.27	0.0015	10.6%	0.50	28.1% 1.06 -11.8% -0.49
		40	-32.09	0.0006	11.1%	0.52	37.0% 1.38 -14.2% -0.58
0.3	0.7	10	-13.89	0.0409	10.3%	0.48	19.0% 0.78 -9.3% -0.38
		20	-16.76	0.0211	10.3%	0.48	19.8% 0.81 -9.9% -0.41
		40	-19.73	0.0106	10.3%	0.48	20.0% 0.82 -10.1% -0.42
1.2		10	-9.75	0.1060	10.3%	0.48	15.3% 0.61 -7.1% -0.30
		20	-12.23	0.0598	10.3%	0.48	18.6% 0.76 -9.1% -0.38
		40	-15.09	0.0310	10.3%	0.48	19.7% 0.80 -9.8% -0.41
3.4		10	-10.69	0.0853	10.3%	0.48	-27.0% -1.20 12.6% 0.51
		20	-7.90	0.1620	10.3%	0.48	-9.7% -0.54 5.2% 0.19
		40	-7.69	0.1700	10.3%	0.48	7.0% 0.21 -3.3% -0.16
0.2		10	-22.86	0.0052	6.3%	0.24	22.9% 0.92 -10.7% -0.44
		20	-26.17	0.0024	6.4%	0.25	27.3% 1.04 -11.6% -0.48
		40	-29.90	0.0010	6.7%	0.26	35.0% 1.31 -13.7% -0.56
0.5	0.7	10	-11.85	0.0654	6.2%	0.24	19.0% 0.78 -9.3% -0.38
		20	-14.72	0.0337	6.2%	0.24	19.8% 0.82 -9.9% -0.41
		40	-17.69	0.0170	6.2%	0.24	20.0% 0.82 -10.1% -0.42
1.2		10	-7.71	0.1690	6.2%	0.24	15.3% 0.61 -7.1% -0.30
		20	-10.19	0.0957	6.2%	0.24	18.6% 0.76 -9.1% -0.38
		40	-13.05	0.0496	6.2%	0.24	19.7% 0.80 -9.8% -0.41
3.4		10	-8.65	0.1360	6.2%	0.24	-27.0% -1.20 12.6% 0.51
		20	-5.86	0.2600	6.2%	0.24	-9.7% -0.54 5.2% 0.19
		40	-5.65	0.2720	6.2%	0.24	7.0% 0.21 -3.3% -0.16

Tableau 6.2.d

FREQUENCE: 5.35 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/W$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/ks$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/kL$			
0.1	0.2	10	-31.96	0.0006	6.4%	0.28	22.6%	0.92	-10.6%	-0.44
		20	-35.24	0.0003	6.4%	0.28	26.5%	1.01	-11.5%	-0.47
		40	-38.89	0.0001	6.4%	0.28	33.2%	1.26	-13.2%	-0.54
	0.7	10	-20.97	0.0080	6.4%	0.28	19.0%	0.78	-9.3%	-0.38
		20	-23.84	0.0041	6.4%	0.28	19.8%	0.81	-9.9%	-0.41
		40	-26.82	0.0021	6.4%	0.28	20.0%	0.82	-10.1%	-0.42
	1.2	10	-16.84	0.0207	6.4%	0.28	15.3%	0.61	-7.1%	-0.30
		20	-19.32	0.0117	6.4%	0.28	18.6%	0.76	-9.1%	-0.38
		40	-22.17	0.0061	6.4%	0.28	19.7%	0.80	-9.8%	-0.41
3.4	10	-17.78	0.0167	6.4%	0.28	-27.0%	-1.20	12.6%	0.51	
	20	-14.98	0.0318	6.4%	0.28	-9.7%	-0.54	5.2%	0.19	
	40	-14.78	0.0333	6.4%	0.28	7.0%	0.21	-3.3%	-0.16	
0.3	0.2	10	-27.16	0.0019	14.0%	0.65	22.6%	0.92	-10.6%	-0.44
		20	-30.44	0.0009	14.0%	0.65	26.6%	1.02	-11.5%	-0.47
		40	-34.09	0.0004	14.0%	0.65	33.3%	1.26	-11.3%	-0.54
	0.7	10	-16.17	0.0242	14.0%	0.65	19.0%	0.78	-9.3%	-0.38
		20	-19.04	0.0125	14.0%	0.65	19.8%	0.81	-9.9%	-0.41
		40	-22.02	0.0063	14.0%	0.65	20.0%	0.82	-10.1%	-0.42
	1.2	10	-12.03	0.0626	14.0%	0.65	15.3%	0.61	-7.1%	-0.30
		20	-14.52	0.0354	14.0%	0.65	18.6%	0.76	-9.1%	-0.38
		40	-17.37	0.0183	14.0%	0.65	19.6%	0.80	-9.8%	-0.41
3.4	10	-12.97	0.0504	14.0%	0.65	-27.0%	-1.20	12.6%	0.51	
	20	-10.18	0.0960	14.0%	0.65	-9.7%	-0.54	5.2%	0.19	
	40	-9.97	0.1010	14.0%	0.65	7.0%	0.21	-3.3%	-0.16	
0.5	0.2	10	-24.42	0.0036	8.3%	0.32	22.7%	0.92	-10.6%	-0.44
		20	-27.70	0.0017	8.2%	0.32	26.6%	1.02	-11.5%	-0.47
		40	-31.37	0.0007	8.2%	0.32	33.4%	1.27	-13.3%	-0.54
	0.7	10	-13.43	0.0454	8.3%	0.32	19.0%	0.78	-9.3%	-0.38
		20	-16.31	0.0234	8.3%	0.32	19.8%	0.82	-9.9%	-0.41
		40	-19.28	0.0118	8.3%	0.32	20.0%	0.82	-10.1%	-0.42
	1.2	10	-9.29	0.1180	8.3%	0.32	15.3%	0.61	-7.1%	-0.30
		20	-11.78	0.0664	8.3%	0.32	18.6%	0.76	-9.1%	-0.38
		40	-14.63	0.0344	8.3%	0.32	19.7%	0.80	-9.8%	-0.41
3.4	10	-10.23	0.0947	8.3%	0.32	-27.0%	-1.20	12.6%	0.51	
	20	-7.44	0.1800	8.3%	0.32	-9.7%	-0.54	5.2%	0.19	
	40	-7.23	0.1890	8.3%	0.32	7.0%	0.21	-3.3%	-0.16	

Tableau 6.2.d'

FREQUENCY: 9.00 GHz			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 20°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
0.1	0.34	17	-17.57	0.0175	4.3%	0.19	20.9%	0.88	-9.7%	-0.40
		34	-20.54	0.0088	4.3%	0.19	20.8%	0.85	-10.2%	-0.42
		67	-23.54	0.0044	4.3%	0.19	21.5%	0.87	-10.2%	-0.42
	1.18	17	-8.11	0.1550	4.3%	0.19	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-10.70	0.0984	4.3%	0.19	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-12.70	0.0538	4.3%	0.19	19.1%	0.79	-9.6%	-0.39
	2.02	17	-8.04	0.1570	4.3%	0.19	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-7.27	0.1870	4.3%	0.19	4.0%	0.07	-1.5%	-0.09
		67	-8.62	0.1370	4.3%	0.19	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-22.49	0.0056	4.3%	0.19	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-16.89	0.0205	4.3%	0.19	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-11.75	0.0668	4.3%	0.19	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	
0.3	0.34	17	-14.02	0.0396	11.2%	0.53	20.8%	0.88	-9.7%	-0.40
		34	-16.99	0.0200	11.2%	0.53	20.7%	0.85	-10.1%	-0.42
		67	-19.98	0.0100	11.2%	0.53	21.4%	0.87	-10.2%	-0.42
	1.18	17	-4.56	0.3500	11.2%	0.53	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-6.52	0.2230	11.2%	0.53	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-9.15	0.1220	11.2%	0.53	19.1%	0.79	-9.6%	-0.39
	2.02	17	-4.49	0.3560	11.2%	0.53	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-3.72	0.4240	11.2%	0.53	4.0%	0.07	-1.5%	-0.09
		67	-5.07	0.3110	11.2%	0.53	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-18.94	0.0128	11.2%	0.53	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-13.34	0.0464	11.2%	0.53	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-8.20	0.1510	11.2%	0.53	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	
0.5	0.34	17	-11.77	0.0665	6.9%	0.27	20.8%	0.88	-9.7%	-0.40
		34	-14.74	0.0336	6.9%	0.27	20.7%	0.85	-10.1%	-0.42
		67	-17.73	0.0169	6.9%	0.27	21.4%	0.86	-10.2%	-0.42
	1.18	17	-2.31	0.5870	6.9%	0.27	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-4.27	0.3740	6.9%	0.27	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-6.90	0.2040	6.9%	0.27	19.1%	0.79	-9.6%	-0.39
	2.02	17	-2.24	0.5970	6.9%	0.27	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-1.47	0.7120	6.9%	0.27	4.0%	0.07	-1.5%	-0.09
		67	-2.82	0.5220	6.9%	0.27	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-16.69	0.0214	6.9%	0.27	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-11.09	0.0778	6.9%	0.27	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-5.95	0.2540	6.9%	0.27	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	

Tableau 6.3.a

FREQUENCY: 9.00 GHZ			POLARISATION: VV			ANGLE D'INCIDENCE: 20°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/W$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/ks$	$(\Delta\sigma^{\circ}/\sigma^{\circ})/kL$			
0.1	0.34	17	-19.36	0.0116	4.5%	0.20	21.1%	0.89	-9.7%	-0.40
		34	-22.33	0.0058	4.5%	0.20	21.0%	0.86	-10.2%	-0.42
		67	-25.34	0.0029	4.5%	0.20	21.8%	0.87	-10.2%	-0.42
	1.18	17	-9.89	0.1030	4.5%	0.20	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-11.85	0.0653	4.5%	0.20	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-14.47	0.0357	4.5%	0.20	19.1%	0.79	-9.6%	-0.40
	2.02	17	-9.81	0.1040	4.5%	0.20	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-9.05	0.1240	4.5%	0.20	4.0%	0.07	-1.5%	0.09
		67	-10.40	0.0912	4.5%	0.20	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-24.27	0.0037	4.5%	0.20	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-18.67	0.0136	4.5%	0.20	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-13.53	0.0444	4.5%	0.20	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	
0.3	0.34	17	-15.70	0.0269	11.3%	0.53	21.1%	0.90	-9.7%	-0.40
		34	-18.67	0.0136	11.3%	0.53	21.0%	0.86	-10.2%	-0.42
		67	-21.68	0.0068	11.3%	0.53	21.8%	0.88	-10.2%	-0.42
	1.18	17	-6.23	0.2380	11.3%	0.53	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-8.19	0.1520	11.3%	0.53	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-10.81	0.0829	11.3%	0.53	19.1%	0.79	-9.6%	-0.40
	2.02	17	-6.15	0.2420	11.3%	0.53	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-5.39	0.2890	11.3%	0.53	4.0%	0.07	-1.5%	-0.09
		67	-6.74	0.2120	11.3%	0.53	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-20.61	0.0087	11.3%	0.53	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-15.00	0.0316	11.3%	0.53	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-9.87	0.1030	11.3%	0.53	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	
0.5	0.34	17	-13.47	0.0449	6.7%	0.26	21.2%	0.90	-9.7%	-0.40
		34	-16.45	0.0226	6.7%	0.26	21.0%	0.86	-10.2%	-0.42
		67	-19.46	0.0113	6.7%	0.26	21.9%	0.88	-10.3%	0.42
	1.18	17	-4.00	0.3980	6.7%	0.26	10.6%	0.39	-4.4%	-0.20
		34	-5.96	0.2530	6.7%	0.26	16.9%	0.68	-8.2%	-0.34
		67	-8.59	0.1380	6.7%	0.26	19.1%	0.79	-9.6%	-0.40
	2.02	17	-3.93	0.4050	6.7%	0.26	-12.9%	-0.67	6.8%	0.26
		34	-3.16	0.4830	6.7%	0.26	4.0%	0.07	-1.5%	-0.09
		67	-4.51	0.3540	6.7%	0.26	14.3%	0.55	-7.0%	-0.30
5.70	17	-18.38	0.0145	6.7%	0.26	-40.0%	-1.57	18.0%	0.75	
	34	-12.78	0.0527	6.7%	0.26	-39.3%	-1.58	18.6%	0.77	
	67	-7.64	0.1720	6.7%	0.26	-32.0%	-1.36	15.6%	0.63	

Tableau 6.3.a'

