

TELEDETECTION RADAR  
HYPERFREQUENCE DES SOLS  
AGRICOLES NUS

---

Application du modèle de KIRCHHOFF  
Simulation et Validation

.....

GAWARANGA Moussa Basile

Mémoire de fin d'études  
E.N.S.A. de RENNES

Septembre 1987

# S O M M A I R E

\*\*\*\*\*

I	<u>INTRODUCTION</u>	Page	1
II	<u>MESURE RADAR</u>		2
	II.1 Principe		2
	II.2 Le Capteur - Cas du Scatteromètre RAMSES II		3
	II.3 Equation Radar		3
	II.4 Comportement électromagnétique de l'onde au contact du sol		6
	II.4.1 La diffusion de volume		7
	II.4.2 La réflexion de surface		7
III	<u>COMPORTEMENT ANGULAIRE DE <math>\sigma_0</math></u>		9
	III.1 Influence de la rugosité		9
	III.1.1 Analyse des courbes obtenues par les auteurs		9
	III.1.2 Problème posé par l'effet de l'azimut		10
	III.2 Influence de l'humidité		11
IV	<u>BASE DE LA MODELISATION</u>		12
	IV.1 Principe		12
	IV.2 Rugosité de surface		12
	IV.3 Humidité de surface		14
V	<u>PRESENTATION DU MODELE</u>		16
	V.1 Calcul de la composante cohérente		17
	V.2 Calcul de la composante incohérente		18
	V.2.1 Approximation de la phase stationnaire		18
	V.2.2 Approximation scalaire des champs		20
VI	<u>APPLICATION DES MODELES</u>		22
VII	<u>SIMULATION A PARTIR DU MODELE</u>		23
	VII.1 Effet de la rugosité - Influence de l'écart-type des hauteurs (s)		23
	VII.2 Différence entre les polarisations parallèles HH et VV		23
	VII.3 Effets de l'humidité		24

VIII	<u>ETUDE DE LA SENSIBILITE</u>	25
VIII.1	Effets de la variation des paramètres géométriques	25
VIII.1.1	Variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'acart-type des hauteurs (s)	25
VIII.1.2	Variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la longueur de corrélation (l)	27
VIII.2	Effet de variation des paramètres d'humidité	28
IX	<u>TELEDETECTION DE LA TENEUR EN EAU</u> - Contrainte imposée par les observations à l'échelle satellitaire	30
X	<u>VALIDATION DES MODELES</u>	32
X.1	VALID 1 - Etude du comportement annulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ )	32
X.2	VALID 2 - Etude du comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l'écart-type des hauteurs (s)	33
X.3	VALID 3 - Etude du comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'humidité volumique ( $m_V$ ) <sup>0</sup>	35
X.4	Conclusions sur la validation	37
	<u>CONCLUSION</u>	39
	<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	41

Je dédie ce travail :

- Aux paysans Centrafricains,  
pour vos efforts quotidiens et la volonté de vaincre ;
- A ma Patrie : la République Centrafricaine,  
fidèle et éternel attachement ;
- A mon père, GAOUARANGA Moussa Jérôme,  
en tant qu'Instituteur, ton seul souci a été la réussite de tes  
enfants à l'école : ce travail est le fruit de ce que tu as semé
- A ma mère, IPAKE Thérèse,  
la sagesse et l'esprit critique ont toujours été au centre de l'édu-  
cation que tu n'a cessé de nous enseigner et je sais que c'est  
à cause de tes enfants que tu es paralysée pour toujours. A travers  
ce travail, mes frères et soeurs se joignent à moi pour t'exprimer  
notre profonde gratitude ;
- A ma marâtre, YAMAKA Martine,  
je te remercie de tout mon coeur pour ta présence, ta patience,  
la confiance que tu n'a cessé d'avoir en moi et les innombrables  
souffrances que tu a vécues à cause de moi par le passé. Je  
n'oublie pas que sans ton aide ce travail ne serait pas ;
- A mes frères et soeurs, pour le sentiment fraternel qui nous  
a toujours animés ;
- A mes enfants, YAMAKA GAWARANGA Adelta, FOULOUNGOU  
GAOUARANGA Bienvenue, TOHETA GAOUARANGA Brice Modeste,  
que ce travail vous serve d'exemple ;
- A SANKEY Madeleine et SAYA Augustine, grâce à qui je suis  
père de trois enfants, recevez dans ce travail mes éternels remer-  
ciements et affection ;
- A mon épouse, MACKINZE Annie Chantal,  
sois assurée de mon amour éternel ;
- A mes oncles : MARADAS NADO Paul, NADO Abel, BIANDJO  
Dieudonné, DESSANDE Jean de Dieu, GANDO Clément, KOSSI  
Jean-Baptiste, BAGAZA Joachim, MALEGUINZA Aimé,  
NGOUALLOU Maurice, MALEBANGA Paul, BANGAYASSI Georges,  
MODEYANGBA Maurice, OUALOT Justin, ADRAMAN Jean-Richard  
grâce à vos conseils j'ai surmonté beaucoup d'obstacles ;

- A mes amis de toujours : BELOUNGO Lucien, YENGUE-BALLU Valentin, JEUDI Oscar, SOKAMBI Sylvestre, OUALEGUE Raymond,, BOUAKA Louis-Marie, FARR Babou ;
- A ma belle-famille ;
- A mes deux cousins, BADAMA Appolinaire et GOUTIA, c'est dans la souffrance qu'on reconnaît les proches et vous l'avez prouvé de 1966 à 1968, je vous en suis entièrement reconnaissant ;
- A mes tantes ;

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 de mémoire.

Je tiens à remercier toutes les personnes de la Station de Sciences du Sol de l'I.N.R.A. de MONTFAVET, qui m'ont apporté leur aide et leur soutien dans ce travail :

- Monsieur Pierre STENGEL,  
Directeur de la Station, qui m'a accueilli pour ce stage de fin d'études ;
- Monsieur Patrick BERTUZZI,  
Ingénieur d'Etudes, mon maître de stage, qui a guidé et suivi mon travail dans toutes ses phases ;
- et tous ceux que j'ai pu solliciter pendant ces six mois et qui m'ont témoigné leur sympathie ;

Je tiens à remercier également :

- Monsieur le Professeur J. DUCHESNE,  
Directeur de la chaire de Génie-Rural à l'E.N.S.A. de RENNES pour la qualité de la formation dont il nous a fait bénéficier ;
- Madame T. le TOAN et Monsieur Hervé NICOLAS pour avoir accepté de participer au jury.

## R E S U M E

-\*\*\*\*\*-

Cette étude porte sur la mise en oeuvre d'un modèle théorique de prévision de la mesure, sur un sol agricole nu (sans végétation), du coefficient de rétrodiffusion Radar. Celle-ci dépend de sa configuration (fréquence, incidence et polarisation) et des paramètres physiques (rugosité et humidité) du sol observé.

Nous utilisons, dans ce travail, un modèle basé sur l'application de la méthode de KIRCHHOFF.

Les principaux résultats d'une étude par simulation ont permis de montrer que le modèle permet de décrire le comportement angulaire (fonction de l'angle d'incidence) du coefficient de rétrodiffusion. Une étude de validation souligne les limites du modèle comme outil de prédiction.

## A B S T R A C T

-oooooooooooo-

The KIRCHHOFF (physical-optics) model is used in this study to explain Radar backscatter measurements from a bare soil surface.

Results of simulated conditions of measurements showed that the model is able to describe the angular dependence of the scattering coefficient with soil surface parameters (roughness and water content) and Radar characteristics (frequency and polarization).

Nevertheless, comparisons with field measurements showed that the model cannot be able, in some conditions, to give predicted backscatter coefficient with a good accuracy.

## I - INTRODUCTION

---

Cette étude porte sur l'utilisation de la télédétection active en hyperfréquences (radar) et sur ses applications en physique du sol.

La mesure radar, sur un sol agricole nu sans couvert végétal, est influencée par son humidité et sa rugosité de surface.

L'influence de l'humidité permet d'envisager de mesurer, par télédétection, l'humidité de surface. L'intérêt potentiel d'une telle mesure réside dans le suivi temporel de l'évolution de la teneur en eau de surface et l'utilisation de cette information comme condition limite de surface d'un modèle de transfert d'eau (sol-atmosphère permettant le suivi et la prévision des termes du bilan hydrique d'un sol).

L'influence de la rugosité permet d'envisager de suivre temporellement l'évolution d'un état de surface. L'intérêt est évident pour des applications concernant les phénomènes de battance, d'érosions hydriques des sols.

Cette étude porte sur les modèles théoriques de prévision de la mesure Radar en fonction de sa configuration et des caractéristiques physiques du sol observé. Il existe plusieurs modèles théoriques. Nous utiliserons dans notre travail un modèle basé sur la méthode de KIRCHHOFF.

Deux études de simulation et de validation de la mesure Radar sont entreprises pour tester l'adéquation du modèle et proposer un choix de configuration Radar compatible avec la mesure de la teneur en eau à l'échelle de l'observation satellitaire.

Denomination	Fréquences MHz	Longueur d'onde cm	Utilisation moyenne
L	1000-2000	30 - 15	25 cm
S	2000-4000	15 - 7,5	10 cm
C	4000-8000	7,5- 3,75	5 cm
X	8000-12000	3,75-2,5	3 cm
K	12000-36000	2,5 -0,8	Ku : 2 K : 1,5 Ka : 1

Tab II-1

Caractéristiques des bandes hyperfréquences  
utilisées en Télédétection  
(Fluhr, 1981)

## II - MESURE RADAR

---

### II.1 PRINCIPE

Le radar est un système actif d'émission et de réception d'une onde électromagnétique hyperfréquence ou micro-ondes. Pour les observations de la surface de la terre, les longueurs d'onde des principaux systèmes radar utilisés sont comprises entre 1 et 25 cm (fréquence de 1 à 30 GHz ; voir tableau n° II.1).

L'onde électromagnétique émise par le radar peut être assimilée à une onde plane caractérisée par sa :

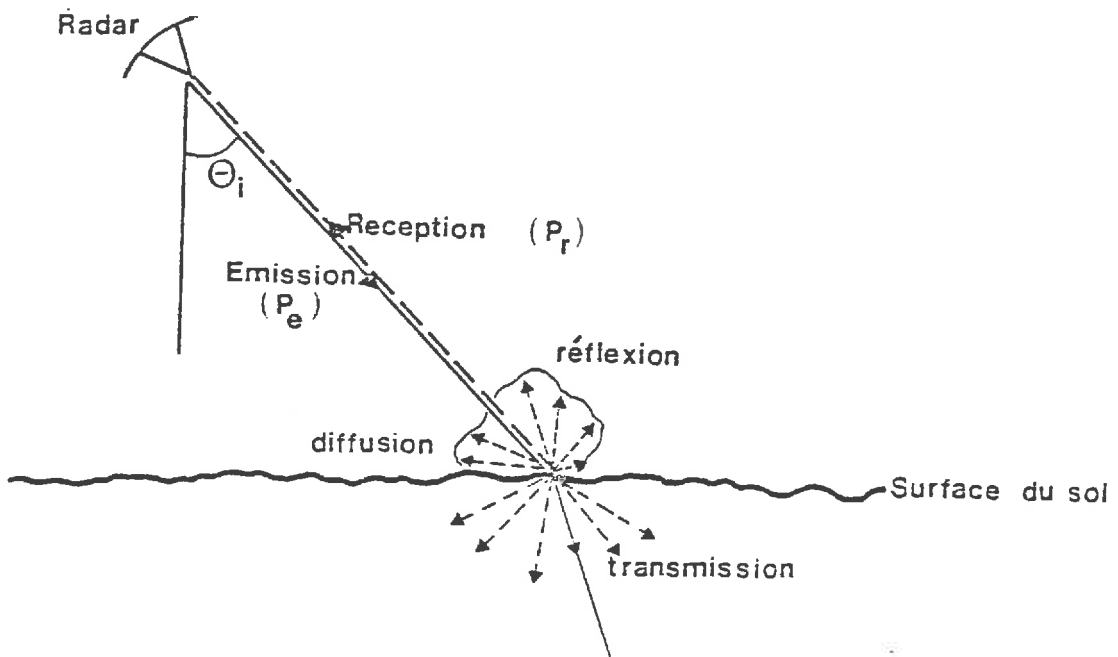
- direction de propagation ou incidence ( $\theta$ )
- fréquence d'émission ( $f$ )
- puissance émise ( $P_e$ )
- polarisation

L'onde électromagnétique émise se propage dans l'air sans subir d'atténuation et parvient à l'interface de séparation "air-sol". Une partie de l'onde incidente est transmise dans le sol (milieu absorbant), une autre est réfléchi ou diffusée à l'interface (voir figure n° II.1).

A l'aide du radar, on mesure le rayonnement électromagnétique réfléchi ou diffusé provenant de cette surface de séparation. Celui-ci, par ses caractéristiques physiques, véhicule des informations acquises au moment de l'interaction de l'onde électromagnétique incidente avec l'interface de séparation.

FIG II-1

Schéma de répartition d'une onde électromagnétique à l'interface air-sol



$$\frac{P_r}{P_e} = \underbrace{\frac{\lambda^2}{(4\pi)^3}}_1 \cdot \underbrace{\frac{G_t \cdot G_r}{R^4}}_2 \cdot \underbrace{\sigma_0 \cdot S}_3$$

1 instrument

2 Etat de la surface

3 Aire observée

## II.2 LE CAPTEUR - CAS DU SCATTEROMETRE RAMSES II

Le radar "RAMSES II" utilisé sur le site d'Avignon est un scatteromètre. Il a été conçu et réalisé par le Centre National d'Etudes Spatiales (C.N.E.S.). Il s'agit d'un radar monostatique (émission et réception dans la même direction) à émission continue avec modulation de fréquence (F.M. - C.W.). Par sa configuration géométrique, il mesure la puissance du rayonnement réfléchi dans une direction de propagation privilégiée qui est la direction de l'onde incidente. C'est pourquoi on parle de la mesure de la puissance réfléchie ou rétrodiffusée. Il est possible sur les radars de choisir :

- la fréquence d'émission (  $f$  )
- la polarisation de l'onde incidente
- la polarisation de l'onde réfléchie
- l'angle d'incidence (  $\theta$  )

Le choix d'un jeu de ces paramètres constitue une configuration radar, par exemple :

- fréquence : 4.5 GHz
- polarisation : HH
- incidence :  $10^\circ$

La polarisation HH veut dire que la première lettre correspond à la polarisation de l'onde émise, la seconde à la polarisation de l'onde reçue.

## II.3 EQUATION RADAR

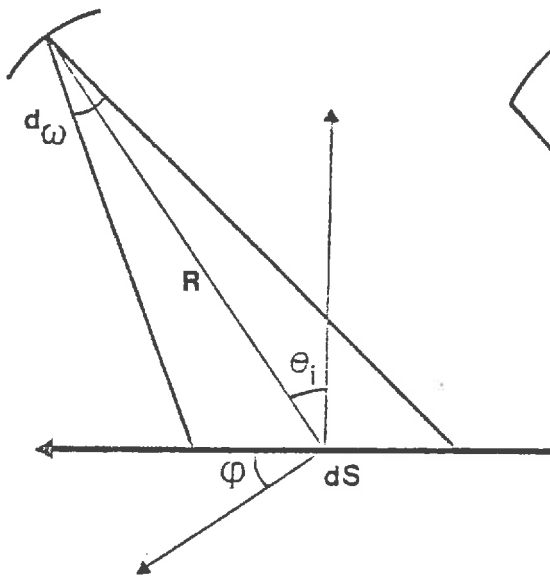
Considérons une antenne radar de surface  $A$  émettant dans un angle solide  $d\omega$  et un élément de surface cible  $ds$  situé à la distance  $R$  de l'antenne (voir fig. n° II.2).

