

85 AVS-~~TH-FB3~~ EBA

UTILISATION DE LA BANDE-C RADAR
POUR LA MESURE DE L'HUMIDITE
SUPERFICIELLE DU SOL

Mémoire de Fin d'Etudes
ENSA de Rennes

Hari WITONO

Promotion 1985-1986

Ecole Nationale Supérieure Agronomique
de Rennes.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE de RENNES
- E. N. S. A. R. -
65, rue de Saint-Brieuc
35042 RENNES Cédex

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
DIPLOME D'AGRONOMIE APPROFONDIE
- D. A. A. -

DATE : 29 Septembre 1986

CHAIRE : Génie Rural
PROFESSEUR : Jean DUCHESNE

ORGANISME D'ACCUEIL : INRA
ADRESSE : INRA, Station de Science
du Sol, B.P. 91, 84140 MONTFAVET
DIRECTEUR SCIENTIFIQUE : Laurent BRUCKLER

AUTEUR(S) : Hari WITONO

TITRE : UTILISATION DE LA BANDE-C RADAR POUR LA MESURE DE L'HUMIDITE SUPERFICIELLE DU SOL
Nombre de pages :

Référence : Mémoire de Fin d'Etude

Année : 1986

RESUME : Une campagne de mesures du coefficient de rétrodiffusion radar (σ_0) et de l'humidité du sol en surface a été réalisée de Juin à Juillet 1986 à l'INRA d'Avignon, dans le but d'une part d'étudier la relation entre σ_0 et l'humidité, d'autre part de modéliser la profondeur de pénétration du signal radar aux configurations suivantes : Fréquences 4,5 et 5,3 GHz ; Incidence : 10°, 15° et 20° en polarisation Horizontale-Horizontale (H-H).

Les principaux résultats confirment l'existence de relations linéaires entre σ_0 et l'humidité aux configurations étudiées. Quant à la profondeur de pénétration du signal radar, la forme du profil hydrique joue un grand rôle sur cette dernière. En prenant compte la profondeur de pénétration du signal, la linéarité des relations entre σ_0 et l'humidité n'est plus acceptable. On propose finalement de décomposer l'information globale fournie par σ_0 en deux informations complémentaires, portant sur la profondeur de pénétration moyenne du signal et l'humidité relative à cette profondeur.

ABSTRACT : Measurements of the backscattering coefficient (σ_0) and the soil surface water content (θ) were conducted during June and July 1986, in order to study the relations between σ_0 and θ and to model the radar penetration depth. Work was carried out near the Soil Science building of the INRA in Montfavet (AVIGNON) using two radar frequencies (4.5 and 5.3 GHz), three angles of incidence (10, 15 and 20 degrees) and one polarisation (Horizontal-Horizontal).

Results of these studies confirm the existence of a linear relationship between σ_0 and θ for a given depth. Modeling results and experimental evidence showed that the radar penetration depth was greatly influenced by water content profile in the soil. While for θ at a given penetration depth, the linear relationship between σ_0 and θ was not valid anymore.

Finally, it is shown that the backscattering coefficient σ_0 is able to provide two different sets of data : first, the mean penetration depth ; second, the mean volumetric water content calculated between the soil surface and this penetration depth.

MOTS CLES : 1. Coefficient de rétrodiffusion radar
2. Humidité Volumique du sol
3. Modèles
4. Variabilité spatiale
5. Profondeur de pénétration de l'onde

Diffusion et référence

- non limitées
 sous réserve d'accord
 non autorisées

Le soussigné Pierre STENGEL propriétaire des droits de reproduction du résumé du Mémoire mentionné ci-dessus, autorise, par la présente, toutes les sources bibliographiques signaler et publier ledit résumé.

Date : Septembre 1986

Signature,  Le Directeur

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1.
I. INTERACTION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES AVEC UN MILIEU QUELCONQUE	2.
I.1. Propriétés générales du champ électromagnétique	2.
I.2. Interaction des ondes électromagnétiques avec un milieu	4.
I.3. Propriétés diélectriques des sols	7.
II. UTILISATION DES HYPERFREQUENCES POUR LA MESURE DE L'HUMIDITE DES SOLS	8.
II.1. Principaux résultats acquis	8.
II.1.1. Configuration du radar utilisé	8.
II.1.2. Estimation de l'humidité des sols à l'aide des mesures de rétrodiffusion Radar	9.
II.2. Prise en compte de la profondeur de pénétration du signal Radar	10.
II.2.1. Position du problème	10.
II.2.2. Hypothèses	10.
II.2.3. Présentation théorique du modèle	11.
III. LA MESURE RADAR	16.
III.1. Définition de la section efficace de rétrodiffusion	17.
III.2. Equation radar	19.
III.3. Comportement électromagnétique de l'onde au contact du sol	20.
III.3.1. La réflexion de volume	20.
III.3.2. La réflexion de surface	20.
IV. MATERIELS ET METHODES	21.
IV.1. Site expérimental	21.
IV.2. Les mesures Radar	22.
IV.3. Mesures au sol	24.
IV.4. Permittivité diélectrique du sol	26.

V.	RESULTATS EXPERIMENTAUX	26.
V.1.	Analyse géostatistique préliminaire et la conséquence pour l'échantillonnage	26.
V.2.	Résultats expérimentaux	27.
V.3.	Relation statistique entre le coefficient de rétrodiffusion radar (σ_0) et la teneur en eau	27.
V.4.	Prise en compte de la profondeur de pénétration	30.
	V.4.1. Simulation théorique	30.
	V.4.2. Profondeurs de pénétration expérimentales	32.
	CONCLUSION GENERALE	36.
	BIBLIOGRAPHIE	38.
	ANNEXES	40.

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser ici mes sincères remerciements à **Monsieur Pierre STENGEL**, Directeur de la Station de Science du Sol de l'INRA Avignon, pour l'accueil et les conseils qu'il a bien voulu m'apporter dans l'ensemble de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement **Monsieur Laurent BRUCKLER**, mon Maître de stage, qui m'a dirigé pendant tout mon travail.

Tous mes remerciements vont à **Messieurs Patrick BERTUZZI, Jean-Claude GAUDU et André CHANZY** dont les conseils m'ont été utiles sur bien des points.

Bien sûr, je remercie **Madame Nadia LEITGOLD** qui a assuré la frappe de ce rapport.

Enfin, ma reconnaissance va à tous les membres de la Station et tous les stagiaires, dont la constante gentillesse à mon égard a contribué à mener à bien ce travail.

RESUME

Une campagne de mesures du coefficient de rétrodiffusion radar (σ_0) et de l'humidité du sol en surface a été réalisée de Juin à Juillet 1986 à l'INRA d'Avignon, dans le but d'une part d'étudier la relation entre σ_0 et l'humidité, d'autre part de modéliser la profondeur de pénétration du signal radar aux configurations suivantes : Fréquences 4,5 et 5,3 GHz ; Incidence : 10°, 15° et 20° en polarisation Horizontale-Horizontale (H-H).

Les principaux résultats confirment l'existence de relations linéaires entre σ_0 et l'humidité aux configurations étudiées. Quant à la profondeur de pénétration du signal radar, la forme du profil hydrique joue un grand rôle sur cette dernière. En prenant compte la profondeur de pénétration du signal, la linéarité des relations entre σ_0 et l'humidité n'est plus acceptable. On propose finalement de décomposer l'information globale fournie par σ_0 en deux informations complémentaires, portant sur la profondeur de pénétration moyenne du signal et l'humidité relative à cette profondeur.

ABSTRACT

Measurements of the backscattering coefficient (σ_0) and the soil surface water content (θ) were conducted during June and July 1986, in order to study the relations between σ_0 , and θ and to model the radar penetration depth.

Work was carried out near the Soil Science building of the INRA in Montfavet (AVIGNON) using two radar frequencies (4.5 and 5.3 GHz), three angles of incidence (10, 15 and 20 degrees) and one polarisation (Horizontal-Horizontal).

Results of these studies confirm the existence of a linear relationship between σ_0 and θ for a given depth.

Modeling results and experimental evidence showed that the radar penetration depth was greatly influenced by water content profile in the soil. While for θ at a given penetration depth, the linear relationship between σ_0 and θ was not valid anymore.

Finally, it is shown that the backscattering coefficient σ_0 is able to provide two different sets of data : first, the mean penetration depth ; second, the mean volumetric water content calculated between the soil surface and this penetration depth.

INTRODUCTION

L'utilisation des micro-ondes en télédétection fait l'objet de travaux de recherche importants. L'intérêt pour ce domaine spectral est motivé en particulier par la possibilité qu'il offre de s'affranchir de la couverture nuageuse.

L'influence de l'humidité du sol sur la rétrodiffusion des micro-ondes permet d'envisager de mesurer, par télédétection, l'humidité de surface. Du fait de l'intérêt potentiel d'une telle mesure pour l'hydrologie, l'agronomie et la météorologie, des programmes importants ont été consacrés à l'étude des relations coefficient de rétrodiffusion-humidité du sol (ULABY et al., 1974 ; ULABY et al., 1978 ; PAUSADER, 1982 ; BERNARD et al., 1982 ; JACKSON et O'NEILL, 1985).

Malgré les résultats acquis, l'utilisation quantitative en agronomie des estimations d'humidité au moyen d'un radar suppose un progrès sensible des connaissances concernant en particulier les points suivants :

1. Recherche du meilleur estimateur possible de la teneur en eau libre du sol (ULABY et al., 1978).
2. Prise en compte des erreurs de mesure et/ou de la variabilité spatiale de la teneur en eau dans l'analyse des résultats.
3. Prise en compte de la forme du profil hydrique, c'est-à-dire de la stratification hydrique du profil qui détermine la profondeur de pénétration du signal.

En effet, la détermination de la teneur en eau de surface du sol à l'aide du radar ne sera utile, à terme, qu'à deux conditions au minimum :

- d'une part, que la profondeur correspondant à "la couche de surface", soit définie le plus précisément possible compte-tenu de l'importance des gradients hydriques dans les premiers centimètres de sol. A cet égard, l'analyse théorique et expérimentale de la profondeur de pénétration joue un rôle central.
- d'autre part, que la variance affectée à l'estimation de la teneur en eau soit minimale. Dans cette optique, le choix du modèle d'estimation est important, ainsi que l'analyse des erreurs de mesure.

Dans ce cadre général, ce travail a pour but essentiel de préciser le rôle de la stratification hydrique des couches superficielles du sol sur la rétrodiffusion du signal radar en combinant les approches expérimentales (mesures de profils hydriques "in situ") et théorique (modélisation de la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique).

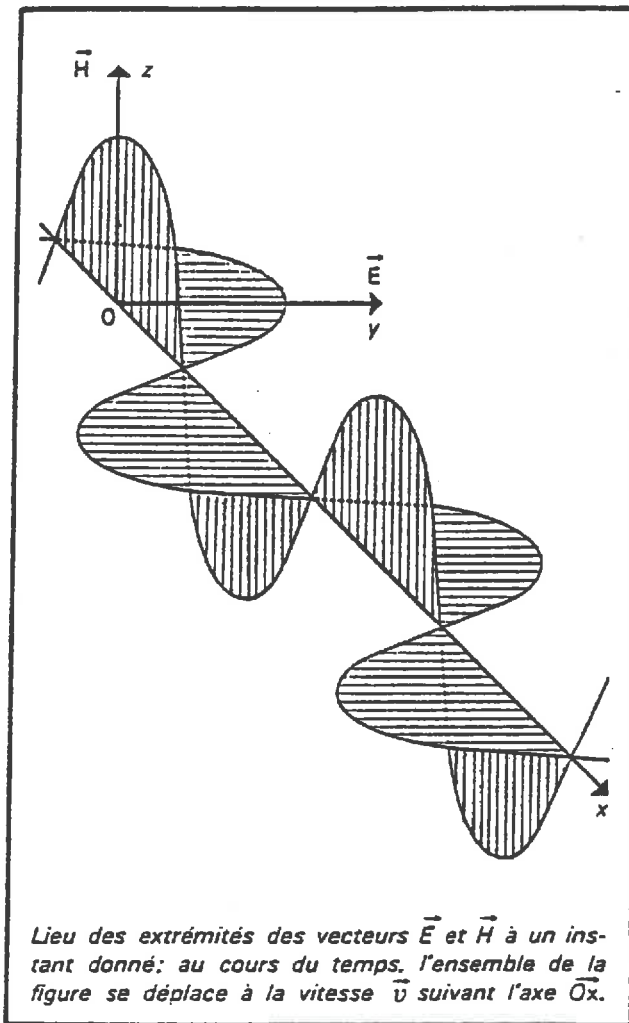


FIGURE 1-1. SCHEMA DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE DANS UN MILIEU QUELCONQUE

I. INTERACTION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES AVEC UN MILIEU QUELCONQUE.

I.1. Propriétés générales du champ électromagnétique

Supposons une onde électromagnétique se propageant avec une vitesse \bar{v} constante dans un milieu homogène. Elle est décomposable en deux termes, le champ électrique (\bar{E}) d'une part, et le champ magnétique (\bar{H}) d'autre part. Les vecteurs représentant ce champ sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et perpendiculaire à la direction de propagation (Fig. I-1). Chacun peut être représenté par une vibration sinusoïdale présentant une double périodicité, dans le temps et dans l'espace. Dans la suite de ce travail, nous ne présenterons que les propriétés générales du champ électrique \bar{E} .

Soit \bar{E}_0 l'amplitude maximale de champ électrique. Quel que soit un point M dans la direction de propagation, tel que $\overline{OM} = \bar{r}$, le champ électrique \bar{E} au temps t s'écrit :

$$\bar{E}_{t,M} = \bar{E}_0 \cos\{\omega(t - \Delta t)\} \quad (I.1)$$

où $\omega =$ pulsation (rad s^{-1})

$\Delta t =$ temps nécessaire pour que l'onde puisse parcourir la distance de O à M.

Donc,
$$\Delta t = \frac{|\overline{OM}|}{|\bar{v}|} = \frac{r}{v} \quad (I.2)$$

On peut ainsi écrire la relation (I.1) sous la forme

$$\bar{E}_{t,M} = \bar{E}_0 \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{v} r\right) \quad (I.2)$$

On a l'habitude d'utiliser le terme de nombre d'onde k défini par :

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (I.3)$$

ω est une pulsation temporelle et on peut considérer que k représente une pulsation spatiale. Souvent on introduit le nombre d'onde sous forme vectorielle, c'est-à-dire par le vecteur d'onde \vec{k} :

$$\vec{k} = \frac{\omega}{v} \vec{u} \quad (I.4)$$

où \vec{u} est le vecteur unitaire dans la direction de propagation.

En combinant les relations (I.2) et (I.4) on obtient alors :

$$\vec{E}_{t,M} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (I.5)$$

Le vecteur d'onde \vec{k} dépend à la fois de l'onde (ω) et de la nature du milieu dont dépend une vitesse de propagation (v). A partir de l'équation (I.5), une onde électromagnétique est parfaitement définie si on connaît \vec{E}_0 et ω qui sont des caractéristiques de l'onde et v , qui tient compte des propriétés du milieu de propagation.

Dans la pratique, on utilise souvent la notion de fréquence (f), égale au nombre de périodes par unité de temps, défini par :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{Hertz}) \quad (I.6)$$

On utilise également la notion période (T) définie par :

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{seconde}) \quad (I.7)$$

avec

$$\lambda = v T \quad (\text{mètre})$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (I.8)$$

La longueur d'onde (λ) est une grandeur plus synthétique qui intègre à la fois les propriétés du milieu et la périodicité de l'onde.

Le tableau I-1 situe la fréquence et la longueur d'onde correspondant aux micro-ondes dans l'ensemble du spectre des ondes électromagnétiques.

TABLEAU I-1. FREQUENCE ET LONGUEUR D'ONDE ELECTROMAGNETIQUE

NOME DE SPECTRE	FREQUENCE (HZ)	LONGUEUR D'ONDE
RAYONNEMENT GAMMA	$>3 \cdot 10^{20}$	<0.01 ANGSTROEM
RAYONS X	$0.6 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$	$0.1 - 5$ ANGSTROEM
ULTRAVIOLET	$8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	$100 - 4000$ ANGSTROEM
LUMIERE VISIBLE	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$	$0.4 - 0.8$ MICRON
INFRAROUGE	$3 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$	$0.8 - 100$ MICRON
ONDES RADIO-ELECTRIQUES	$<3 \cdot 10^9$	>1 MM
HYPERFREQUENCES	$10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	$3 - 1000$ MM
ONDES COURT	$3 \cdot 10^7$	10 M
ONDES MOYNNES	$3 \cdot 10^6$	100 M
GRANDES ONDES	$3 \cdot 10^5$	1000 M

I.2. Interaction des ondes électromagnétiques avec un milieu

L'interaction d'une onde électromagnétique avec un milieu de propagation correspond à une variation de la valeur du vecteur d'onde.