FREQUENCE: 9.00 GHz			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 30°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
0.34		17	-22.69	0.0054	4.2%	0.19	21.2%	0.87	-10.2%	-0.42
		34	-25.79	0.0026	4.2%	0.19	22.4%	0.91	-10.6%	-0.44
		67	-28.95	0.0013	4.3%	0.19	25.0%	0.99	-11.2%	-0.46
0.1	1.18	17	-12.35	0.0583	4.2%	0.19	15.7%	0.63	-7.5%	-0.32
		34	-14.91	0.0323	4.2%	0.19	18.8%	0.77	-9.3%	-0.39
		67	-17.70	0.0170	4.2%	0.19	19.4%	0.78	-10.3%	-0.78
2.02		17	-10.01	0.0999	4.2%	0.19	0.9%	0.06	-0.1%	-0.02
		34	-11.01	0.0793	4.2%	0.19	12.8%	0.48	-6.1%	-0.27
		67	-13.25	0.0473	4.2%	0.19	17.8%	0.70	-9.1%	-0.41
5.70		17	-20.70	0.0085	4.2%	0.19	-38.9%	-1.55	17.7%	0.74
		34	-15.43	0.0286	4.2%	0.19	-34.0%	-1.43	16.4%	0.67
		67	-11.39	0.0725	4.2%	0.19	-19.8%	-0.94	10.1%	0.39
0.34		17	-19.17	0.0121	11.1%	0.52	21.1%	0.87	-10.2%	-0.42
		34	-22.25	0.0060	11.2%	0.53	22.2%	0.90	-10.5%	-0.44
		67	-25.40	0.0029	11.2%	0.53	24.5%	0.97	-11.1%	-0.46
0.3	1.18	17	-8.83	0.1310	11.1%	0.52	15.8%	0.63	-7.5%	-0.32
		34	-11.39	0.0726	11.1%	0.52	18.8%	0.77	-9.3%	-0.39
		67	-14.19	0.0381	11.1%	0.52	19.4%	0.78	-10.3%	-0.47
2.02		17	-6.49	0.2240	11.1%	0.52	0.9%	0.06	-0.1%	-0.02
		34	-7.49	0.1780	11.1%	0.52	12.8%	0.48	-6.1%	-0.27
		67	-9.74	0.1060	11.1%	0.52	17.8%	0.70	-9.1%	-0.40
5.70		17	-17.19	0.0191	11.1%	0.52	-38.9%	-1.55	17.7%	0.74
		34	-11.91	0.0644	11.1%	0.52	-34.0%	-1.43	16.4%	0.67
		67	-7.88	0.1630	11.1%	0.52	-19.8%	-0.94	10.1%	0.39
0.34		17	-16.93	0.0203	6.9%	0.27	21.0%	0.87	-10.2%	-0.42
		34	-20.00	0.0100	6.9%	0.27	22.0%	0.90	-10.5%	-0.43
		67	-23.14	0.0049	7.0%	0.27	24.2%	0.96	-11.0%	-0.45
0.5	1.18	17	-6.60	0.2190	6.9%	0.27	15.8%	0.63	-7.5%	-0.32
		34	-9.16	0.1210	6.9%	0.27	18.8%	0.77	-9.3%	-0.39
		67	-11.96	0.0637	6.9%	0.27	19.4%	0.79	-10.3%	-0.46
2.02		17	-4.26	0.3750	6.9%	0.27	0.9%	0.06	-0.1%	-0.02
		34	-5.26	0.2980	6.9%	0.27	12.8%	0.48	-6.1%	-0.27
		67	-7.50	0.1780	6.9%	0.27	17.8%	0.70	-9.1%	-0.40
5.70		17	-14.95	0.0320	6.9%	0.27	-38.9%	-1.55	17.7%	0.74
		34	-9.68	0.1080	6.9%	0.27	-34.0%	-1.43	16.4%	0.67
		67	-5.64	0.2730	6.9%	0.27	-19.8%	-0.94	10.1%	0.39

Tableau 6.3.b

FREQUENCY: 9.00 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$
0.34		17	-25.06	0.0054	4.9%	0.21	21.1% 0.87 -10.2% -0.42
		34	-28.15	0.0015	4.9%	0.21	22.3% 0.90 -10.6% -0.44
		67	-28.95	0.0013	4.9%	0.21	24.7% 0.98 -11.1% -0.46
0.1	1.18	17	-14.72	0.0337	4.9%	0.21	15.7% 0.63 -7.5% -0.32
		34	-17.28	0.0187	4.9%	0.21	18.8% 0.77 -9.3% -0.39
		67	-20.08	0.0098	4.9%	0.21	19.4% 0.78 -10.3% -0.47
2.02		17	-12.38	0.0578	4.9%	0.21	0.9% 0.06 -0.1% -0.02
		34	-13.38	0.0459	4.9%	0.21	12.8% 0.48 -6.1% -0.27
		67	-15.63	0.0274	4.9%	0.21	17.8% 0.70 -9.1% -0.41
5.70		17	-23.08	0.0049	4.9%	0.21	-38.9% -1.55 17.7% 0.74
		34	-17.80	0.0166	4.9%	0.21	-34.0% -1.43 16.4% 0.67
		67	-13.77	0.0420	4.9%	0.21	-19.8% -0.94 10.1% 0.39
0.34		17	-21.06	0.0078	12.4%	0.58	21.1% 0.87 -10.2% -0.42
		34	-24.15	0.0039	12.4%	0.58	22.3% 0.90 -10.6% -0.44
		67	-27.31	0.0019	12.4%	0.58	24.7% 0.98 -11.2% -0.46
0.3	1.18	17	-10.72	0.0848	12.5%	0.58	15.7% 0.63 -7.5% -0.32
		34	-13.28	0.0470	12.5%	0.58	18.8% 0.77 -9.3% -0.39
		67	-16.08	0.0247	12.5%	0.58	19.4% 0.78 -10.3% -0.47
2.02		17	-8.38	0.1450	12.5%	0.58	0.9% 0.06 -0.1% -0.02
		34	-9.38	0.1150	12.5%	0.58	12.8% 0.48 -6.1% -0.27
		67	-11.62	0.0688	12.5%	0.58	17.8% 0.70 -9.1% -0.41
5.70		17	-19.07	0.0124	12.5%	0.58	-38.9% -1.55 17.7% 0.74
		34	-13.80	0.0417	12.5%	0.58	-34.0% -1.43 16.4% 0.67
		67	-9.77	0.1060	12.5%	0.58	-19.8% -0.94 10.1% 0.39
0.34		17	-18.60	0.0138	7.4%	0.29	21.2% 0.87 -10.2% -0.42
		34	-21.69	0.0068	7.4%	0.29	22.3% 0.91 -10.6% -0.44
		67	-24.86	0.0033	7.4%	0.28	24.9% 0.98 -11.2% -0.46
0.5	1.18	17	-8.26	0.1490	7.4%	0.29	15.7% 0.63 -7.5% -0.32
		34	-10.82	0.0828	7.4%	0.29	18.8% 0.77 -9.3% -0.39
		67	-13.61	0.0435	7.4%	0.29	19.4% 0.78 -10.3% -0.47
2.02		17	-5.92	0.2560	7.4%	0.29	0.9% 0.06 -0.1% -0.02
		34	-6.92	0.2030	7.4%	0.29	12.8% 0.48 -6.1% -0.27
		67	-9.16	0.1210	7.4%	0.29	17.8% 0.70 -9.1% -0.41
5.70		17	-16.61	0.0218	7.4%	0.29	-38.9% -1.55 17.7% 0.74
		34	-11.34	0.0735	7.4%	0.29	-34.0% -1.43 16.4% 0.67
		67	-7.30	0.1860	7.4%	0.29	-19.8% -0.94 10.1% 0.39

Tableau 6.3.b'

FREQUENCE: 9.00 GHZ			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 35°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
0.34		17	-24.18	0.0038	4.2%	0.18	19.5%	0.46	-11.5%	-0.84
		34	-27.75	0.0017	4.2%	0.19	23.3%	0.94	-10.6%	-0.45
		67	-30.27	0.0009	4.2%	0.18	22.6%	0.28	-12.9%	-1.23
0.1	1.18	17	-14.03	0.0395	4.2%	0.18	17.4%	0.72	-8.6%	-0.37
		34	-16.73	0.0212	4.2%	0.18	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-19.59	0.0110	4.2%	0.18	16.5%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-10.96	0.0802	4.2%	0.18	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-12.55	0.0555	4.2%	0.18	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-15.06	0.0312	4.2%	0.18	18.7%	0.77	-9.4%	-0.39
5.70		17	-19.49	0.0113	4.2%	0.18	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-14.53	0.0353	4.2%	0.18	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-11.28	0.0744	4.2%	0.18	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25
0.34		17	-20.73	0.0085	11.0%	0.51	19.6%	0.50	-11.4%	-0.80
		34	-24.24	0.0038	11.1%	0.52	22.9%	0.92	-10.5%	-0.44
		67	-26.81	0.0021	11.0%	0.51	22.4%	0.34	-12.6%	-1.14
0.3	1.18	17	-10.55	0.0881	11.0%	0.52	17.4%	0.72	-8.6%	-0.36
		34	-13.25	0.0473	11.0%	0.52	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-16.11	0.0245	11.0%	0.52	16.8%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-7.48	0.1780	11.0%	0.52	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-9.08	0.1240	11.0%	0.52	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-11.59	0.0694	11.0%	0.52	18.7%	0.77	-9.4%	-0.39
5.70		17	-16.01	0.0251	11.0%	0.52	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-11.05	0.0786	11.0%	0.52	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-7.81	0.1660	11.0%	0.52	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25
0.34		17	-18.55	0.0140	6.7%	0.26	19.6%	0.52	-11.3%	-0.77
		34	-22.01	0.0063	6.8%	0.26	22.7%	0.92	-10.5%	-0.44
		67	-24.61	0.0035	6.8%	0.26	22.2%	0.38	-12.4%	-1.08
0.5	1.18	17	-8.35	0.1460	6.8%	0.26	17.4%	0.72	-8.6%	-0.36
		34	-11.05	0.0785	6.8%	0.26	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-13.91	0.0406	6.8%	0.26	17.1%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-5.28	0.2960	6.8%	0.26	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-6.87	0.2050	6.8%	0.26	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-9.38	0.1150	6.8%	0.26	18.7%	0.77	-9.4%	-0.34
5.70		17	-13.81	0.0416	6.8%	0.26	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-8.84	0.1300	6.8%	0.26	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-5.60	0.2750	6.8%	0.26	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25

Tableau 6.3.c

FREQUENCE: 9.00 GHZ POLARISATION: VV ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	σ^0 (dB)	σ^0 (puis)	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/W$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/ks$	$(\Delta\sigma^0/\sigma^0)/kL$			
0.34		17	-27.09	0.0020	5.2%	0.23	19.6%	0.52	-11.3%	-0.77
		34	-30.55	0.0009	5.2%	0.23	22.7%	0.92	-10.5%	-0.44
		67	-33.15	0.0005	5.2%	0.23	22.2%	0.38	-12.4%	-1.08
0.1	1.18	17	-16.89	0.0205	5.2%	0.23	17.4%	0.72	-8.6%	-0.36
		34	-19.59	0.0110	5.2%	0.23	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-22.45	0.0057	5.2%	0.23	17.1%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-13.82	0.0415	5.2%	0.23	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-15.41	0.0288	5.2%	0.23	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-17.92	0.0161	5.2%	0.23	18.7%	0.77	-9.4%	-0.39
5.70		17	-22.35	0.0058	5.2%	0.23	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-17.38	0.0183	5.2%	0.23	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-14.14	0.0385	5.2%	0.23	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25
0.34		17	-22.80	0.0053	13.4%	0.63	19.6%	0.56	-11.3%	-0.77
		34	-26.27	0.0024	13.4%	0.63	22.7%	0.92	-10.5%	-0.44
		67	-28.86	0.0013	13.4%	0.63	22.2%	0.37	-12.4%	-1.08
0.3	1.18	17	-12.60	0.0549	13.4%	0.63	17.4%	0.72	-8.6%	-0.36
		34	-15.30	0.0295	13.4%	0.63	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-18.17	0.0153	13.4%	0.63	17.0%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-9.54	0.1110	13.4%	0.63	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-11.13	0.0771	13.4%	0.63	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-13.64	0.0433	13.4%	0.63	18.7%	0.77	-9.4%	-0.39
5.70		17	-18.06	0.0156	13.4%	0.63	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-13.10	0.0490	13.4%	0.63	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-9.86	0.1030	13.4%	0.63	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25
0.34		17	-20.15	0.0097	8.0%	0.31	19.6%	0.52	-11.3%	-0.78
		34	-23.62	0.0043	8.0%	0.31	22.7%	0.92	-10.5%	-0.44
		67	-26.21	0.0024	8.0%	0.31	22.2%	0.37	-12.5%	-1.10
0.5	1.18	17	-9.95	0.1010	8.0%	0.31	17.4%	0.72	-8.6%	-0.36
		34	-12.66	0.0542	8.0%	0.31	19.2%	0.79	-9.6%	-0.39
		67	-15.52	0.0281	8.0%	0.31	17.0%	0.79	-9.8%	-0.40
2.02		17	-6.89	0.2050	8.0%	0.31	6.1%	0.17	-2.5%	-0.12
		34	-8.48	0.1420	8.0%	0.31	15.1%	0.60	-7.4%	-0.31
		67	-10.99	0.0796	8.0%	0.31	18.7%	0.77	-9.4%	-0.39
5.70		17	-15.41	0.0288	8.0%	0.31	-37.7%	-1.52	17.3%	0.72
		34	-10.45	0.0901	8.0%	0.31	-29.8%	-1.29	14.6%	0.59
		67	-7.21	0.1900	8.0%	0.31	-12.7%	-0.66	6.7%	0.25