FIG II-2

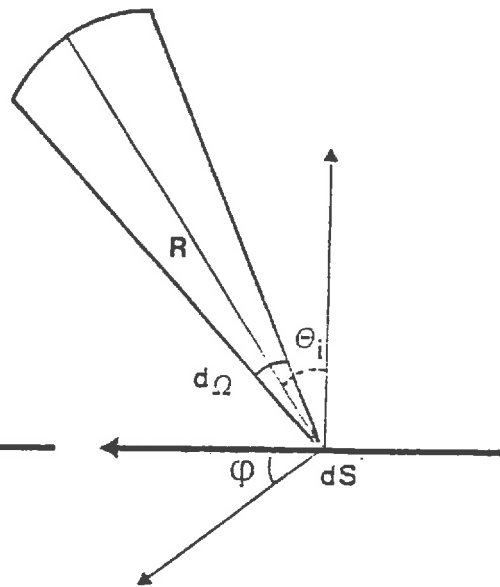
Schéma de définition des angles solides sur l'antenne et sur la cible

irradiation d'une surface  $dS$   
par une antenne

vision de l'antenne  
par une surface  $dS$



(a)



(b)

L'émission est isotrope et la puissance émise dans l'angle solide  $d\omega$  s'écrit :

$$dP_i = \frac{P_e}{4\pi} \cdot d\omega \quad 1$$

On définit le gain de l'antenne  $G(\theta, \varphi)$  comme étant le rapport entre la puissance effectivement émise dans la direction  $(\theta, \varphi)$  et la puissance qui serait émise s'il y avait émission isotrope. D'où, dans le cas de l'antenne du radar :

$$dP(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \cdot \frac{P_e}{4\pi} \cdot d\omega \quad 2$$

L'élément de surface irradiée  $dS$  est donné par :

$$d\omega = \frac{dS \cdot \cos\theta}{R^2} \quad 3$$

Le flux incident sera donc :

$$\Phi = \frac{dP(\theta, \varphi)}{dS \cdot \cos\theta} = \frac{G(\theta, \varphi)}{4\pi} \cdot \frac{P_e}{R^2} \quad 4$$

Si  $d\Omega$  est l'angle solide sous lequel on voit l'antenne depuis la cible, et d'après la définition de la section efficace différentielle  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  qui

est la puissance réémise par la cible par unité d'angle solide et par unité de flux incident, on pourra écrire :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dP_e/d\Omega}{\Phi} \quad 5$$

La puissance reçue qui est la partie du flux réémis capté par l'antenne peut s'écrire :

$$P_r = \Phi \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot d\Omega \quad 6$$

or

$$d\Omega = \frac{A}{R^2} \quad 7$$

et la section efficace est, par définition, égale à :

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad 8$$

d'où l'équation radar :

$$P_r = P_e \cdot \frac{G}{4 \pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4 \pi} \cdot \frac{A}{R^2} \quad 9$$

Pour un système radar donné, G et A sont des constantes et le gain de l'antenne G est donné par :

$$G = \frac{4 \pi}{\lambda^2} \cdot A \quad 10$$

ce qui entraîne :

$$A = \frac{\lambda^2}{4 \pi} \cdot G \quad 11 \quad (\text{Thourel, 1970})$$

Pour tenir compte des pertes électroniques, de propagation et de polarisation qui sont représentées globalement par un facteur de perte L, l'équation radar devient :

$$P_r = \frac{P_e}{L} \cdot \frac{\sigma}{R^4} \cdot \frac{G^2 \cdot \lambda^2}{(4 \pi)^3} \quad 12$$

Dans la plupart des applications, les cibles sont plus larges que la cellule de résolution. Il est alors nécessaire de définir une section efficace différentielle moyenne, ou section efficace radar, par unité de surface et de considérer la puissance rétrodiffusée moyenne. Cette dernière est alors obtenue par l'intégration des échos de chaque surface différentielle sur la surface irradiée totale. La section efficace différentielle moyenne est définie comme étant le coefficient de rétrodiffusion et est exprimée par  $\sigma_0$  ou par  $\mathcal{V}$  avec :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{S} \quad 13$$

ou S est la surface illuminée et :

$$\mathcal{V} = \frac{\sigma_0}{\cos \theta} \quad 14$$

où  $\theta$  est l'angle d'incidence du faisceau radar avec la verticale.

$\sigma_0$  est appelé aussi la section efficace de rétrodiffusion ou pouvoir réflecteur par unité de surface et  $\mathcal{V}$  est surtout utilisé pour les surfaces

rugueuses ; dans ce cas il varie faiblement en fonction de l'incidence.

L'équation radar peut être, finalement, décomposée en un produit de trois termes :

$$\frac{P_r}{P_e} = \underbrace{\sigma_0}_1 \cdot \underbrace{\frac{S}{(4\pi)^3 R^4}}_2 \cdot \underbrace{\frac{G^2 \lambda^2}{L}}_3 \quad 15$$

1 représente la contribution du terrain à la puissance rétrodiffusée.

2 représente les caractéristiques géométriques de la cible.

3 représente la contribution du système.

Pour une configuration de la mesure, la valeur de  $\sigma_0$  est obtenue par la résolution de l'équation radar, sous certaines hypothèses. On démontre ainsi que  $\sigma_0$  est une variable proportionnelle au rapport des puissances émises et reçues. Cette grandeur présentant une forte dynamique de variation est donc exprimée en décibel :

$$\sigma_0(\text{db}) = 10 \cdot \log \sigma_0 \quad 16$$

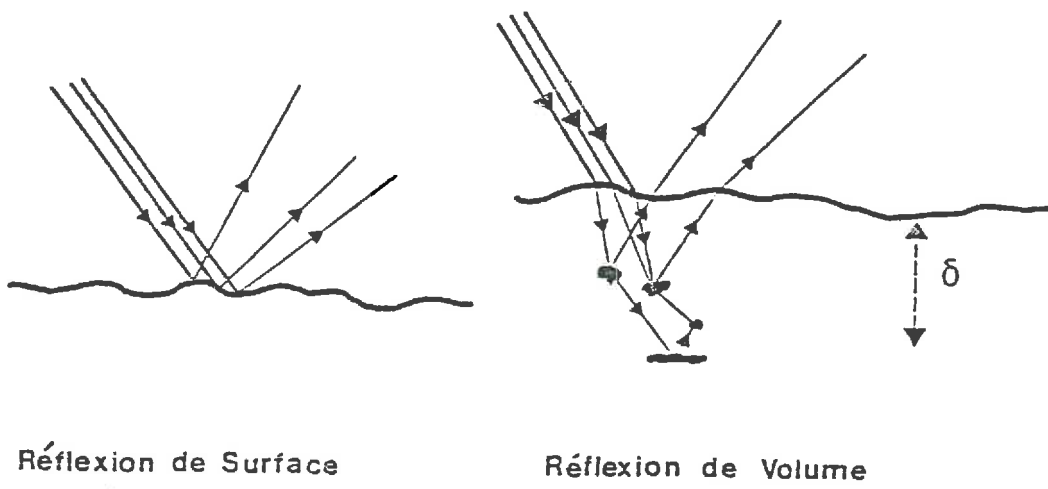
où  $\log$  représente le logarithme décimal.

#### II.4 COMPORTEMENT ELECTROMAGNETIQUE DE L'ONDE AU CONTACT DU SOL

Dans le paragraphe n° II.3, nous avons montré à l'aide de l'équation radar que la section efficace de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) constitue, pour une configuration radar donnée, une grandeur physique synthétique traduisant la contribution de la cible visée à la puissance rétrodiffusée mesurée. La valeur de celle-ci dépendra des caractéristiques géométriques et physiques de la cible. Le problème théorique à résoudre consiste dans un premier temps à étudier le processus de réflexion d'un rayonnement micro-onde à l'interface air-sol.

FIG II-3

Schéma de réflexion d'une onde électromagnétique à l'interface air-sol



En considérant un rayonnement qui se propage dans l'air vers le sol, le mode de réflexion présente deux aspects (voir figure n° II.3) :

- une diffusion de volume
- une réflexion de surface

Nous allons voir plus en détail, séparément, ces deux aspects tout en insistant sur le fait que ces deux phénomènes sont toujours concomittants.

#### II.4.1 La diffusion de volume

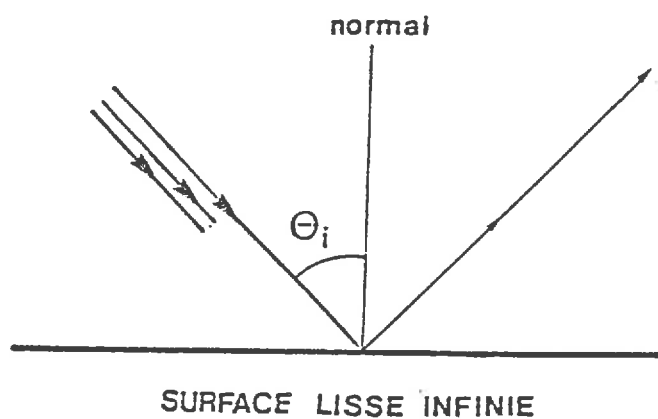
Celle-ci fait intervenir les propriétés internes du profil de sol, en particulier et surtout son humidité. En effet, l'état hydrique du sol gouverne les propriétés diélectriques de celui-ci. Ces dernières vont conditionner l'aptitude du sol à la réflexion de l'onde incidente en profondeur.

Ainsi, plus un sol sera humide et moins l'onde pénétrera profondément, mais plus la contribution de la diffusion de volume à la valeur du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) sera importante. Au total, la profondeur de pénétration n'excède pas quelques centimètres dans le cas d'un sol sec (WITONO, 1986).

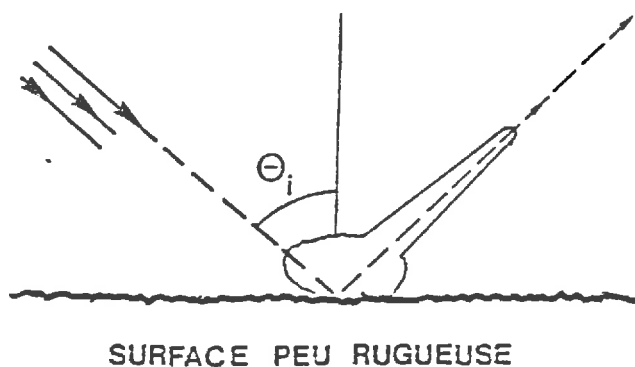
#### II.4.2 La réflexion de surface

Celle-ci fait intervenir principalement les caractéristiques géométriques de la surface du sol que l'on regroupe sous la notion de rugosité. Qualitativement, les relations entre rugosité et réflexion de surface peuvent être illustrées par les schémas de la figure n° II.4 :

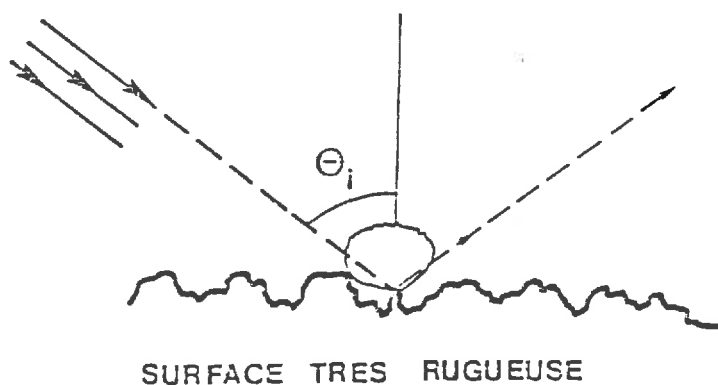
- Pour une surface lisse infinie (a), la rétrodiffusion est de type uniquement spéculaire de type cohérente.
- Pour une surface rugueuse aux dimensions finies (b), l'onde rétrodiffusée présente deux composantes : une cohérente élevée, dans la direction de la réflexion, et une incohérente faible.



[a]  
Rétrodiffusion par  
composante Cohérente



[b]  
Rétrodiffusion par  
-composante Cohérente  
  importante  
-composante diffuse  
  peu importante



[c]  
Rétrodiffusion par  
Composante Diffuse

Fig II-4

Schéma de réflexion d'une onde électromagnétique  
selon la rugosité de la surface du sol  
(Ulaby et al, 1982 (1))

Si l'angle d'incidence (  $\theta$  ) est proche de la verticale, la valeur du coefficient de rétrodiffusion radar (  $\sigma_0$  ) mesurée sera forte. Par contre, avec l'augmentation de l'angle d'incidence (  $\theta$  ), le coefficient de rétrodiffusion radar (  $\sigma_0$  ) décroît puisque l'on mesure en fait la composante incohérente (cas de la figure b ).

- Pour une surface très rugueuse, le schéma de rétrodiffusion présente uniquement une composante incohérente. Quelque soit l'angle d'incidence, la valeur du coefficient de rétrodiffusion radar (  $\sigma_0$  ) mesurée sera faible.

La rugosité de surface gouverne donc la distribution spatiale de l'énergie.

### III - COMPORTEMENT ANGULAIRE DE $\sigma_0$

---

Les auteurs (ULABY et al, 1978) et (FLUHR, 1981) ont cherché à caractériser le comportement angulaire, fonction de l'angle d'incidence ( $\theta$ ), du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ). Les résultats expérimentaux présents dans ce chapitre décrivent uniquement l'influence des paramètres physiques du sol agricole nu (sans couverts végétaux) sur celui-ci.

#### III.1 INFLUENCE DE LA RUGOSITE

##### III.1.1 Analyse des courbes obtenues par les auteurs

La figure n° III.1 décrit le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) à différentes fréquences et rugosités pour une même humidité. La rugosité est quantifiée par le critère H.R.M.S. (s) qui est par définition l'écart-type des hauteurs de rugosité observée.

- Les courbes obtenues sur la figure à 1.1 GHZ ont montré que l'allure générale décroissante est la même pour toutes les rugosités. Cependant, la pente de la courbe est plus prononcée pour des surfaces ayant une faible rugosité ( $s = 1.1$  cm) et tend à s'aplatir pour des surfaces ayant une forte rugosité ( $s = 4.1$  cm).

- Aux autres fréquences (4.5 et 7.5 GHZ), les courbes obtenues sont beaucoup plus applaties. La décroissance angulaire est d'autant plus faible que la fréquence est plus élevée.

La notion de rugosité est donc, pour la mesure radar, une notion relative qui dépend de la fréquence.

ou toutes mes  
lectures

FIG III-1

Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion  
 Influence de la rugosité  
 (Ulaby et al, 1982 (1))

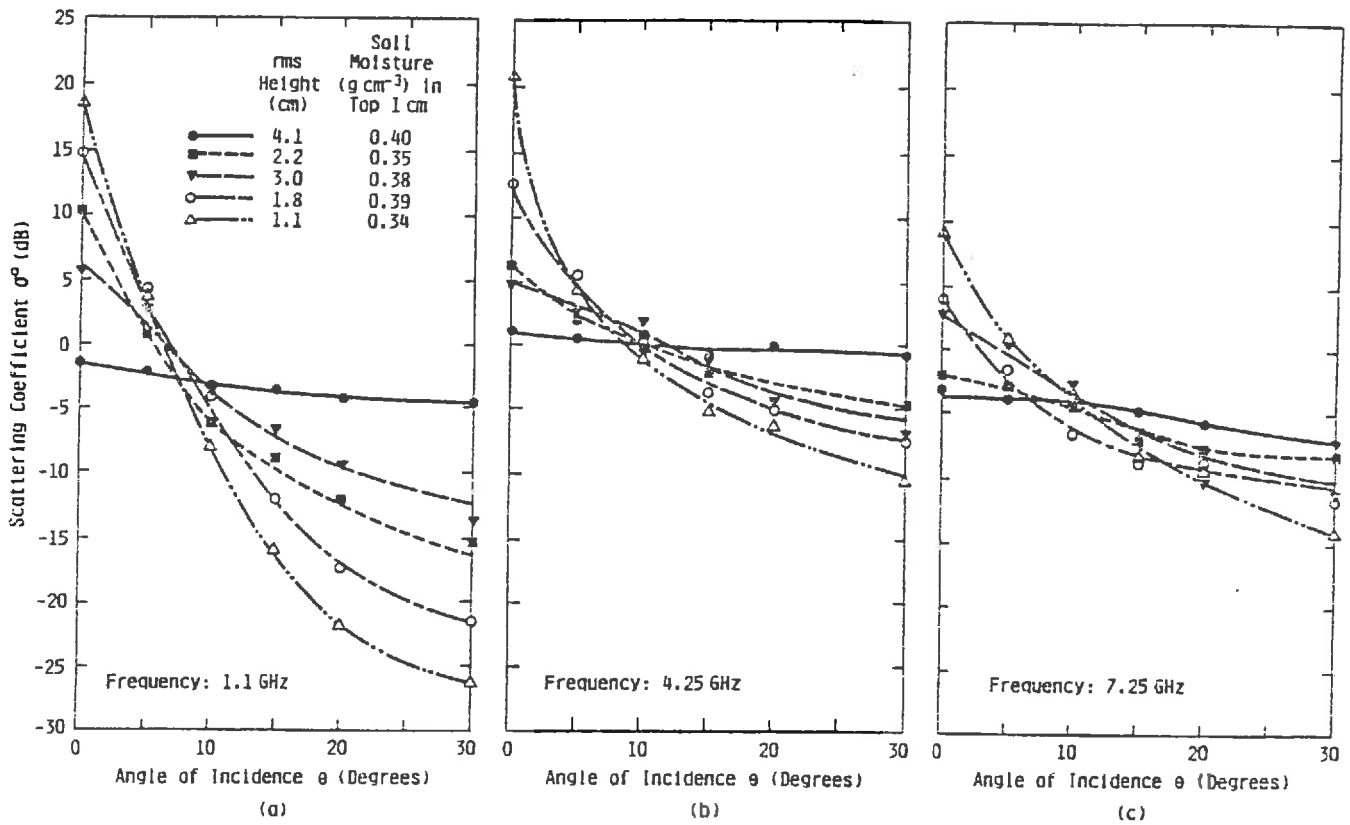


FIG III-2

Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion  
 Influence de la rugosité  
 (Fluhr, 1981)