La théorie de MAXWELL permet d'écrire :

$$\overline{k} \overline{k} = \epsilon \mu \omega^2 \quad (I.9)$$

- où ϵ = permittivité diélectrique du milieu de propagation
 μ = perméabilité magnétique du milieu de propagation.
 ω = pulsation d'onde

Lorsque le milieu de propagation est absorbant, la permittivité est complexe ($\epsilon = \epsilon' + i \epsilon''$), et le vecteur d'onde qui devient complexe s'écrit :

$$\bar{\kappa} = \bar{\kappa}' - i \bar{\kappa}'' \quad (\text{I.10})$$

où $\bar{\kappa}' =$ partie réelle
 $\bar{\kappa}'' =$ partie imaginaire

D'après les équations (I.9) et (I.10) :

$$(\bar{\kappa}' - i \bar{\kappa}'')(\bar{\kappa}' - i \bar{\kappa}'') = (\epsilon' + i \epsilon'') \mu \omega^2$$

$$\kappa'^2 - \kappa''^2 - 2i \bar{\kappa}' \bar{\kappa}'' = \omega^2 \mu \epsilon' + \omega^2 \mu \epsilon'' i$$

Supposons que les vecteur \bar{k}' et \bar{k}'' définissent entre eux un angle θ_t ,

$$\kappa'^2 - \kappa''^2 - 2 \kappa' \kappa'' \cos \theta_t i = \omega^2 \mu \epsilon' + \omega^2 \mu \epsilon'' i$$

En égalant les parties réelles et imaginaires, cette relation complexe peut être décomposée en deux équations :

$$\kappa'^2 - \kappa''^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (\text{I.11})$$

$$-2 \kappa' \kappa'' \cos \theta_t = \omega^2 \mu \epsilon''$$

$$\kappa'' = -\frac{\omega^2 \mu \epsilon''}{2 \kappa' \cos \theta_t} \quad (\text{I.12})$$

Les équations (I.11) et (I.12) donnent :

$$\kappa'^4 - \omega^2 \mu \epsilon' \kappa'^2 - \frac{\omega^4 \mu^2 \epsilon''^2}{4 \cos^2 \theta_t} = 0 \quad (\text{I.13})$$

L'équation (I.13) est une équation du second degré en k'^2 , on a donc :

$$k'^2 = \frac{\omega^2 \mu \epsilon' \pm \sqrt{\omega^4 \mu^2 \epsilon'^2 + \frac{\omega^4 \mu^2 \epsilon''^2}{\cos^2 \theta_t}}}{2}$$

La seconde racine n'est pas acceptable, car elle fournirait une valeur k'^2 négative. On a donc une seule valeur de k'^2 .

$$k' = \sqrt{\frac{1}{2} \omega^2 \mu \epsilon' \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\epsilon''^2}{\epsilon'^2 \cos^2 \theta_t}} \right)} \quad (\text{I.14})$$

On introduit la relation suivante :

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0}$$

où ϵ'_r = permittivité diélectrique relative réelle
 ϵ_0 = permittivité diélectrique du vide

On obtient alors :

$$\epsilon' = \epsilon_0 \epsilon'_r \quad (\text{I.15})$$

De la même manière, on a :

$$\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon''_r \quad (\text{I.16})$$

En combinant les équations (I.14), (I.15) et (I.16), on obtient :

$$k' = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \sqrt{\mu \epsilon_0} \sqrt{\epsilon'_r \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{\epsilon''_r^2}{\epsilon'^2 \cos^2 \theta_t}} \right\}} \quad (\text{I.17})$$

De la même manière, en partant de l'équation (I.11) et (I.12), on obtient :

$$k'' = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \sqrt{\mu \epsilon_0} \sqrt{\epsilon_r' \left[\sqrt{1 + \frac{\epsilon_r''^2}{\epsilon_r'^2 \cos^2 \theta}} - 1 \right]} \quad (I.18)$$

On voit donc (équations (I.17) et (I.18)) que les propriétés du milieu (μ , ϵ' , ϵ'') jouent un rôle essentiel sur les caractéristiques de l'onde électrique (k' , k''). Pour cette raison, la connaissance de la permittivité diélectrique d'un sol est indispensable pour la modélisation de ces interactions avec une onde électromagnétique.

1.3. Propriétés diélectriques des sols

La permittivité diélectrique d'un milieu joue un rôle essentiel lors d'une interaction entre des ondes électromagnétiques et le milieu considéré. En effet, les variables déterminant les caractéristiques d'une onde électromagnétique varient en fonction de la permittivité diélectrique.

La permittivité d'un matériau est une mesure de l'aptitude à la polarisation des charges électriques placées dans un champ électrique. La polarisation dépend de la fréquence du champ appliqué, il en est donc de même pour la permittivité (GUERIN, 1984). On peut donc écrire :

$$\epsilon^* = F(f) \quad (I.19)$$

où ϵ^* = permittivité diélectrique complexe
 f = fréquence du champ électromagnétique.

Un sol est un assemblage composé de trois constituants : l'air, les particules solides et l'eau, ayant des permittivités diélectriques contrastées. La permittivité diélectrique relative de l'air est prise par référence égale à 1. Pour un sol sec, les valeurs de la permittivité diélectrique réelle varient habituellement entre 2 et 5, pour des fréquences de 10^7 à 10^{10} Hz. Dans la bande des micro-ondes (fréquence de 1 à 200 GHz), la permittivité de l'eau peut varier de 10 à 80. Dans le sol, la permittivité diélectrique de l'eau est fonction des fractions relatives de l'eau électriquement liée et de l'eau libre. L'eau liée a une permittivité diélectrique ≈ 3 et l'eau libre ≈ 74 . Il est donc possible de prévoir que la permittivité du sol

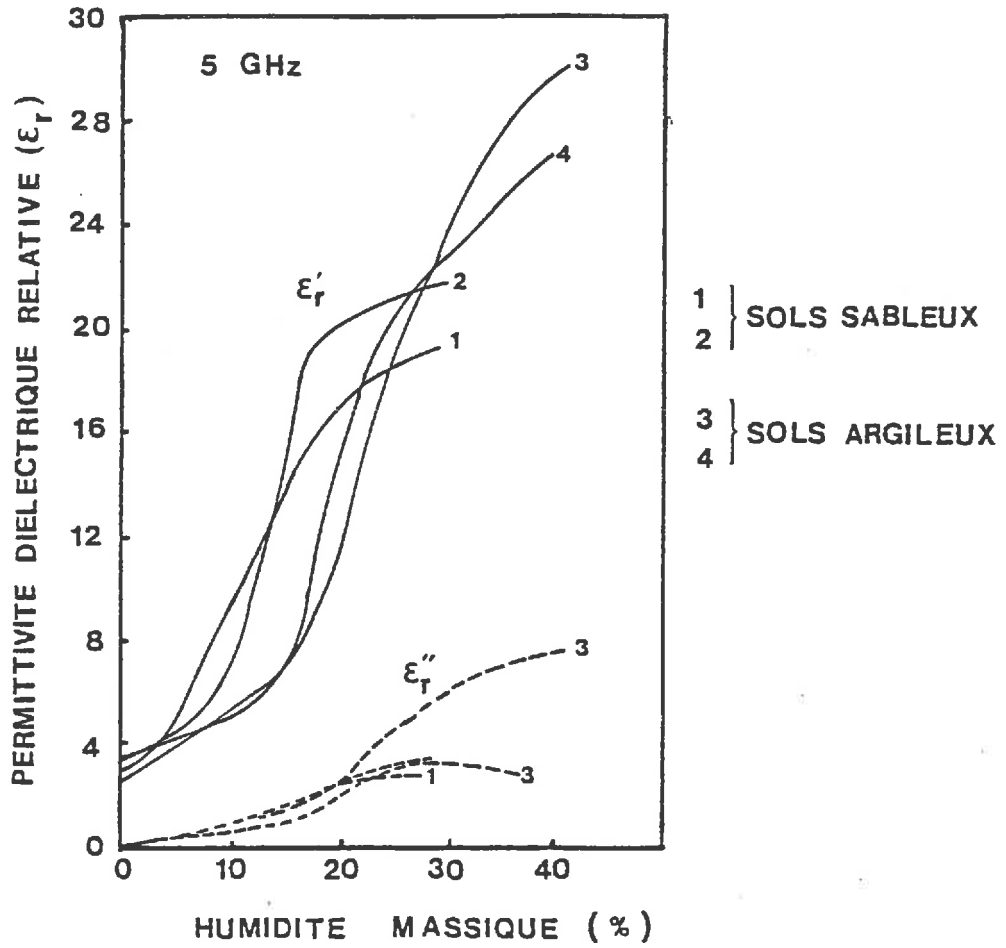


FIGURE I-2. COMPORTEMENT DIELECTRIQUE DES SOLS EN FONCTION DE L'HUMIDITE (WANG ET SCHUMUGGE, 1978)

dépend principalement de sa teneur en eau (GUERIN, 1984). Les parties solides ont une permittivité diélectrique qui dépend des minéraux. Feldspaths et mica par exemple ont des permittivités diélectriques respectives de 4,5 à 5 et de 8.

La matière organique est considérée comme négligeable car sa proportion est très faible.

Comme d'autres milieux absorbants, le sol a une permittivité diélectrique complexe qui s'écrit :

$$\epsilon^* = \epsilon_r' + i \epsilon_r''$$

où ϵ_r' = permittivité diélectrique relative réelle

ϵ_r'' = permittivité diélectrique relative imaginaire.

La figure I-2 montre les variations des valeurs de la permittivité diélectrique d'un sol en fonction de sa teneur en eau.

II. UTILISATION DES HYPERFREQUENCES POUR LA MESURE DE L'HUMIDITE DES SOLS

II.1. Principaux résultats acquis

II.1.1. Configuration du radar utilisé

Les résultats obtenus par ULABY et al. (1978) montrent que la polarisation H-H, pour des fréquences à l'ordre de 5,0 GHz à des angles d'incidence comprise entre 10° et 20°, donne les résultats les plus satisfaisants, aussi bien en ce qui concerne la sensibilité vis-à-vis de la mesure de l'humidité que la minimisation des effets de la rugosité (Fig. II-1 a) b) c)).

D'autres études (GIRARD et KING, 1978) mettent en évidence le fait que la fréquence voisine de 5 GHz permet de minimiser l'influence de la géométrie de la surface. Les mêmes résultats semblent confirmés par les études de PAUSADER (1982) qui analyse en détail les mesures de l'humidité des sols à l'aide des hyperfréquences (Fig. II-2).

Dans l'ensemble de ces résultats, ceux de HIROSAWA et al. (1978) semblent contradictoires, puisqu'ils montrent que la polarisation H-V est beaucoup plus sensible que la polarisation H-H (Figure II-3).

Malgré tout, nous conservons les résultats acquis par ULABY et al. (1978), GIRARD et KING (1978 ; PAUSADER, 1982) et nous travaillerons aux fréquences 4,5 et 5,3 GHz, à 10°, 15° et 20° d'incidence, en polarisation Horizontale-Horizontale.

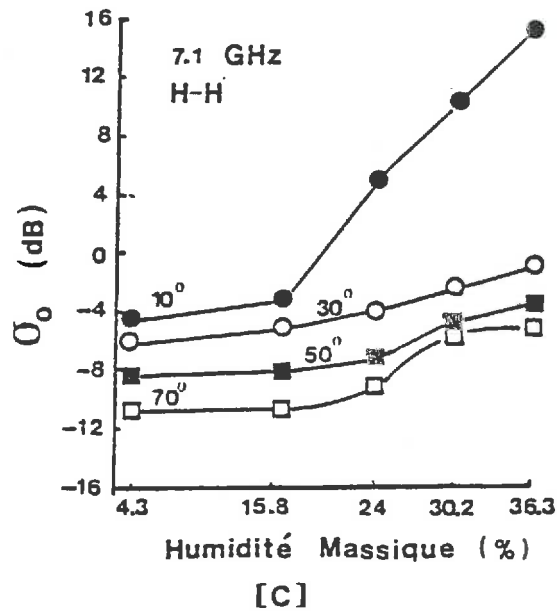
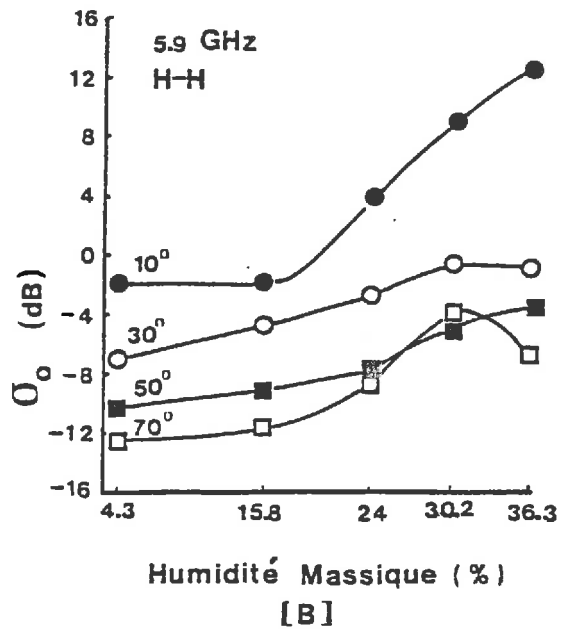
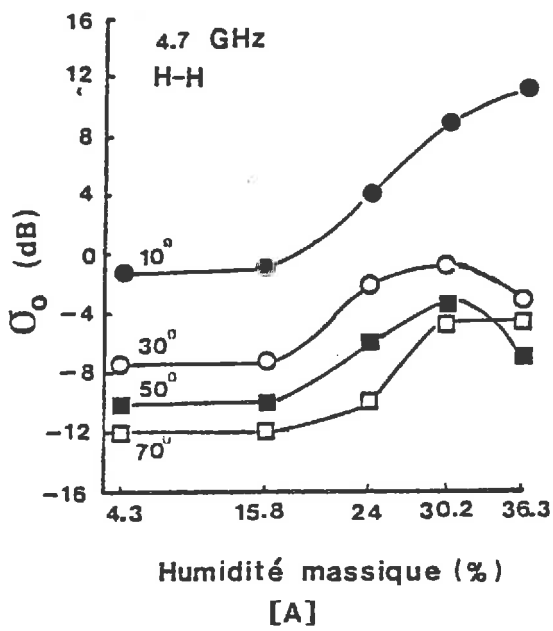


FIGURE II-1. COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR EN FONCTION DE L'HUMIDITE DE SURFACE (HRMS = 2.5 CM) (ULABY, 1974)

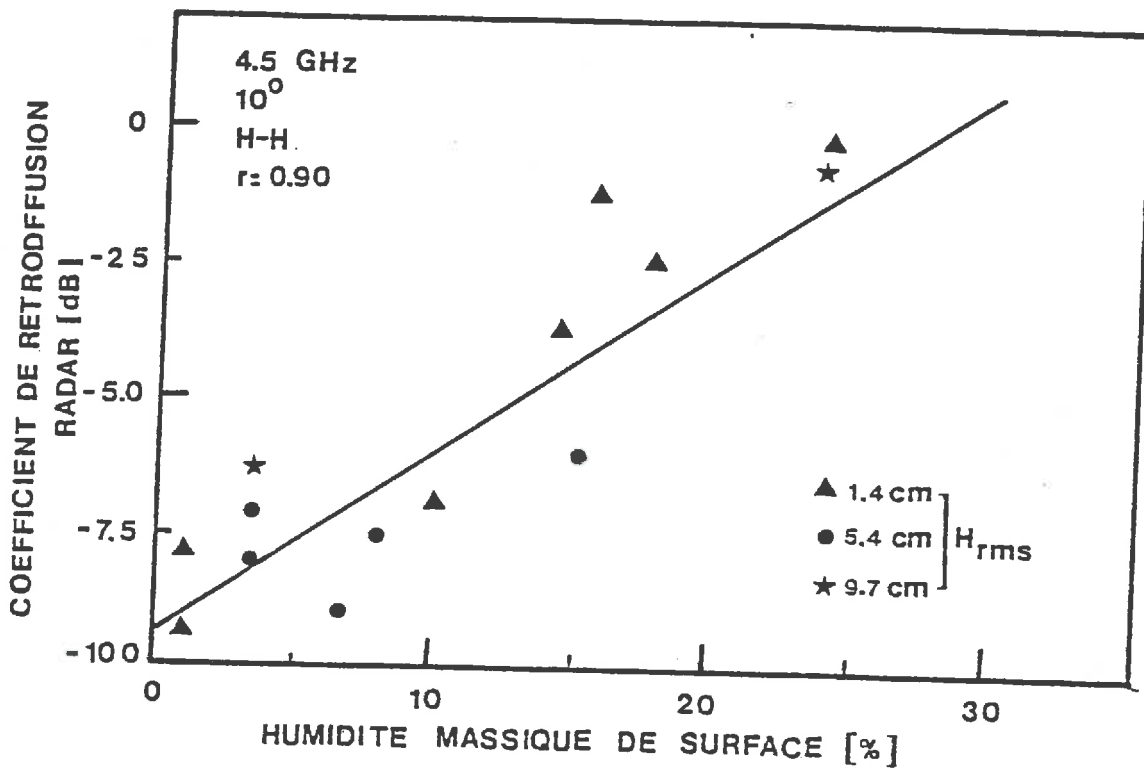


FIGURE II-2. COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR EN FONCTION DE L'HUMIDITE DE SURFACE POUR TROIS TYPES DE RUGOSITE DE SURFACE (PAUSADER, 1982)

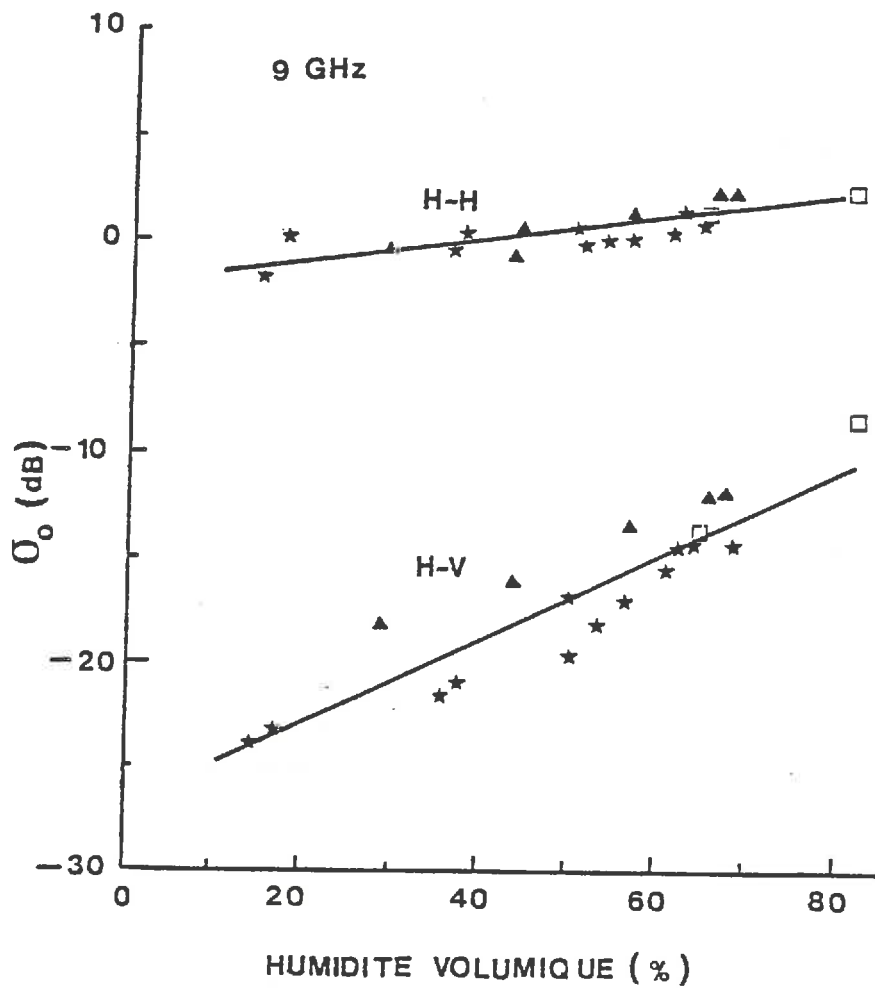


FIGURE II-3. COMPARAISON ENTRE LES POLARISATIONS HORIZONTALE-HORIZONTALE ET HORIZONTALE-VERTICALE DANS LA MESURE DU COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR EN FONCTION DE L'HUMIDITE (HIROSAWA ET AL, 1978)

II.1.2. Estimation de l'humidité des sols à l'aide des mesures de rétro-diffusion Radar

Les résultats obtenus par les auteurs dont nous avons précédemment parlé, mettent clairement en évidence l'existence de relations entre des variables caractérisant l'humidité de surface et le coefficient de rétrodiffusion Radar (Fig. II-1, II-2, II-3).