Tableau 6.3.c'

FREQUENCE: 9.00 GHZ			POLARISATION: HH			ANGLE D'INCIDENCE: 40°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
0.34		17	-26.20	0.0024	4.1%	0.18	21.9%	0.89	-10.5%	-0.43
		34	-29.39	0.0012	4.2%	0.18	24.1%	0.96	-10.7%	-0.43
		67	-32.78	0.0005	4.2%	0.19	29.3%	1.13	-12.2%	-0.52
0.1	1.18	17	-15.45	0.0285	4.1%	0.18	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-18.27	0.0149	4.1%	0.18	19.6%	0.81	-9.7%	-0.40
		67	-21.17	0.0076	4.1%	0.18	20.0%	0.83	-10.3%	-0.40
2.02		17	-11.88	0.0649	4.1%	0.18	10.2%	0.37	-4.6%	-0.20
		34	-13.91	0.0406	4.1%	0.18	16.9%	0.68	-8.6%	-0.35
		67	-16.57	0.0220	4.1%	0.18	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
5.70		17	-18.05	0.0157	4.1%	0.18	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-13.56	0.0441	4.1%	0.18	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-11.26	0.0749	4.1%	0.18	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10
0.34		17	-22.76	0.0053	10.8%	0.51	21.6%	0.88	-10.4%	-0.43
		34	-25.93	0.0026	10.9%	0.51	23.6%	0.94	-10.6%	-0.43
		67	-29.25	0.0012	11.1%	0.52	27.9%	1.09	-11.9%	-0.50
0.3	1.18	17	-12.04	0.0626	10.7%	0.50	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-14.85	0.0327	10.7%	0.50	19.5%	0.81	-9.8%	-0.40
		67	-17.76	0.0168	10.7%	0.50	20.0%	0.83	-10.3%	-0.40
2.02		17	-8.46	0.1420	10.7%	0.50	10.2%	0.37	-4.6%	-0.20
		34	-10.50	0.0891	10.7%	0.50	16.9%	0.68	-8.6%	-0.35
		67	-13.16	0.0483	10.7%	0.50	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
5.70		17	-14.64	0.0344	10.7%	0.50	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-10.14	0.0967	10.7%	0.50	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-7.85	0.1640	10.7%	0.50	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10
0.34		17	-20.60	0.0087	6.6%	0.26	21.5%	0.88	-10.4%	-0.42
		34	-23.75	0.0042	6.7%	0.26	23.2%	0.93	-10.6%	-0.43
		67	-27.03	0.0020	6.8%	0.26	27.1%	1.06	-11.7%	-0.49
0.5	1.18	17	-9.89	0.1030	6.6%	0.26	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-12.70	0.0537	6.6%	0.26	19.5%	0.81	-9.8%	-0.40
		67	-15.61	0.0275	6.6%	0.26	20.0%	0.83	-10.3%	-0.40
2.02		17	-6.31	0.2340	6.6%	0.26	10.2%	0.37	-4.6%	-0.21
		34	-8.35	0.1460	6.6%	0.26	16.9%	0.68	-8.6%	-0.35
		67	-11.01	0.0792	6.6%	0.26	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
5.70		17	-12.49	0.0564	6.6%	0.26	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-7.99	0.1590	6.6%	0.26	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-5.70	0.2690	6.6%	0.26	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10

Tableau 6.3.d

FREQUENCY: 9.00 GHZ			POLARISATION: VV			ANGLE D'INCIDENCE: 40°				
W	ks	kL	σ° (dB)	σ° (puis)	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/W$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/ks$	$(\Delta\sigma^\circ/\sigma^\circ)/kL$			
	0.34	17	-29.80	0.0011	5.7%	0.25	21.3%	0.87	-10.3%	-0.42
		34	-32.93	0.0005	5.7%	0.25	22.9%	0.92	-10.5%	-0.43
		67	-36.18	0.0002	5.7%	0.25	26.3%	1.04	-11.5%	-0.48
0.1	1.18	17	-19.10	0.0123	5.7%	0.25	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-21.92	0.0064	5.7%	0.25	19.5%	0.81	-9.8%	-0.40
		67	-24.82	0.0033	5.7%	0.25	20.0%	0.83	-10.2%	-0.40
	2.02	17	-15.53	0.0280	5.7%	0.25	10.2%	0.37	-4.6%	-0.21
		34	-17.56	0.0175	5.7%	0.25	16.9%	0.68	-8.5%	-0.35
		67	-20.22	0.0095	5.7%	0.25	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
	5.70	17	-21.70	0.0068	5.7%	0.25	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-17.21	0.0190	5.7%	0.25	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-14.91	0.0323	5.7%	0.25	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10
	0.34	17	-25.11	0.0031	14.6%	0.68	21.3%	0.87	-10.3%	-0.42
		34	-28.25	0.0015	14.6%	0.68	22.9%	0.92	-10.5%	-0.43
		67	-31.50	0.0007	14.6%	0.68	26.3%	1.04	-11.5%	-0.48
0.3	1.18	17	-14.42	0.0362	14.6%	0.68	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-17.23	0.0189	14.6%	0.68	19.5%	0.81	-9.8%	-0.40
		67	-20.13	0.0097	14.6%	0.68	20.0%	0.83	-10.2%	-0.40
	2.02	17	-10.84	0.0823	14.6%	0.68	10.2%	0.37	-4.6%	-0.21
		34	-12.88	0.0515	14.6%	0.68	16.9%	0.68	-8.5%	-0.35
		67	-15.54	0.0279	14.6%	0.68	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
	5.70	17	-17.02	0.0199	14.6%	0.68	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-12.52	0.0559	14.6%	0.68	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-10.23	0.0950	14.6%	0.68	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10
	0.34	17	-22.22	0.0060	8.8%	0.34	21.3%	0.87	-10.3%	-0.42
		34	-25.36	0.0029	8.7%	0.34	22.9%	0.92	-10.5%	-0.43
		67	-28.61	0.0014	8.7%	0.34	26.4%	1.04	-11.6%	-0.48
0.5	1.18	17	-11.52	0.0704	8.8%	0.34	18.2%	0.74	-8.9%	-0.37
		34	-14.34	0.0368	8.8%	0.34	19.5%	0.81	-9.8%	-0.40
		67	-17.24	0.0189	8.8%	0.34	20.0%	0.83	-10.2%	-0.40
	2.02	17	-7.95	0.1600	8.8%	0.34	10.2%	0.37	-4.6%	-0.21
		34	-9.99	0.1000	8.8%	0.34	16.9%	0.68	-8.5%	-0.35
		67	-12.65	0.0543	8.8%	0.34	19.2%	0.79	-9.6%	-0.40
	5.70	17	-14.13	0.0387	8.8%	0.34	-35.7%	-1.46	16.6%	0.68
		34	-9.63	0.1090	8.8%	0.34	-24.3%	-1.11	12.1%	0.48
		67	-7.33	0.1850	8.8%	0.34	-5.6%	-0.36	3.1%	0.10

Tableau 6.3.d'

ANNEXE II

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Etude du rapport $\sigma_{HH}^{\circ} / \sigma_{VV}^{\circ}$

Les tableaux 6.4 donnent les valeurs du rapport $\sigma_{HH}^{\circ} / \sigma_{VV}^{\circ}$, exprimées en puissance.

Le tableau 6.4.a correspond à la bande S

Le tableau 6.4.b correspond à la bande C

Le tableau 6.4.c correspond à la bande X

Les tableaux 6.5 (respectivement 6.6 et 6.7) donnent la sensibilité de ce rapport à une variation relative des paramètres de surface, en bande S (resp. C et X). Ces résultats sont exprimés en pourcentage. Ils correspondent à une variation de la puissance.

Dans chaque bande de fréquence, quatre angles d'incidence ont été étudiés : 20°, 30°, 35° et 40°.

VALEURS DU RAPPORT $\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$				FREQUENCE: 2.25 GHZ		
W	ks	kL	$\theta=20^{\circ}$	$\theta=30^{\circ}$	$\theta=35^{\circ}$	$\theta=40^{\circ}$
0.1	0.08	4	1.52	1.69	1.82	2.07
		8	1.53	1.69	1.72	1.79
	0.29	4	1.50	1.71	1.90	2.26
		8	1.50	1.71	1.90	2.26
		17	1.50	1.71	1.90	2.26
	0.50	4	1.50	1.71	1.90	2.26
8		1.50	1.71	1.90	2.26	
17		1.50	1.71	1.90	2.26	
1.40	4	1.50	1.71	1.90	2.26	
	8	1.50	1.71	1.90	2.26	
	17	1.50	1.71	1.90	2.26	
0.3	0.08	4	1.50	1.55	1.55	1.60
		8	1.52	1.57	1.53	1.50
	0.29	4	1.47	1.53	1.57	1.67
		8	1.47	1.53	1.57	1.67
		17	1.47	1.53	1.57	1.67
	0.50	4	1.47	1.53	1.57	1.67
8		1.47	1.53	1.57	1.67	
17		1.47	1.53	1.57	1.67	
1.40	4	1.47	1.53	1.57	1.67	
	8	1.47	1.53	1.57	1.67	
	17	1.47	1.53	1.57	1.67	
0.5	0.08	4	1.51	1.50	1.44	1.40
		8	1.54	1.54	1.46	1.37
	0.29	4	1.48	1.46	1.43	1.43
		8	1.48	1.46	1.43	1.43
		17	1.48	1.46	1.43	1.43
	0.50	4	1.48	1.46	1.43	1.43
8		1.48	1.46	1.43	1.43	
17		1.48	1.46	1.43	1.43	
1.40	4	1.48	1.46	1.43	1.43	
	8	1.48	1.46	1.43	1.43	
	17	1.48	1.46	1.43	1.43	

Tableau 6.4.a

VALEURS DU RAPPORT $\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$			FREQUENCE: 5.35 GHz			
W	ks	kL	$\theta=20^{\circ}$	$\theta=30^{\circ}$	$\theta=35^{\circ}$	$\theta=40^{\circ}$
0.1	0.2	10	1.51	1.71	1.89	2.22
		20	1.51	1.71	1.86	2.16
		40	1.52	1.70	1.80	2.00
	0.7	10	1.50	1.72	1.91	2.28
		20	1.50	1.72	1.91	2.28
		40	1.51	1.72	1.91	2.28
	1.2	10	1.50	1.72	1.91	2.28
		20	1.50	1.72	1.91	2.28
		40	1.51	1.72	1.91	2.28
3.4	10	1.50	1.72	1.91	2.28	
	20	1.50	1.72	1.91	2.28	
	40	1.50	1.72	1.91	2.28	
0.3	0.2	10	1.48	1.54	1.58	1.67
		20	1.48	1.54	1.57	1.65
		40	1.50	1.55	1.55	1.58
	0.7	10	1.47	1.53	1.58	1.69
		20	1.47	1.53	1.58	1.69
		40	1.48	1.53	1.58	1.69
	1.2	10	1.47	1.53	1.58	1.69
		20	1.47	1.53	1.58	1.69
		40	1.47	1.53	1.58	1.69
3.4	10	1.47	1.53	1.58	1.69	
	20	1.47	1.53	1.58	1.69	
	40	1.47	1.53	1.58	1.69	
0.5	0.2	10	1.49	1.47	1.44	1.43
		20	1.50	1.48	1.44	1.42
		40	1.52	1.51	1.45	1.40
	0.7	10	1.48	1.46	1.44	1.44
		20	1.48	1.46	1.44	1.44
		40	1.49	1.46	1.44	1.44
	1.2	10	1.48	1.46	1.44	1.44
		20	1.48	1.46	1.44	1.44
		40	1.48	1.46	1.44	1.44
3.4	10	1.48	1.46	1.44	1.44	
	20	1.48	1.46	1.44	1.44	
	40	1.48	1.46	1.44	1.44	