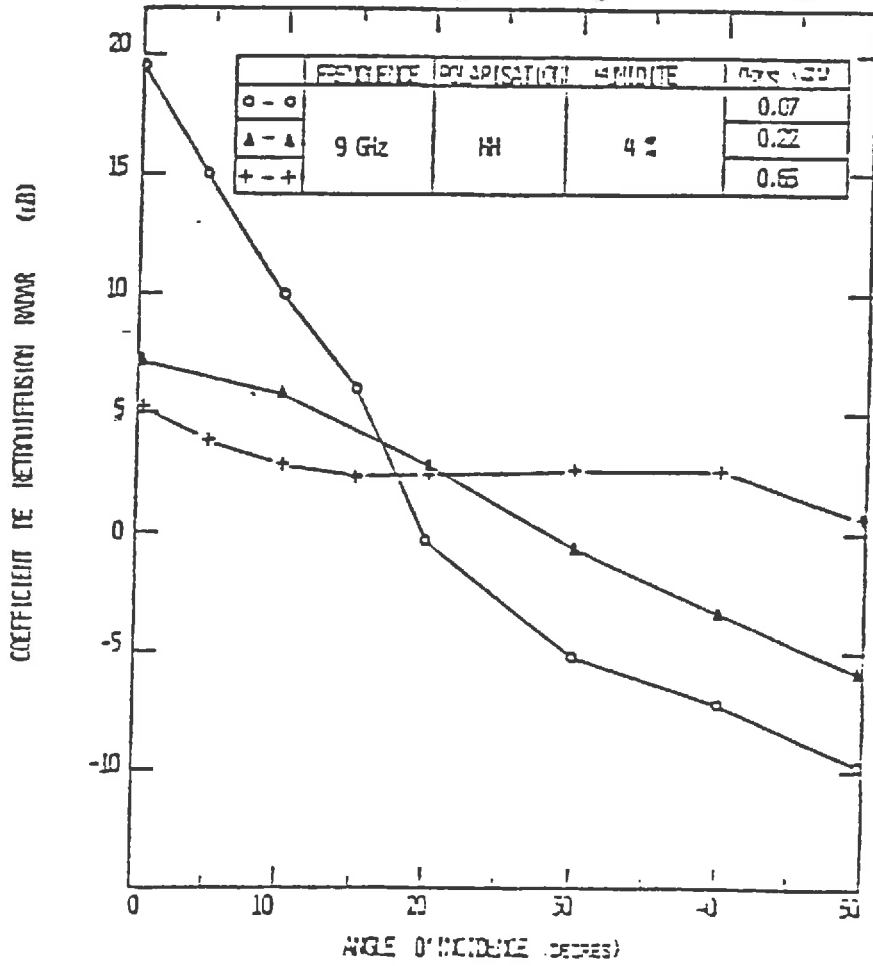


FIG III-3

Schéma de définition de l'angle azimutal  
(Ulaby et al, 1982 (3))

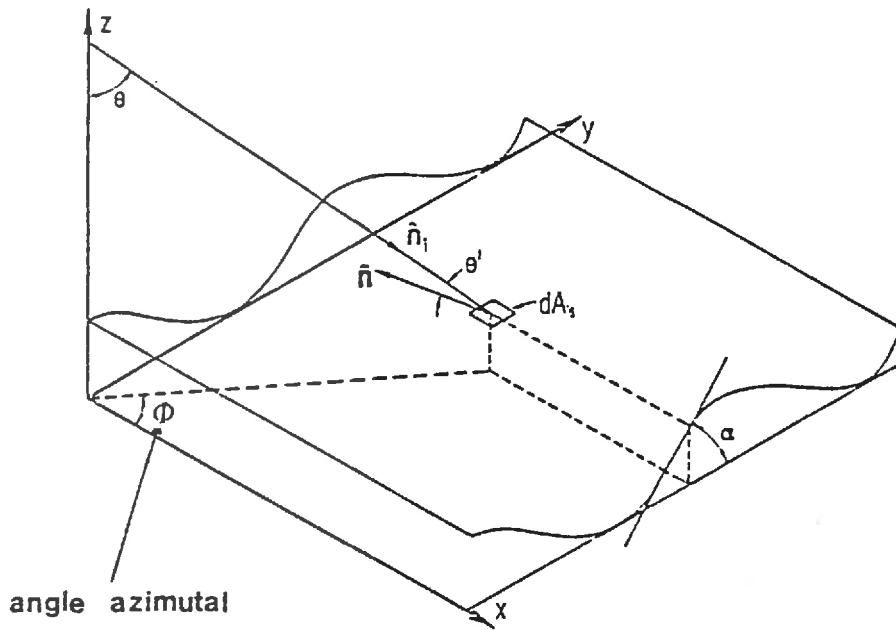
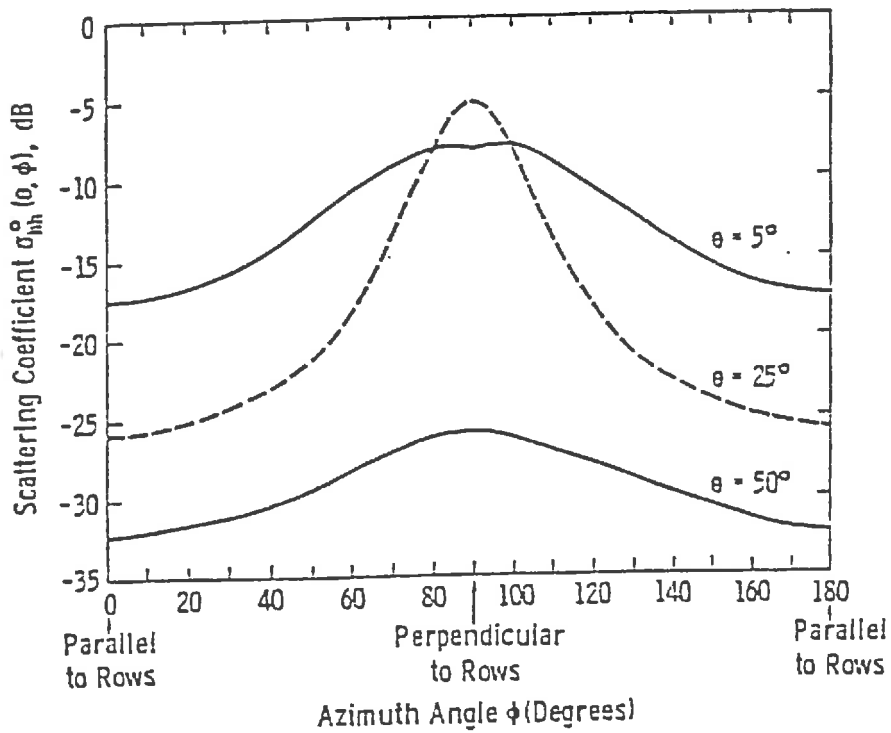


FIG III-4

Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion  
Influence de l'angle azimutal  
(Ulaby et al, 1982 (3))



On constate aussi que pour chaque fréquence, toutes les courbes se coupent au voisinage d'un même angle d'incidence ( $5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ ).

Les courbes de la figure n° III.1 ont été confirmées par FLUHR en 1981 sur le site expérimental d'Auzeville pour deux états de surface : sol hersé ( $s=0.7$  cm) et sol labouré ( $s=6.5$  cm) ; pour une même humidité volumique et pour une fréquence : 9.00 GHz (voir figure n° III.2).

### III.1.2 Problème posé par l'effet de l'azimut

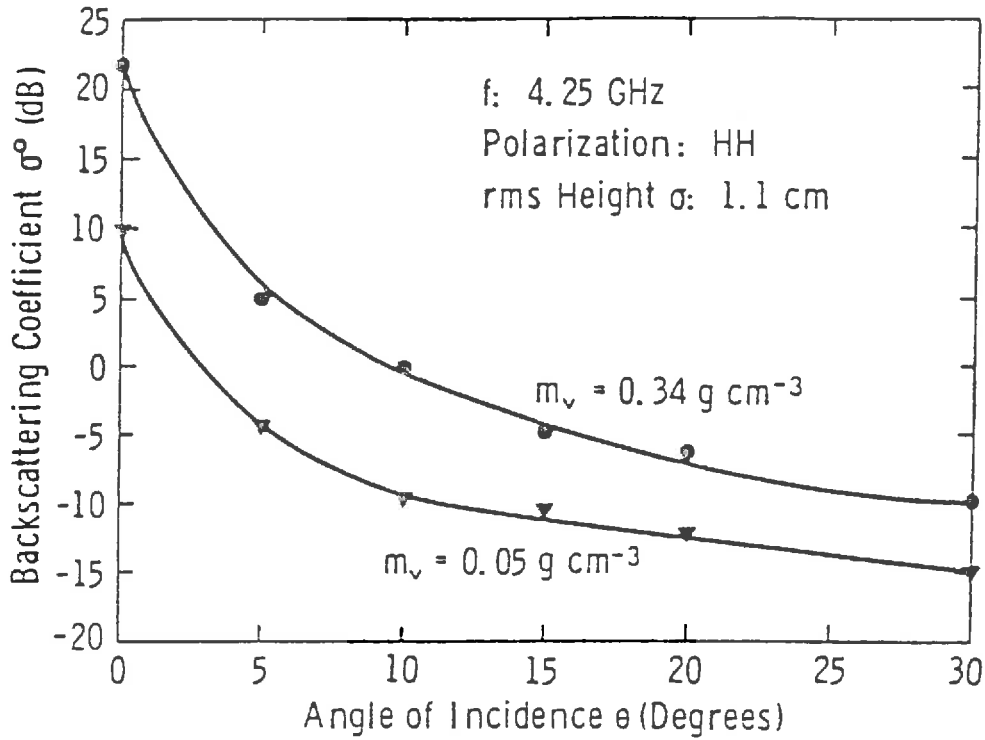
Pour l'observation des surfaces du sol agricole qui présente une direction préférentielle du travail du sol (exemple : bande de labour), la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est dépendante d'un facteur de variation supplémentaire qui est l'angle azimutal ( $\Phi$ ). Il est défini par l'angle d'orientation formé par la direction privilégiée du travail et la projection verticale sur le plan moyen (ox,oy) de référence (voir figure n° III.3).

La figure n° III.4 décrit le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'angle azimutal ( $\Phi$ ). On constate que, pour une incidence élevée ( $50^\circ$ ), la variation maximale du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'azimut est de 5 db. Par contre, pour une incidence moyenne de  $25^\circ$ , nous observons une variation plus importante de l'ordre de 25 db. Ceci confirme bien :

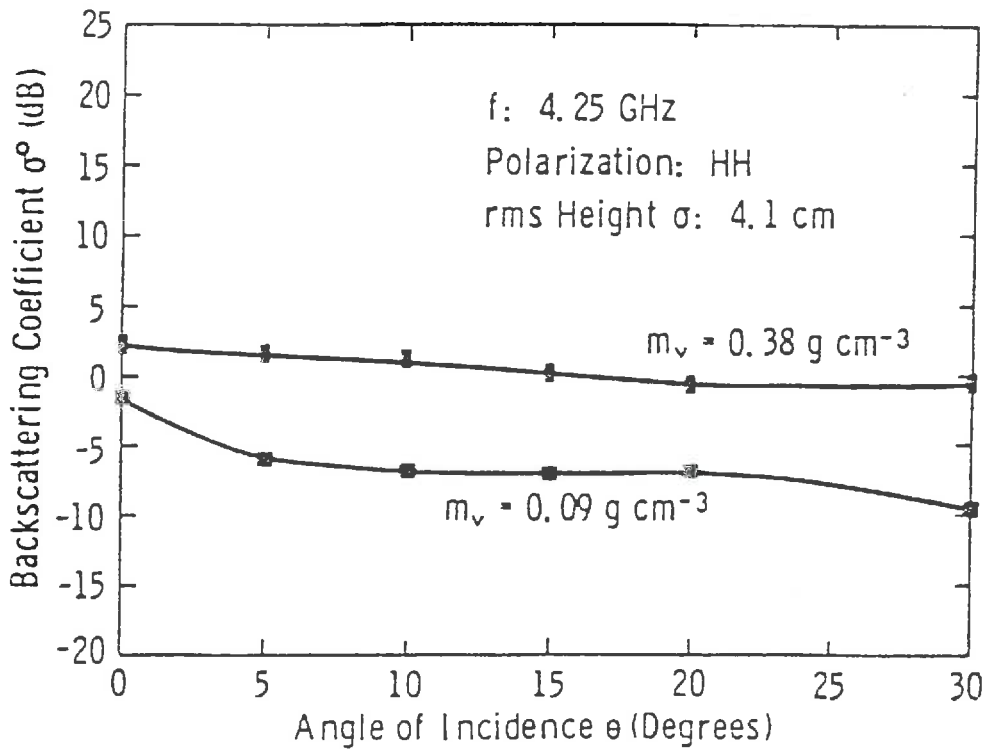
- qu'en fonction de l'azimut, le radar n'observe pas le même type de rugosité ;
- que pour minimiser son effet, il faut travailler en polarisation parallèle à des fortes incidences.

FIG III-5

Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion  
 Influence de l'humidité volumique  
 (Ulaby et al, 1982 (1))



(a)



(b)

### III.2 INFLUENCE DE L'HUMIDITE

La figure n° III.5 décrit le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) pour une même fréquence à différentes rugosités et humidités.

On constate, apparemment, une translation des courbes vers le haut des sols secs vers les sols humides. Ces résultats ont été confirmés par les travaux de FLUHR en 1981 (voir figure n° III.6).

Les auteurs (ULABY et al, 1978 ; BERNARD et al, 1982 ; PAUSADER 1982) ont étudié la relation statistique entre le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) et la teneur en eau volumique ( $m_v$ ). Cette étude est basée sur l'analyse de la régression linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) et l'humidité volumique moyenne ( $\bar{m}_v$ ) des courbes de surface du sol. Pour cela, les auteurs calculent la régression linéaire en fixant comme variable explicative l'humidité volumique moyenne des couches du sol croissantes. Ils choisissent, par un critère de qualité d'ajustement, la meilleure combinaison des paramètres de régression (coefficient de corrélation). Dans ces conditions, les configurations radar optimales à la mesure de l'humidité volumique sont :

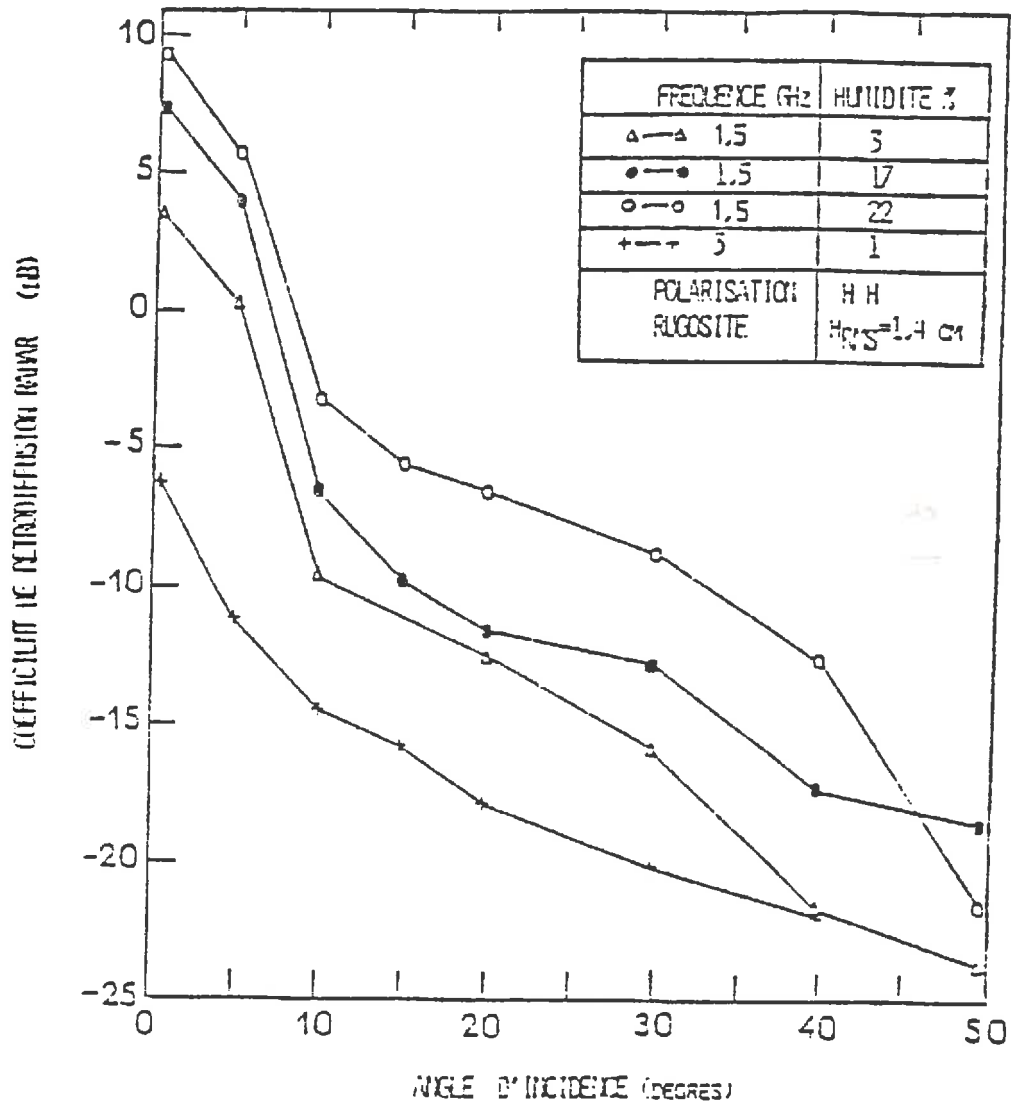
- fréquence : 4.5 - 5.3 GHZ
- polarisation : HH
- incidence : 10° 15°

WITONO (1986) propose de prendre en compte, non pas une humidité moyenne ( $\bar{m}_v$ ) calculée pour une profondeur optimale sur les critères définis ci-dessus, mais la profondeur effective de pénétration, calculée par modèle. En effet, celle-ci varie en fonction de la forme du profil hydrique des couches de surface.