Ce sont les variables de teneur en eau massique.

D'autres variables de teneur en eau, notamment la teneur en eau volumique ou bien la pression tensiométrique, donnent sans doute une relation indicateur d'humidité-coefficient de rétrodiffusion radar aussi fort que ce dernier.

Ces résultats sont largement confirmés par d'autres auteurs, notamment : BERNARD et al. (1982) ; BRADLEY et al. (1981) ; KIM et al. (1981).

Les principaux problèmes discutés par ces auteurs sont de deux ordres :

- d'une part, le choix d'un indicateur de la teneur en eau du sol vis-à-vis de la mesure radar est difficile et des approches empiriques ne permettent de résoudre que partiellement le problème. En particulier, des variables exprimés sous la forme d'un rapport entre une teneur en eau volumique et une teneur en eau de référence (capacité au champ par exemple) permettent de donner des résultats satisfaisants, tous les sols étant confondus.
- d'autre part, la linéarité des relations obtenus ne semble pas confirmée par la théorie. Cependant, les relations linéaires entre un indicateur de la teneur en eau et un coefficient de rétrodiffusion radar semblent constituer une bonne approximation de la réalité (Fig. II-2, II-3).

Quant au choix de la variable exprimant l'humidité, la difficulté résulte de l'influence de l'état de liaison de l'eau (avec la matrice solide) sur sa permittivité diélectrique. Celle-ci induit nécessairement l'influence de la relation potentiel-teneur en eau et par conséquent un effet de la texture, particulièrement de la teneur en argile sur la rétrodiffusion des micro-ondes.

Ce problème ne peut être réglé qu'approximativement par l'expression des teneurs en eau par rapport à la capacité de rétention, qui équivaut au calage de relations potentiel-teneur en eau sur un point expérimental et ne peut corriger totalement les variations entre matériaux différents.

Mis à part ce problème, il est clair que, la permittivité étant une notion spatiale, la meilleure variable pour exprimer la teneur en eau dans ce cas est la teneur volumique. Cependant, pour un même potentiel, celle-ci est fortement affectée par les variations de densité dans la couche de surface du sol. Ceci peut expliquer que la teneur en eau pondérale lui ait été préférée, dans certains cas, et puisse fournir de meilleures relations d'étalonnage.

II.2. Prise en compte de la profondeur de pénétration du signal Radar

II.2.1. Position du problème

La stratification hydrique des couches de surface, parfois très forte, induit une stratification des propriétés diélectriques de ces mêmes couches. Il y a donc une modification des interactions principales entre l'onde électromagnétique incidente et le sol (atténuation, réflexion, transmission). Ce sont précisément ces interactions qu'il convient de prendre en compte et de modéliser (ULABY, 1974 ; PAUSADER, 1982 ; ULABY et al., 1982).

En effet, l'existence d'une stratification, difficilement évitable dans les conditions expérimentales de plein champ, risque de biaiser la relation d'étalonnage ou de contribuer pour une grande part à sa variance résiduelle. D'autre part, l'utilisation de l'humidité de surface comme condition à la limite dans un modèle de transfert suppose que l'épaisseur de sol concernée par la mesure, et l'existence d'éventuels gradients soient bien connus.

II.2.2. Hypothèses

Les hypothèses nécessaires sont les suivantes (PAUSADER, 1982) :

1. La surface de la cible (sol) est considérée comme plane
2. Le sol est modélisé comme au milieu stratifié dont les propriétés diélectriques varient seulement avec la profondeur. C'est-à-dire que $\epsilon^* = f(z)$.
3. Le faisceau incident est constitué d'ondes planes monochromatiques.

Lorsque l'onde incidente arrive sur l'interface air-sol, une partie est réfléchiée et une autre est transmise. A l'intérieur de chaque couche, l'onde est atténuée et sur chaque intercouche il y a réflexion et transmission. L'onde incidente est donc affectée par ces trois phénomènes : absorption, transmission et réflexion.

En réalité, au modèle plus complet devrait prendre en compte des réflexions multiples. Malgré tout, nous ne prendrons en compte dans un premier temps qu'une réflexion par interface.

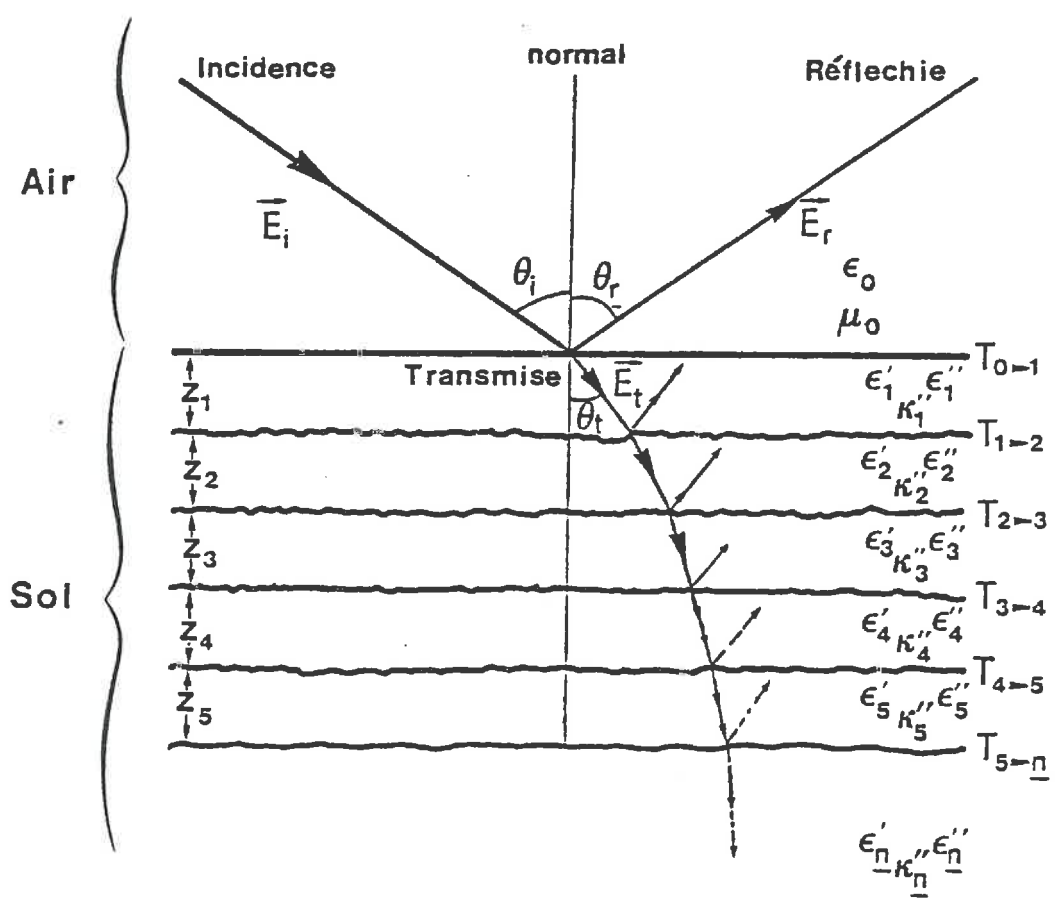


FIGURE II-4. SCHEMÀ DE L'INTERACTION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE LORS D'INCIDENCE A L'INTERFACE AIR-SOL

II.2.3. Présentation théorique du modèle

Remarque préliminaire : Nous ne donnerons ici que les principaux résultats. Les calculs détaillés sont présentés dans l'Annexe 1.

Dans le cas d'un milieu absorbant complexe (sol), la direction de l'onde transmise est déterminée par l'angle de transmission (Θ_t) complexe (Fig. II-4).

L'angle de transmission obtenu par la relation classique

$$n_i \sin \Theta_i = n_t \sin \Theta_t \quad (\text{II.1})$$

où n_i = indice de réfraction du milieu d'incidence

Θ_i = angle d'incidence

n_t = indice de réfraction complexe du milieu de transmission (milieu 2)

Θ_t = angle de transmission complexe.

D'après BECKER (1978), le problème complexe peut toujours se ramener à un problème réel. Dans le cas où le milieu de réfraction "t" a un indice n_t complexe, la relation de SNELL-DESCARTES s'écrit, lorsque le milieu "i" a un indice réel :

$$n_i \sin \Theta_i = \nu(\Theta_t) \sin \Theta_t' \quad (\text{II.2})$$

avec

$\nu(\Theta_t)$ un indice réel apparent dépendant de l'angle réel de réfraction (voir Annexe 1).

Or, on a une relation :

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{II.3})$$

où n = indice de réfraction du milieu considéré

ϵ_r = permittivité diélectrique relative du milieu considéré.

Donc, un milieu "t" caractérisé par la permittivité diélectrique complexe (ϵ' , ϵ'') a un indice réel équivalent $\nu(\Theta'_t)$ ou une permittivité diélectrique réelle équivalente (ϵ_{rte}) par la relation :

$$\sqrt{\epsilon_{rte}} = \nu[\Theta'_t]$$

$$\text{ou} \quad \epsilon_{rte} = \left\{ \nu[\Theta'_t] \right\}^2 \quad (\text{II.4})$$

La valeur de l'angle réel Θ'_t correspondante est calculée par la relation donnée par BECKER (1978). Après avoir développé les relations précédentes (voir Annexe 1), on a les relations nécessaires pour résoudre le problème de transmission des ondes dans un milieu complexe.

1. L'angle réel de transmission donné par la relation

$$\sin^2 \Theta'_t = \frac{\epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i \left[[-\epsilon'_{rt} - \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i] + \sqrt{[\epsilon'^2_{rt} + \epsilon''^2_{rt}] + \epsilon_{ri}^2 \sin^4 \theta_i + 2 \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i (-\epsilon'_{rt})} \right]}{2 \left[\frac{\epsilon''^2_{rt}}{4} - \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i (\epsilon'_{rt}) \right]} \quad (\text{II.5})$$

avec Θ'_t = angle réel de transmission

θ_i = angle réel d'incidence

ϵ_{ri} = permittivité diélectrique relative du milieu d'incidence

ϵ'_{rt} = partie réelle de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission

ϵ''_{rt} = partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission.

2. La permittivité diélectrique réelle équivalente du milieu de transmission (ϵ_{rte}) :

$$\epsilon_{rte} = \frac{1}{2 \cos^2 \theta'_t} \left[[\epsilon'_{rt} \cos^2 \theta'_t] + \sqrt{\epsilon'^2_{rt} \cos^4 \theta'_t + \epsilon''^2_{rt} \cos^2 \theta'_t} \right] \quad (\text{II.6})$$

avec

ϵ'_{rt} = partie réelle de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission

ϵ''_{rt} = partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission

Θ'_t = angle réel de transmission

Pour chaque passage de la couche i à t , le problème est entièrement réel ($\Theta'_t, \epsilon_{rte}$). Après le premier passage d'interface air-sol, l'angle de transmission se transforme en angle d'incidence et la permittivité diélectrique relative équivalente du milieu de transmission en permittivité diélectrique relative du milieu incident.

La partie transmise (E_t) de l'onde incidente (E_i) à chaque interface est définie par le coefficient de transmission ($T_{i,t}$) donné par la relation suivante :

$$T_{i-t} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_{ri}} \cos \Theta_i}{\sqrt{\epsilon_{ri}} \cos \Theta_i + \sqrt{\epsilon_{rte}} \cos \Theta'_t} = \frac{E_t}{E_i} \quad (\text{II.2})$$

avec

ϵ_{ri} = permittivité diélectrique relative du milieu d'incidence

Θ_i = angle d'incidence (réel)

ϵ_{rte} = permittivité diélectrique relative équivalente du milieu de transmission

Θ'_t = angle réel de transmission.

L'amplitude de l'onde transmise (E_t) est atténuée après traversée d'une couche d'épaisseur z_i . On obtient ainsi l'amplitude de l'onde atténuée (E_a) telle que :

$$\frac{E_i}{E_t} = e^{-k''_i z_i} \quad (\text{II.8})$$

avec

k''_i = partie imaginaire du vecteur d'onde de couche i

z_i = épaisseur de la couche i .

L'existence de ces phénomènes explique le fait que l'amplitude de champ transmise se réduit à mesure que l'onde pénètre, et tend vers zéro quand la profondeur croît. On définit alors une profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique (z) comme celle à laquelle l'amplitude du champ électrique transmise n'est que $0,37$ ($\frac{1}{e}$) fois celle du champ électrique incident (ULABY et al., 1982).

Par définition, on peut écrire :

$$\frac{E_z}{E_0} = \frac{1}{e} \quad (\text{II.9})$$

Dans les modèles de calcul de la profondeur de pénétration, on se propose de calculer la valeur (E_z/E_0). A partir de la figure (II-4), on peut décomposer la propagation des ondes couche par couche.

Soit E_0 l'amplitude incidente et E_1 l'amplitude transmise dans la première couche.

On a :

$$E_1 = E_0 T_{0 \rightarrow 1} \quad (\text{II.10})$$

où

$T_{0 \rightarrow 1}$ = coefficient de transmission entre le milieu d'incident et le milieu de transmission première couche

Cette amplitude E_1 est alors atténuée dans la couche $0-z_1$ et elle devient E_1' :

$$E_1' = E_1 e^{-k_1''(z_1-0)} = E_0 T_{0 \rightarrow 1} e^{-k_1''(z_1-0)} \quad (\text{II.11})$$

De la même façon, on obtient :

$$E_2 \text{ (transmise)} = E_1' \cdot T_{1 \rightarrow 2}$$

et l'atténuation est telle que :

$$\begin{aligned} E_2' &= E_2 e^{-k_2''(z_2-z_1)} \\ &= E_1' T_{1 \rightarrow 2} e^{-k_2''(z_2-z_1)} \\ &= E_0 T_{0 \rightarrow 1} e^{-k_1''(z_1-0)} T_{1 \rightarrow 2} e^{-k_2''(z_2-z_1)} \end{aligned}$$

$$= E_0 T_{0-1} T_{1-2} e^{-[k_1''(z_1-0) + k_2''(z_2-z_1)]} \quad 15.$$

Pour n couches, on peut trouver la relation récurrente ci-dessous de la même manière :

$$E_n' = E_0 T_{0-1} T_{1-2} \dots T_{n-1-n} e^{-[k_1''(z_1-0) + k_2''(z_2-z_1) \dots + k_n''(z_n-z_{n-1})]} \quad (\text{II.12})$$

On obtient finalement :

$$\frac{E_n'}{E_0} = T_{0-1} T_{1-2} \dots T_{n-1-n} e^{-[k_1''(z_1-0) + k_2''(z_2-z_1) \dots + k_n''(z_n-z_{n-1})]} \quad (\text{II.13})$$

ou

$$\prod_{i=1}^n \{ T_{(i-1)-i} \} e^{-\sum_{i=1}^n k_i'' [z_i - z_{i-1}]} = \frac{1}{e} \quad (\text{II.14})$$

La relation (II.14) n'est pas une égalité stricte en z puisque n est inconnu. En fait, on incrémente " n " jusqu'à ce que :

$$\prod_{i=1}^n \{ T_{(i-1)-i} \} e^{-\sum_{i=1}^n k_i'' [z_i - z_{i-1}]} \rightarrow 0.37$$

avec

T_i = coefficient de transmission de la couche i

k_i'' = partie imaginaire du vecteur d'onde de la couche i

z_i = épaisseur de la couche i

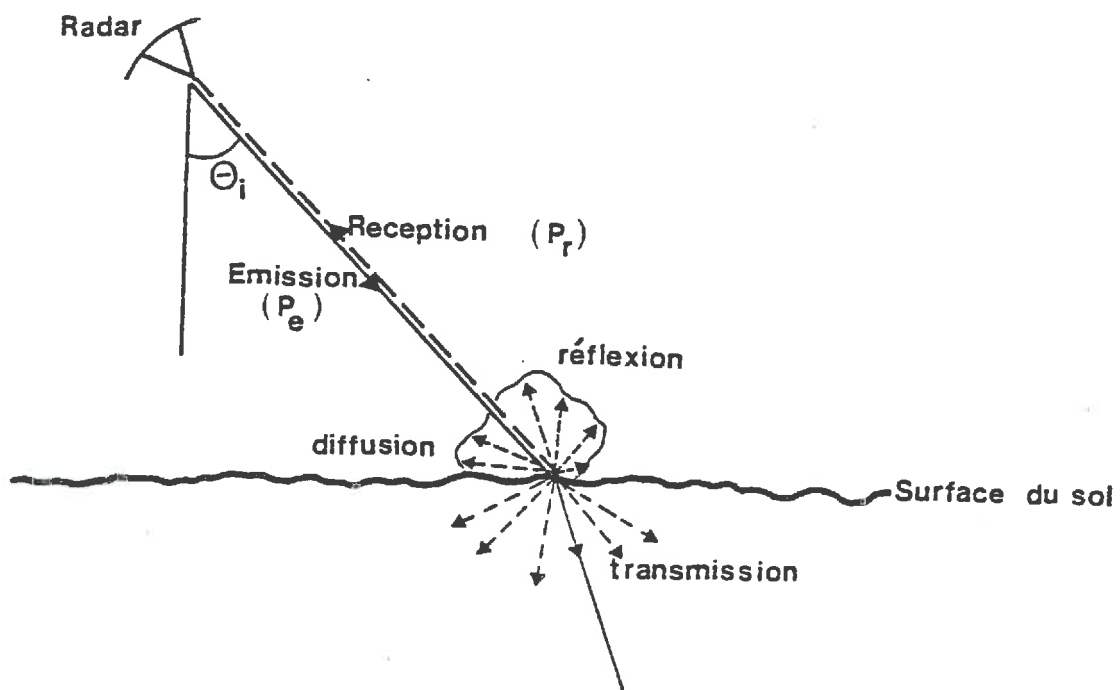


FIGURE III-1. SCHEMA DE REPARTITION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE LORS D'INTERACTION A L'INTERFACE AIR-SOL

III. LA MESURE RADAR

Le radar est un système actif d'émission et de réception d'une onde électromagnétique-hyperfréquence ou micro-onde. Pour les observations de la surface terrestre, les longueurs d'onde (λ) des principaux systèmes radar sont comprises entre 1 et $25 \cdot 10^{-2}$ m correspondantes à des fréquences comprises entre 1 et 30 GHz (1 GHz = 10^9 Hz).