Tableau 6.4.b

VALEURS DU RAPPORT $\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$

FREQUENCE: 9.0 GHz

W	ks	kL	$\theta=20^{\circ}$	$\theta=30^{\circ}$	$\theta=35^{\circ}$	$\theta=40^{\circ}$
0.1	0.34	17	1.51	1.72	1.95	2.29
		34	1.51	1.72	1.91	2.26
		67	1.52	1.72	1.94	2.19
	1.18	17	1.51	1.73	1.93	2.32
		34	1.51	1.73	1.93	2.32
		67	1.51	1.73	1.93	2.32
	2.02	17	1.51	1.73	1.93	2.32
		34	1.51	1.73	1.93	2.32
		67	1.51	1.73	1.93	2.32
5.70	17	1.51	1.73	1.93	2.32	
	34	1.51	1.73	1.93	2.32	
	67	1.51	1.73	1.93	2.32	
0.3	0.34	17	1.47	1.55	1.61	1.72
		34	1.47	1.55	1.60	1.70
		67	1.48	1.55	1.61	1.68
	1.18	17	1.47	1.54	1.60	1.73
		34	1.47	1.54	1.60	1.73
		67	1.47	1.54	1.60	1.73
	2.02	17	1.47	1.54	1.60	1.73
		34	1.47	1.54	1.60	1.73
		67	1.47	1.54	1.60	1.73
5.70	17	1.47	1.54	1.60	1.73	
	34	1.47	1.54	1.60	1.73	
	67	1.47	1.54	1.60	1.73	
0.5	0.34	17	1.48	1.47	1.45	1.45
		34	1.48	1.48	1.45	1.45
		67	1.49	1.49	1.45	1.44
	1.18	17	1.48	1.47	1.45	1.46
		34	1.48	1.47	1.45	1.46
		67	1.48	1.46	1.45	1.46
	2.02	17	1.48	1.47	1.45	1.46
		34	1.48	1.47	1.45	1.46
		67	1.48	1.46	1.45	1.46
5.70	17	1.48	1.46	1.45	1.46	
	34	1.48	1.46	1.45	1.46	
	67	1.48	1.46	1.45	1.46	

Tableau 6.4.c

FREQUENCY: 2.25 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 20°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.08	4	1.52	-0.20%	-0.52%	0.08%
		8	1.53	-0.19%	-1.01%	0.22%
	0.29	4	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
		8	1.50	-0.23%	0.00%	-0.01%
		17	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
	0.50	4	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
		8	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
		17	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
		8	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
		17	1.50	-0.23%	0.00%	0.00%
	0.3	0.08	4	1.50	0.09%	-0.75%
8			1.52	0.17%	-1.45%	0.32%
0.29		4	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
		8	1.47	0.00%	-0.01%	-0.01%
		17	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
0.50		4	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
		8	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
		17	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
1.40		4	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
		8	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
		17	1.47	0.00%	0.00%	0.00%
0.5		0.08	4	1.51	0.30%	-0.96%
	8		1.54	0.36%	-1.86%	0.41%
	0.29	4	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
		8	1.48	0.22%	-0.01%	-0.01%
		17	1.48	0.22%	-0.01%	0.00%
	0.50	4	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
		8	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
		17	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
		8	1.48	0.22%	0.00%	0.00%
		17	1.48	0.22%	0.00%	0.00%

Tableau 6.5.a

FREQUENCY: 2.25 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.08	4	1.69	-0.65%	0.42%	-0.08%
		8	1.69	-0.53%	1.11%	-0.26%
	0.29	4	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		8	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		17	1.71	-0.75%	0.01%	0.00%
	0.50	4	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		8	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		17	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		8	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
		17	1.71	-0.75%	0.00%	0.00%
	0.3	0.08	4	1.55	-0.89%	-0.53%
8			1.57	-0.53%	-1.39%	0.33%
0.29		4	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		8	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		17	1.53	-1.18%	0.01%	0.00%
0.50		4	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		8	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		17	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
1.40		4	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		8	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
		17	1.53	-1.18%	0.00%	0.00%
0.5		0.08	4	1.50	-0.28%	-1.23%
	8		1.54	-0.03%	-3.19%	0.75%
	0.29	4	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
		8	1.46	-0.48%	-0.01%	0.00%
		17	1.46	-0.48%	-0.02%	0.00%
	0.50	4	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
		8	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
		17	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
		8	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%
		17	1.46	-0.49%	0.00%	0.00%

Tableau 6.5.b

FREQUENCY: 2.25 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.08	4	1.82	-1.03%	2.21%	-0.47%
		8	1.71	-0.77%	6.88%	-1.63%
	0.29	4	1.90	-1.20%	0.01%	0.00%
		8	1.90	-1.20%	0.01%	0.00%
		17	1.90	-1.20%	0.04%	-0.01%
	0.50	4	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
		8	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
		17	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
		8	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
		17	1.90	-1.20%	0.00%	0.00%
	0.3	0.08	4	1.55	-1.78%	0.59%
8			1.53	-1.17%	1.76%	0.42%
0.29		4	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		8	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		17	1.57	-2.21%	0.01%	0.00%
0.50		4	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		8	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		17	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
1.40		4	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		8	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
		17	1.57	-2.21%	0.00%	0.00%
0.5		0.08	4	1.44	-0.84%	-0.43%
	8		1.46	-0.47%	-1.27%	0.30%
	0.29	4	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		17	1.43	-1.11%	-0.01%	0.00%
	0.50	4	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		17	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%
		17	1.43	-1.12%	0.00%	0.00%

Tableau 6.5.c

FREQUENCY: 2.25 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.08	4	2.07	-1.61%	4.68%	-1.03%
		8	1.79	-1.12%	16.79%	-4.00%
	0.29	4	2.26	-1.88%	0.02%	0.00%
		8	2.26	-1.88%	0.03%	-0.01%
		17	2.26	-1.88%	0.07%	-0.02%
	0.50	4	2.26	-1.88%	0.00%	0.00%
		8	2.26	-1.88%	0.00%	0.00%
		17	2.26	-1.88%	0.00%	0.00%
	1.40	4	2.26	-1.88%	0.00%	0.00%
		8	2.26	-1.88%	-0.01%	0.00%
		17	2.26	-1.88%	0.00%	0.00%
	0.3	0.08	4	1.60	-3.09%	2.22%
8			1.50	-2.14%	7.41%	-1.76%
0.29		4	1.67	-3.64%	0.01%	0.00%
		8	1.67	-3.63%	0.01%	0.00%
		17	1.67	-3.63%	0.03%	-0.01%
0.50		4	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
		8	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
		17	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
1.40		4	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
		8	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
		17	1.67	-3.64%	0.00%	0.00%
0.5		0.08	4	1.40	-1.63%	0.89%
	8		1.37	-1.13%	2.85%	-0.68%
	0.29	4	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.97%	0.01%	0.00%
		17	1.43	-1.96%	0.01%	0.00%
	0.50	4	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
		17	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
	1.40	4	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
		8	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%
		17	1.43	-1.97%	0.00%	0.00%

Tableau 6.5.d

FREQUENCY: 5.35 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 20°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\% W$	$\pm 10\% ks$	$\pm 10\% kL$	
0.1	0.2	10	1.51	-0.21%	-0.14%	0.03%	
		20	1.51	-0.21%	-0.28%	0.07%	
		40	1.52	-0.20%	-0.61%	0.21%	
	0.7	10	1.50	-0.22%	0.00%	0.00%	
		20	1.50	-0.22%	-0.02%	0.00%	
		40	1.51	-0.21%	-0.09%	0.36%	
	1.2	10	1.50	-0.22%	0.00%	0.00%	
		20	1.50	-0.22%	0.01%	0.00%	
		40	1.51	-0.22%	-0.03%	0.09%	
3.4	10	1.50	-0.22%	0.00%	0.00%		
	20	1.50	-0.22%	0.00%	0.00%		
	40	1.50	-0.22%	0.00%	0.00%		
0.3	0.2	10	1.48	-0.01%	-0.20%	0.04%	
		20	1.48	0.02%	-0.40%	0.09%	
		40	1.50	0.07%	-0.86%	0.29%	
	0.7	10	1.47	-0.03%	0.00%	0.00%	
		20	1.47	-0.03%	-0.02%	0.00%	
		40	1.48	0.00%	-0.12%	0.51%	
	1.2	10	1.47	-0.03%	0.00%	0.00%	
		20	1.47	-0.03%	0.02%	-0.03%	
		40	1.47	-0.02%	-0.04%	0.13%	
	3.4	10	1.47	-0.03%	0.00%	0.00%	
		20	1.47	-0.04%	0.00%	0.00%	
		40	1.47	-0.03%	0.00%	0.00%	
	0.5	0.2	10	1.49	0.23%	-0.25%	0.06%
			20	1.50	0.25%	-0.51%	0.12%
			40	1.52	0.30%	-1.11%	0.30%
0.7		10	1.48	0.21%	0.00%	0.00%	
		20	1.48	0.21%	-0.03%	0.00%	
		40	1.49	0.24%	-0.16%	0.65%	
1.2		10	1.48	0.21%	0.00%	0.00%	
		20	1.48	0.21%	0.02%	-0.01%	
		40	1.48	0.22%	-0.05%	0.17%	
3.4		10	1.48	0.21%	0.00%	0.00%	
		20	1.48	0.21%	0.00%	0.00%	
		40	1.48	0.21%	0.00%	0.00%	

Tableau 6.6.a

FREQUENCY: 5.35 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.2	10	1.71	-0.68%	0.11%	-0.03%
		20	1.71	-0.66%	0.25%	-0.06%
		40	1.70	-0.59%	0.62%	-0.13%
	0.7	10	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%
		20	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%
		40	1.72	-0.71%	0.01%	0.00%
	1.2	10	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%
		20	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%
		40	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%
3.4	10	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%	
	20	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%	
	40	1.72	-0.71%	0.00%	0.00%	
0.3	0.2	10	1.54	-1.14%	-0.12%	0.03%
		20	1.54	-1.05%	-0.27%	0.06%
		40	1.55	-0.84%	-0.65%	0.14%
	0.7	10	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%
		20	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%
		40	1.53	-1.23%	-0.01%	0.00%
	1.2	10	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%
		20	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%
		40	1.53	-1.22%	0.01%	0.00%
3.4	10	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%	
	20	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%	
	40	1.53	-1.23%	0.00%	0.00%	
0.5	0.2	10	1.47	-0.45%	-0.31%	0.07%
		20	1.48	-0.39%	-0.66%	0.16%
		40	1.51	-0.24%	-1.62%	0.35%
	0.7	10	1.46	-0.51%	0.00%	0.00%
		20	1.46	-0.51%	0.00%	0.00%
		40	1.46	-0.52%	-0.03%	0.00%
	1.2	10	1.46	-0.51%	0.00%	0.01%
		20	1.46	-0.52%	0.01%	0.00%
		40	1.46	-0.51%	0.01%	0.00%
3.4	10	1.46	-0.52%	0.01%	0.01%	
	20	1.46	-0.52%	0.00%	0.00%	
	40	1.46	-0.52%	0.00%	0.00%	

Tableau 6.6.b

FREQUENCY: 5.35 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\% W$	$\pm 10\% ks$	$\pm 10\% kL$
		10	1.89	-1.09%	0.55%	-0.13%
	0.2	20	1.86	-1.04%	1.24%	-0.31%
		40	1.80	-0.91%	3.35%	-0.83%
		10	1.91	-1.13%	0.01%	0.00%
0.1	0.7	20	1.91	-1.13%	0.01%	-0.01%
		40	1.91	-1.13%	0.02%	0.00%
		10	1.91	-1.13%	0.00%	0.00%
	1.2	20	1.91	-1.13%	0.00%	0.00%
		40	1.91	-1.13%	0.01%	0.01%
		10	1.91	-1.13%	0.00%	0.00%
	3.4	20	1.91	-1.13%	0.00%	0.00%
		40	1.91	-1.13%	0.00%	0.00%
		10	1.58	-2.14%	0.17%	-0.04%
	0.2	20	1.57	-2.00%	0.38%	-0.09%
		40	1.55	-1.66%	1.00%	-0.25%
		10	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
0.3	0.7	20	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
		40	1.58	-2.26%	0.01%	0.00%
		10	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
	1.2	20	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
		40	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
		10	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
	3.4	20	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
		40	1.58	-2.26%	0.00%	0.00%
		10	1.44	-1.08%	-0.09%	0.02%
	0.2	20	1.44	-0.99%	-0.20%	0.05%
		40	1.45	-0.78%	-0.52%	0.13%
		10	1.44	-1.16%	0.00%	0.00%
0.5	0.7	20	1.44	-1.16%	0.00%	0.00%
		40	1.44	-1.16%	0.00%	0.00%
		10	1.44	-1.17%	0.00%	0.00%
	1.2	20	1.44	-1.17%	0.00%	0.00%
		40	1.44	-1.16%	0.00%	0.00%
		10	1.44	-1.17%	0.00%	0.00%
	3.4	20	1.44	-1.17%	0.00%	0.00%
		40	1.44	-1.17%	0.00%	0.00%