Dans ces conditions, il semble que la relation reliant le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) et l'humidité volumique ( $m_v$ ) ne soit plus linéaire (voir figure n° III.7).

FIG III-6

Comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion  
 Influence de l'humidité volumique  
 (Fluhr, 1981)



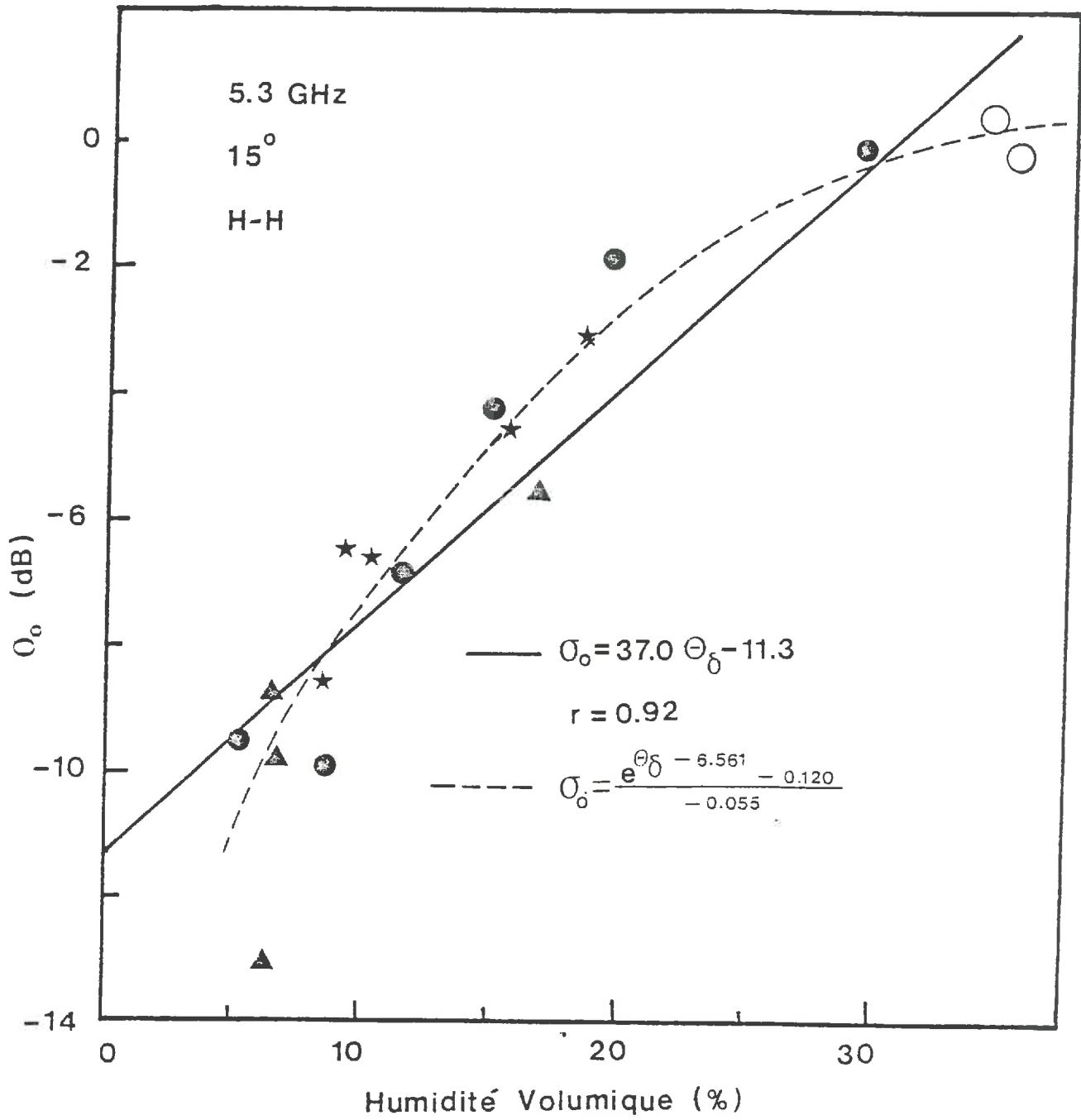


FIG III-7

Ajustement linéaire et non-linéaire  
Relation entre le coefficient de rétrodiffusion  
et l'humidité volumique  
(Witono, 1986)

## IV - BASE DE LA MODELISATION

---

### IV.1 PRINCIPE

L'analyse des données expérimentales des figures n° III.1, III.2, III.3, III.4 a permis de mettre en évidence les deux paramètres intervenant dans le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la rugosité et de l'humidité de la cible.

Le coefficient de rétrodiffusion radar peut être exprimé par le produit de deux fonctions ( $F_1$ ) et ( $F_2$ ).

$$\sigma_0(\theta) = F_1(\theta, m_v) \cdot F_2(\theta, \text{geom}) \quad 17$$

La première fonction ( $F_1$ ) dépend de l'humidité volumique du sol, la seconde fonction ( $F_2$ ) dépend des propriétés géométriques de la surface du sol.

Avant de présenter les modèles de description du comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ), nous allons présenter en détail les paramètres utilisés dans les modèles pour caractériser l'effet de la rugosité et de l'humidité du sol.

### IV.2 RUGOSITE DE SURFACE

La rugosité est mesurée en effectuant des répétitions de mesures du profil de rugosité de surface du sol. Les auteurs utilisent différentes techniques :

- aspérimètre à aiguilles (FLUHR, 1981)
- technique de "projection de peinture" (ULABY et al, 1978)
- technique optoélectronique (rugosimètre laser), prototype en cours d'étude à la Station de Science du Sol à Avignon.

- fait  
avec + voir  
sur rétrosc-

Quelle que soit la technique utilisée, le profil mesuré est numéroté et les critères de rugosité suivants sont calculés :

- écart-type des hauteurs (s)
- longueur de corrélation (l)
- fonction d'auto-corrélation [ $\rho(x)$ ]

L'écart-type des hauteurs (s) et la longueur de corrélation (l) sont les deux paramètres fondamentaux qui caractérisent la rugosité d'une surface. Ils décrivent la variation statistique de la composante "aléatoire" de la hauteur de rugosité par rapport à une surface de référence qui peut être :

- soit plane (cas général où il n'existe pas une structure particulière induite par le travail du sol),
  - soit ondulée (cas où la rugosité présente une structure induite par le passage de l'outil , exemple : bande de labour).
- Par définition, l'écart-type des hauteurs (s) est donné par la relation

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \cdot (\sum h_i^2 - n \cdot \bar{h}^2) \right]^{1/2} \quad 18$$

où

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \cdot \sum h_i \quad 19$$

- La longueur de corrélation est une grandeur qui caractérise l'indépendance entre deux mesures. Elle est définie comme étant la valeur pour laquelle la fonction de corrélation [ $\rho(x)$ ] est égale à 0.37. Ce qui se traduit par :

$$\rho(l) = \frac{1}{e} \quad 20$$

Cette longueur de corrélation est exprimée en mètre (m). Cette caractéristique géométrique est évaluée après ajustement de la fonction d'auto-corrélation expérimentale.

Dans l'hypothèse où la structure géométrique de la rugosité peut être considérée comme aléatoire et isotrope, les auteurs (ULABY et al, 1982 (1)) proposent deux types d'ajustement :

- ajustement du type exponentiel :

$$\rho(x) = \exp(x/l) \quad 21$$

- ajustement du type gaussien :

$$\rho(x) = \exp(-x^2/l^2) \quad 22$$

où  $l$  est la longueur de corrélation et  $x$  le pas de l'échantillonnage du profil de rugosité.

De nombreux travaux du sol présentent une structure géométrique directionnelle imposée par le profil de travail (labour). Dans ces conditions, les auteurs (ULABY et al, 1982 (2)) proposent un modèle d'ajustement permettant la prise en compte de deux échelles de rugosité :

$$\rho(x) = \exp(-x^2/\sqrt{l^4 + x^2 L^2}) \quad 23$$

où  $L$  est la longueur de corrélation à grande échelle et  $l$  la longueur de corrélation à petite échelle.

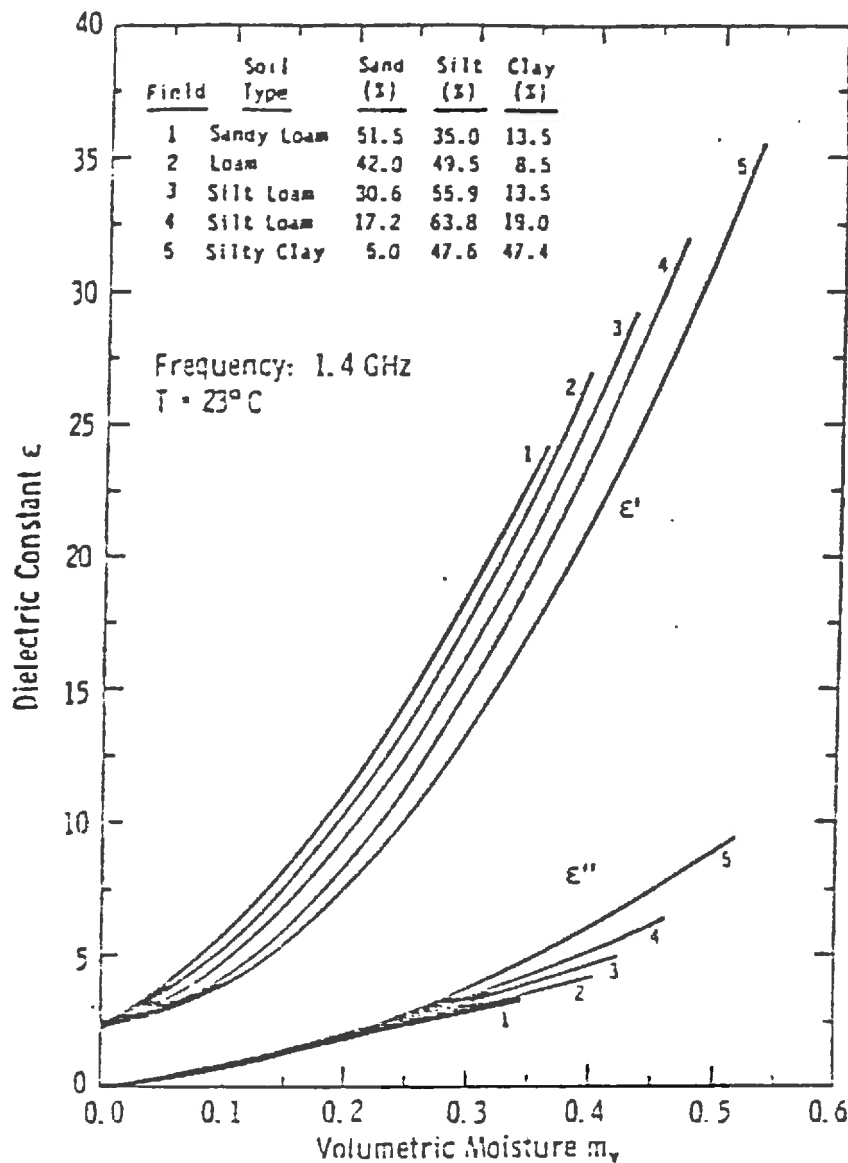
Ils définissent la longueur de corrélation équivalente :

$$l_e = (L^2/2 + \sqrt{(L^2/2)^2 + l^4})^{1/2} \quad 24$$

#### IV.3 HUMIDITE DE SURFACE

Dans la relation (17), nous avons constaté que le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est dépendant de deux termes dont l'un est l'humidité volumique ( $m_v$ ).

Au chapitre II, nous avons vu que lorsque l'onde électromagnétique émise par le radar arrive à la surface de séparation "sol-air", une partie est réfléchié ; cette réflexion est rendue possible grâce au pouvoir réflec-



(a)

$$\epsilon' = (a_0 + a_1 s + a_2 c) + (b_0 + b_1 s + b_2 c) m_v + (c_0 + c_1 s + c_2 c) m_v^2$$

$$\epsilon'' = (a'_0 + a'_1 s + a'_2 c) + (b'_0 + b'_1 s + b'_2 c) m_v + (c'_0 + c'_1 s + c'_2 c) m_v^2$$

Fig IV-1

Calcul de la permittivité diélectrique  
Modèle de Hallikainen  
(Hallikainen et al, 1985)

teur du sol ou encore appelé coefficient de réflexion de Fresnel. Le coefficient de réflexion de Fresnel est, par définition, le rapport de la puissance réfléchie sur la puissance incidente, ce coefficient diffère d'une polarisation à une autre ; ainsi, dans notre cas, nous allons donner l'expression du coefficient de Fresnel pour les polarisations parallèles HH et VV.

$$R_{hh}(\theta) = \frac{(\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2} - \cos \theta}{(\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2} + \cos \theta} \quad 25$$

Ceci est valable pour la polarisation HH et, pour la polarisation VV, nous avons :

$$R_{vv}(\theta) = \frac{\epsilon \cos \theta - (\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\epsilon \cos \theta + (\epsilon - \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad 26$$

Dans les deux termes, apparaît ( $\epsilon$ ) qui est la constante diélectrique qui dépend de l'humidité du sol. Elle est une grandeur complexe qui se traduit par la somme d'une partie réelle et d'une partie imaginaire

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' \quad 27$$

Dans notre travail, les permittivités diélectriques ( $\epsilon'$ ) et ( $\epsilon''$ ) ont été calculées suivant le modèle de Hallikainen (HALLIKAINEN et al, 1985). Dans ce modèle, la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité sont calculées par les relations suivantes :

$$\epsilon' = (a_0 + a_1 s + a_2 c) + (b_0 + b_1 s + b_2 c) m_v + (c_0 + c_1 s + c_2 c) m_v^2 \quad 28$$

et

$$\epsilon'' = (a'_0 + a'_1 s + a'_2 c) + (b'_0 + b'_1 s + b'_2 c) m_v + (c'_0 + c'_1 s + c'_2 c) m_v^2 \quad 29$$

où :

S est le pourcentage du sable

C est le pourcentage d'argile

$m_v$  est la teneur en eau volumique

$a_0, a_0', \dots b_0, b_0', \dots c_0, c_0' \dots$  sont des coefficients d'ajustement dépendants de la fréquence.

La figure IV1 montre la variation de ( $\epsilon$ ) en fonction de la teneur en eau volumique ( $m_v$ ).

## V - PRESENTATION DU MODELE

---

Au paragraphe II.4, nous avons défini les différents types de comportements : spéculaire, intermédiaire et diffus. Les auteurs (ULABY et al, 1982 (3)) ont cherché par la modélisation à expliquer ces différents comportements. Nous nous limiterons dans ce chapitre à la description des modèles proposés par les auteurs en différenciant dans les relations analytiques proposées les termes qui dépendent de l'humidité volumique (fonction  $F_1$ ) et ceux qui dépendent de la rugosité de surface (fonction  $F_2$ ).

Les modèles proposés utilisent la méthode de l'optique physique basée sur le calcul des champs magnétiques et électriques diffusés à la surface du sol (BECKMAN et SPIZZICHINO, 1963). Le calcul de ces champs est qu'en chaque point de la surface, le champ tangent peut être évalué en fonction des propriétés de réflexion sur le plan tangent. Cette condition implique que, localement, la surface doit être considérée comme lisse. Pour effectuer le calcul, des hypothèses supplémentaires sont nécessaires :

- la surface illuminée doit avoir des dimensions plus grandes que la longueur de corrélation ;
- la distribution des irrégularités doit être aléatoire.

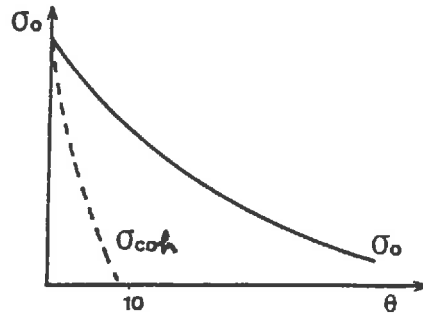
Le modèle ne prend en compte que des réflexions de surface, la diffusion de volume étant négligée.

Nous ne décrivons que la formulation des modèles en polarisation parallèle HH et VV.

Le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) peut être exprimé sous forme de la somme des composantes cohérentes et incohérentes (ULABY et al, 1982 (3)).

$$\sigma_0 = \sigma_{0\text{coh}} + \sigma_{0\text{inc}} \quad 30$$

Ceci peut se résumer sur la courbe ci-dessous :



Cette courbe signifie que l'on calcule la composante cohérente pour des angles inférieurs à 10°, car elle tend à devenir négligeable au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente. Par contre, la composante incohérente négligeable devant la composante cohérente pour des incidences petites est pratiquement égale à la composante totale ( $\sigma_0$ ) lorsque l'angle d'incidence augmente.