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

- direction de propagation ou incidence (θ_1)
- 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 partie est réfléchi ou diffusée à l'interface (cf. Fig. III-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 propres (fréquence, polarisation, déphasage, puissance) véhicule des informations acquises au moment de l'interaction de l'onde électromagnétique incidente avec l'interface de séparation. Une étude exhaustive des lois physiques d'interaction nécessiterait un développement long et fastidieux basé sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme. Nous nous bornerons à recenser dans ce chapitre, les caractéristiques physiques du sol qui ont une influence sur les conditions de réflexion et de diffusion de l'onde radar.

Le radar utilisé est un scattéromètre. 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 réfléchi ou rétrodiffusée. Il est possible sur les radars utilisés en télédétection de choisir :

irradiation d'une surface dS
par une antenne

vision de l'antenne
par une surface dS

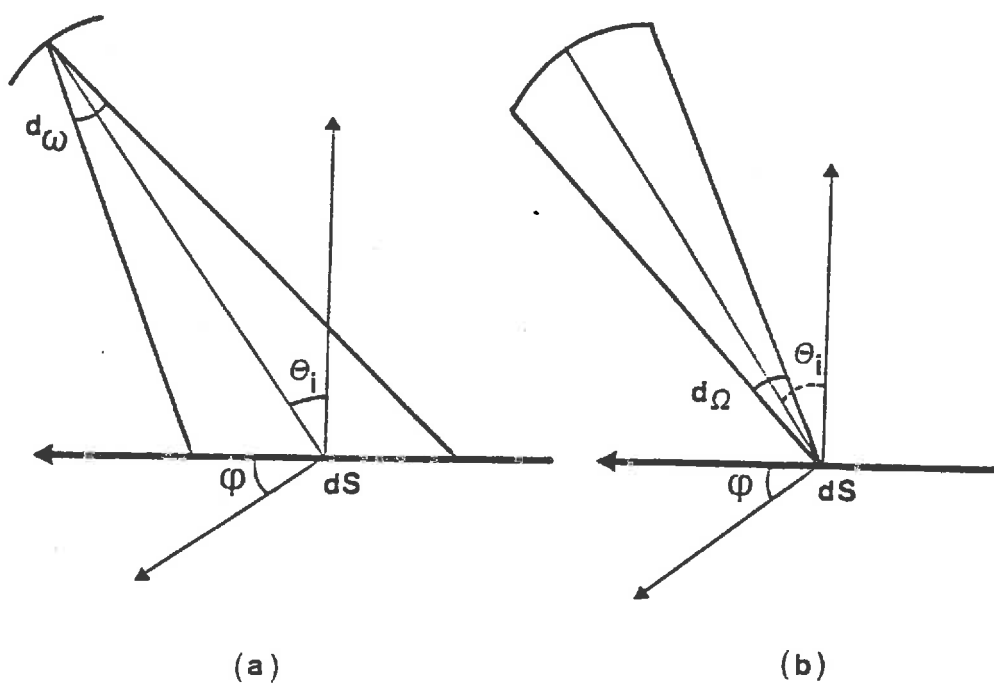


FIGURE III-2. SCHEMA DES ANGLES SOLIDES SUR L'ANTENNE ET SUR LA SURFACE CIBLE

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

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

- Fréquence : 4,5 GHz
- Polarisation : HH
- Incidence : 10°

Lorsque nous parlons de la polarisation HH, la première lettre correspond à la polarisation de l'onde émise, la seconde à la polarisation de l'onde reçue. Dans l'exemple choisi, la polarisation est horizontale (H), l'autre possibilité étant verticale (V).

Nous venons de voir que la mesure radar consiste à mesurer la puissance du rayonnement rétrodiffusé. Cette puissance, reçue par le capteur, dépend à la fois :

- des caractéristiques géométriques du radar
- de la configuration de la mesure
- du pouvoir de rétrodiffusion de la surface étudiée.

C'est ce dernier facteur qui nous intéresse. Pour pouvoir isoler ce facteur, il faut définir une grandeur physique qui traduit le pouvoir d'une cible à fournir un rayonnement rétrodiffusé, par unité de surface ou section efficace de rétrodiffusion (σ).

III.1. Définition de la section efficace de rétrodiffusion

Considérons une antenne radar de surface A et luminance L_i^* . Cette antenne irradie une surface élémentaire dS située à une distance R (cf. Fig. III-2). Soit $d\omega$ l'angle solide sous lequel l'antenne A voit la surface élémentaire dS . L'angle solide $d\omega$ est donné par la relation :

$$d\omega = \frac{\cos\theta_i}{R^2} dS \quad (\text{III.1})$$

* Luminance : puissance émise ou réfléchie par unité de surface et d'angle solide.

Soit $d\Omega$ l'angle solide sous lequel la surface élémentaire dS voit l'antenne A (cf. Fig. III-2)

$$d\Omega = \frac{A}{R^2} \quad (\text{III.2})$$

La puissance incidente dP_e reçue par l'élément de surface dS s'écrit :

$$dP_e = L_i A d\omega \quad (\text{III.3})$$

En combinant (1) + (2) + (3), nous obtenons :

$$dP_e = L_i \cos\theta_i dS d\Omega \quad (\text{III.4})$$

Le flux de la puissance incidente :

$$d\Phi_i = L_i d\Omega \quad (\text{III.5})$$

En combinant (2) + (5) :

$$d\Phi_i = L_i \frac{A}{R^2} \quad (\text{III.6})$$

La puissance mesurée par l'élément de surface dS , dans l'angle solide $d\Omega$, est donnée par :

$$dP_r = L_r dS \cos\theta_i d\Omega \quad (\text{III.7})$$

où L_r est la luminance de réflexion de la cible dS .

Par définition, la section efficace différentielle d'une surface dS localisée par ses coordonnées polaires (Θ, φ) est la puissance réémise par unité d'angle solide et par unité de flux incident :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}[\theta, \varphi] = \frac{dP_r \cdot dS/d\Omega}{\Phi_i} \quad (\text{III.8})$$

Par définition, la section efficace radar est :

$$\sigma = 4\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}[\theta, \varphi] \quad (\text{III.9})$$

Les radaristes introduisent le coefficient de rétrodiffusion ou section efficace de rétrodiffusion σ_0 définie par :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma(\theta, \varphi)}{d\Sigma} \quad (\text{III.10})$$

où $d\Sigma$ est la surface illuminée.

III.2. Equation radar

La puissance reçue au niveau de l'antenne provenant d'une surface S correspond à la somme des contributions des surfaces élémentaires dS . Elle est reliée aux caractéristiques du radar et de la cible par l'équation radar :

$$P_r = P_e \frac{1}{(4\pi)^3} \lambda^2 \iint_S \frac{G_e(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi)}{D^4} \sigma_0 dS \quad (\text{III.11})$$

P_r = puissance reçue

P_e = puissance incidente émise

λ = longueur d'onde

$G_E(\theta, \varphi)$, $G_r(\theta, \varphi)$ = gain de l'antenne (émission et réception)

σ_0 = section efficace de rétrodiffusion

D = distance de la cible à l'antenne

L'équation radar est composé de trois termes fonction de :

- la contribution de la cible (σ_0)
- la contribution du système (P_e , $G_E(\theta, \varphi)$, $G_r(\theta, \varphi)$, λ)
- la géométrie de la mesure.

Pour une configuration de la mesure, la valeur de σ_0 est obtenue par la résolution de l'équation radar, sous certaines hypothèses. On démontre ainsi que est une variable proportionnelle au rapport des puissances émises et reçues.

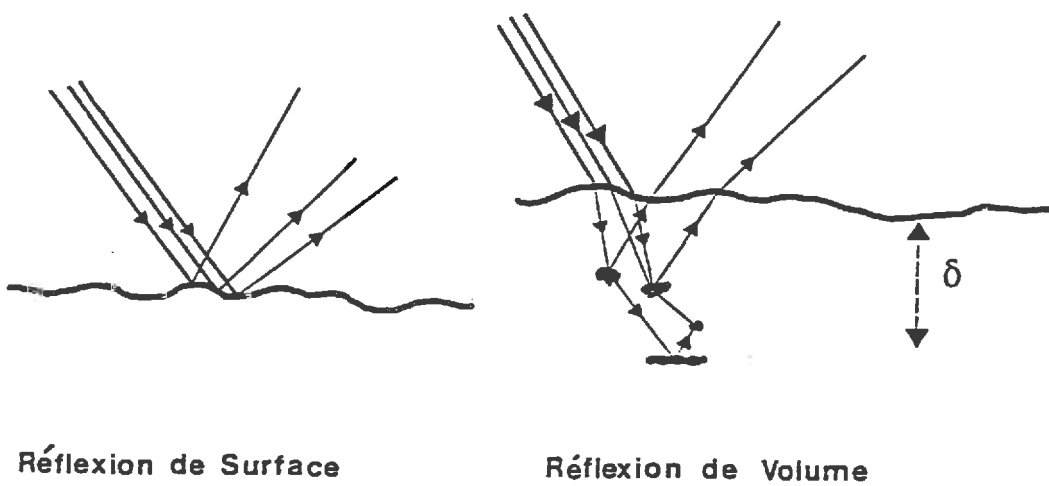


FIGURE III-3. SCHEMA DE REFLEXION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE A L'INTERFACE AIR-SOL

Enfin, cette grandeur présentant une forte dynamique de variation est donc exprimée en décibel :

$$\sigma_0 \text{ (dB)} = 10 \log \sigma_0 \quad \text{(III.12)}$$

III.3. Comportement électromagnétique de l'onde au contact du sol

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré à l'aide de l'équation radar que la section efficace de rétrodiffusion 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.

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

- une réflexion ou diffusion de volume
- une réflexion de surface,

que nous allons voir plus en détails séparément, tout en insistant sur le fait que ces deux phénomènes sont toujours committents.

III.3.1. La réflexion de volume

Celle-ci fait intervenir les propriétés internes du profil, en particulier et surtout l'humidité du sol. 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 que la profondeur de pénétration de l'onde.

III.3.2. La réflexion de surface

Celle-ci fait principalement intervenir 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 illustrés par les schémas de la figure III-4 :

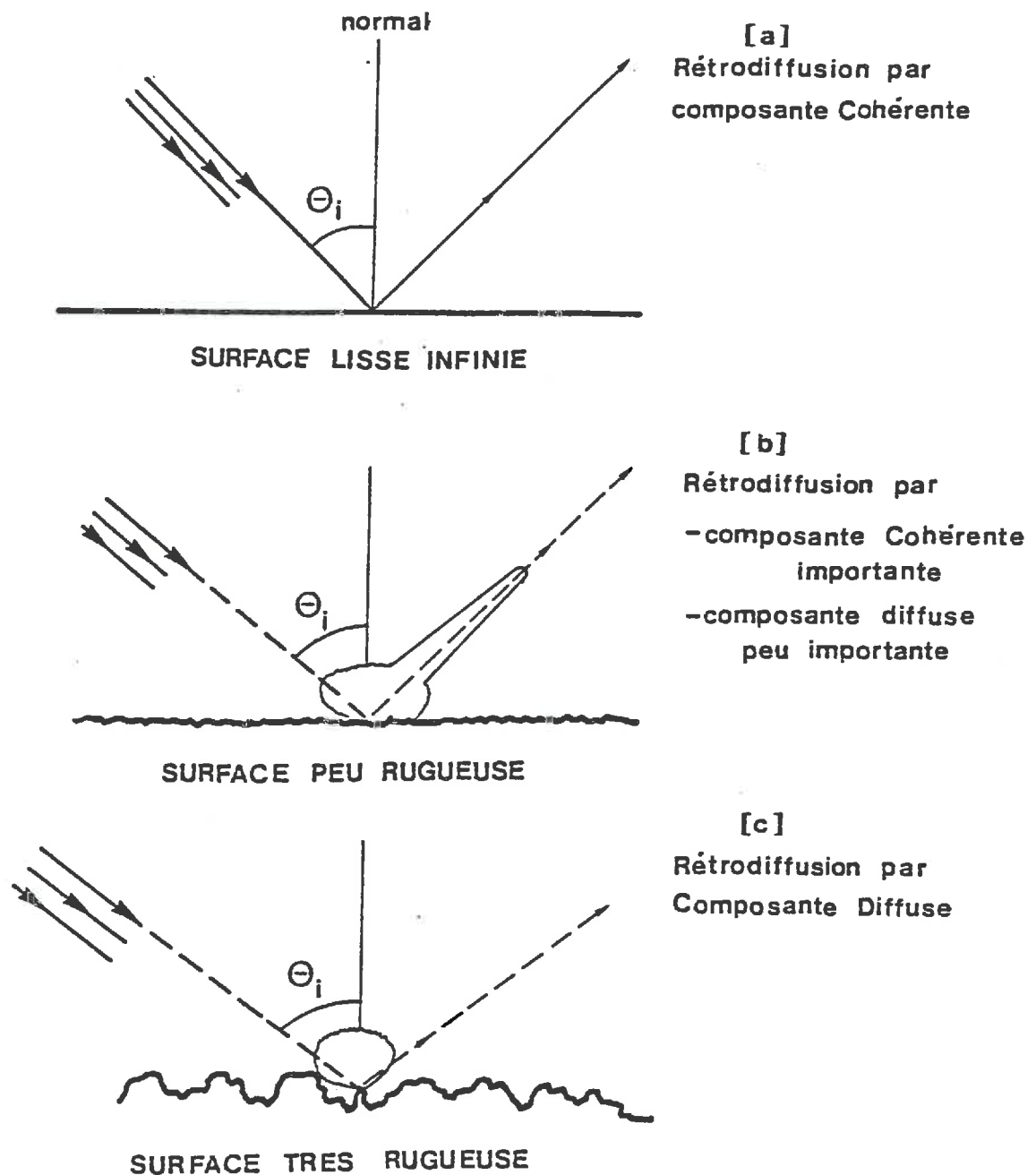


Figure III-4. Schéma de réflexion d'une onde électromagnétique selon la condition de la rugosité de surface (Ulaby et al, 1986)

- Pour une surface lisse infinie (a), la rétrodiffusion est de type uniquement spéculaire.
- Pour une surface peu rugueuse aux dimensions finies (b), l'onde rétrodiffusée présente deux composantes : une cohérente élevée, dans la direction de la réflexion, et une incohérente faible. Si l'angle d'incidence Θ_i est proche de la verticale, la valeur de σ_0 mesurée sera forte : elle correspondra à la valeur de la composante cohérente. Par contre, avec augmentation de Θ_i , σ_0 décroîtra puisque l'on mesurera en fait la composante incohérente (cas de la figure (b)).
- Pour une surface très rugueuse, le schéma de rétrodiffusion présente uniquement une composante incohérente. Quel que soit l'angle d'incidence, la valeur de σ_0 mesurée sera faible.

A partir de là, le problème qui se pose est le passage d'un comportement à l'autre vis-à-vis des ondes électromagnétiques, la rugosité d'une surface est une notion relative : en effet, une surface qui apparaît lisse pour une micro-onde peut être "vue" comme rugueuse par une onde de longueur d'onde plus petite (FLUHR, 1981).

IV. MATERIELS ET METHODES

IV.1. Site expérimental

Pour l'acquisition des données, une campagne de mesures a été réalisée sur le site expérimental qui se situe au Domaine Saint Paul de l'INRA d'AVIGNON. Les mesures se sont déroulées du mois de Mai au mois de Juillet 1986. Le plan du dispositif expérimental est présenté à la Figure IV-1.

Quant au sol du site, il a une texture limono-argileuse, sa composition granulométrique est présentée au Tableau IV.1.

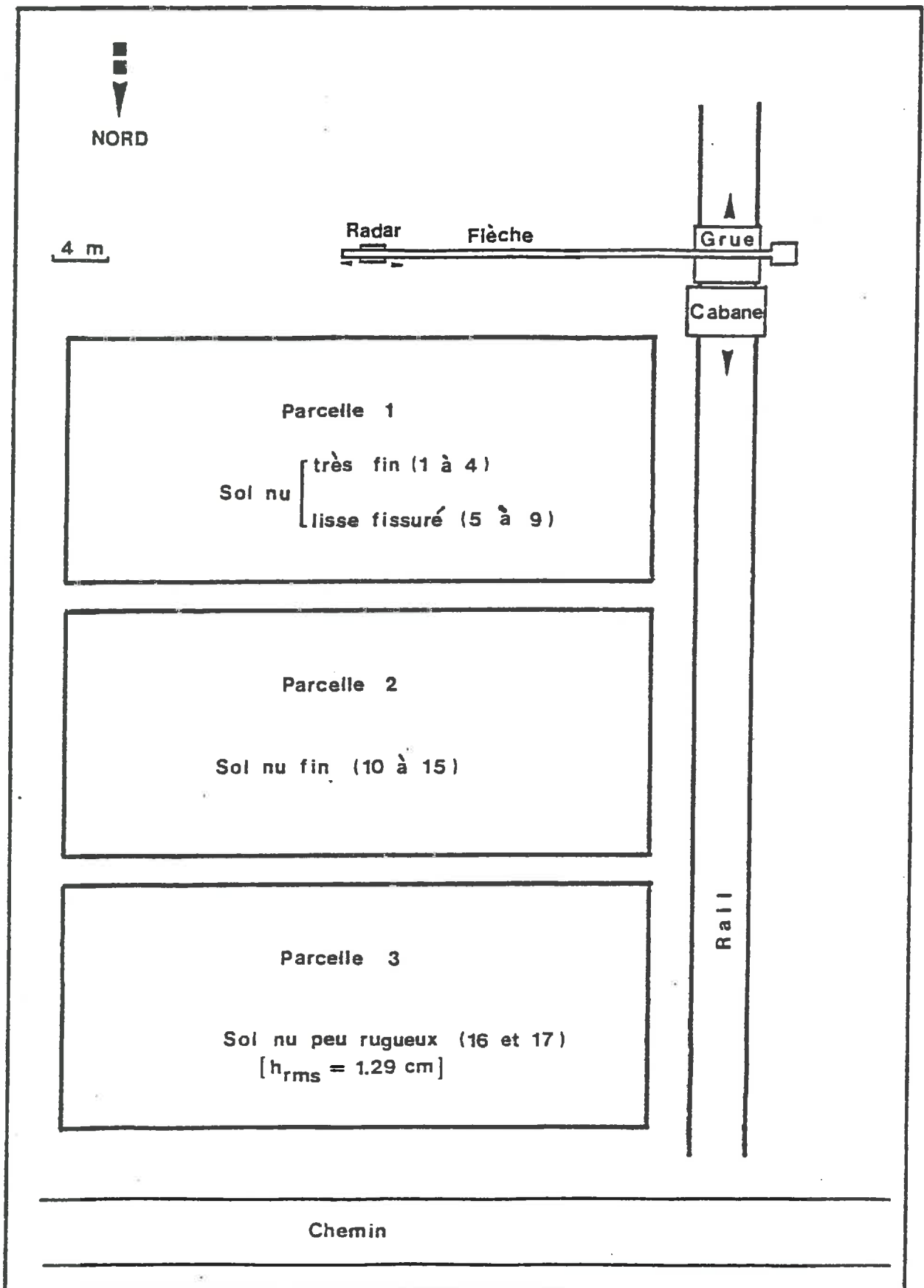


FIGURE IV-1. SCHEMA DU SITE EXPERIMENTAL
 (LES NUMEROS ENTRE PARANTHESES CORRESPONDENT AUX NUMEROS
 DE SERIES DE MESURES)

Tableau IV-1 : Composition granulométrique du sol du site expérimental.