Tableau 6.6.c

FREQUENCY: 5.35 GHZ

ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
	0.2	10	2.22	-1.71%	1.12%	-0.27%
		20	2.16	-1.63%	3.02%	-0.63%
		40	2.00	-1.40%	7.61%	-1.82%
0.1	0.7	10	2.28	-1.78%	0.00%	0.00%
		20	2.28	-1.78%	0.00%	0.00%
		40	2.28	-1.78%	0.03%	-0.01%
	1.2	10	2.28	-1.78%	0.00%	0.00%
		20	2.28	-1.78%	0.02%	0.01%
		40	2.28	-1.78%	0.12%	0.00%
	3.4	10	2.28	-1.78%	0.00%	0.00%
		20	2.28	-1.78%	0.00%	0.00%
		40	2.28	-1.78%	0.00%	-0.01%
	0.2	10	1.67	-3.54%	0.57%	-0.14%
		20	1.65	-3.35%	1.52%	-0.32%
		40	1.58	-2.86%	3.69%	-0.88%
0.3	0.7	10	1.69	-3.70%	0.00%	0.00%
		20	1.69	-3.70%	0.01%	0.00%
		40	1.69	-3.70%	0.01%	-0.01%
	1.2	10	1.69	-3.70%	0.00%	0.00%
		20	1.69	-3.70%	0.01%	0.01%
		40	1.69	-3.70%	0.06%	0.00%
	3.4	10	1.69	-3.70%	0.00%	0.00%
		20	1.69	-3.70%	0.00%	0.00%
		40	1.69	-3.70%	0.00%	0.00%
	0.2	10	1.43	-1.94%	0.24%	-0.06%
		20	1.42	-1.83%	0.64%	-0.13%
		40	1.40	-1.54%	1.52%	-0.36%
0.5	0.7	10	1.44	-2.04%	0.00%	0.00%
		20	1.44	-2.04%	0.01%	0.00%
		40	1.44	-2.04%	0.01%	0.00%
	1.2	10	1.44	-2.04%	0.00%	0.00%
		20	1.44	-2.04%	0.01%	0.00%
		40	1.44	-2.04%	0.03%	0.00%
	3.4	10	1.44	-2.04%	0.00%	0.00%
		20	1.44	-2.04%	0.00%	0.00%
		40	1.44	-2.04%	0.00%	0.00%

Tableau 6.6.d

FREQUENCY: 9.0 GHZ

ANGLE D'INCIDENCE: 20°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.34	17	1.51	-0.20%	-0.20%	0.02%
		34	1.51	-0.20%	-0.16%	0.03%
		67	1.52	-0.20%	-0.26%	0.03%
	1.18	17	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%
		34	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%
		67	1.51	-0.21%	0.00%	0.01%
	2.02	17	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%
		34	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%
		67	1.51	-0.12%	-0.01%	0.00%
5.70	17	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%	
	34	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%	
	67	1.51	-0.21%	0.00%	0.00%	
0.3	0.34	17	1.47	-0.08%	-0.28%	0.02%
		34	1.47	-0.07%	-0.22%	0.04%
		67	1.48	-0.05%	-0.36%	0.04%
	1.18	17	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
		34	1.47	-0.10%	0.00%	0.01%
		67	1.47	-0.10%	0.00%	0.02%
	2.02	17	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
		34	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
		67	1.47	-0.10%	-0.01%	0.00%
	5.70	17	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
		34	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
		67	1.47	-0.10%	0.00%	0.00%
0.5	0.34	17	1.48	0.22%	-0.37%	0.03%
		34	1.48	0.23%	-0.29%	0.05%
		67	1.49	0.25%	-0.47%	0.05%
	1.18	17	1.48	0.21%	-0.01%	0.00%
		34	1.48	0.21%	0.00%	0.01%
		67	1.48	0.21%	0.00%	0.02%
	2.02	17	1.48	0.21%	0.00%	0.00%
		34	1.48	0.21%	0.00%	0.00%
		67	1.48	0.21%	-0.01%	0.00%
	5.70	17	1.48	0.21%	0.00%	0.00%
		34	1.48	0.21%	0.00%	0.00%
		67	1.48	0.21%	0.00%	0.00%

Tableau 6.7.a

FREQUENCY: 9.0 GHZ

ANGLE D'INCIDENCE: 30°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.34	17	1.72	-0.62%	0.07%	-0.02%
		34	1.72	-0.61%	0.14%	-0.03%
		67	1.72	-0.59%	0.30%	-0.07%
	1.18	17	1.73	-0.64%	-0.01%	0.00%
		34	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%
		67	1.73	-0.64%	-0.02%	-0.02%
	2.02	17	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%
		34	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%
		67	1.73	-0.64%	0.00%	-0.01%
5.70	17	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%	
	34	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%	
	67	1.73	-0.64%	0.00%	0.00%	
0.3	0.34	17	1.55	-1.30%	-0.05%	0.01%
		34	1.55	-1.25%	-0.10%	0.02%
		67	1.55	-1.16%	-0.22%	0.05%
	1.18	17	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%
		34	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%
		67	1.54	-1.35%	0.01%	0.02%
	2.02	17	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%
		34	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%
		67	1.54	-1.35%	0.00%	0.01%
5.70	17	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%	
	34	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%	
	67	1.54	-1.34%	0.00%	0.00%	
0.5	0.34	17	1.47	-0.53%	-0.16%	0.04%
		34	1.48	-0.49%	-0.31%	0.07%
		67	1.49	-0.43%	-0.66%	0.15%
	1.18	17	1.47	-0.56%	0.01%	0.00%
		34	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%
		67	1.46	-0.57%	0.04%	0.05%
	2.02	17	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%
		34	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%
		67	1.46	-0.57%	0.00%	0.03%
5.70	17	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%	
	34	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%	
	67	1.47	-0.56%	0.00%	0.00%	

Tableau 6.7.b

FREQUENCY: 9.0 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 35°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.34	17	1.95	-1.04%	-0.06%	-0.26%
		34	1.91	-0.97%	0.62%	-0.10%
		67	1.94	-1.02%	0.46%	-0.49%
	1.18	17	1.93	-1.01%	0.03%	-0.06%
		34	1.93	-1.01%	-0.01%	0.00%
		67	1.93	-1.01%	-0.59%	0.04%
	2.02	17	1.93	-1.01%	0.00%	0.00%
		34	1.93	-1.01%	-0.01%	0.00%
		67	1.93	-1.01%	0.01%	-0.01%
5.70	17	1.93	-1.01%	0.00%	0.00%	
	34	1.93	-1.01%	0.00%	0.00%	
	67	1.93	-1.01%	0.00%	0.00%	
0.3	0.34	17	1.61	-2.51%	-0.02%	-0.10%
		34	1.60	-2.28%	0.23%	-0.04%
		67	1.61	-2.45%	0.17%	-0.18%
	1.18	17	1.60	-2.41%	0.01%	-0.02%
		34	1.60	-2.41%	-0.01%	0.00%
		67	1.60	-2.41%	-0.22%	0.01%
	2.02	17	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%
		34	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%
		67	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%
5.70	17	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%	
	34	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%	
	67	1.60	-2.41%	0.00%	0.00%	
0.5	0.34	17	1.45	-1.31%	0.01%	0.03%
		34	1.45	-1.15%	-0.06%	0.01%
		67	1.45	-1.27%	-0.05%	0.05%
	1.18	17	1.45	-1.24%	0.00%	0.01%
		34	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%
		67	1.45	-1.24%	0.06%	0.00%
	2.02	17	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%
		34	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%
		67	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%
5.70	17	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%	
	34	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%	
	67	1.45	-1.24%	0.00%	0.00%	

Tableau 6.7.c

FREQUENCY: 9.0 GHz

ANGLE D'INCIDENCE: 40°

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}HH/\sigma^{\circ}VV$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.34	17	2.29	-1.55%	0.57%	-0.13%
		34	2.26	-1.52%	1.25%	-0.19%
		67	2.19	-1.44%	3.01%	-0.69%
	1.18	17	2.32	-1.58%	0.01%	0.00%
		34	2.32	-1.58%	0.01%	0.01%
		67	2.32	-1.57%	0.06%	-0.09%
	2.02	17	2.32	-1.58%	0.00%	0.01%
		34	2.32	-1.58%	0.01%	-0.08%
		67	2.32	-1.58%	0.02%	0.00%
5.70	17	2.32	-1.58%	0.00%	0.01%	
	34	2.32	-1.58%	0.00%	0.01%	
	67	2.32	-1.58%	0.00%	0.01%	
0.3	0.34	17	1.72	-3.82%	0.31%	-0.07%
		34	1.70	-3.73%	0.68%	-0.10%
		67	1.68	-3.53%	1.61%	-0.37%
	1.18	17	1.73	-3.91%	0.01%	0.00%
		34	1.73	-3.90%	0.01%	0.00%
		67	1.73	-3.90%	0.03%	-0.05%
	2.02	17	1.73	-3.91%	0.00%	0.01%
		34	1.73	-3.91%	0.00%	-0.04%
		67	1.73	-3.91%	0.01%	0.00%
5.70	17	1.73	-3.91%	0.00%	0.01%	
	34	1.73	-3.91%	0.00%	0.01%	
	67	1.73	-3.91%	0.00%	0.01%	
0.5	0.34	17	1.45	-2.11%	0.14%	-0.03%
		34	1.45	-2.05%	0.30%	-0.05%
		67	1.44	-1.93%	0.71%	-0.16%
	1.18	17	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%
		34	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%
		67	1.46	-2.16%	0.01%	-0.02%
	2.02	17	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%
		34	1.46	-2.16%	0.00%	-0.02%
		67	1.46	-2.16%	0.01%	0.00%
5.70	17	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%	
	34	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%	
	67	1.46	-2.16%	0.00%	0.00%	

Tableau 6.7.d

ANNEXE III

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Etude du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$

Les tableaux 6.8, 6.9 et 6.10 donnent, d'une part, les valeurs du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$, exprimées en puissance et, d'autre part, la sensibilité de ce rapport à une variation relative des paramètres de surface.

Le tableau 6.8 correspond à la bande S

Le tableau 6.9 correspond à la bande C

Le tableau 6.10 correspond à la bande X

FREQUENCE:2.25 GHz

W	ks	kL	$\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.08	4	7.20	0.0%	-11.6%	-5.5%
		8	9.50	0.5%	-24.6%	-3.2%
	0.29	4	5.73	0.1%	-1.7%	-3.6%
		8	6.73	0.1%	-0.7%	-1.5%
		17	6.95	0.1%	-0.4%	-0.4%
	0.50	4	4.91	0.1%	-4.8%	-4.9%
		8	6.24	0.1%	-2.4%	-2.8%
		17	6.93	0.1%	-0.8%	-0.8%
	1.40	4	1.19	0.1%	-24.1%	9.8%
		8	2.44	0.1%	-20.5%	10.2%
		17	4.61	0.1%	-11.3%	9.9%
	0.3	0.08	4	7.64	0.0%	-9.2%
8			11.50	0.9%	-24.6%	-7.0%
0.29		4	5.91	0.4%	-1.6%	-3.6%
		8	6.93	0.4%	-0.7%	-1.5%
		17	7.27	0.4%	-0.4%	-0.4%
0.50		4	5.03	0.4%	-4.8%	-4.9%
		8	6.44	0.4%	-2.4%	-2.8%
		17	7.19	0.4%	-0.8%	-0.8%
1.40		4	1.23	0.4%	-24.1%	9.8%
		8	2.52	0.4%	-20.5%	10.2%
		17	4.77	0.4%	-11.3%	9.9%
0.5		0.08	4	7.61	0.0%	-8.0%
	8		10.71	0.4%	-21.6%	-6.1%
	0.29	4	6.03	0.3%	-1.6%	-3.6%
		8	7.05	0.3%	-0.7%	-1.5%
		17	7.45	0.3%	-0.4%	-0.4%
	0.50	4	5.13	0.3%	-4.8%	-4.9%
		8	6.57	0.3%	-2.4%	-2.8%
		17	7.29	0.3%	-0.8%	-0.8%
	1.40	4	1.26	0.3%	-24.1%	9.8%
		8	2.57	0.3%	-20.5%	10.2%
		17	4.87	0.3%	-11.3%	9.9%