### V.1 CALCUL DE LA COMPOSANTE COHERENTE

On calcule la composante cohérente dans le cas de la surface considérée comme lisse devant la longueur d'onde. Le modèle de l'optique physique est appliqué et, dans ce cas, la composante incohérente est négligeable devant la composante cohérente

$$\sigma_{coh} = \frac{4k^2 a^2}{\pi} \cdot |R_{pp}|^2 \cdot \exp(-4k^2 s^2 \cos^2 \theta) \quad 31$$

où

$k$  est le nombre d'onde,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda =$  longueur d'onde en(m)

$s$  est l'écart-type des hauteurs qui caractérise la géométrie

$R_{pp}$  est le coefficient de Fresnel qui est fortement tributaire de l'humidité

$a$  est la largeur de la surface éclairée (m)

On voit que le terme ( $\sigma(\theta)$ ) dépend de deux facteurs : l'humidité volumique représentée par  $R_{pp}$  et la rugosité représentée par  $s$ .

## V.2 CALCUL DE LA COMPOSANTE INCOHERENTE

Parmi les nombreuses théories de la diffusion de surface, celle de KIRCHHOFF, ou d'optique physique, est la plus largement utilisée. 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 et, dans le cas du sol, on aura deux rugosités pour deux types d'approximation :

- l'approximation de la phase stationnaire pour des surfaces ayant un grand écart-type des hauteurs ;
- l'approximation scalaire du champ pour des surfaces de faible pente et avec un écart-type des hauteurs petit ou moyen. Les conditions de validité de l'approximation de KIRCHHOFF sont données par :

$$k.l > 6$$

$$l^2 > 2.76 s \lambda$$

32 (ULABY et al 1982 (3))

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

Le choix de l'une ou de 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.

### V.2.1 Approximation de la phase stationnaire

La condition de validité de l'approximation de la phase stationnaire est donnée par (ULABY et al, 1982 (3))

$$(2k.s.\cos\theta)^2 > 10$$

33

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. Pour cela, on exclut les effets de diffraction locale.

Cette approximation ne s'applique qu'à des sols "rugueux" pour lesquels :

$$k \cdot s > 3$$

34

Le calcul de la section efficace de rétrodiffusion, étape par étape, nécessiterait un développement long et fastidieux basé sur les lois physiques et fondamentales de l'électromagnétisme. Nous nous bornerons à donner ici l'expression :

$$\sigma_{\text{0inc}}(\theta) = \frac{|R_{pp}(0)|^2}{2 \cos^2 \theta \cdot m^2} \cdot \exp\left(-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2 m^2}\right) \quad 35$$

où

$R_{pp}(0)$  est le coefficient de réflexion de Fresnel évalué à l'incidence normale. Ce terme est fortement dépendant de l'humidité comme cela a été démontré au paragraphe IV.3.

$$m^2 = -s^2 |\rho''(0)| \quad 36$$

$m$  correspond à l'écart-type des pentes de la surface.

Au vu de ces deux termes  $R_{pp}(0)$  et  $m$ , on constate que  $\sigma_{\text{0inc}}$ , pour la phase stationnaire dépend de deux facteurs : humidité et géométrie. Cette équation est uniquement fonction des pentes de la surface et indépendante de la forme de la fonction d'auto-corrélation de cette surface. Ceci provient de l'hypothèse que le terme  $[2k \cdot s \cdot \cos \theta]^2$  est grand.

Il est important de souligner que ce coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est indépendant de la polarisation choisie (HH ou VV) car le coefficient de Fresnel qui intervient dans ce coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est calculé à l'incidence normale. En incidence normale on montre que  $|R_{hh}(0)| = |R_{vv}(0)|$ .

V.2.2 Approximation scalaire des champs

Cette approximation n'est possible que pour des surfaces "lisses" pour lesquelles

$$k \cdot s \leq 3$$

37

La validité de l'approximation scalaire des champs (BECKMANN, 1963) suppose que l'écart-type des pentes de la surface, notée  $m$ , est inférieure de l'ordre de 0,25. On sait par définition que l'écart-type des pentes d'un processus aléatoire Gaussien,  $Z(n)$ , de moyenne nulle et de variance  $s$ , est donné par  $m = [-s^2 \rho''(0)]^{1/2}$  d'où la condition de validité :

$$\left( -s^2 \rho''(0) \right)^{1/2} < 0.25 \quad 38$$

$\rho''(0)$  est la dérivée seconde de la fonction d'autocorrélation de  $Z(n)$  au point  $x = 0$

Comme dans le cas de l'approximation de la phase stationnaire, on se contente de donner ici l'expression ( $\sigma_{\text{oinc}}$ ) dans le cas de l'approximation scalaire des champs

$$\sigma_{\text{oinc}} = 2 |R_{pp}|^2 \cdot \cos^2 \theta \int_0^\infty \exp[-(2k \cdot s \cdot \cos \theta)^2 (1 - \rho(\xi))] \cdot J_0(2k \cdot s \cdot \sin \theta \cdot \xi) \cdot \xi \cdot d\xi \quad 39$$

où  $R_{pp}(\theta)$  est le coefficient de réflexion de Fresnel

$J_0$  la fonction de Bessel d'ordre 0

$\xi$  le pas de calcul de l'intégrale

$\rho(\xi)$  la fonction d'autocorrélation

On constate encore ici que même dans le cas de l'approximation scalaire des champs,  $(\sigma_{0inc})$  dépend de deux facteurs : humidité et géométrie.

Mais dans le cas présent intervient un troisième facteur qui est la forme de l'état de surface caractérisée par la fonction de corrélation  $[\rho(\xi)]$

## VI - APPLICATION DES MODELES

---

*si il sort  
est le ?* ( Dans le cas du radar ERS-1, qui sera mis en orbite vers 1990, les configurations proposées sont :

- fréquence : 5.30 GHZ
- incidence : 23°
- polarisation : HH

Comme tout autre capteur radar embarqué, ERS-1 aura une incidence supérieure à 20°. Ce choix privilégié d'incidences élevées est justifié par :

- l'augmentation de la surface observée au sol
- la haute résolution ne peut être obtenue que pour ces incidences.

*no. je pense  
o. en un petit  
d'ailleurs et de  
moyen* { Dans ces conditions, la simulation de la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) revient uniquement à celle de la mesure de la composante incohérente (voir chapitre V). Pour le calcul de celle-ci, nous ne nous intéressons qu'à la formulation du modèle de KIRCHHOFF en approximation scalaire des champs. Le choix unique de cette approximation est justifié par deux raisons complémentaires :

*quel est l'usage  
le type de  
la* - les gammes de variation des caractéristiques géométriques de la rugosité des sols agricoles telle qu'elle est perceptible au niveau de la bibliographie ;

- le choix prévu des configurations radar décrites dans les projets des futurs satellites hyperfréquences ;

*multiplicabilité* qui nous conduisent à estimer des conditions de validité compatibles avec l'application de ce modèle.

FIG VII-1

Influence de la rugosité  
 (3.5Ghz, Pol HH, Ajus exp, l=0.20m, Mv=0.45)

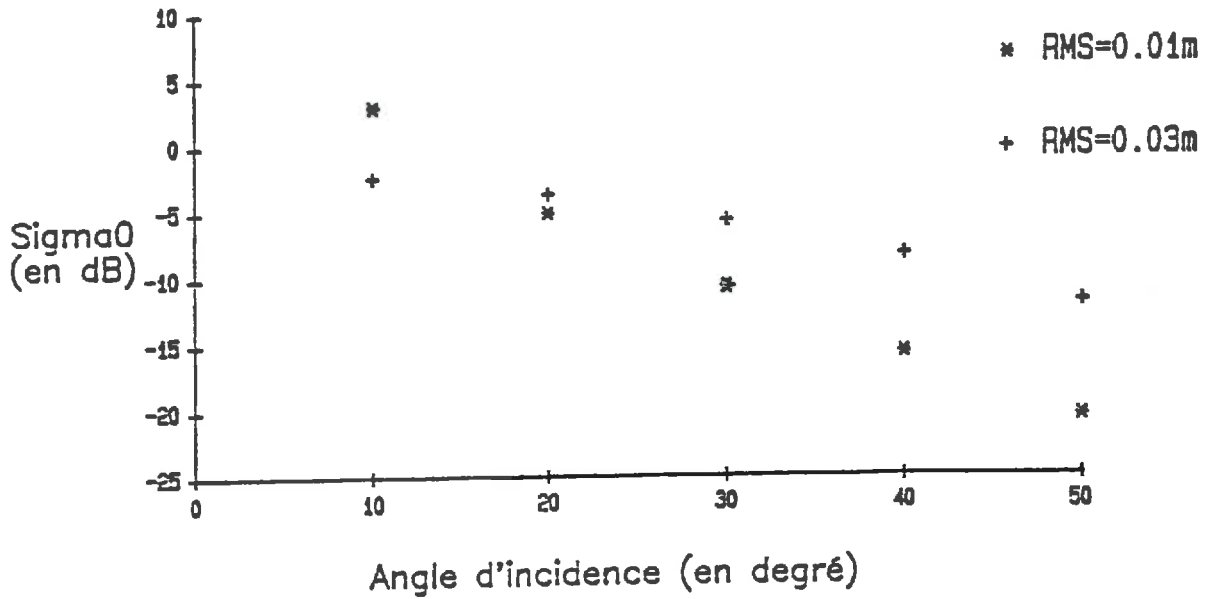
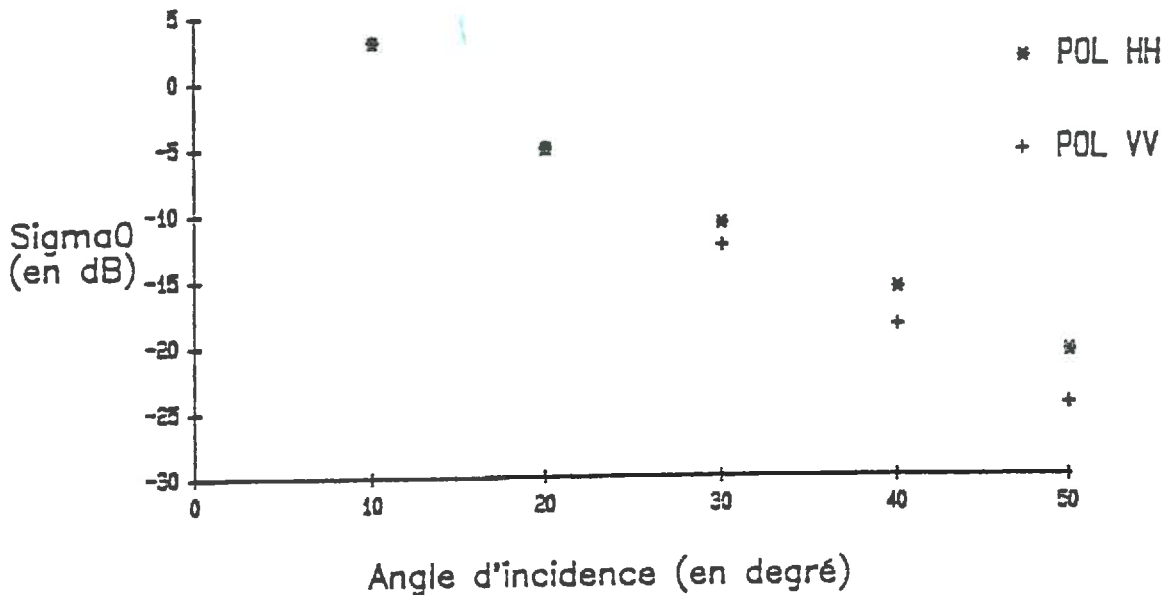


FIG VII-2

Influence de la polarisation  
 (3.5 Ghz, Ajus exp, s=0.01 m, l=0.20m, Mv=0.45)



## VII - SIMULATION A PARTIR DU MODELE

---

L'intérêt de ce chapitre est de vérifier que le modèle peut traduire les comportements angulaires du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) observés expérimentalement.

Dans un premier temps, nous allons observer l'influence de l'écart-type des hauteurs (s), dans un second temps, nous allons observer l'influence du choix de la polarisation parallèle (HH et VV) ; enfin, nous nous intéresserons dans un troisième temps à l'effet de la variation de l'humidité volumique du sol.

### VII.1 EFFET DE LA RUGOSITE - INFLUENCE DE L'ECART-TYPE DES HAUTEURS (s)

La figure n° VII.1 montre le comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) pour deux écart-types des hauteurs.

On constate :

- une forte décroissance pour  $s = 0.010$  m
- une faible décroissance pour  $s = 0.030$  m

Aux deux rugosités, on retrouve l'allure générale des comportements angulaires en fonction de la variation de l'écart-type des hauteurs (s), décrit au paragraphe II.4

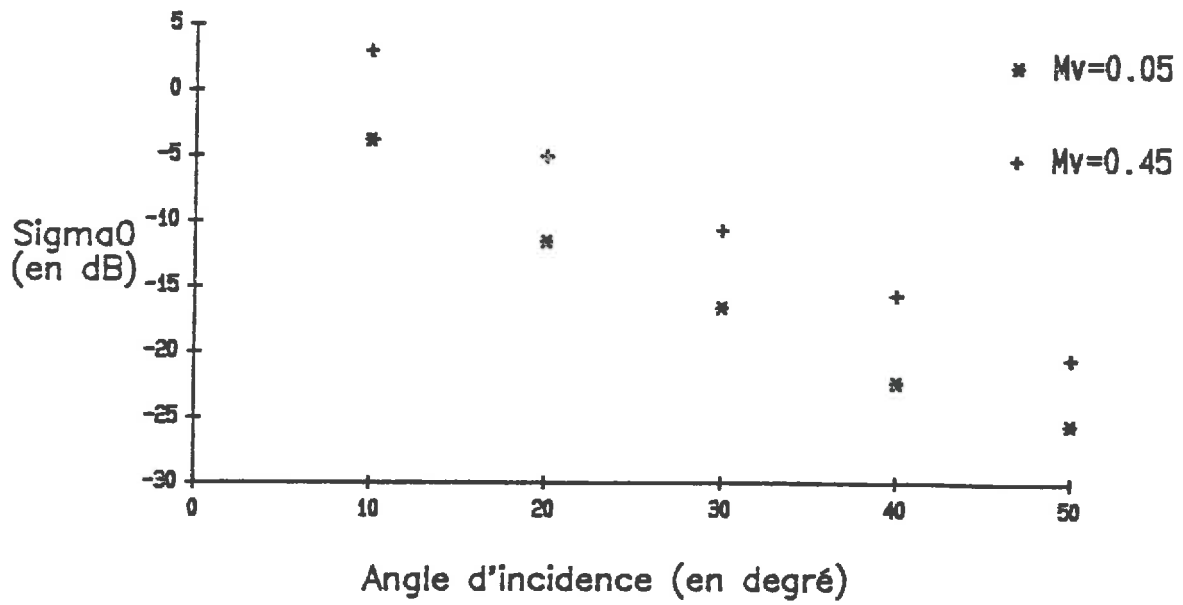
### VII.2 DIFFERENCE ENTRE LES POLARISATIONS PARALLELES HH ET VV

La figure n° VII.2 donne la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'incidence ( $\theta$ ) pour deux polarisations HH et VV. On constate que plus l'angle d'incidence ( $\theta$ ) augmente, les courbes HH et VV se différencient. Cette différence peut s'expliquer

3.5 dB.

FIG VII-3

Influence de l'humidité  
(3.5 Ghz, Pol HH, Ajust exp,  $l=0.20m, s=0.01m$ )



par le fait que la puissance réfléchi n'est pas la même en fonction de la fréquence et de la polarisation.

L'allure générale des courbes de la figure n° VII.2 est conforme à celles obtenues par les auteurs (ULABY et al, 1982 (1)).

### VII.3 EFFET DE L'HUMIDITE

La figure n° VII.3 montre le comportement du coefficient de rétro-diffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'incidence à deux humidités (0.05 et 0.45). On constate qu'il y a un décalage des courbes vers le haut du sol sec au sol humide.

L'allure générale des courbes de la figure n° VII.3 est conforme à celles obtenues par les auteurs (ULABY et al, 1982 (1)).

## VIII - ETUDE DE LA SENSIBILITE

---

Au chapitre III, nous avons montré que le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) dépend de deux facteurs principaux : la rugosité et l'humidité. Dans ce chapitre, nous étudierons l'effet d'une variation prise séparément de ces paramètres sur le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ).