Composant	Teneur (%)
Argile	27,19
Limon fin	45,94
Limon grossier	15,81
Sables totaux	11,05
Matière organique	1,70

Source : Rapport ATP-Eau, Science du Sol-INRA, AVIGNON 1984.

IV.2. Les mesures Radar

Le radar utilisé (RAMSES II) est monté sur la flèche d'une grue de chantier à une hauteur de 14 mètres (cf. Figures IV-1, IV-2 et IV-3). La position de celle-ci par rapport à la parcelle expérimentale est fonction de l'angle d'incidence de la mesure. Sa distance vis-à-vis de la parcelle est calculée à partir de l'évaluation des surfaces participant effectivement à la rétrodiffusion (cf. Figure IV-4).

La valeur de l'angle β est donnée en fonction de la fréquence (cf. Tableau IV-2).

Tableau IV.2 : Valeur de l'angle solide en fonction de la fréquence

Fréquence (GHz)	$\beta/2$ (degrés)
4,5	4,60
5,3	3,90

Les valeurs a et b sont calculées en utilisant les relations suivantes :

$$a = H \left\{ \operatorname{tg} \Theta_i - \operatorname{tg} [\Theta_i - \beta/2] \right\}$$

$$b = H \left\{ \operatorname{tg} [\Theta_i + \beta/2] - \operatorname{tg} \Theta_i \right\}$$

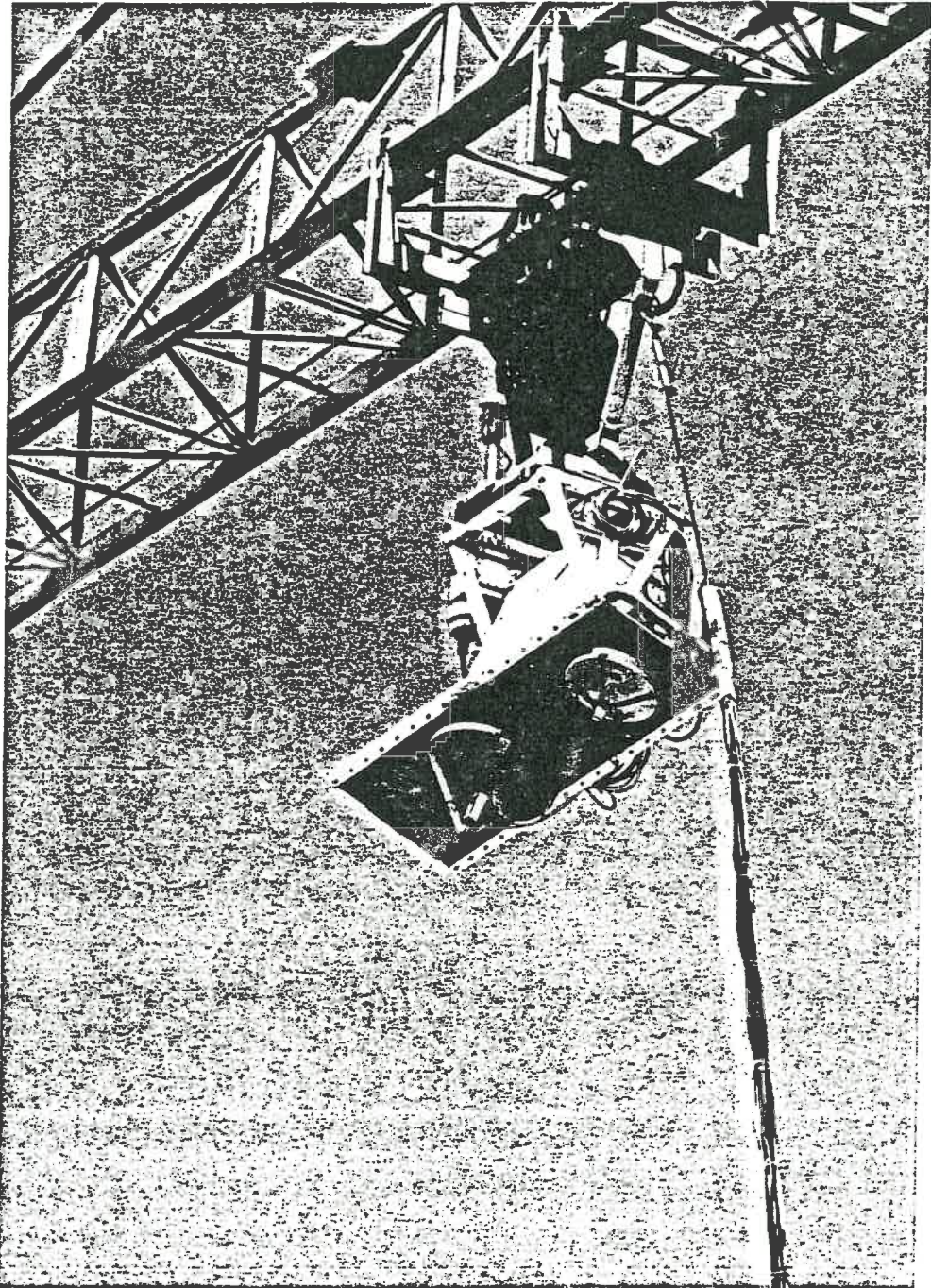


FIGURE IV-2. PHOTO DES ANTENNES EMISSION-RECEPTION DU SCATTEROMETRE
RAMSES II

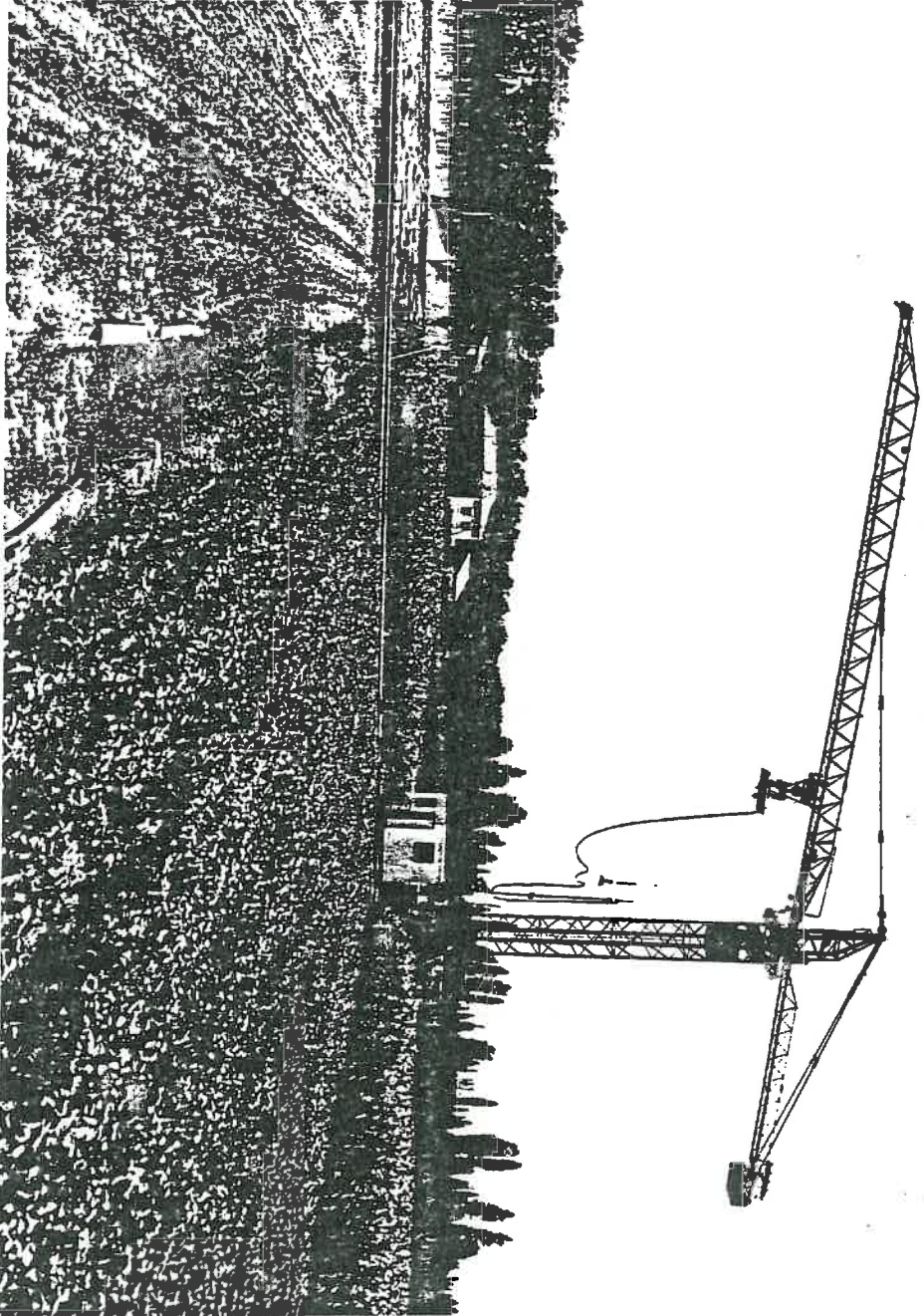


FIGURE IV-3. ENSEMBLE DU SYSTEME PORTANT DES ANTENNES ET LA CABANE DE MESURES

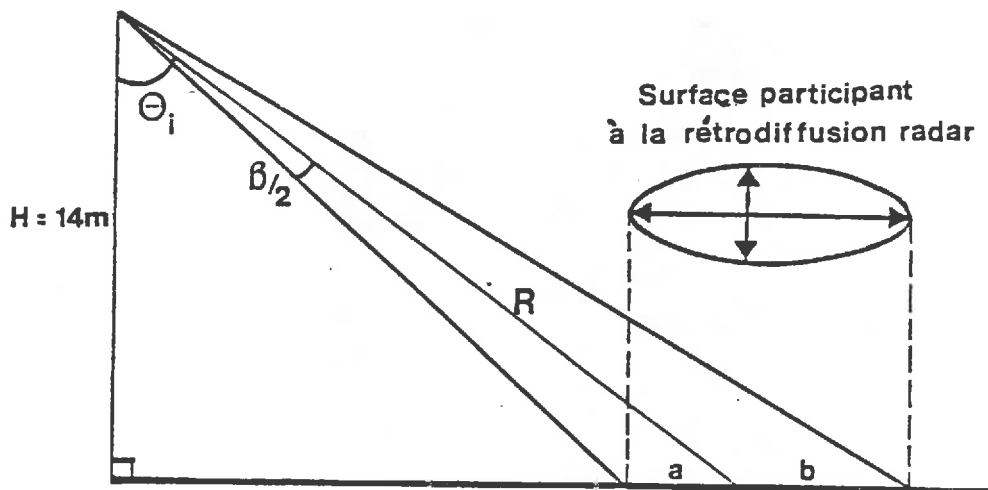


FIGURE IV-4. SCHEMÉ DE LA SURFACE PARTICIPANT A LA RETRODIFFUSION, EN FONCTION DE LA FREQUENCE ET L'ANGLE D'INCIDENCE

Le tableau IV-3 montre les résultats du calcul de ceux-ci :

Tableau IV.3 : Les valeurs a et b correspondant à la surface participant à la rétrodiffusion en fonction de la fréquence et l'angle d'incidence

Fréquence (GHz)	Incidence (degrés)	a (m)	b (m)
4,5	10	1,15	1,18
	15	1,18	1,23
	20	1,24	1,31
5,3	10	0,97	1,00
	15	1,01	1,04
	20	1,05	1,11

Le principe général de fonctionnement de RAMSES II est présenté en annexe 2.

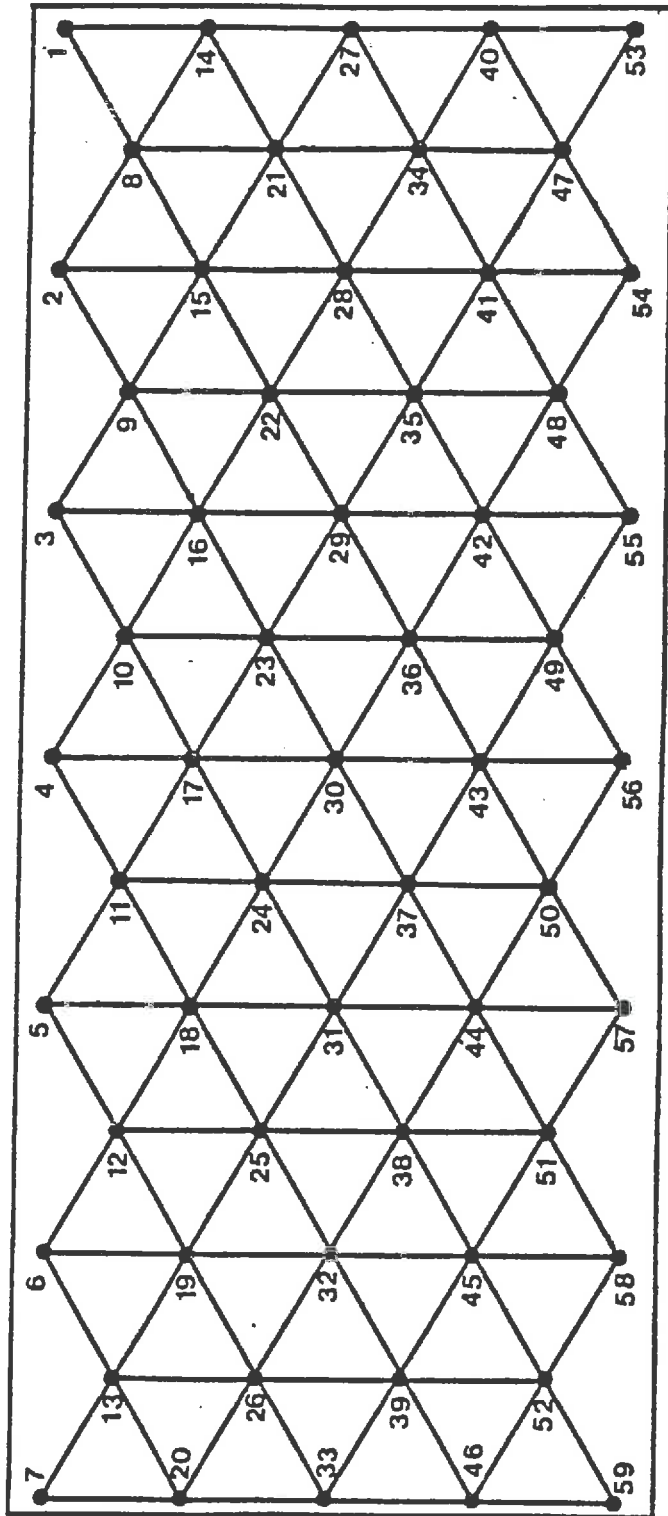
Les configurations utilisées sont celles qui sont considérées comme capables de minimiser l'effet de la rugosité. Ce sont les suivantes :

- Fréquence : 4,5 GHz et 5,3 GHz
- Incidence : 10°, 15° et 20°
- Polarisation: Horizontale-Horizontal

Au total, en intégrant les trois paramètres ci-dessus, chaque séquence se compose donc de 6 configurations. Chaque séquence de mesure est répétée deux fois, ceci donnant une indication sur la variabilité de celle-ci.

Précision des mesures

La mesure radar (calcul de la section efficace de rétrodiffusion σ_0) est en réalité, une mesure statistique : elle est la moyenne d'un nombre d'échantillons indépendants intégrés dans une même mesure. La précision de cette dernière dépend du nombre de ces échantillons. Ceux-ci sont obtenus de deux façons :



4 m

● Profil observé

FIGURE IV-5. SCHEME DU MAILLAGE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS POUR L'ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIALE

- par un procédé de décorrélation en fréquence. En effet, lorsqu'on parle de mesure à une fréquence donnée, il s'agit d'une fréquence centrale, sorte de moyenne autour de laquelle est modulé le signal émis. Il est donc possible de calculer une variation minimale de fréquence permettant deux mesures décorrélées, et pour finir le nombre total d'échantillons, ceci pour chaque fréquence centrale.
- par un procédé de décorrélation spatiale. Celui-ci s'obtient par le déplacement du radar sur la flèche de la grue au moment de la mesure. Il suffit de calculer la distance minimale de déplacement pour laquelle deux mesures sont décorrélées pour avoir le nombre d'échantillons connaissant la longueur utile de la flèche de la grue, soit 14 mètres.

Le nombre total d'échantillons indépendants pour une configuration de mesure donnée, s'obtient par multiplication des deux précédents termes. A partir de là, connaissant ce nombre et la loi de probabilité que suivent les mesures, peut être calculé l'intervalle de confiance (FLUHR, 1981).

IV.3. Mesures au sol

A proximité à la surface du sol, seule la mesure gravimétrique de la teneur en eau massique est réalisable directement de façon fiable, en l'état présent des techniques. L'estimation de la teneur en eau volumique doit donc être obtenue à partir des mesures complémentaires de la densité apparente sèche.

a. Teneur en eau massique

Le prélèvement d'échantillons a été réalisé consécutivement à la mesure radar. En chaque point de mesure, le profil hydrique a été déterminé en prélevant les échantillons aux profondeurs suivantes : 0-1 cm ; 1-2 cm ; 2-3 cm ; 3-4 cm ; 4-5 cm ; 5-6 cm ; 6-7 cm et 7-10 cm.

11 à 18 profils (répétitions) ont été associés à chaque mesure radar, répartis sur la parcelle de façon à être statistiquement indépendants, c'est-à-dire séparés par des distances suffisantes suivant l'analyse de variabilité spatiale (géostatistique), qui a été préalablement réalisée. La figure IV-5 montre le maillage avec lequel l'analyse géostatistique a été faite.