Tableau 6.8

FREQUENCY: 5.35 GHz

W	ks	kL	$\sigma^\circ(20^\circ)/\sigma^\circ(40^\circ)$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.2	10	7.50	0.1%	-3.2%	1.5%
		20	8.83	0.0%	-8.5%	1.8%
		40	8.67	-0.2%	-17.6%	3.9%
	0.7	10	5.99	0.1%	-3.9%	2.9%
		20	6.81	0.1%	-1.3%	1.1%
		40	7.00	0.1%	0.0%	1.7%
	1.2	10	3.90	0.1%	-3.9%	2.9%
		20	5.73	0.1%	-6.5%	3.8%
		40	6.67	0.1%	-2.1%	0.7%
3.4	10	0.43	0.1%	-12.4%	4.7%	
	20	0.76	0.1%	-24.7%	11.3%	
	40	1.86	0.1%	-26.8%	13.4%	
0.2	0.2	10	7.63	0.4%	-2.7%	1.4%
		20	8.27	0.2%	-6.7%	1.6%
		40	10.00	-0.3%	-13.9%	3.1%
	0.7	10	6.16	0.5%	-3.9%	3.1%
		20	7.01	0.5%	-1.3%	1.1%
		40	7.19	0.5%	0.0%	-1.6%
	1.2	10	4.01	0.5%	-13.7%	6.6%
		20	5.92	0.5%	-6.5%	3.8%
		40	6.87	0.5%	-2.0%	0.7%
3.4	10	0.45	0.5%	-12.4%	4.7%	
	20	0.78	0.5%	-24.7%	11.3%	
	40	1.92	0.5%	-26.8%	13.4%	
0.3	0.2	10	7.67	0.2%	-2.4%	1.3%
		20	8.42	0.1%	-5.9%	1.4%
		40	9.80	-0.2%	-12.0%	2.6%
	0.7	10	6.30	0.3%	-3.9%	3.1%
		20	7.18	0.3%	-1.3%	1.1%
		40	7.35	0.3%	0.0%	1.5%
	1.2	10	4.11	0.3%	-13.7%	6.6%
		20	6.04	0.3%	-6.5%	3.8%
		40	7.04	0.3%	-2.0%	0.8%
3.4	10	0.46	0.3%	-12.4%	4.7%	
	20	0.80	0.3%	-24.7%	11.3%	
	40	1.96	0.3%	-26.8%	13.4%	

Tableau 6.9

FREQUENCY: 9.0 GHz

W	ks	kL	$\sigma^\circ(20^\circ)/\sigma^\circ(40^\circ)$	$\pm 10\%$ W	$\pm 10\%$ ks	$\pm 10\%$ kL
0.1	0.34	17	7.29	0.2%	-1.0%	0.8%
		34	7.33	0.1%	-3.3%	0.5%
		67	8.80	0.1%	-7.8%	2.0%
	1.18	17	5.44	0.2%	-7.6%	4.5%
		34	6.60	0.2%	-2.7%	1.5%
		67	7.08	0.2%	-0.9%	0.7%
	2.02	17	2.42	0.2%	-23.1%	11.4%
		34	4.61	0.2%	-12.9%	7.1%
		67	6.23	0.2%	-4.9%	2.6%
5.70	17	0.36	0.2%	-4.3%	1.4%	
	34	0.46	0.2%	-15.3%	6.5%	
	67	0.89	0.2%	-26.4%	12.5%	
0.3	0.34	17	7.47	0.3%	-0.8%	0.7%
		34	7.69	0.1%	-2.9%	0.5%
		67	8.33	0.5%	-6.5%	1.7%
	1.18	17	5.59	0.5%	-7.6%	4.5%
		34	6.82	0.5%	-2.6%	1.6%
		67	7.26	0.5%	-0.9%	0.7%
	2.02	17	2.51	0.5%	-23.1%	11.4%
		34	4.76	0.5%	-12.9%	7.1%
		67	6.44	0.5%	-4.9%	2.6%
5.70	17	0.37	0.5%	-4.3%	1.4%	
	34	0.48	0.5%	-15.3%	6.5%	
	67	0.92	0.5%	-26.4%	12.5%	
0.5	0.34	17	7.63	0.3%	-0.7%	0.8%
		34	8.00	0.2%	-2.5%	0.5%
		67	8.45	0.1%	-5.7%	1.5%
	1.18	17	5.70	0.3%	-7.6%	4.5%
		34	6.96	0.3%	-2.6%	1.6%
		67	7.42	0.3%	-0.9%	0.7%
	2.02	17	2.55	0.3%	-23.1%	11.4%
		34	3.04	0.3%	-12.9%	7.1%
		67	6.59	0.3%	-4.9%	2.6%
5.70	17	0.38	0.3%	-4.3%	1.4%	
	34	0.49	0.3%	-15.3%	6.5%	
	67	1.06	0.3%	-26.4%	12.5%	

Tableau 6.10

ANNEXE IV

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Etude de la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion à une variation de l'angle d'incidence

Les tableaux suivants donnent la sensibilité de la section efficace de rétrodiffusion , exprimée en dB, à une variation de $\pm 3^\circ$ de l'angle d'incidence.

Tableau 7.1	Bande S	Polarisation HH
Tableau 7.2	Bande S	Polarisation VV
Tableau 7.3	Bande C	Polarisation HH
Tableau 7.4	Bande C	Polarisation VV
Tableau 7.5	Bande X	Polarisation HH
Tableau 7.6	Bande X	Polarisation VV

FREQUENCY: 2.25 GHz			POLARISATION: HH				
W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.08	4	-1.70	-1.45	-1.26	-1.08	-0.89
		8	-1.96	-1.72	-1.55	-1.39	-1.16
		17	-1.76	-1.41	-1.16	-0.97	-0.81
0.1	0.29	4	-1.50	-1.25	-1.05	-0.89	-0.77
		8	-1.69	-1.37	-1.13	-0.95	-0.81
		17	-1.76	-1.41	-1.16	-0.97	-0.81
0.1	0.50	4	-1.33	-1.13	-0.96	-0.83	-0.72
		8	-1.60	-1.31	-1.10	-0.93	-0.79
		17	-1.73	-1.39	-1.15	-0.96	-0.82
0.1	1.40	4	-0.13	-0.11	-0.11	-0.11	-0.12
		8	-0.64	-0.61	-0.57	-0.53	-0.50
		17	-1.23	-1.08	-0.95	-0.83	-0.73
0.3	0.08	4	-1.69	-1.44	-1.25	-1.08	-0.92
		8	-1.95	-1.68	-1.49	-1.31	-1.09
		17	-1.77	-1.42	-1.19	-1.01	-0.87
0.3	0.29	4	-1.50	-1.26	-1.07	-0.93	-0.83
		8	-1.69	-1.38	-1.16	-0.99	-0.87
		17	-1.77	-1.42	-1.19	-1.01	-0.87
0.3	0.50	4	-1.34	-1.14	-0.98	-0.87	-0.78
		8	-1.60	-1.32	-1.12	-0.97	-0.86
		17	-1.74	-1.41	-1.17	-1.00	-0.88
0.3	1.40	4	-0.13	-0.12	-0.13	-0.15	-0.18
		8	-0.64	-0.62	-0.59	-0.57	-0.56
		17	-1.24	-1.09	-0.97	-0.87	-0.79
0.5	0.08	4	-1.68	-1.44	-1.24	-1.09	-0.95
		8	-1.93	-1.66	-1.46	-1.28	-1.09
		17	-1.76	-1.43	-1.20	-1.04	-0.92
0.5	0.29	4	-1.50	-1.26	-1.09	-0.96	-0.87
		8	-1.69	-1.38	-1.17	-1.02	-0.91
		17	-1.76	-1.43	-1.20	-1.04	-0.92
0.5	0.50	4	-1.34	-1.14	-1.00	-0.89	-0.82
		8	-1.60	-1.33	-1.14	-1.00	-0.90
		17	-1.73	-1.41	-1.19	-1.03	-0.92
0.5	1.40	4	-0.13	-0.13	-0.14	-0.18	-0.23
		8	-0.64	-0.62	-0.61	-0.60	-0.61
		17	-1.24	-1.10	-0.99	-0.90	-0.83

Tableau 7.1

FREQUENCY: 2.25 GHz

POLARISATION: VV

W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
	0.08	4	-1.85	-1.58	-1.42	-1.37	-1.44
		8	-2.13	-1.81	-1.60	-1.48	-1.48
		17	-1.66	-1.42	-1.30	-1.30	-1.43
0.1	0.29	8	-1.85	-1.54	-1.38	-1.36	-1.47
		17	-1.92	-1.58	-1.41	-1.38	-1.48
		4	-1.49	-1.29	-1.21	-1.23	-1.38
0.50	0.50	8	-1.76	-1.48	-1.35	-1.34	-1.46
		17	-1.89	-1.56	-1.40	-1.37	-1.48
		4	-0.28	-0.28	-0.35	-0.52	-0.78
1.40	1.40	8	-0.80	-0.78	-0.82	-0.94	-1.16
		17	-1.39	-1.25	-1.20	-1.24	-1.39
		4	-1.77	-1.46	-1.25	-1.13	-1.11
0.08	0.08	8	-2.05	-1.70	-1.43	-1.24	-1.14
		4	-1.58	-1.30	-1.13	-1.07	-1.09
		8	-1.77	-1.42	-1.21	-1.13	-1.14
0.3	0.29	17	-1.84	-1.46	-1.24	-1.14	-1.14
		4	-1.41	-1.17	-1.04	-1.00	-1.05
		8	-1.68	-1.36	-1.18	-1.10	-1.12
0.50	0.50	17	-1.81	-1.44	-1.23	-1.14	-1.15
		4	-0.20	-0.16	-0.19	-0.28	-0.45
		8	-0.72	-0.66	-0.65	-0.71	-0.83
1.40	1.40	17	-1.31	-1.13	-1.03	-1.00	-1.06
		4	-1.73	-1.39	-1.15	-1.00	-0.93
		8	-2.01	-1.63	-1.33	-1.10	-0.96
0.08	0.08	4	-1.53	-1.22	-1.03	-0.94	-0.93
		8	-1.72	-1.34	-1.11	-1.00	-0.97
		17	-1.79	-1.39	-1.14	-1.02	-0.97
0.5	0.29	4	-1.36	-1.10	-0.94	-0.87	-0.88
		8	-1.63	-1.29	-1.08	-0.97	-0.95
		17	-1.76	-1.37	-1.13	-1.01	-0.98
0.50	0.50	4	-0.15	-0.09	-0.09	-0.15	-0.28
		8	-0.67	-0.58	-0.55	-0.58	-0.66
		17	-1.26	-1.06	-0.93	-0.87	-0.89
1.40	1.40	4	-0.15	-0.09	-0.09	-0.15	-0.28
		8	-0.67	-0.58	-0.55	-0.58	-0.66
		17	-1.26	-1.06	-0.93	-0.87	-0.89

Tableau 7.2

FREQUENCY: 5.35 GHz			POLARISATION: HH				
W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.2	10	-1.77	-1.44	-1.20	-1.01	-0.85
		20	-1.84	-1.51	-1.27	-1.07	-0.90
		40	-1.92	-1.63	-1.40	-1.22	-1.00
	0.7	10	-1.55	-1.28	-1.08	-0.92	-0.78
		20	-1.71	-1.39	-1.14	-0.96	-0.81
		40	-1.67	-1.41	-1.17	-0.97	-0.83
	1.2	10	-1.07	-0.95	-0.84	-0.75	-0.66
		20	-1.48	-1.25	-1.06	-0.91	-0.78
		40	-1.65	-1.37	-1.12	-0.96	-0.82
3.4	10	0.40	0.49	0.57	0.65	0.68	
	20	0.18	0.20	0.19	0.16	0.10	
	40	-0.35	-0.39	-0.42	-0.43	-0.44	
0.3	0.2	10	-1.77	-1.45	-1.21	-1.04	-0.90
		20	-1.84	-1.51	-1.27	-1.09	-0.93
		40	-1.91	-1.61	-1.38	-1.20	-1.00
	0.7	10	-1.55	-1.29	-1.10	-0.95	-0.84
		20	-1.72	-1.40	-1.16	-1.00	-0.87
		40	-1.68	-1.42	-1.19	-1.01	-0.89
	1.2	10	-1.07	-0.96	-0.86	-0.79	-0.72
		20	-1.49	-1.26	-1.08	-0.94	-0.84
		40	-1.66	-1.38	-1.15	-0.99	-0.88
3.4	10	0.40	0.48	0.55	0.61	0.62	
	20	0.18	0.19	0.17	0.12	0.04	
	40	-0.35	-0.40	-0.44	-0.47	-0.50	
0.5	0.2	10	-1.77	-1.45	-1.22	-1.06	-0.94
		20	-1.84	-1.51	-1.28	-1.10	-0.97
		40	-1.91	-1.60	-1.37	-1.19	-1.02
	0.7	10	-1.55	-1.30	-1.11	-0.98	-0.89
		20	-1.71	-1.40	-1.18	-1.02	-0.92
		40	-1.68	-1.43	-1.20	-1.04	-0.93
	1.2	10	-1.07	-0.97	-0.88	-0.82	-0.77
		20	-1.49	-1.26	-1.10	-0.97	-0.88
		40	-1.66	-1.38	-1.16	-1.02	-0.92
3.4	10	0.40	0.48	0.54	0.58	0.58	
	20	0.18	0.19	0.16	0.09	-0.00	
	40	-0.35	-0.41	-0.45	-0.50	-0.54	