### VIII.1 EFFET DE LA VARIATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

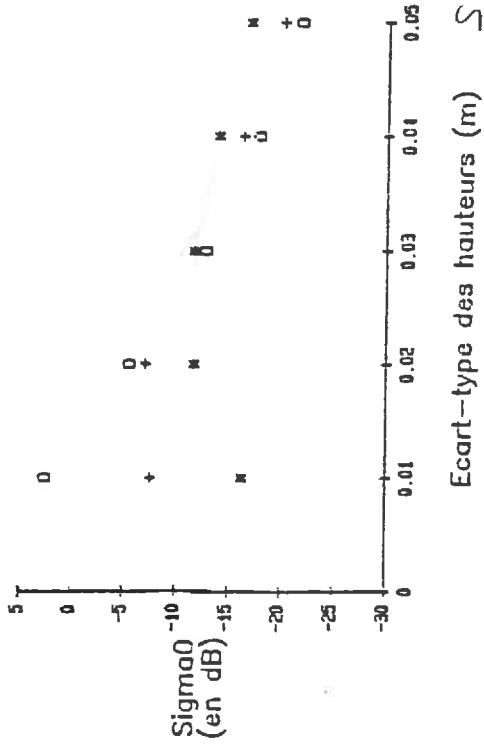
Au chapitre IV, nous avons défini les deux principales grandeurs qui interviennent dans la rugosité, il s'agit de l'écart-type des hauteurs (s) et la longueur de corrélation (l).

Dans un premier temps, nous allons étudier la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'écart-type des hauteurs (s) et, dans un second temps, la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la longueur de corrélation (l). Nous nous limiterons au cas où la fonction d'auto-corrélation est ajustée à une fonction exponentielle. En effet, cette fonction est celle qui donne les meilleurs ajustements aux données expérimentales (FLUHR, 1981 ; BROUSSARD, 1986 ; AUTRET, 1987).

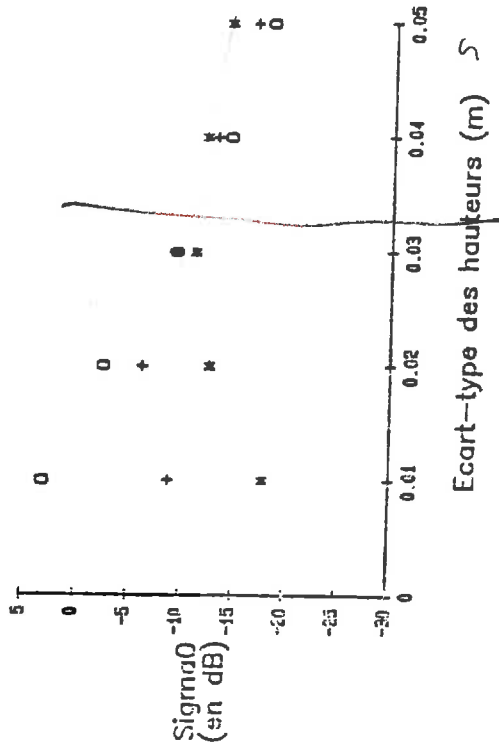
#### VIII.1.1 Variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'écart-type des hauteurs (s)

La figure n° VIII.1 montre la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'écart-type des hauteurs (s), pour une fréquence de 5.3 GHz à trois incidences ( $10^\circ$  -  $30^\circ$  -  $50^\circ$ ) et quatre longueurs de corrélation (0.100 m - 0.150 m - 0.200 m - 0.250 m).

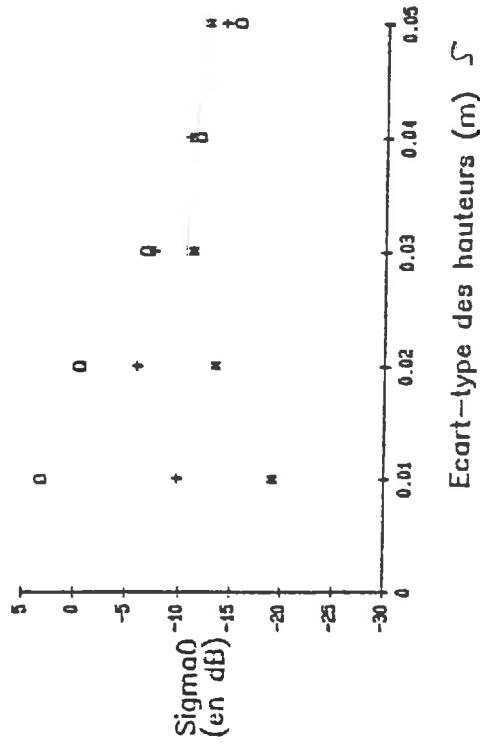
$l = 0.10 \text{ m}$



$l = 0.15 \text{ m}$



$l = 0.20 \text{ m}$



$l = 0.25 \text{ m}$

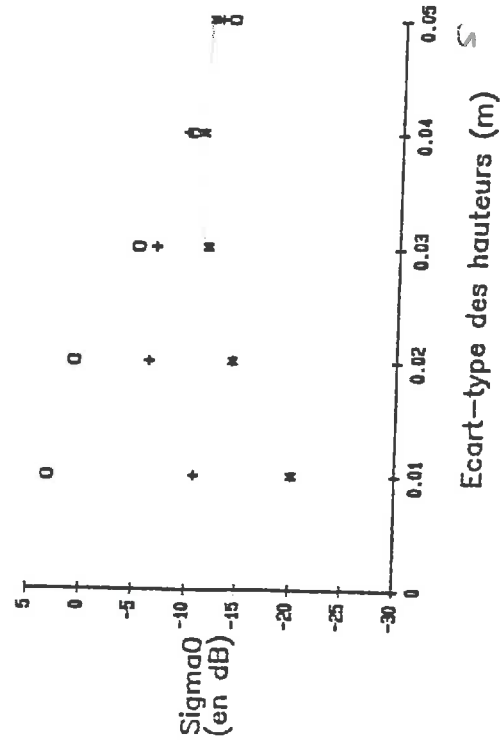


FIG VIII-1

Influence de l'écart-type des hauteurs (s)  
(5.3 Ghz, Pol HH, Ajust exp,  $Mv=0.30$ )

On constate que les quatre représentations révèlent les mêmes allures de la relation  $\sigma_0 = f(s)$  en fonction de l'angle d'incidence. On remarque cependant que :

- Quelle que soit la longueur de corrélation, plus l'incidence est petite et plus la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'écart-type des hauteurs ( $s$ ) est grande.

- L'effet de la longueur de corrélation dépend de l'incidence. En effet, on remarque :

\* pour les incidences faibles ( $\theta = 10^\circ$ ), la variation de  $\sigma_0 = f(s)$  décroît avec la longueur de corrélation ( $l$ )

\* pour les incidences fortes ( $\theta = 50^\circ$ ), la variation de  $\sigma_0 = f(s)$  croît avec la longueur de corrélation ( $l$ ) ; mais elle exerce un effet moindre dans ces conditions.

*19 notes*

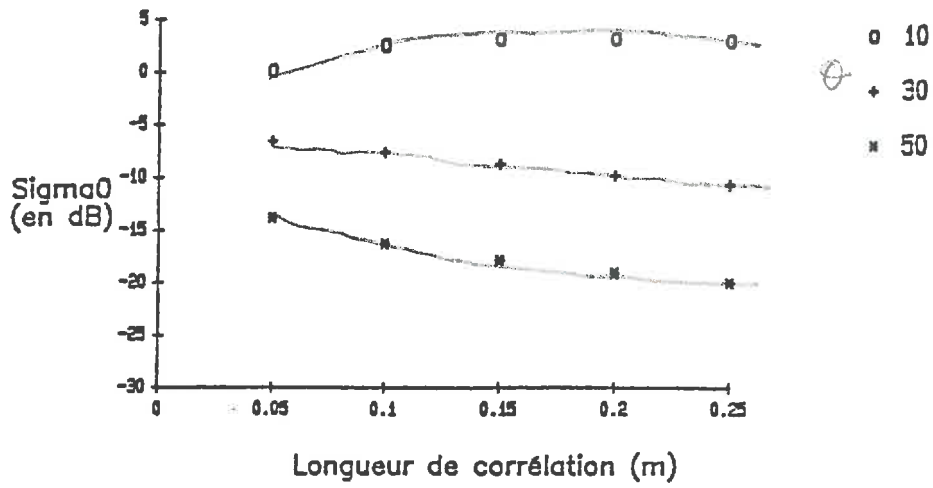
Nous allons étendre notre étude dans le cas où l'on a deux fréquences (2.20 GHz et 5.3 GHz), deux longueurs de corrélation (0.150 m et 0.250 m) à deux incidences ( $10^\circ$  et  $50^\circ$ ). En faisant la différence des points extrêmes des courbes pour chaque incidence, fréquence et longueur de corrélation, on trouve les résultats recensés dans le tableau suivant :

*différence entre  
quatre points*

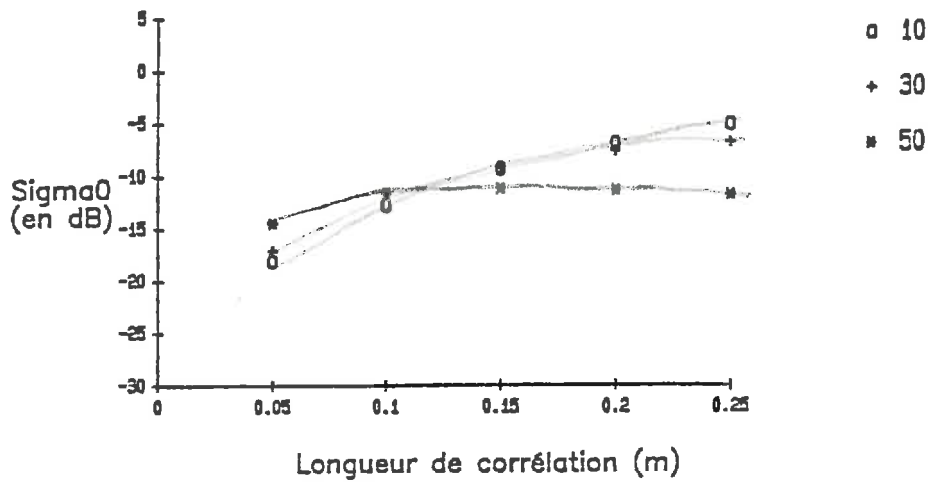
?

	l = 0.150 m		l = 0.250 m	
incidence fréquence	$10^\circ$	$50^\circ$	$10^\circ$	$50^\circ$
2.20 GHz	12.20	10.39	8.82	12.31
5.30 GHz	21.42	3.70	16.81	8.97

$s = 0.01 \text{ m}$



$s = 0.03 \text{ m}$



$s = 0.05 \text{ m}$

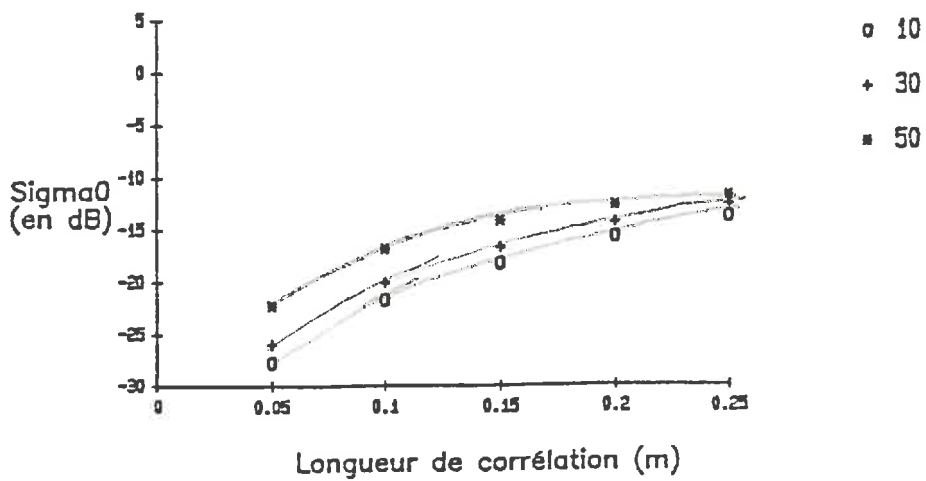


Fig VIII-2

Influence de la longueur de corrélation ( $l$ )  
(5.3 Ghz, Pol HH, Ajust exp,  $M_v = 0.30$ )

On constate aussi dans ce tableau que quelle que soit la longueur de corrélation donnée :

- pour des incidences faibles ( $\theta = 10^\circ$ ), la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) augmente avec la fréquence
- pour des incidences fortes ( $\theta = 50^\circ$ ), la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) diminue quand la fréquence augmente.

Globalement, on peut estimer qu'une variation de  $\pm 1$  cm de l'écart-type des hauteurs (s) peut induire une variation de 1 à 5 db sur le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) suivant le choix de la configuration.

#### VIII.1.2 Variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la longueur de corrélation (l)

La figure n° VIII.2 montre la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la longueur de corrélation (l), pour une fréquence de 5.3 GHZ à trois incidences ( $10^\circ - 30^\circ - 50^\circ$ ) et pour trois écart-types des hauteurs (0.010 m - 0.03 m - 0.050 m). On constate que :

- plus l'écart-type des hauteurs (s) est grand, plus la variation de  $\sigma_0 = f(l)$  est grande, quelle que soit l'incidence.

Nous allons étendre notre étude dans le cas où l'on a deux fréquences (2.20 GHZ et 5.30 GHZ), deux écart-types des hauteurs (0.010 m et 0.050 m) à deux incidences ( $10^\circ$  et  $50^\circ$ ). En faisant la différence des points extrêmes des courbes pour chaque incidences, fréquence et écart-type des hauteurs, on trouve les résultats recensés dans le tableau suivant :

*but c'est de ?  
que de sens. (1) ?  
si un petit pb =*

incidence fréquence	s = 0.010 m		s = 0.050 m	
	10°	50°	10°	50°
2.20 GHZ	1.63	6.13	4.21	0.23
5.30 GHZ	0.20	2.16	4.41	2.35

Ce tableau montre que :

- pour un sol lisse (s = 0.010 m), quelle que soit l'incidence, la variation de  $\sigma_0 = f(l)$  décroît quand la fréquence augmente.
- pour un sol rugueux (s = 0.050 m), quelle que soit l'incidence, la variation de  $\sigma_0 = f(l)$  croît avec la fréquence.

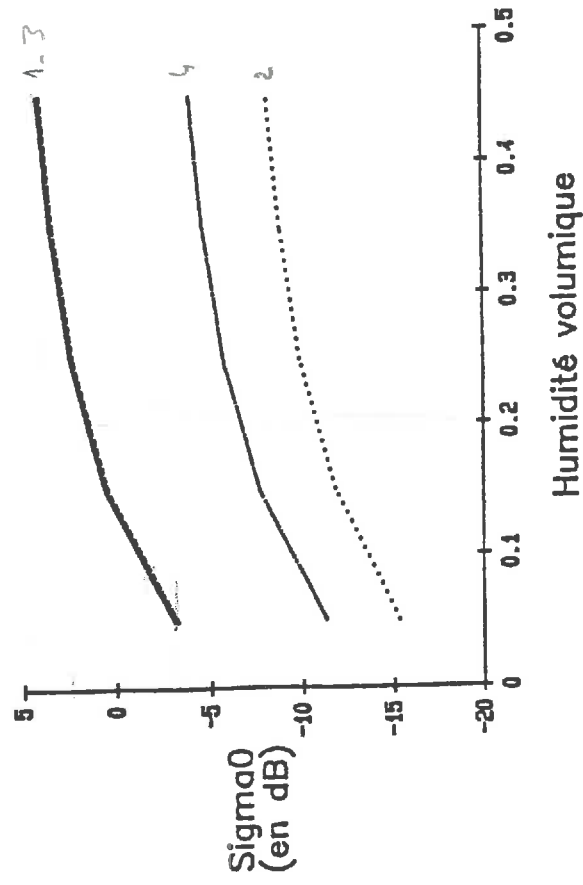
Globalement, en terme de sensibilité, une variation de  $\pm 1$  cm de la longueur de corrélation (l), semble induire une variation inférieure à 1 db sur le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ).

Par rapport aux résultats obtenus au paragraphe VIII.1.1 le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est davantage sensible à une variation de l'écart-type des hauteurs de rugosité (s) qu'à une variation de la longueur de corrélation (l).

## VIII.2 EFFET DE LA VARIATION DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE

La figure VIII.3 décrit la variation du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'humidité volumique ( $\sigma_0$ ), pour une fréquence de 5.3 GHZ, à trois incidences (10° - 30° - 50°) et pour quatre couples de caractéristiques géométriques (écart-type des hauteurs (s), longueur de corrélation (l)).