La teneur en eau massique (H) est calculée après 24 heures de séchage à 105°C, en utilisant la relation suivante :

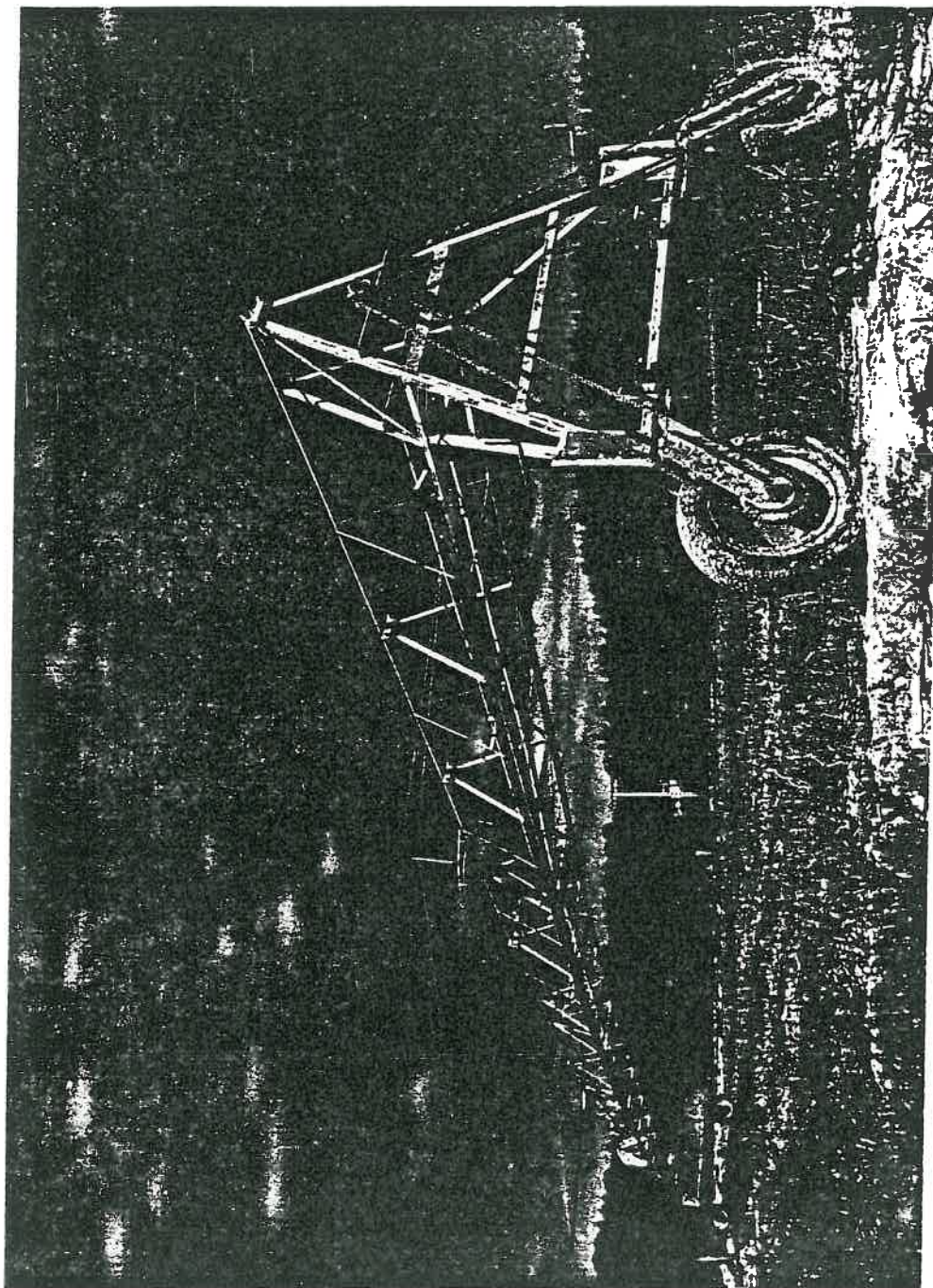


FIGURE IV-6. DISPOSITIF UTILISE POUR MAITRISE L'HUMIDITE DU SOL
DURANT LA CAMPAGNE DE MESURE

$$H = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

avec

P_h = poids humide de l'échantillon

P_s = poids sec de l'échantillon

La teneur en eau volumique (Θ) est calculée à partir de la teneur en eau massique par la relation :

$$\Theta = H \times \rho_d$$

avec :

H = teneur en eau massique

ρ_d = densité sèche de l'échantillon correspondant.

b. Densité apparente sèche

La mesure de la densité sèche a été faite avant le premier prélèvement d'échantillon de l'humidité massique, puis répétée après le travail du sol (changement de l'état structural en surface) et après un orage qui a modifié la structure de la surface.

On a utilisé deux méthodes de mesure de la densité apparente sèche suivant les conditions du terrain.

1. La méthode de mesure du volume après enrobage à la paraffine (STENGEL, 1984) a été utilisée pour évaluer la densité de la croûte de battance existant en surface (0-1,5 cm) après l'orage.
2. La méthode Gammadensimétrique (STENGEL et al., 1986) a été utilisée pour évaluer la densité des couches sous-jacentes. Son principe et les caractéristiques de l'appareil utilisé sont présentés en annexe 3.

c. Maîtrise de l'humidité du sol

Les variations de l'humidité de la couche de surface ont été induites par irrigation au moyen d'une rampe frontale de façon à réduire l'hétérogénéité spatiale des apports et à limiter la dégradation structurale par rapport aux dispositifs d'aspersion classiques.

TABLEAU IV-4. COEFFICIENTS DE L'ESTIMATION POLYNOMIALE DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE D'UN SOL (HALLIKAINEN ET AL, 1985)

FREQUENCE GHz	$\epsilon_c = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2$												$\Delta\epsilon = \epsilon_m - \epsilon_c$			$\epsilon_m = A + B \epsilon_c$		
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2	$\bar{\Delta\epsilon}$	SD	A	B	r^2	SEE	N		
1.4	2.862	-0.012	0.001	3.803	0.462	-0.341	119.006	-0.500	0.633	-0.101	0.672	0.227	0.967	0.993	0.620	53		
4	2.977	-0.012	-0.001	5.505	0.371	0.062	114.826	-0.389	-0.547	-0.022	0.852	0.112	0.989	0.986	0.855	70		
6	1.993	0.002	0.015	38.006	-0.176	-0.633	10.720	1.256	1.522	-0.128	0.907	0.031	0.987	0.983	0.908	73		
8	1.977	0.002	0.018	25.579	-0.017	-0.412	39.791	0.723	0.941	-0.075	0.739	0.038	0.990	0.987	0.742	74		
10	2.502	-0.003	-0.003	10.101	0.221	-0.004	77.482	-0.061	-0.135	-0.042	0.723	0.072	0.989	0.986	0.725	77		
12	2.700	-0.001	0.012	26.473	0.013	-0.523	34.333	0.284	1.062	-0.103	0.857	0.015	0.989	0.976	0.860	89		
14	2.331	0.001	0.009	17.918	0.084	-0.282	50.149	0.012	0.307	-0.073	0.612	0.065	0.984	0.987	0.612	62		
16	2.237	0.002	0.009	15.505	0.076	-0.217	48.260	0.168	0.289	-0.080	0.706	0.096	0.979	0.983	0.704	50		
18	1.912	0.007	0.021	29.123	-0.190	-0.545	6.960	0.822	1.195	-0.107	0.621	0.066	0.978	0.984	0.616	88		
All										-0.002	0.751	0.068	0.986	0.906	0.746	636		
1.4	0.356	-0.003	-0.008	5.507	0.044	-0.002	17.753	-0.313	0.206	0.079	0.350	-0.304	1.179	0.981	0.239	53		
4	0.004	0.001	0.002	0.951	0.005	-0.010	16.759	0.192	0.290	0.419	0.637	0.049	1.211	0.884	0.578	70		
6	-0.123	0.002	0.003	7.502	-0.058	-0.116	2.942	0.452	0.543	0.271	0.580	-0.088	1.160	0.926	0.575	73		
8	-0.201	0.003	0.003	11.266	-0.085	-0.155	0.194	0.584	0.581	0.139	0.568	-0.138	1.097	0.945	0.537	74		
10	-0.070	0.000	0.001	6.620	0.015	-0.081	21.578	0.293	0.332	0.090	0.411	-0.100	1.056	0.979	0.309	77		
12	-0.142	0.001	0.003	11.868	-0.059	-0.225	7.817	0.570	0.801	0.137	0.774	-0.276	1.105	0.976	0.732	89		
14	-0.096	0.021	0.002	8.583	-0.005	-0.153	28.707	0.297	0.357	-0.191	0.326	-0.142	0.987	0.990	0.326	62		
16	-0.027	-0.001	0.003	6.179	0.074	-0.086	34.126	0.143	0.206	-0.114	0.306	-0.073	0.989	0.992	0.306	50		
18	-0.071	0.000	0.003	6.938	0.029	-0.128	29.945	0.275	0.377	-0.041	0.340	-0.116	1.021	0.990	0.335	88		
All										0.097	0.544	0.000	1.032	0.961	0.598	636		

Les doses d'irrigation appliquées ont été de 10 à 20 mm, l'intensité de l'ordre de 30 mm/h. Chaque irrigation a été suivie par la mesure radar et le prélèvement d'échantillons de l'humidité répété quotidiennement pendant la phase d'évaporation.

La figure IV-6 montre le dispositif utilisé.

IV-4. Permittivité diélectrique du sol

Le laboratoire ne dispose pas de matériel de mesure directe de la permittivité diélectrique du sol. Celle-ci a été estimée, en fonction de l'humidité volumique, à partir de la relation empirique établie par HALLIKAINEN et al. (1985).

$$\epsilon_r = [a_0 + a_1S + a_2A] + [b_0 + b_1S + b_2A]\Theta + [c_0 + c_1S + c_2A]\Theta^2$$

avec :

ϵ_r = permittivité diélectrique relative

S = pourcentage de sable

A = pourcentage d'argile

Θ = teneur en eau volumique

a, b, c = coefficients d'ajustement dépendant de la fréquence et différente pour la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité.

Les valeurs des coefficients sont données par le tableau IV-4.

V. RESULTATS EXPERIMENTAUX

V.1. Analyse géostatistique préliminaire et la conséquence pour l'échantillonnage

L'étude de la variabilité spatiale de la teneur en eau à l'échelle de la parcelle a été réalisée par une analyse géostatistique préliminaire (DELHOMME, 1976). Les semi-variogrammes (Figure V-1) correspondent aux teneurs en eau massiques pour les profondeurs 0-1 cm ; 0-2 cm ; 0-3 cm ; 0-4 cm ; 0-5 cm ; 0-7 cm ; et 0-10 cm.

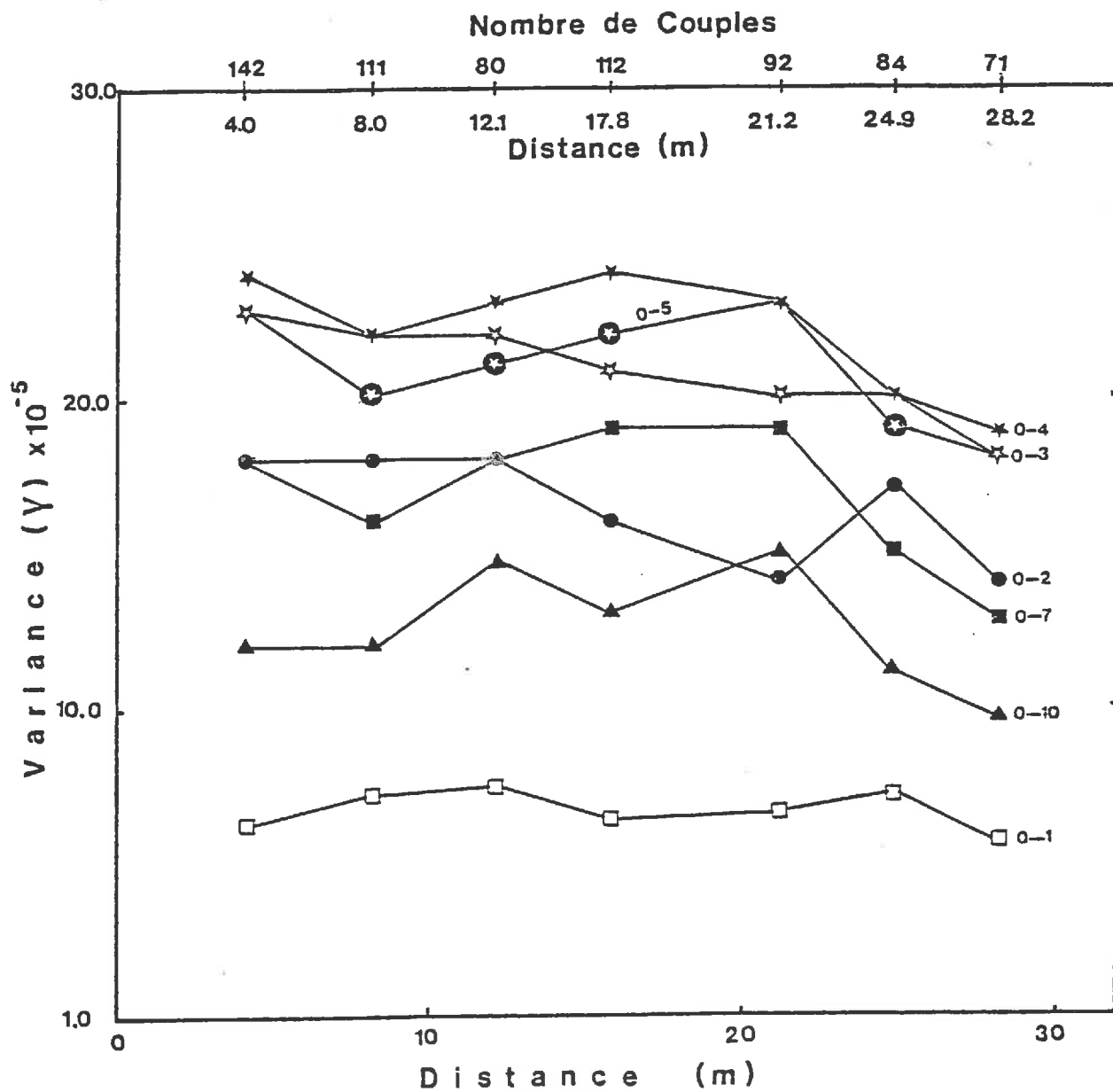


FIGURE V-1. SEMI VARIOGRAMMES POUR L'HUMIDITE MASSIQUE AUX SEPT PROFONDEURS MESUREES

La figure V-1 montre que la variable étudiée a une structure spatiale aléatoire. L'effet pépité résulte probablement de la seule erreur de mesure. L'ordre de grandeur de la variance de l'erreur est de $0,4.10^{-8}$ à $0,12.10^{-3}$ et les variogrammes indiquent une variance de $0,6.10^{-4}$ à $0,2.10^{-3}$.

La portée, si elle existe, est inférieure à 4 m et n'apparaît pas sur le variogramme.

En tout état de cause, et à condition que cette structure soit stable, on peut admettre qu'au-delà d'une distance de 4 m, les échantillons sont indépendants les uns des autres. Cet écartement minimal a donc été respecté pour tous les échantillonnages réalisés.

V.2. Résultats expérimentaux

Pendant la campagne de mesure, dix sept séries de mesure radar et d'humidité ont été réalisées. Les résultats de mesure radar et d'humidité sont respectivement présentés dans l'annexe 4a et 4b. Les profils hydriques correspondants sont présentés à la figure V-2.

Les analyses statistiques des humidités massiques et volumiques sont présentées dans l'annexe 4c. Les résultats sur l'évolution de la densité apparente sèche sont présentés dans le tableau V.1.

L'analyse de la teneur en eau montre qu'il existe des variations très importantes à l'échelle de la parcelle. Les coefficients de variation varient entre 6 % et 70 %. Ils décroissent avec la profondeur et sont les plus faibles dans la couche 5 à 10 cm.

L'analyse de la densité apparente sèche donne des résultats semblables, les coefficients de variation varient de 20 à 40 %.

En ce qui concerne les résultats de mesure radar, l'analyse statistique n'est pas réalisée ; en effet, le système de mesure donne directement les grandeurs de variation à l'échelle de la parcelle. Généralement, l'ordre de grandeur du coefficient de variation varie de 80 à 100 %. Le tableau V.2 montre les exemples de l'ordre de grandeur concerné.

V.3. Relation statistique entre le coefficient de rétrodiffusion radar (σ_0) et la teneur en eau

La liaison statistique existant entre le paramètre σ_0 et les humidités massiques et volumiques a été étudiée par l'analyse des régressions linéaires.