Tableau 7.3

FREQUENCY: 5.35 GHz				POLARISATION: VV			
W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.2	10	-1.93	-1.60	-1.43	-1.39	-1.49
		20	-2.00	-1.66	-1.47	-1.42	-1.50
		40	-2.08	-1.76	-1.54	-1.46	-1.50
	0.7	10	-1.71	-1.45	-1.33	-1.33	-1.46
		20	-1.87	-1.56	-1.39	-1.37	-1.49
		40	-1.81	-1.58	-1.42	-1.39	-1.50
	1.2	10	-1.23	-1.12	-1.09	-1.17	-1.34
		20	-1.64	-1.42	-1.31	-1.32	-1.45
		40	-1.80	-1.54	-1.38	-1.37	-1.49
3.4	10	0.24	0.32	0.32	0.23	0.01	
	20	0.02	0.03	-0.06	-0.25	-0.57	
	40	-0.51	-0.56	-0.67	-0.85	-1.11	
0.3	0.2	10	-1.85	-1.48	-1.27	-1.16	-1.16
		20	-1.93	-1.55	-1.31	-1.19	-1.17
		40	-2.01	-1.64	-1.37	-1.23	-1.16
	0.7	10	-1.63	-1.33	-1.17	-1.10	-1.13
		20	-1.79	-1.44	-1.23	-1.15	-1.16
		40	-1.73	-1.46	-1.26	-1.16	-1.18
	1.2	10	-1.15	-1.01	-0.93	-0.94	-1.01
		20	-1.57	-1.30	-1.15	-1.09	-1.12
		40	-1.72	-1.42	-1.21	-1.14	-1.16
	3.4	10	0.32	0.44	0.49	0.46	0.33
		20	0.10	0.15	0.10	-0.03	-0.24
		40	-0.43	-0.44	-0.51	-0.62	-0.78
0.5	0.2	10	-1.80	-1.41	-1.16	-1.03	-0.99
		20	-1.88	-1.47	-1.21	-1.05	-0.99
		40	-1.96	-1.57	-1.27	-1.09	-0.99
	0.7	10	-1.58	-1.26	-1.06	-0.97	-0.96
		20	-1.74	-1.37	-1.13	-1.01	-0.99
		40	-1.68	-1.39	-1.15	-1.03	-1.00
	1.2	10	-1.10	-0.93	-0.83	-0.81	-0.84
		20	-1.52	-1.23	-1.05	-0.96	-0.95
		40	-1.67	-1.35	-1.11	-1.01	-0.99
	3.4	10	0.37	0.51	0.59	0.59	0.51
		20	0.14	0.22	0.21	0.11	-0.07
		40	-0.38	-0.37	-0.41	-0.49	-0.61

Tableau 7.4

FREQUENCY: 9.0 GHz			POLARISATION: HH				
W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.34	17	-1.77	-1.43	-1.18	-1.41	-0.84
		34	-1.81	-1.46	-1.22	-1.03	-0.89
		67	-1.87	-1.49	-1.29	-1.85	-0.91
	1.18	17	-1.42	-1.21	-1.03	-0.87	-0.76
		34	-1.66	-1.36	-1.13	-0.94	-0.80
		67	-1.74	-1.47	-1.18	-0.98	-0.82
	2.02	17	-0.59	-0.59	-0.58	-0.55	-0.52
		34	-1.22	-1.08	-0.95	-0.84	-0.74
		67	-1.58	-1.29	-1.14	-0.92	-0.80
5.70	17	0.45	0.57	0.70	0.84	0.97	
	34	0.38	0.46	0.53	0.58	0.59	
	67	0.11	0.11	0.08	0.03	-0.03	
0.3	0.34	17	-1.78	-1.44	-1.20	-1.40	-0.89
		34	-1.81	-1.47	-1.23	-1.05	-0.93
		67	-1.87	-1.49	-1.29	-1.78	-0.94
	1.18	17	-1.43	-1.22	-1.05	-0.91	-0.82
		34	-1.67	-1.37	-1.15	-0.98	-0.86
		67	-1.75	-1.48	-1.20	-1.02	-0.88
	2.02	17	-0.60	-0.60	-0.60	-0.59	-0.58
		34	-1.22	-1.09	-0.97	-0.87	-0.79
		67	-1.59	-1.30	-1.16	-0.96	-0.86
5.70	17	0.45	0.56	0.68	0.80	0.91	
	34	0.38	0.45	0.51	0.54	0.53	
	67	0.11	0.09	0.05	-0.01	-0.09	
0.5	0.34	17	-1.77	-1.44	-1.21	-1.39	-0.93
		34	-1.81	-1.47	-1.24	-1.07	-0.97
		67	-1.87	-1.49	-1.29	-1.73	-0.98
	1.18	17	-1.43	-1.22	-1.07	-0.93	-0.86
		34	-1.67	-1.37	-1.16	-1.01	-0.91
		67	-1.75	-1.48	-1.22	-1.04	-0.92
	2.02	17	-0.59	-0.61	-0.62	-0.62	-0.62
		34	-1.22	-1.10	-0.99	-0.90	-0.84
		67	-1.59	-1.31	-1.17	-0.99	-0.90
5.70	17	0.45	0.56	0.67	0.77	0.86	
	34	0.38	0.44	0.50	0.51	0.49	
	67	0.11	0.09	0.04	-0.04	-0.14	

Tableau 7.5

FREQUENCY: 9.0 GHz			POLARISATION: VV				
W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
	0.34	17	-1.94	-1.61	-1.43	-1.75	-1.52
		34	-1.98	-1.63	-1.46	-1.42	-1.54
		67	-2.04	-1.65	-1.50	-2.06	-1.53
0.1	1.18	17	-1.59	-1.39	-1.29	-1.30	-1.46
		34	-1.83	-1.54	-1.39	-1.37	-1.50
		67	-1.91	-1.65	-1.44	-1.41	-1.52
	2.02	17	-0.75	-0.77	-0.84	-0.98	-1.22
		34	-1.38	-1.26	-1.22	-1.26	-1.43
		67	-1.75	-1.47	-1.40	-1.36	-1.50
	5.70	17	0.29	0.39	0.44	0.41	0.27
		34	0.22	0.28	0.27	0.15	-0.11
		67	-0.05	-0.07	-0.19	-0.40	-0.73
	0.34	17	-1.86	-1.49	-1.28	-1.53	-1.19
		34	-1.90	-1.52	-1.30	-1.20	-1.21
		67	-1.97	-1.53	-1.34	-1.84	-1.20
0.3	1.18	17	-1.51	-1.27	-1.14	-1.08	-1.13
		34	-1.75	-1.42	-1.23	-1.15	-1.18
		67	-1.83	-1.54	-1.29	-1.19	-1.19
	2.02	17	-0.68	-0.66	-0.69	-0.76	-0.89
		34	-1.31	-1.15	-1.06	-1.04	-1.11
		67	-1.67	-1.35	-1.24	-1.13	-1.17
	5.70	17	0.36	0.51	0.60	0.63	0.59
		34	0.29	0.30	0.43	0.37	0.22
		67	0.02	0.04	-0.03	-0.18	-0.41
	0.34	17	-1.81	-1.41	-1.17	-1.40	-1.01
		34	-1.85	-1.44	-1.19	-1.06	-1.03
		67	-1.92	-1.46	-1.23	-1.71	-1.02
0.5	1.18	17	-1.46	-1.20	-1.03	-0.94	-0.95
		34	-1.70	-1.34	-1.13	-1.01	-1.00
		67	-1.78	-1.46	-1.18	-1.05	-1.01
	2.02	17	-0.63	-0.58	-0.58	-0.62	-0.71
		34	-1.26	-1.07	-0.95	-0.90	-0.93
		67	-1.62	-1.27	-1.13	-1.00	-0.99
	5.70	17	0.41	0.59	0.70	0.77	0.77
		34	0.34	0.47	0.53	0.51	0.40
		67	0.08	0.12	0.08	-0.04	-0.23

Tableau 7.6

ANNEXE V

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Etude de la sensibilité du rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$
à une variation de l'angle d'incidence

Les tableaux suivants donnent la sensibilité du rapport des sections efficace de rétrodiffusion à une variation de l'angle d'incidence. Les résultats sont exprimés en pourcentage. Ils correspondent à la variation en puissance du rapport.

Le tableau 7.7 montre les résultats obtenus en bande S

Le tableau 7.8 montre les résultats obtenus en bande C

Le tableau 7.9 montre les résultats obtenus en bande X

FREQUENCE: 2.25 GHz

W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.08	4	4.63%	3.46%	3.55%	5.64%	10.54%
		8	5.11%	3.13%	1.57%	1.54%	5.16%
	0.29	4	4.36%	3.93%	5.10%	8.12%	13.26%
		8	4.50%	3.98%	5.12%	8.13%	13.28%
		17	4.57%	4.00%	5.12%	8.12%	13.32%
	0.50	4	4.27%	3.89%	5.08%	8.10%	13.24%
		8	4.43%	3.93%	5.11%	8.14%	13.28%
		17	4.53%	4.00%	5.14%	8.16%	13.32%
	1.40	4	3.91%	3.72%	5.00%	8.02%	13.09%
		8	3.99%	3.76%	4.99%	8.02%	13.12%
		17	4.20%	3.86%	5.07%	8.10%	13.23%
	0.3	0.08	4	3.10%	1.09%	0.15%	0.73%
8			3.83%	1.30%	-0.84%	-1.75%	-0.17%
0.29		4	2.58%	1.15%	1.09%	2.43%	5.07%
		8	2.68%	1.17%	1.09%	2.43%	5.07%
		17	2.73%	1.17%	1.07%	2.41%	5.08%
0.50		4	2.51%	1.13%	1.09%	2.43%	5.07%
		8	2.63%	1.16%	1.09%	2.44%	5.08%
		17	2.70%	1.17%	1.09%	2.44%	5.09%
1.40		4	2.20%	1.03%	1.09%	2.46%	5.07%
		8	2.29%	1.06%	1.07%	2.43%	5.05%
		17	2.46%	1.12%	1.08%	2.43%	5.07%
0.5		0.08	4	2.44%	-0.25%	-1.94%	-2.28%
	8		3.42%	0.36%	-2.37%	-4.05%	-3.70%
	0.29	4	1.70%	-0.49%	-1.34%	-0.91%	0.58%
		8	1.78%	-0.48%	-1.36%	-0.93%	0.57%
		17	1.83%	-0.48%	-1.38%	-0.94%	0.57%
	0.50	4	1.64%	-0.49%	-1.34%	-0.90%	0.59%
		8	1.74%	-0.48%	-1.34%	-0.91%	0.59%
		17	1.80%	-0.48%	-1.36%	-0.92%	0.58%
	1.40	4	1.32%	-0.57%	-1.29%	-0.82%	0.66%
		8	1.43%	-0.53%	-1.32%	-0.86%	0.62%
		17	1.59%	-0.50%	-1.33%	-0.90%	0.59%

Tableau 7.7

FREQUENCY: 5.35 GHz

W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$
0.1	0.2	10	4.66%	3.94%	4.81%	7.62%	12.79%
		20	4.78%	3.82%	4.33%	6.81%	11.87%
		40	5.02%	3.53%	3.19%	4.68%	9.27%
	0.7	10	4.45%	4.02%	5.22%	8.29%	13.52%
		20	4.55%	4.06%	5.27%	8.31%	13.54%
		40	4.92%	3.98%	5.24%	8.31%	13.52%
	1.2	10	4.18%	3.90%	5.16%	8.23%	13.47%
		20	4.40%	3.98%	5.21%	8.29%	13.51%
		40	4.67%	4.06%	5.24%	8.31%	13.54%
3.4	10	3.96%	3.85%	5.25%	8.45%	13.70%	
	20	3.93%	3.81%	5.14%	8.22%	13.34%	
	40	3.96%	3.79%	5.08%	8.15%	13.32%	
0.3	0.2	10	2.93%	1.30%	1.03%	2.24%	4.92%
		20	3.12%	1.31%	0.75%	1.69%	4.27%
		40	3.53%	1.32%	0.10%	0.31%	2.53%
	0.7	10	2.68%	1.30%	1.30%	2.72%	5.47%
		20	2.76%	1.31%	1.31%	2.73%	5.48%
		40	3.14%	1.18%	1.29%	2.72%	5.46%
	1.2	10	2.48%	1.24%	1.29%	2.72%	5.47%
		20	2.64%	1.26%	1.30%	2.73%	5.47%
		40	2.88%	1.31%	1.27%	2.73%	5.48%
	3.4	10	2.24%	1.16%	1.35%	2.88%	5.68%
		20	2.24%	1.16%	1.31%	2.78%	5.48%
		40	2.29%	1.18%	1.28%	2.71%	5.42%
0.5	0.2	10	2.07%	-0.30%	-1.36%	-1.08%	0.40%
		20	2.32%	-0.19%	-1.53%	-1.51%	-0.15%
		40	2.90%	0.06%	-1.88%	-2.54%	-1.57%
	0.7	10	1.77%	-0.37%	-1.18%	-0.68%	0.89%
		20	1.82%	-0.37%	-1.18%	-0.69%	0.88%
		40	2.26%	-0.54%	-1.21%	-0.69%	0.88%
	1.2	10	1.59%	-0.40%	-1.15%	-0.66%	0.91%
		20	1.73%	-0.41%	-1.18%	-0.68%	0.89%
		40	1.97%	-0.38%	-1.24%	-0.69%	0.89%
	3.4	10	1.31%	-0.51%	-1.14%	-0.54%	1.08%
		20	1.33%	-0.49%	-1.12%	-0.57%	0.99%
		40	1.40%	-0.44%	-1.13%	-0.62%	0.92%