Incidence 10



Incidence 30

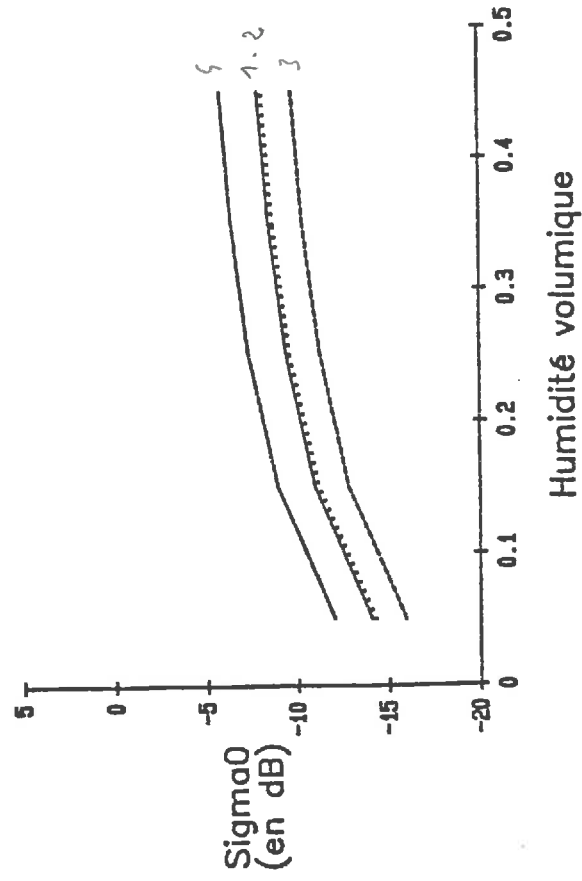
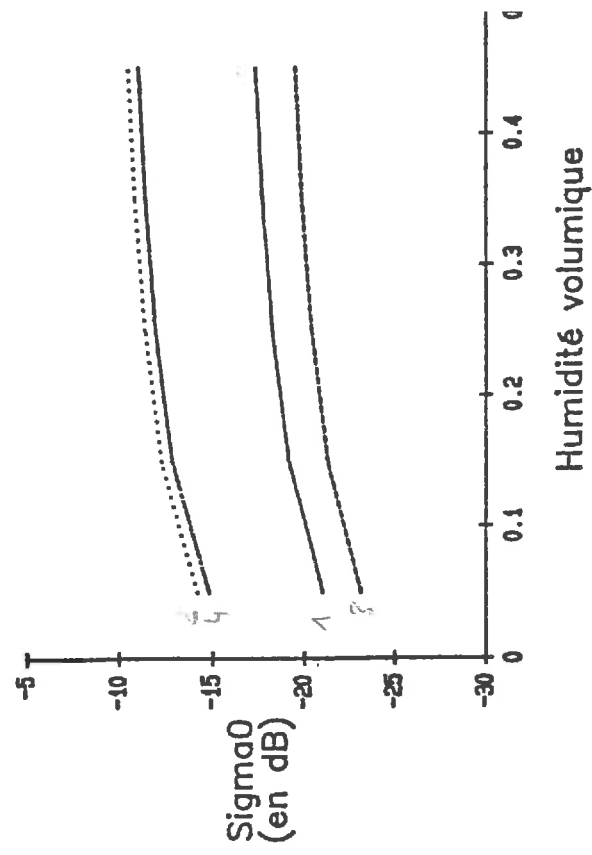


Fig VIII-3

Influence de l'humidité volumique (Mv)  
(5.3 Ghz, Pol HH, Ajus exp)

- 1 —  $l=0.15$  m  
 $s=0.01$  m
- 2 ....  $l=0.15$  m  
 $s=0.03$  m
- 3 —  $l=0.25$  m  
 $s=0.01$  m
- 4 - -  $l=0.25$  m  
 $s=0.03$  m

Incidence 50



On constate que :

- quelles que soient les caractéristiques géométriques, l'influence de l'humidité volumique ( $m_v$ ) dépend du choix de l'incidence ( $\theta$ ). Elle est d'autant plus faible que l'incidence est élevée.

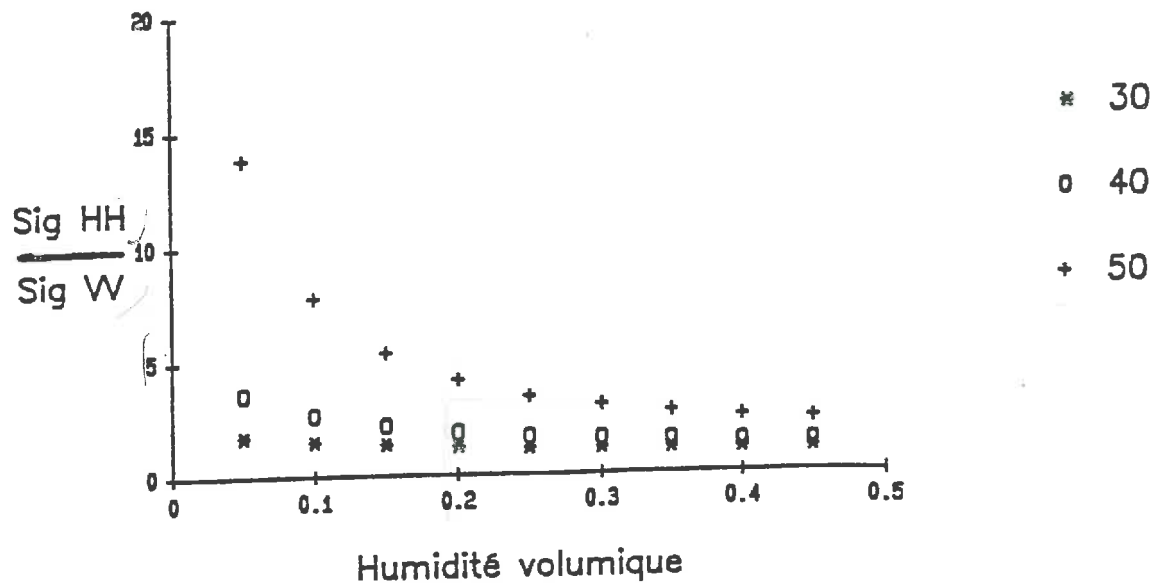
- quelle que soit l'incidence, la gamme de variation imposée aux paramètres géométriques a une influence sur la valeur estimée du coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma_0$ ) mais pas d'influence sur sa variation relative en fonction de l'humidité volumique ( $m_v$ ). Ce résultat, déjà mis en évidence par AUTRET (1986), n'est pas évident à comprendre a priori. Il tend à montrer que les paramètres de rugosité n'interagissent pas avec l'humidité volumique.

Une simulation effectuée à la fréquence de 2.2 CHZ confirme les mêmes résultats à la différence près que la gamme de variation du coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma_0$ ), en fonction de l'humidité volumique ( $m_v$ ) est légèrement plus petite.

Globalement, en terme de sensibilité, une variation de  $\pm 0,01$  point de l'humidité volumique semble induire une variation inférieure à 1 db sur le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ).

*Handwritten notes:*  
-  $\sigma_0$  (db) = 0db  
- pour 50% humidité  
-  $\sigma_0$  (db)  
- humidité relative à 50%  
- plus pour l'humidité. Toute variation pour un objet  
- condensation pour une catastrophe -  
- 1dB pour 20% ( $\approx 20\%$ )

f = 2.2 Ghz



f = 5.3 Ghz

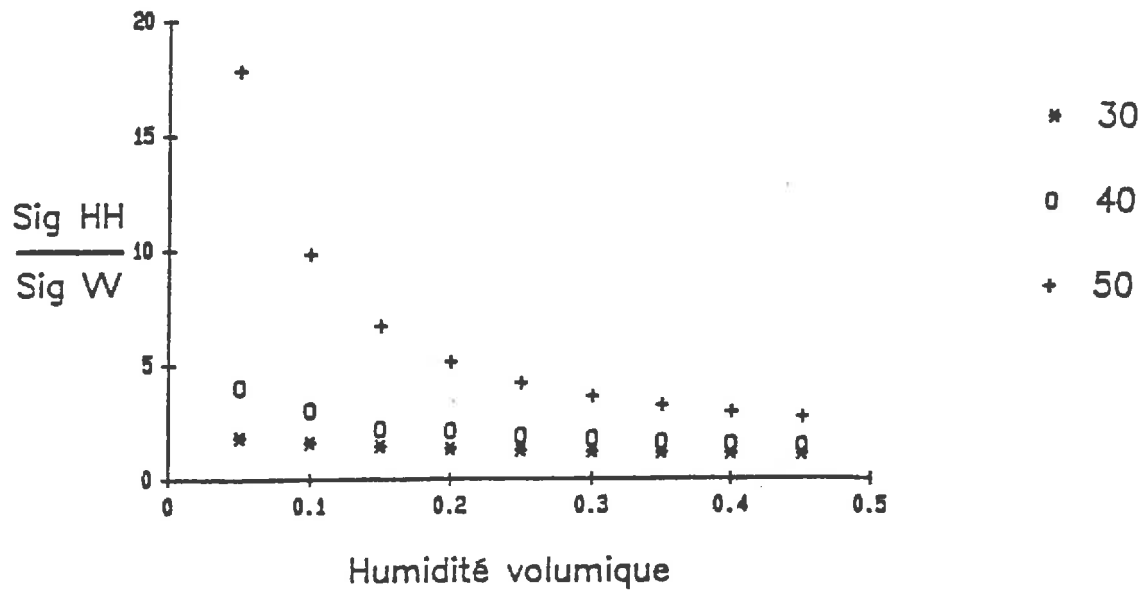


Fig IX-1

Etude du rapport  $\text{Sigma}_0 \text{ HH} / \text{Sigma}_0 \text{ W}$   
en fonction de l'humidité volumique

## IX - TELEDETECTION DE LA TENEUR EN EAU - Contrainte imposée par les observations à l'échelle satellitaire

---

Les configurations optimales à la télédétection de la teneur en eau proposées par les auteurs (ULABY et al, 1978) ; PAUSADER, 1982 ; WITONO, 1986) ne sont pas applicables. Dans ces conditions, le choix d'une incidence élevée ne permet pas de négliger l'effet de la variation des paramètres de rugosité sur la mesure radar. Une seule configuration radar ne saurait être alors suffisante pour effectuer une mesure de la teneur en eau de la surface du sol. La combinaison des configurations radar conduisant au calcul d'une grandeur indépendante des variations des paramètres de rugosité doit être envisagée.

Pour cela, AUTRET (1987) a proposé la combinaison des mesures en polarisation HH et VV. En effet, dans l'équation du modèle de KIRCHHOFF (approximation scalaire des champs), on remarque que le rapport  $\sigma_{0HH}/\sigma_{0VV}$  est indépendant des paramètres de la rugosité. Ceci provient du fait que :

$$\frac{\sigma_{0HH}}{\sigma_{0VV}} = \frac{|R_{HH}|^2}{|R_{VV}|^2} \quad 40$$

avec  $R_{HH}$  et  $R_{VV}$  qui sont respectivement les coefficients de réflexion de FRESNEL avec polarisation HH et VV.

La figure n° IX.1 montre la variation du rapport  $\frac{\sigma_{0HH}}{\sigma_{0VV}}$  en fonction de l'humidité volumique ( $m_v$ ). On constate que :

- $\sigma_{0HH} / \sigma_{0VV}$  augmente avec l'angle d'incidence
- $\sigma_{0HH} / \sigma_{0VV}$  augmente lorsque l'humidité diminue
- pour des incidences élevées, l'écart entre les valeurs obtenues sur un sol sec ( $m_v=0,10$ ) et celui obtenu sur un sol très humide ( $m_v=0,45$ ) s'accroît avec la fréquence.

$\theta > 60^\circ \rightarrow$   
insensibilité aux sols humides.  
pb de pente (localisation de point visé...)

Nous avons étudié pour différentes fréquences et incidences la variation du rapport  $\sigma_{0\text{ HH}} / \sigma_{0\text{ VV}}$  en fonction de l'humidité volumique ( $m_v$ ). Cependant, il reste à définir en fonction de la gamme des paramètres de rugosité aussi large que possible une configuration radar tra-  
duisant, quelle que soit la cible observée, un comportement de type plutôt spéculaire qui permet la différenciation des mesures en polarisation HH et VV en fonction de l'incidence.

## X - VALIDATION DES MODELES

---

L'intérêt de ce chapitre est d'utiliser les données de :

- FLUHR (1981)
- WITONO (1986)
- BROUSSARD (1986)

et de calculer, à l'aide du modèle, une estimation des coefficients de rétrodiffusion radar et de les confronter aux résultats expérimentaux donnés par les auteurs.

### X.1 VALID 1 - Etude du comportement angulaire du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ )

Les données de base proviennent de la thèse de FLUHR (1981). La surface du sol étudiée est une surface hersée. Les données de base servant au calcul par les modèles sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

RADAR		S O L			
F :	1.50 GHZ	$m_V$	s (m)	l (m)	ajuste - ment
$\theta$ :	10° 20° 30° 40° 50°	0.03	0.014	0.240	exp
polarisation :	HH	0.17	0.014	0.240	exp
		0.22	0.014	0.240	exp

$l=0.24 \text{ m}, s=0.014 \text{ m}, Mv=0.03$

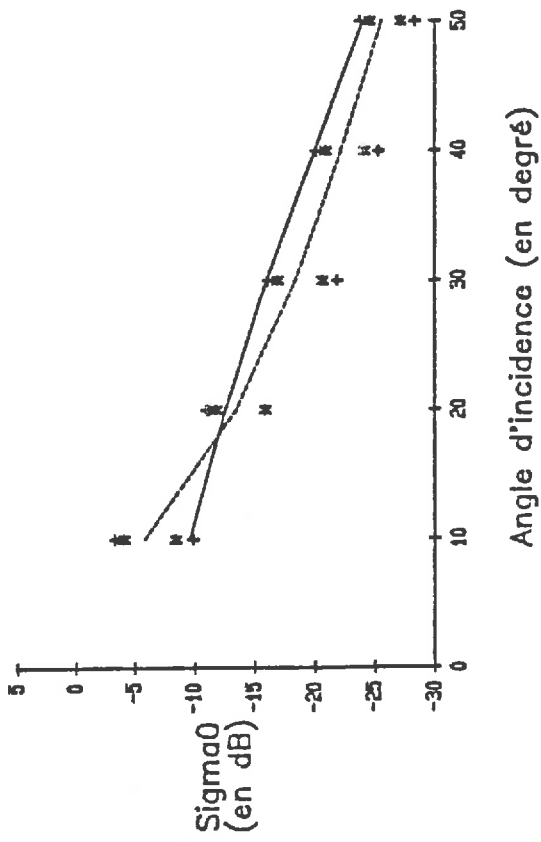
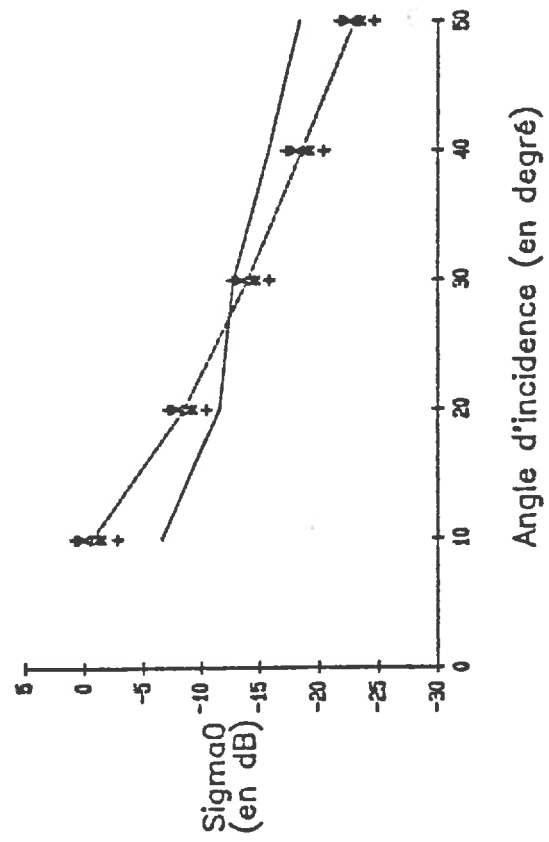
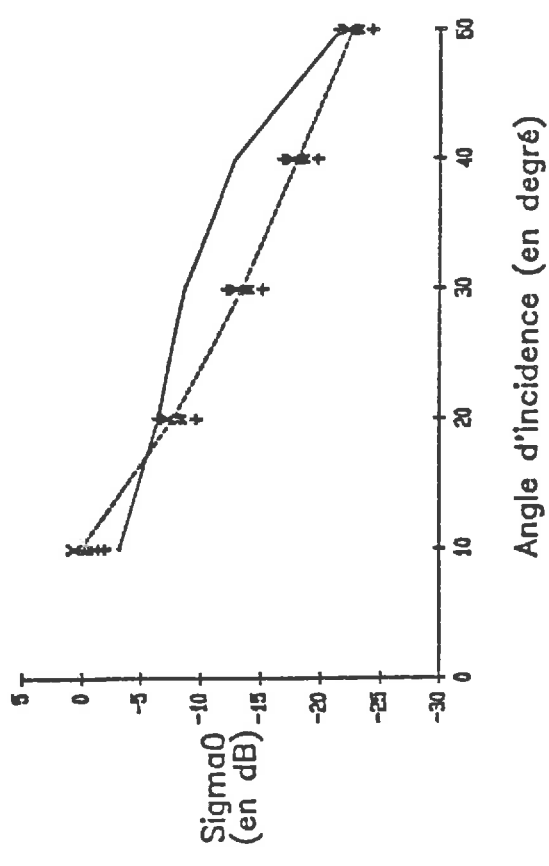


Fig X-1  
Validation 1  
(Fluhr, 1981)

$l=0.24 \text{ m}, s=0.014 \text{ m}, Mv=0.17$



$l=0.24 \text{ m}, s=0.014 \text{ m}, Mv=0.22$



La figure n° X.1 compare les comportements angulaires du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) expérimental (trait plein) et simulé (tireté) par le modèle de KIRCHHOFF, approximation scalaire des champs à trois humidités volumiques ( $m_V = 0.03$ ,  $m_V = 0.17$ ,  $m_V = 0.22$ ).