TABLEAU V-1. DENSITES APPARENTES SECHES (G/CM³) MESUREES POUR
DIFFERENTS ETATS STRUCTURAUX DE LA SURFACE,
DURANT LA CAMPAGNE DE MESURES

PROFONDEUR (CM)	ENTRE SERIE				
	0-1E	4E-5E	9E-10E	12E-13E	15E-16E
0 - 1	1.19	1.40	1.18	1.19	1.19
1 - 2	1.19	1.32	1.18	1.19	1.19
2 - 3	1.19	1.24	1.18	1.19	1.20
3 - 4	1.19	1.21	1.18	1.19	1.22
4 - 5	1.19	1.20	1.18	1.18	1.22
5 - 6	1.19	1.19	1.18	1.15	1.21
6 - 7	1.22	1.19	1.20	1.15	1.20
7 - 10	1.33	1.20	1.20	1.22	1.21

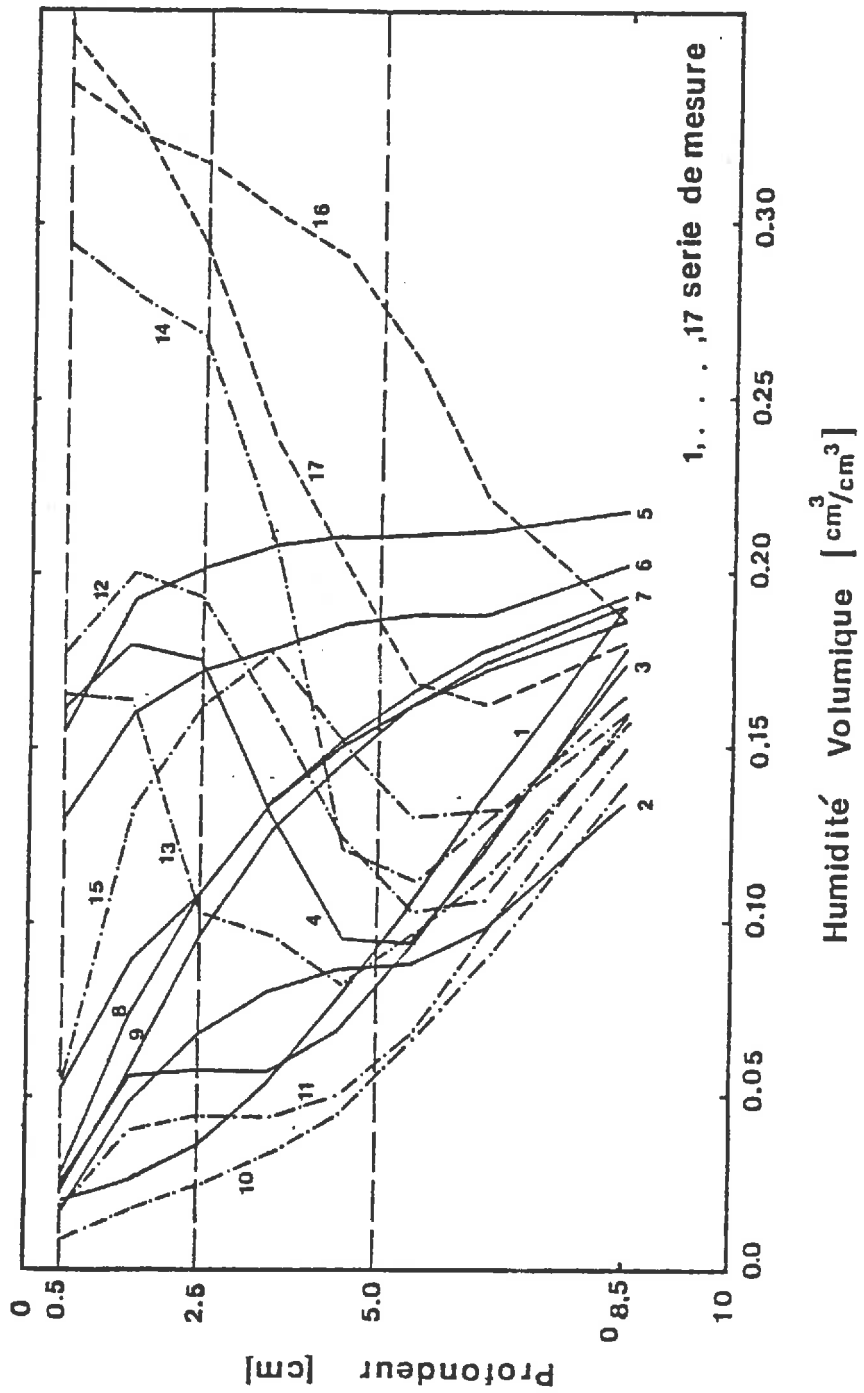


FIGURE V-2. PROFILS HYDRIQUES MESURES DURANTS LA PERIODE D'EXPERIMENTATION

TABLEAU V-2. RESULTATS DE MESURES DU COEFFICIENT
 DE RETRODIFFUSION RADAR ET LA PUISSANCE REÇUE
 (FREQUENCE:4.5 GHZ, INCIDENCE 15 DEGRES; H-H)

NUMERO DE SERIE	COEFF. RETRODIF. RADAR (DB)			PUISSANCE RECUE (DB)	
	MINIMAL	MOYEN	MAXIMAL	MOYENNE	EC-TYPE
1	-20.1	-13.1	-6.6	21.7	19.5
2	-17.5	- 9.8	-5.0	23.6	21.2
3	-16.2	- 8.8	-3.1	24.7	22.0
4	-16.5	- 5.6	0.1	27.9	26.3
5	-12.9	- 3.2	2.3	30.1	28.8
6	-15.2	- 4.6	7.6	30.3	31.9
7	-16.2	- 6.6	1.0	26.5	26.0
8	-16.0	- 6.5	1.3	26.4	25.8
9	-13.7	- 8.7	-2.4	26.6	24.1
10	-17.2	- 9.4	-4.1	24.7	22.1
11	-15.3	- 9.8	-4.0	24.4	21.6
12	-10.4	- 1.9	3.8	31.7	29.6
13	-12.5	- 4.3	1.0	29.0	26.6
14	- 5.4	- 0.1	6.4	35.0	32.2
15	-15.7	- 6.9	-1.4	25.2	23.5
16	- 5.7	0.4	8.0	35.8	34.2
17	- 5.5	- 0.2	7.6	36.1	34.0

Le choix de la régression linéaire est fondé sur des constatations des différents auteurs (ULABY et al., 1974 ; ULABY et al., 1978 ; BERNARD et al., 1982 ; PAUSADER, 1982).

Les résultats obtenus sont présentés aux annexes 5 et 6 respectivement pour la teneur en eau massique et volumique. Ces résultats montrent qu'il existe une valeur du coefficient de corrélation maximale quelles que soient les configurations utilisées pour les profondeurs étudiées.

a. Comparaison entre les variables expérimentales de teneur en eau

Les coefficients de corrélation obtenus avec les teneurs en eau volumiques sont supérieurs à ceux obtenus avec les teneurs en eau massiques, sauf pour l'incidence la plus élevée (20°) et les profondeurs supérieures à 5 cm. La figure V-3 montre les comparaisons des coefficients de corrélation entre la variable de teneur en eau massique et volumique, pour la fréquence 4,5 GHz, H-H.

La meilleure liaison avec l'humidité volumique est conforme au fait que c'est cette variable qui influe directement sur la permittivité diélectrique et donc sur le coefficient de rétrodiffusion radar, au moins si l'on considère que l'eau du sol est de façon prépondérante de l'eau électriquement libre. Il convient à cet égard de souligner que dans le cadre d'une expérimentation portant sur un seul sol, les variations de l'état de liaison de l'eau pour une teneur en eau volumique donnée, sont évidemment réduites par rapport à ce qu'on pourrait obtenir en travaillant sur différentes textures.

b. Comparaison entre les fréquences utilisées

La figure V-4 montre les résultats obtenus pour deux fréquences utilisées dans le cas de la régression linéaire entre σ_0 et l'humidité volumique.

De façon générale, il apparaît que la fréquence de 5,3 GHz donne des coefficients de corrélation linéaire plus élevés que la fréquence 4,5 GHz. A l'exception cependant de l'incidence de 20° aux faibles profondeurs (0-5 cm), où celle de 4,5 GHz donne les meilleurs coefficients de corrélation. Il est difficile de proposer une interprétation à ce résultat dans l'immédiat. Notons seulement qu'ils sont conformes à ceux obtenus par d'autres auteurs (ULABY et al., 1978 ; HIROSAWA, 1978).

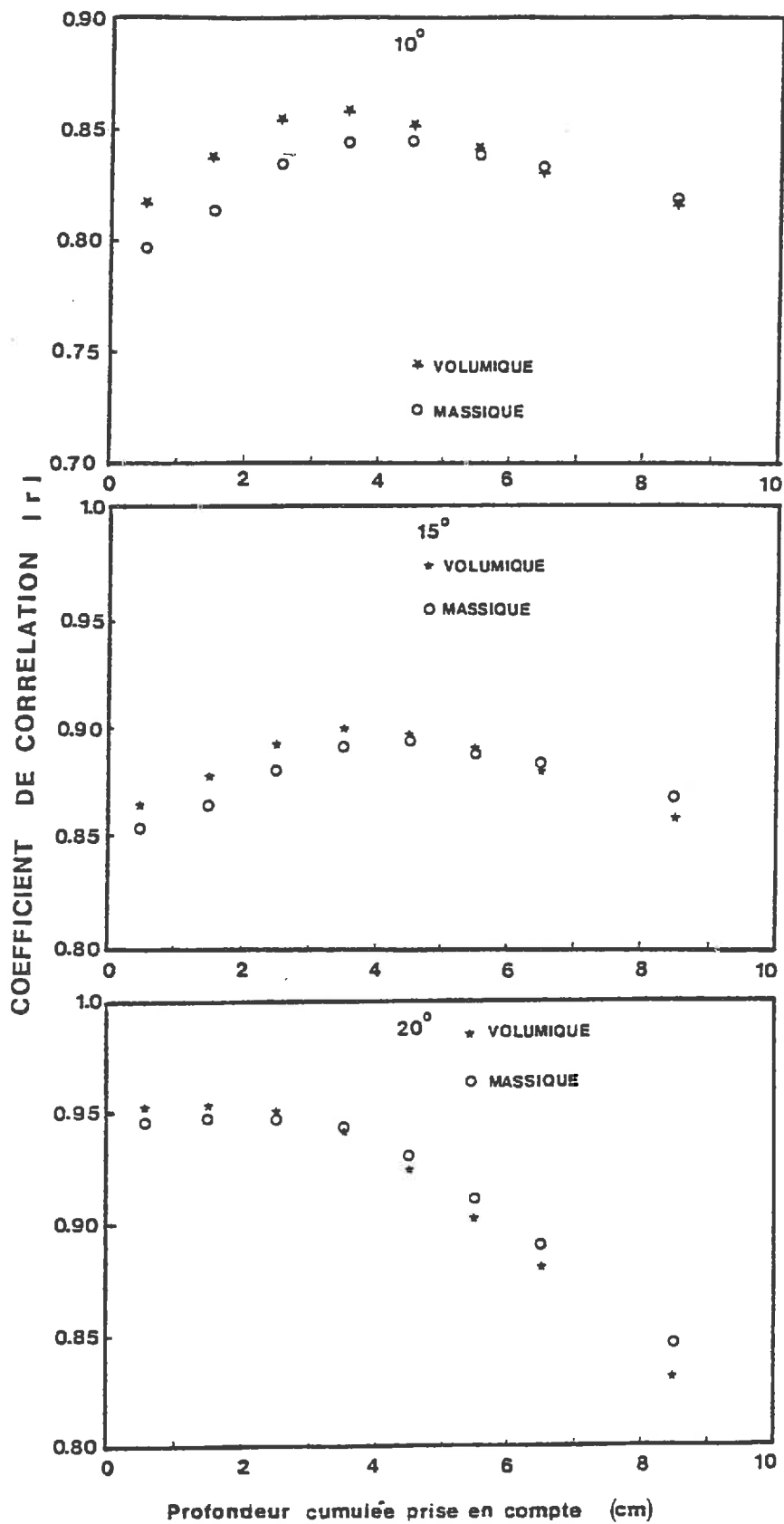


FIGURE V-3. COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS PAR LA REGRESSION LINEAIRE ENTRE LE COEFFICIENT DE RETODIFFUSION RADAR ET LES PARAMETRES D'HUMIDITE (CAS 4.5 GHZ; H-H)

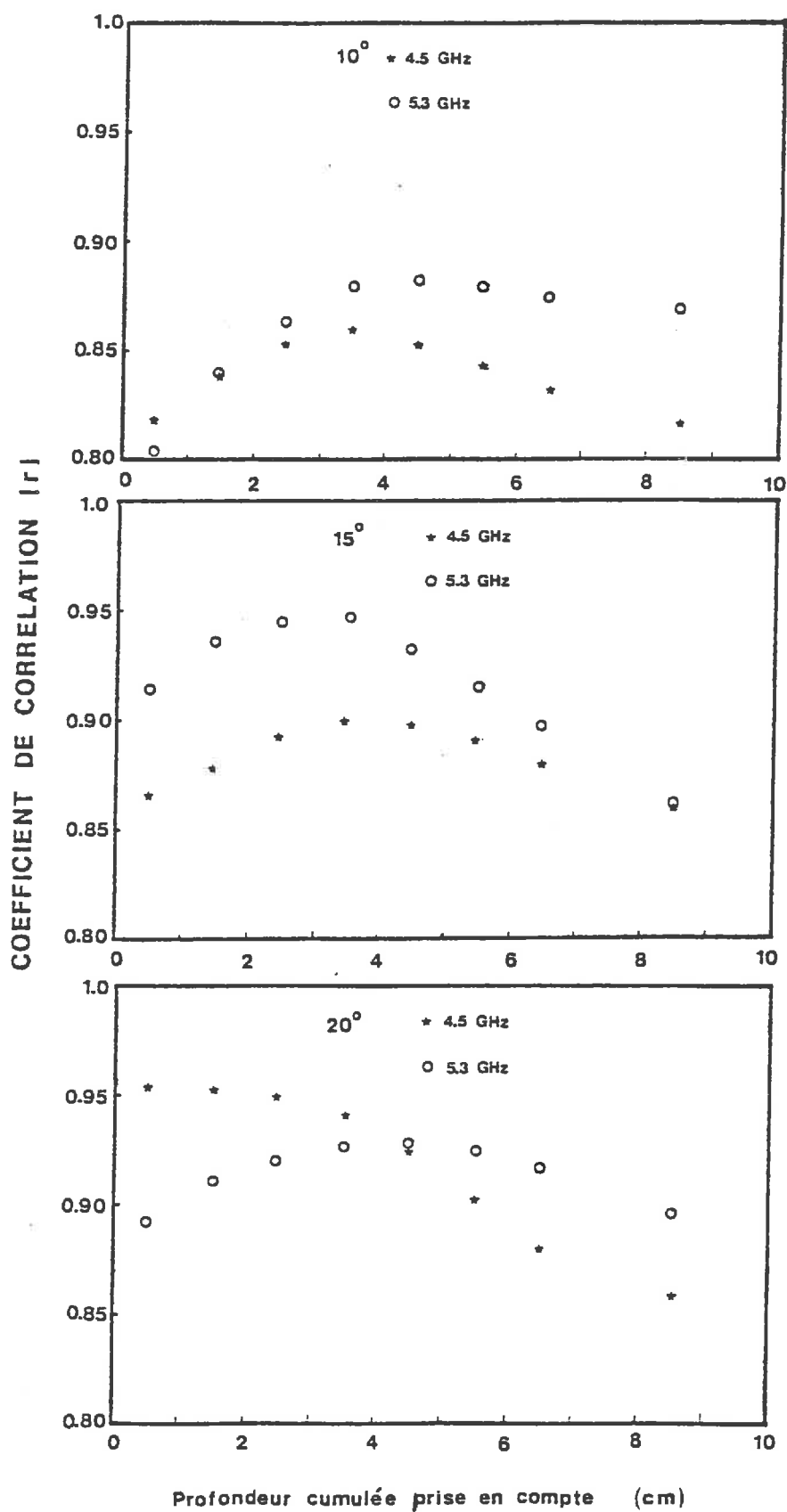


FIGURE V-4. COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS PAR LA REGRESSION LINEAIRE CENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE (CAS POLARISATION H-H)

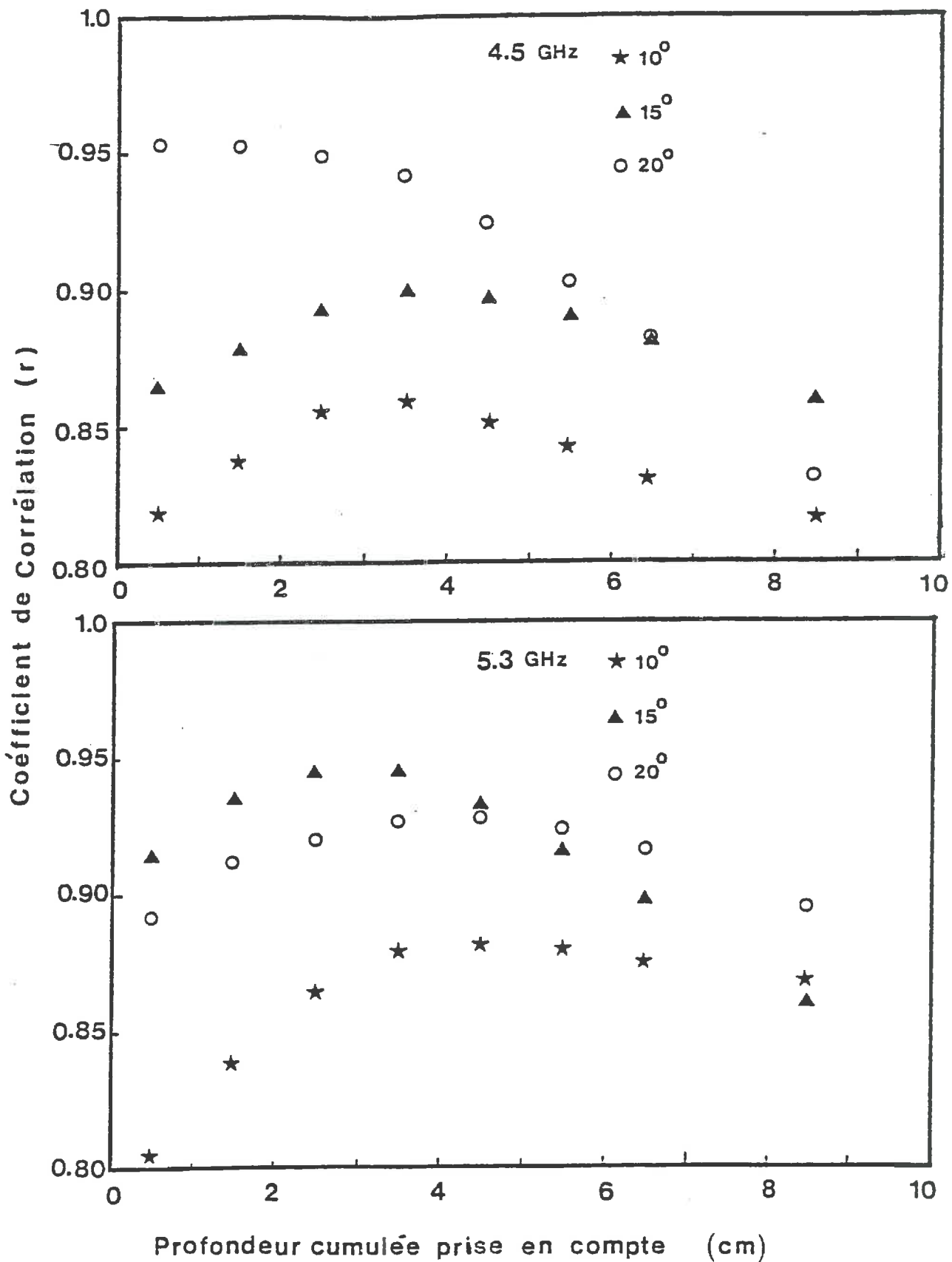


Figure V-5. Comparaison des coefficients de corrélation obtenus par la régression linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité volumique pour différents d'angles d'incidences (polarisation horizontale-horizontale)