Tableau 7.8

FREQUENCY: 9.0 GHz

W	ks	kL	$\theta=20^\circ$	$\theta=25^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=35^\circ$	$\theta=40^\circ$	
0.1	0.34	17	4.75%	4.16%	5.25%	8.03%	13.62%	
		34	4.82%	4.10%	5.02%	7.89%	13.11%	
		67	4.82%	3.97%	4.48%	6.82%	12.17%	
	1.18	17	4.47%	4.10%	5.02%	7.89%	13.11%	
		34	4.63%	4.15%	5.46%	8.63%	14.04%	
		67	4.72%	4.25%	5.45%	8.60%	13.97%	
	2.02	17	4.11%	3.97%	5.30%	8.47%	13.83%	
		34	4.33%	4.09%	5.39%	8.56%	13.92%	
		67	4.57%	4.23%	5.42%	8.63%	14.00%	
5.70	17	4.06%	4.02%	5.52%	8.90%	14.48%		
	34	4.05%	3.99%	5.45%	8.72%	14.09%		
	67	4.03%	3.94%	5.33%	8.48%	13.75%		
0.3	0.34	17	3.00%	1.54%	1.51%	2.88%	5.83%	
		34	3.08%	1.53%	1.37%	2.69%	5.47%	
		67	3.16%	1.50%	1.01%	2.09%	4.79%	
	1.18	17	2.75%	1.51%	1.65%	3.21%	6.11%	
		34	2.87%	1.48%	1.65%	3.21%	6.14%	
		67	2.93%	1.65%	1.64%	3.20%	6.09%	
	2.02	17	2.46%	1.43%	1.62%	3.18%	6.07%	
		34	2.65%	1.49%	1.64%	3.19%	6.08%	
		67	2.82%	1.57%	1.63%	3.22%	6.11%	
	5.70	17	2.37%	1.40%	1.72%	3.42%	6.47%	
		34	2.36%	1.40%	1.69%	3.34%	6.27%	
		67	2.37%	1.39%	1.64%	3.22%	6.08%	
	0.5	0.34	17	2.03%	-0.19%	-1.04%	-0.56%	1.06%
			34	2.15%	-0.16%	-1.13%	-0.78%	0.77%
			67	2.29%	-0.11%	-1.38%	-1.13%	0.20%
1.18		17	1.78%	-0.24%	-0.94%	-0.35%	1.31%	
		34	1.87%	-0.31%	-0.95%	-0.36%	1.31%	
		67	1.93%	-0.05%	-0.98%	-0.36%	1.29%	
2.02		17	1.51%	-0.27%	-0.90%	-0.32%	1.33%	
		34	1.69%	-0.24%	-0.93%	-0.35%	1.30%	
		67	1.84%	-0.18%	-0.96%	-0.36%	1.31%	
5.70		17	1.37%	-0.37%	-0.91%	-0.21%	1.56%	
		34	1.37%	-0.36%	-0.90%	-0.22%	1.48%	
		67	1.40%	-0.33%	-0.89%	-0.26%	1.38%	

Tableau 7.9

ANNEXE VI

RESULTATS DES CALCULS DE SIMULATION

Sensibilité du rapport $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$ à une variation de l'angle d'incidence.

Le tableau 7.10 regroupe les résultats obtenus dans les trois bandes de fréquence (S, C et X) pour une polarisation HH. Les valeurs sont exprimées en pourcentage. Elles correspondent à la variation en puissance du rapport.

VARIATION DU RAPPORT $\sigma^{\circ}(20^{\circ})/\sigma^{\circ}(40^{\circ})$

W	s	L	Bande S	Bande C	Bande X
	0.18	8.9	-20.97%	-25.78%	-26.38%
		17.8	-21.50%	-26.55%	-26.80%
		35.7	-	-25.60%	-26.41%
0.1	0.63	8.9	-19.64%	-20.57%	-17.22%
		17.8	-24.50%	-24.85%	-23.85%
		35.7	-26.70%	-27.66%	-26.25%
	1.08	8.9	-16.18%	-10.02%	-1.21%
		17.8	-22.05%	-18.62%	-11.86%
		35.7	-25.74%	-24.78%	-21.28%
	3.00	8.9	-0.39%	-6.91%	-12.01%
		17.8	-3.26%	-1.43%	-5.34%
		35.7	-12.69%	2.56%	2.94%
	0.18	8.9	-20.49%	-24.81%	-25.42%
		17.8	-23.09%	-25.84%	-25.96%
		35.7	-	-25.72%	-25.83%
0.3	0.63	8.9	-18.46%	-19.44%	-16.16%
		17.8	-23.31%	-23.70%	-22.77%
		35.7	-25.50%	-26.58%	-17.32%
	1.08	8.9	-14.99%	-8.86%	-0.15%
		17.8	-20.86%	-17.49%	-10.82%
		35.7	-24.54%	-23.61%	-20.22%
	3.00	8.9	0.79%	-5.73%	-10.89%
		17.8	-2.08%	-2.57%	-4.25%
		35.7	-11.50%	3.68%	3.99%
	0.18	8.9	-19.82%	-23.94%	-24.49%
		17.8	-23.17%	-25.07%	-25.10%
		35.7	-	-25.28%	-25.09%
0.5	0.63	8.9	-17.52%	-18.49%	-15.20%
		17.8	-22.37%	-22.77%	-21.78%
		35.7	-24.55%	-22.41%	-24.24%
	1.08	8.9	-14.06%	-7.93%	0.80%
		17.8	-19.91%	-16.55%	-9.86%
		35.7	-23.59%	-22.66%	-19.25%
	3.00	8.9	1.71%	-4.79%	-9.90%
		17.8	-1.16%	3.49%	-3.29%
		35.7	-10.57%	4.61%	4.94%

Tableau 7.10

BIBLIOGRAPHIE

*"Il y a des livres plus utiles par
l'idée qu'on s'en fait que par la
connaissance qu'on en prend"*
Joubert

Attema E. P. W., P. J. Van Kats & L. Krul, 1982 : " A Radar Signature Model for Partially Coherent Scattering from Irregular Surfaces", IEEE Trans. on Geosci. and Remote sensing, Vol. GE-20, No 1, pp 76-84.

Autret M., 1984 : "Traitement d'une expérience hélicoptérée de télédétection active en hyperfréquence", Rapport de stage de D.E.A. Méthodes Physiques en Télédétection, CNET-1 CRPE, Université Paris 7.

Battiliva P. P., F. T. Ulaby, 1977 : "Faisability of monitoring soil moisture using active microwave remote sensing", RSL Technical Report 264.12, University of Kansas Center of Research., Inc., Lawrence, Kansas.

Beckmann P. & A. Spizzichino, 1963 : "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces ", Pergamon Press, New-York.

Bernard R., O. Taconet, D. Vidal-Madjar, J.L. Thony, M. Vauclin, A. Chapoton, F. Wattrelot & A. Lebrun, 1984 : "Comparison of three in situ surface soil moisture measurements and applications to C-Band scatterometer calibration", IEEE Trans. Geosci. Electron., Vol. GE-22, pp 388-394.

Bernard R., P. Martin & D. Vidal-Madjar, 1981 : "Spécifications des performances minimales pour un diffusiomètre en bande C destiné à la mesure de l'humidité des sols", Document de travail CRPE/1075.

Bernard R. & D. Vidal-Madjar, 1983 : "ERASME : diffusiomètre hélicoptéré en bande C, application à la mesure de l'humidité des sols", Proceedings of a EARSEL Symposium on Remote Sensing Applications for Environmental Studies, Brussels, Belgium, pp 59-64, 26-29 April 1983

Bernard R., P. Martin, J.L. Thony, M. Vauclin & D. Vidal-Madjar, 1982 : "C-Band Radar for Determining Surface Soil Moisture", Remote Sensing of Environment, Vol. 12, pp 189-200.

Bernard R., J. V. Soares & D. Vidal-Madjar, 1986 : "Differential Bare Field Drainage Properties From Airborne Microwave Observations", Water Resources Research, Vol. 22, No 6, pp 869-875.

Bernard R., D. Vidal-Madjar, F. Baudin & G. Laurent, 1986 : "Data Processing and Calibration for an Airborne Scatterometer", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol GE-24, No 5.

Burke W. J. & J.F. Paris, 1975 : "A Radiative Transfer Model for Microwave Emission from Bare Agricultural Soils ", NASA Tech. Memo. TM X.58166, No JSC-09836.

Carver K. R. & al., 1985 : "Microwave Remote Sensing from Space", Proc. IEEE, Vol 73, No 6.

Chan H. L. & A.K. Fung, 1978 : "A Numerical Study of the Kirchhoff Approximation in Horizontally Polarized Backscattering from a Random Surface ", Radioscience, Vol. 13, No 5, p 811-818.

Dobson M. C. & F. T Ulaby, 1986 : "Active Microwave Soil Moisture Research ", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol 24, No 1.

Engman E. T. & J. R. Wang, 1986 : " Evaluation Roughness Models of Radar Backscatter", Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zurich, 8-11 Sept. 1986, Ref. ESA SP-254.

Eom H. J. & W-M Boerner, 1986 : " A Re-Examination of Radar Terrain Backscattering at Nadir", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. GE-24, No 2, pp 232-234.

Fung A. K. & H.J. Eom, 1981 : "Note on the Kirchhoff Rough Surface Solution in Backscattering " , Radioscience, Vol. 16, No 3, p 299-302.

Fung A. K. & H.J. Eom, 1981 : "Multiple Scattering and Depolarisation by a Randomly Rough Kirchhoff Surface" IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-29, No 3, p 463-471.

Fung A.K., 1985 : "Inverse Methods in Rough Surface Scattering" Inverse Methods in Electromagnetic Imaging, M. Boerner et al. Eds, Part 2, Reidel Publishing Company.

Fung A. K., 1964 : "Theory of Radar Scatter from Rough Surfaces, Bistatic and Monostatic, with Application to Lunar Radar Return", Journal of Geophysical Research, Vol. 69, No 6, p 1063-1073.

Fung A. K. & H.J. Eom, 1982 : "An Approximate Model for Backscattering and Emission from Land and Sea ", Univ. of Kansas, Center for Res., Inc., Lawrence, RSL Tech. Rep. 460-5.

Hipp J. E., 1974 : "Soil electromagnetic parameters as a fonction of frequency, soil density and soil moisture", Proc. of IEEE, 62(1), pp 98-103.

Hoeksfra P. & A. Delaney, 1974 : "Dielectric properties at VHF and microwaves frequencies", J. of Geophys. Research, 79(11), pp 1699-1708.

Idso S. B.; R. D. Jackson & R. J. Reginato, 1975 : "Detection of soil moisture by remoter surveillance", American Scientist., pp 549-557.

Jackson T. J. & P. E. O'Neill, 1985 : " Aircraft scatterometer observations of soil moisture on rangeland watersheds", Int. J. Remote Sensing, Vol. 6, No 7, pp 1135-1152.

Jackson T. J. & P. E. O'Neill, 1986 : " Microwave Dielectric Model for Aggregated Soils", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol GE-26, No 6.

Jackson T.J., A. Chang & T. J. Schmugge, 1981 : " Aircraft Active Microwave Measurements for Estimating Soil Moisture", Photogram. Engin. and Remote Sensing 47, pp 801-805.

Le Toan T., 1982 : "Active microwaves signatures of soil and crops. Significant results of three years of experiment", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'82, Munich, FRG.

Mo T., T.J. Schmugge & T.J. Jackson, 1983 : "Calculation of Radar Backscattering Coefficient of Vegetation Covered Soils ", NASA Tech. Memo. 85006, SM-G3-04400.

Mo T., 1982 : "Incoherent Scattering of Microwave Radiation from Rough Soils Surfaces ", NASA Tech. Report, SM-G2-04291.

Tsang L. & R.W. Newton, 1982 : "Microwave Emissions from Soils with Rough Surfaces ", Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No 11, p 9017-9024, Oct. 20.

Ulaby F. T., C.T Allen & A.K. Fung, 1983 : "Method for Retrieving the True Backscattering Coefficient from Measurements with a Real Antenna ", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, No 3, p 308-313.

Ulaby F. T., R.K. Moore & A.K. Fung, 1982 : "Microwave Remote Sensing : Active and Passive, Vol.II : Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory ", Ch.12, Reading, MA : Addison-Wesley.

Wang J. R. & T.J. Schmugge, 1978 : "An Empirical Model for The Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content ", NASA Tech. Memo. 79659.

Wilheit T. T., 1978 : "Radiative Transfer in a Plane Stratified Dielectric", IEEE Trans. on Geosci. Electronics, Vol. GE-16, No 2, pp 138-143.