On constate que les résultats issus du modèle rendent compte de la décroissance du comportement angulaire. Néanmoins, il apparaît notamment aux humidités volumiques ( $m_V = 0.17$ ,  $m_V = 0.22$ ) des écarts relatifs importants entre valeurs expérimentales et simulées.

Afin de tester l'influence des erreurs sur le choix des paramètres, nous avons imposé à la longueur de corrélation ( $l$ ) et à l'écart-type des hauteurs ( $s$ ) une variation relative de  $\pm 10\%$  et  $\pm 30\%$  et avons fixé pour la teneur en eau volumique ( $m_V$ ) une erreur de  $\pm 0.020$ , ordre de grandeur de l'écart-type de la teneur en eau moyenne estimée à la surface d'un sol nu sur une parcelle, dans des conditions homogènes (WITONO, 1986). Nous avons représenté (symboles + et \* ) les courbes simulées les plus défavorables compte tenu des erreurs imposées.

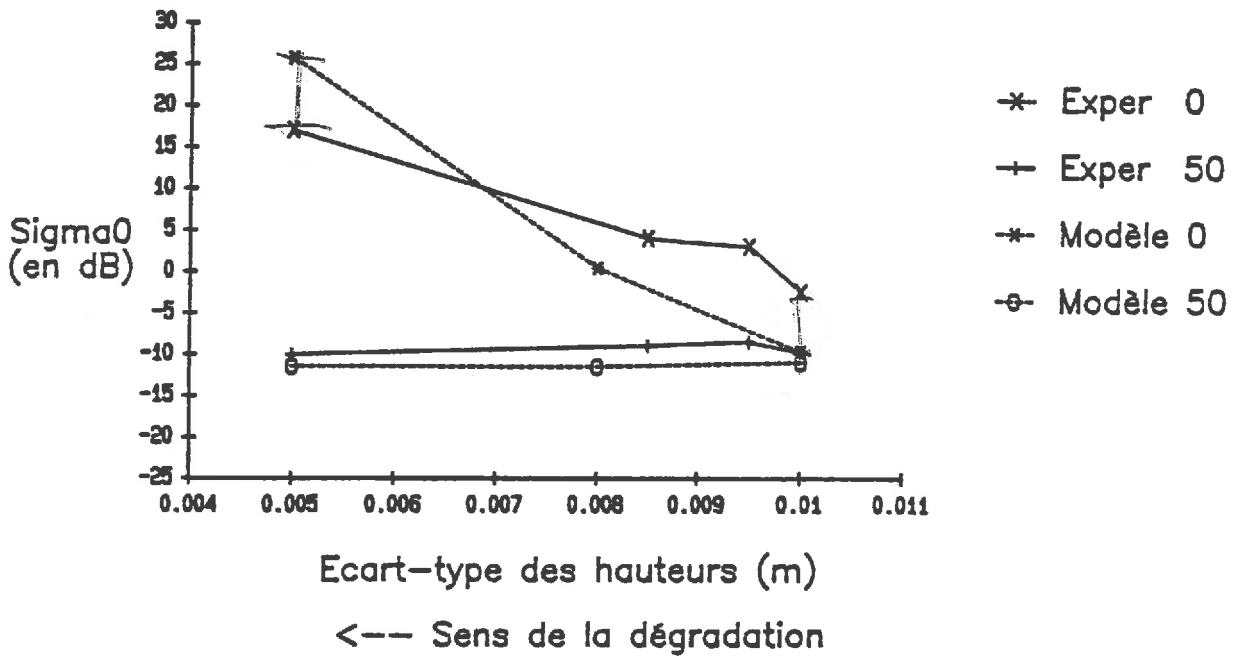
Celles-ci ne peuvent à elles seules expliquer l'écart relatif des courbes expérimentales et simulées dans les cas les plus défavorables. Il faudrait fixer aux paramètres des ordres de grandeur de l'erreur importante pour espérer pouvoir expliquer ces différences dans les cas les plus défavorables.

## X.2 VALID 2 - Etude du comportement du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de l'écart-type des hauteurs (s)

Les données de base proviennent du mémoire de BROUSSARD (1986), elles ont été récoltées lors de la campagne d'Avignon en 1986. Pour cette validation, nous confronterons des données expérimentales acquises à incidence normale ( $\theta = 0^\circ$ ) avec celles calculées par le modèle utilisé par le calcul de la composante cohérente (voir paragraphe n° V.1).

Fig X-2

Validation 2  
(Broussard, 1986)



La surface du sol étudiée est une surface du type lit de semence soumise à l'action de dégradation des pluies.

Étudions le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'écart-type des hauteurs (s) pour un sol humide à la fréquence de 9.00 GHz en polarisation HH.

Les données de base servant au calcul par les modèles sont représentées dans le tableau ci-dessous :

RADAR	S O L			
F : 9.00 GHz	$m_v$	$s$ (m)	$l$ (m)	ajuste - ment
$\theta$ : 0° - 50°	0.31	0.010	0.052	exp
polarisation : HH	0.35	0.008	0.042	exp
	0.34	0.005	0.009	exp

Trois états de surface en cours de dégradation ont été retenus. Le choix du modèle d'ajustement et le calcul de la longueur de corrélation ont été établis après ajustement de la fonction d'auto-corrélation expérimentale.

On constate sur les courbes expérimentales de la figure n° X.2 que :

- à l'incidence normale, au fur et à mesure que l'écart-type des hauteurs (s) décroît (de *droite* à *gauche* sur la figure), le coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) augmente. Ceci peut s'expliquer par le fait que sous l'action de la dégradation des pluies, la surface du sol tend à devenir de plus en plus lisse, ce qui se traduit par un comportement angulaire de plus en plus spéculaire.

- à l'incidence élevée ( $50^\circ$ ), le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) est invariant quel que soit l'écart-type des hauteurs (s).

Pour les deux incidences ( $0^\circ$  et  $50^\circ$ ), les courbes modélisées et expérimentales traduisent le même type de réponse. Néanmoins, en incidence normale ( $\theta = 0^\circ$ ), on constate que les données modélisées traduisent un comportement spéculaire plus accentué. A l'incidence élevée ( $\theta = 50^\circ$ ), on constate pour cette validation une bonne concordance entre les données issues du modèle et les données expérimentales.

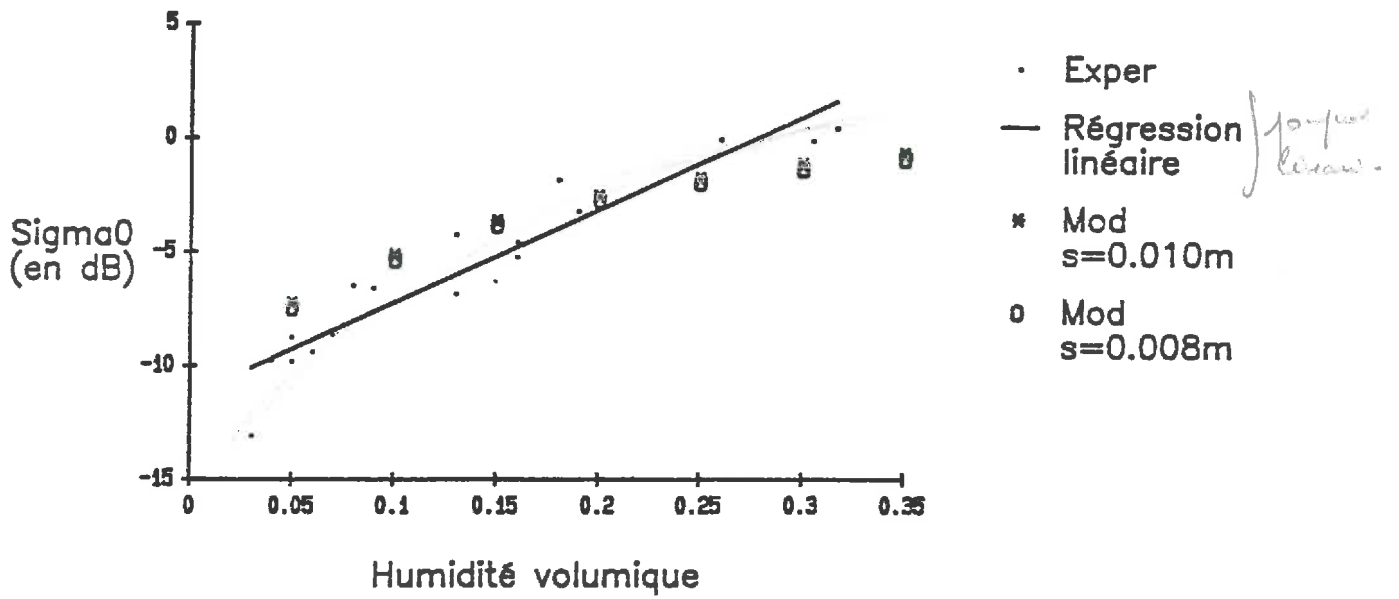
X.3 VALID 3 - Etude du comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'humidité volumique ( $m_v$ )

Les données de base proviennent du mémoire de WITONO (1986). Elles ont été récoltées lors de la campagne d'Avignon en 1986. La structure du sol étudiée est du type lit de semence, dont la rugosité se dégrade sous l'action d'arrosages réguliers.

Etudions le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'humidité ( $m_v$ ) pour une fréquence de 5.30 GHZ, d'angle d'incidence de  $15^\circ$  en polarisation HH.

Les données de base servant au calcul par les modèles sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Fig X-3  
Validation 3  
(Witono, 1986)



RADAR		S O L			
f :	5.30 GHZ	$m_V$	$(\overset{s}{m})$	$(\underset{l}{m})$	ajuste- ment
$\theta$ :	15°	0.05	↑	↑	exp
polarisation :	HH	0.10	↑	↑	exp
		0.15	0.01	0.052	exp
		0.20	↑	↑	exp
		0.25	et	et	exp
		0.30	↑	↑	exp
		0.35	0.08	0.042	exp
		0.40	↑	↑	exp
		0.45	↓	↓	exp

Deux types d'état de surface répondent aux conditions de validité du modèle (les deux premières surfaces initiales de VALID 2).

La figure n° X.3 montre le comportement du coefficient de rétro-diffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de l'humidité volumique ( $m_V$ ). On constate :

- que les courbes des données modélisées ne sont pas linéaires et, de plus, peu différentes pour les deux états de rugosité étudiés.
- qu'il existe un écart (environ 5 db) entre les courbes modélisées et la courbe expérimentale.
- de plus, les résultats modélisés, contrairement aux résultats expérimentaux, ne peuvent être indépendants des paramètres géométriques du sol.

#### X.4 CONCLUSIONS SUR LA VALIDATION

AB d'écrit? ( La confrontation des résultats modélisés et expérimentaux de la validation 2 sont satisfaisants pour le modèle de KIRCHHOFF en approximation scalaire des champs. Pour les autres validations, les résultats obtenus sont sensiblement différents. Ils traduisent les limites principales du modèle compte tenu des hypothèses fondamentales imposées, à savoir :

- on néglige la diffusion de volume
- on limite les interactions onde électromagnétiques-sol à des réflexions de surface
- on suppose que la rugosité du sol est isotrope et aléatoire

Ces hypothèses sont nécessaires pour aboutir à la formulation d'une solution analytique du problème (AUTRET, 1987). La modélisation a permis de comprendre la physique de l'interaction sol-onde électromagnétique et de recenser les paramètres du sol qui ont une influence sur la mesure radar.

Lorsque les conditions expérimentales répondent aux conditions imposées par le modèle, on doit s'attendre à mettre en évidence une bonne concordance entre valeurs modélisées et expérimentales. Dans le cas contraire, on retrouve, avec le modèle, le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la variable étudiée. Néanmoins, les résultats de la modélisation ne permettent pas une bonne prédiction des valeurs expérimentales mesurées. Cette remarque suppose bien sûr que l'on soit capable, dans le cadre d'une expérimentation de validation, d'estimer les paramètres du sol nécessaires au modèle (écart-type des hauteurs, fonction d'auto-corrélation, humidité du sol) avec une bonne précision. Ce dernier point soulève le problème de l'échantillonnage de la mesure de ceux-ci. Généralement, on ne trouve pas dans la bibliographie :

- une information détaillée décrivant les protocoles expérimentaux d'échantillonnage ;

- un ordre de grandeur de précisions de l'estimation des paramètres utilisés dans les modèles.

## C O N C L U S I O N

---

Notre travail nous a amené aux conclusions suivantes :

- 1 - Le modèle ne semble pas, dans sa formulation analytique, donner une bonne prédiction des valeurs expérimentales.
- 2 - Il présente l'intérêt de comprendre le comportement du coefficient de rétrodiffusion radar ( $\sigma_0$ ) en fonction de la variable étudiée et de recenser les paramètres physiques qui exercent une influence sur la mesure.
- 3 - Il permet, grâce à l'étude de la sensibilité, de préciser l'influence de l'erreur d'une estimation des différents paramètres sur la mesure radar. Cette erreur peut être importante (cas du critère de l'écart-type des hauteurs).
- 4 - L'étude de la sensibilité de la mesure du rapport  $\sigma_{0hh}/\sigma_{0vv}$  par le modèle fournit des indications sur le choix, à priori, privilégié des configurations radar les plus intéressantes. Elle ne saurait, à elle seule, garantir la pertinence d'un tel choix compte tenu des limites du modèle.

La mise en oeuvre d'une expérimentation de terrain est nécessaire pour vérifier expérimentalement la sensibilité de la relation. Pour cela, il faut effectuer des mesures à différentes humidités de la surface du sol, sous différentes configurations et pour des états de rugosité de surface très contrastée : du plus grossier (labour) au plus lisse (lit de semence).

Cette expérimentation aurait aussi comme intérêt de constituer un jeu de données expérimentales à confronter aux modèles existants. Ils serviront éventuellement de base pour valider d'autres types de modèles qui résulteront d'un progrès significatif par rapport aux limites des modèles existants.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- AUTRET M., 1987. - Etude théorique de la sensibilité du signal rétrodiffusé en hyperfréquence aux paramètres caractéristiques d'un sol agricole : humidité et rugosité.  
Thèse de Docteur de l'Université de PARIS VII. (FRA).
- BECKMANN P. et SPIZZICHINO A., 1963. - The Scattering of electromagnetic waves from Rough Surfaces.  
Pergammon Press, NEW YORK. (U.S.A.)
- BERNARD R., O. TACONET, D. VIDAL-MADJAR, J.L. THONY, M. VAUCLIN, A. CHAPOTON, F. WATTRELOT and A. LEBRUN, 1984. - Comparison of three in situ surface soil moisture measurements and application to C-Band Scatterometer calibration.  
IEEE TRANS., GEOSCI. REM. SEN. GE 22 (4)
- BROUSSARD P., 1986. - Potentialités d'étude de la battance par la télé-détection.  
Mémoire de D.A.A. - I.N.A. PARIS-GRIGNON (FRA).
- FLUHR A., 1981. - Etude de l'influence des propriétés géométriques de surfaces de sol nu sur la rélectivité radar.  
Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université Paul SABATIER, TOULOUSE (FRA).
- FUNG A.K., 1985. - Inverse methods in rough-surface scattering. Inverse methods in electromagnetic Imaging. Part 2, 931-942.  
D. REIDEL Publishing Compagny (U.S.A.)

HALLIKAINEN M.T., F.T. ULABY, M.C. DOBSON, M.A. EL-RAYES et L.K. WU, 1985. - Microwave Dielectric behaviour of Wet soil.

Par. 1 : Empirical models and experimental observations.  
IEEE TRANS. GEOSCI. REM. SEN. 23 (1).

PAUSADER M., 1982. - Influence de l'humidité des sols sur la réflectivité radar.

Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Paul SABATIER,  
TOULOUSE (FRA).

THOUREL L., 1970. - Propagation des ondes électromagnétiques.

Cours ENSAE.

ULABY F.T., R.K. MOORE, A.K. FUNG, 1982 (1). - Radar Remote Sensing and surface scattering and emission theory.

Vol. II, Chap. 11 : Physical Mechanical and Empirical models for scattering and emission.

ADDISON-WESLEY Publishing Compagny (U.S.A.).

ULABY F.T., F.KOUYATE, A.K. FUNG, A.J. SIEBER, 1982 (2). - A Backscatter Model for a Randomly Perturbed Periodic Surface.  
IEEE TRANS. GEOSCI. REM. SEN. Vol. GE-20 no. 4, october.

ULABY F.T., R.K. MOORE, A.K. FUNG, 1982 (3). - Microwave Remote Sensing : Active and Passive.

Vol. II, chap. 12. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and emission theory.

ADDISON - Wesley Publishing Compagny (U.S.A.)

WITONO H., 1986. - Utilisation de la bande -C radar pour la mesure de l'humidité superficielle du sol.

Mémoire de D.A.A. - E.N.S.A. de RENNES (FRA).