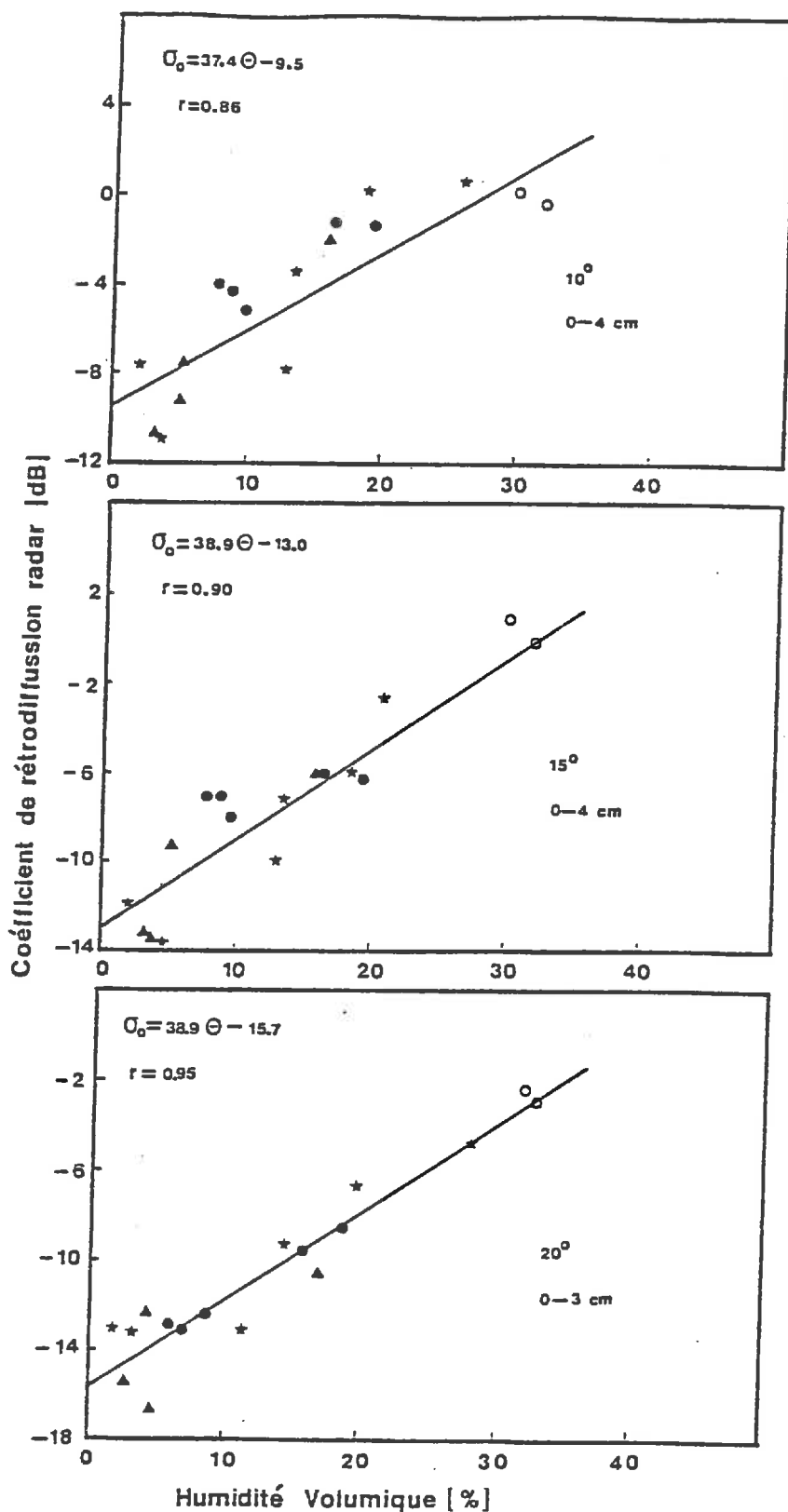


FIGURE V-6. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR σ_0 ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE POUR DIFFERENTS ETATS STRUCTURAUX DE SURFACE (CAS 4.5 GHz; H-H)

- ▲ : SOL NU TRES FIN, 60% DES MOTTES DE 1-3 CM; LE RESTE EST CONSTITUE PAR LA TERRE FINE
- : SOL NU LISSE FISURE (APRES L'ORAGE)
- ★ : SOL NU FIN, 60% DES MOTTES 2-4 CM; 20% DES MOTTES DE 0.5-2 CM; LE RESTE EST CONSTITUE PAR LA TERRE FINE
- : SOL NU PEU RUGUEUX (HRMS = 1.29 CM)

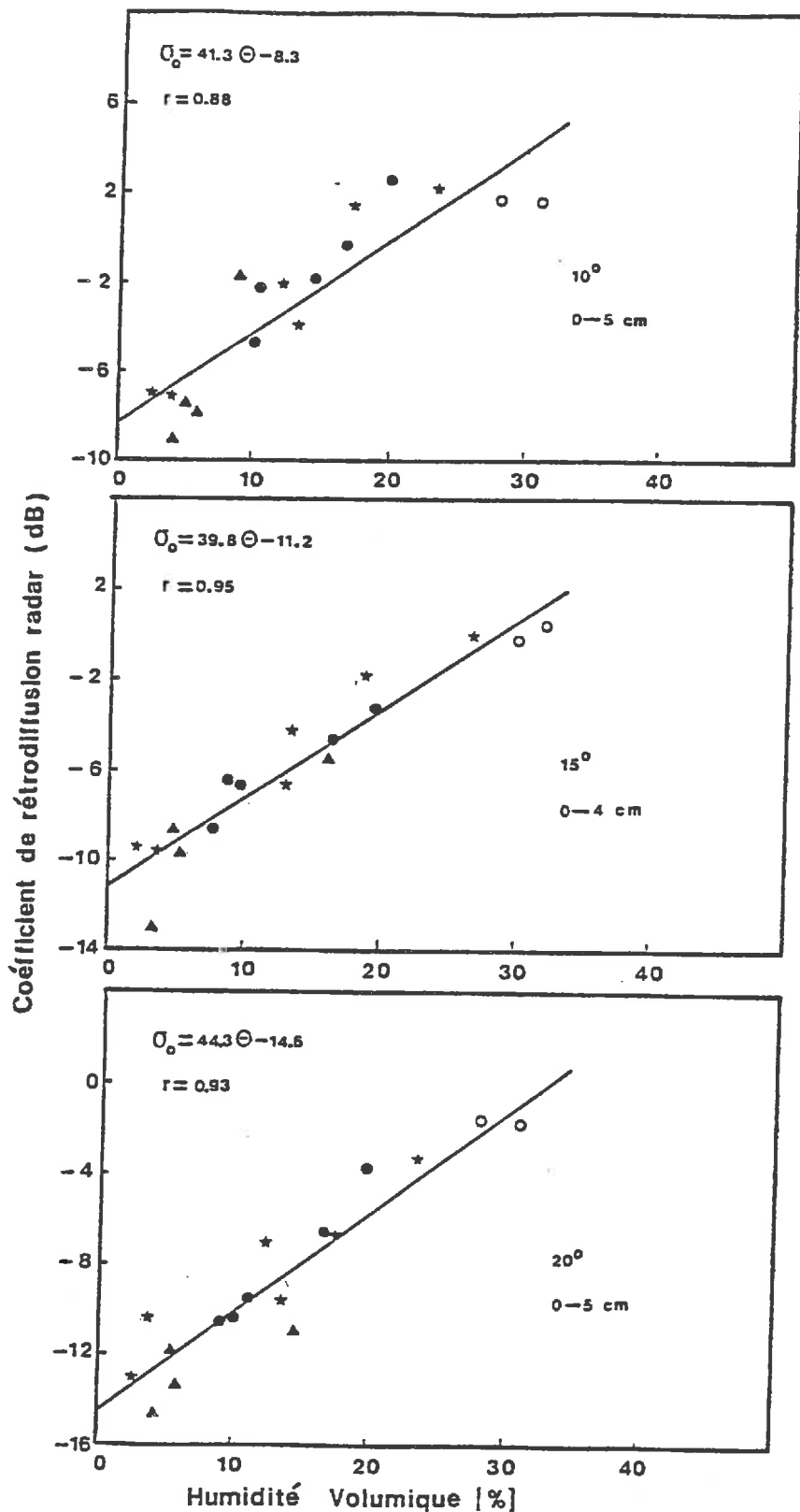


FIGURE V-7. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR O_0 ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE POUR DIFFERENTS ETATS STRUCTURAUX DE SURFACE (CAS 5.3 GHZ; H-H)

- ▲ : SOL NU TRES FIN, 60% DES MOTTES DE 1-3 CM; LE RESTE EST CONSTITUE PAR LA TERRE FINE
- : SOL NU LISSE FISURE (APRES L'ORAGE)
- ★ : SOL NU FIN, 60% DES MOTTES 2-4 CM; 20% DES MOTTES DE 0.5-2 CM; LE RESTE EST CONSTITUE PAR LA TERRE FINE
- : SOL NU PEU RUGUEUX (HRMS = 1.29 CM)

c. Comparaison entre les incidences utilisées

La figure V-5 montre les valeurs des coefficients de corrélation linéaire obtenus pour différents angles d'incidence.

Ces résultats confirment que les angles d'incidence de 15° et 20° donnent toujours des coefficients de corrélation meilleur que celui de 10°. Ils sont de nouveaux tout à fait conformes aux résultats de la bibliographie. Citons ULABY et al., 1978 ; GIRARD et KING, 1982 ; PAUSADER, 1982).

Dans le cas de la fréquence de 5,3 GHz, on trouve que l'incidence 15° donne des coefficients de corrélation plus élevés que l'incidence 20° aux faibles profondeurs (0-5 cm). Ces résultats sont difficiles à interpréter.

e. Effet de la rugosité

L'évolution de la rugosité n'a pas été réalisée de façon quantitative. Cependant, on a effectué des observations visuelles qualitatives de l'état structural de la surface.

Les figures V-6 et V-7 et l'annexe 7 montrent qu'il n'y a pas de différenciation nette entre les 4 états de rugosité distingués. On peut donc admettre que dans ces conditions expérimentales l'effet de variation de la rugosité est effectivement resté négligeable.

Une comparaison plus précise entre les trois incidences et les deux fréquences utilisées fait apparaître que l'incidence de 10° minimise moins l'effet de la rugosité. En effet, les nuages de points des différents états structuraux de surface sont très séparés par rapport aux autres incidences (15° et 20°).

Il est donc clair que l'incidence proche de 18° est capable de minimiser l'effet de la rugosité. Ceci est bien confirmé par ULABY et al., 1978).

e. Prise en compte des erreurs de mesure

La réalisation des mesures terrains comporte nécessairement des erreurs ; il existe également une variance due à la variabilité spatiale du site expérimental. Chaque point de mesure est donc associé à une variance.

Pour prendre en compte le rôle de cette dernière dans la relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité, l'analyse de la régression linéaire avec erreur a été réalisée (BERTUZZI et al., à paraître).

Les résultats obtenus montrent que la prise en compte des erreurs de mesure accroît sensiblement les valeurs du coefficient de corrélation pour tous les cas étudiés. Le tableau V.3 montre un exemple de la comparaison entre les résultats obtenus avec et sans prise en compte des erreurs de mesure.

TABLEAU V-3. COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATION
 OBTENUS PAR LA REGRESSION LINEAIRE SANS ET
 AVEC PRISE EN COMPTE DES ERREURS DE MESURE
 (CAS 4.5 GHZ; 15 DEGRES INCIDENCE)

PROFONDEUR PRISE EN COMPTE (CM)	CAS COEFF. RETRODIF. RADAR ET			
	HUMIDITE MASSIQUE		HUMIDITE VOLUMIQUE	
	SANS ERREUR	AVEC ERREUR	SANS ERREUR	AVEC ERREUR
0 - 1	0.853	0.898	0.865	0.921
0 - 2	0.865	0.906	0.878	0.930
0 - 3	0.880	0.926	0.892	0.947
0 - 4	0.891	0.948	0.899	0.963
0 - 5	0.895	0.963	0.897	0.972
0 - 6	0.891	0.967	0.890	0.971
0 - 7	0.884	0.968	0.880	0.978
0 - 10	0.869	0.975	0.859	0.973

La figure V-8 montre l'ordre de grandeur des erreurs obtenues pour un cas concret.

Dans tous les cas, le résultat de la prise en compte des erreurs de mesure est conforme à la théorie (BERTUZZI et al., à paraître). Cette analyse sera complétée aux cours des travaux ultérieurs, car ces premiers résultats mettent en évidence l'importance des erreurs de mesure sur les conclusions statistiques.

V.4. Prise en compte de la profondeur de pénétration

On a vu dans le Chapitre IV-3 l'existence d'une profondeur pour chacune des configurations utilisées maximisant le coefficient de corrélation. Ceci suggère que jusqu'à une certaine profondeur la diffusion du volume contribue aux variations de σ_0 . Pour cela, l'étude de la profondeur de pénétration est donc importante pour déterminer la limite exacte de la couche participant à la rétrodiffusion de l'onde.

V.4.1. Simulation théorique

a. Choix du modèle

Le modèle a été établi en négligeant d'une part la géométrie de la surface, d'autre part les réflexions multiples. Ce choix est essentiellement destiné dans un premier temps à simplifier des calculs intermédiaires. La description de ce modèle a été présentée dans le Chapitre II et annexe 1.

b. Description de la pénétration de l'onde

Le procédé le plus important dans le calcul de la profondeur de pénétration est de décomposer les couches du profil hydrique concerné en un certain nombre de couches élémentaires. L'humidité correspondante à chaque couche élémentaire est estimée par interpolation linéaire à partir du profil hydrique concerné.

Le modèle de la profondeur de pénétration décrit prend en compte plusieurs paramètres correspondant à la description de la pénétration de l'onde. Les paramètres de bases nécessaires sont les suivants :

- Les paramètres liés au signal tel que l'angle d'incidence et la fréquence.
- Les paramètres liés aux propriétés de la cible (sol), il s'agit de la valeur de la permittivité diélectrique, déterminant les phénomènes de réflexion, de transmission et d'atténuation de l'onde. Cette permittivité est évaluée à partir de la teneur en eau et la composition granulométrique (cf. figure I-2).

A partir du modèle établi, il apparaît un certain nombre de paramètres intermédiaires décrivant les interactions du signal et de la cible. Ces paramètres sont les suivants :

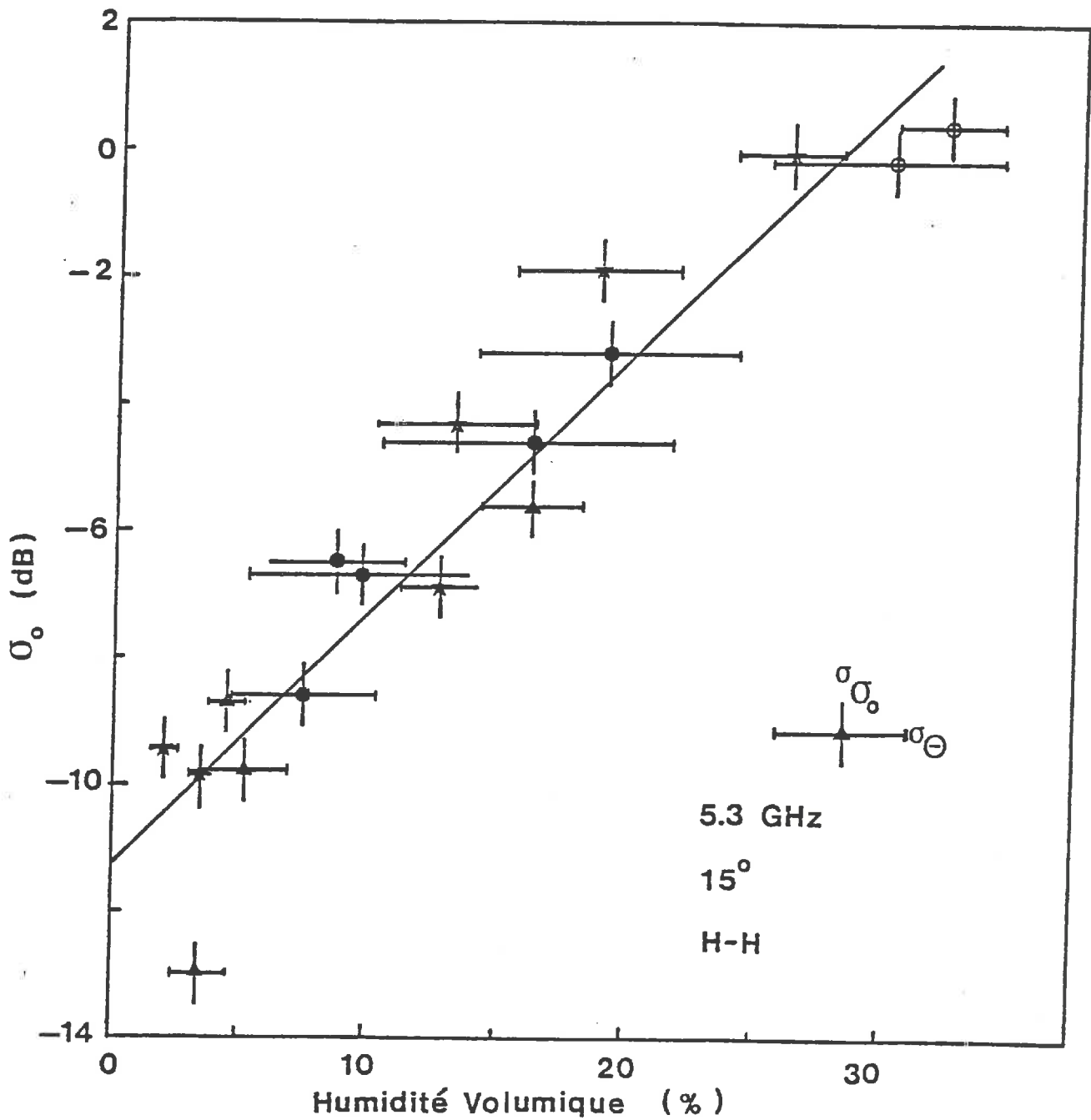


FIGURE V-8. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR σ_0 ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE EN MONTRANT LES ERREURS DE MESURES (CAS DE PROFONDEUR 0-4 CM; LES ERREURS DE SIGMA ZERO EST ESTIMEES = 0.5 DB)

TABLEAU V-4. EXEMPLE DE RESULTAT DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION POUR UN PROFIL HYDRIQUE HUMIDE

```

*****
*
* RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
*
*****
FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
ANGLE D'INCIDENCE : 10.00 DEGRES
POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE
NOMBRE DE COUCHES MAXIMALES : 200
EPAISEUR DE LA COUCHE : 1.00 MILLIMETRES
NOMBRE DE COUCHES EFFECTIVES : 21
HUMIDITE VOLUMIQUE MOYENNE : 0.171
PROFONDEUR DE PENETRATION : 21.0 MILLIMETRES
    
```

```

*****
RESULTATS DU CALCUL INTERMEDIAIRE
*****
    
```

LEGENDE DU TABLEAU :

- COLONNE 1 = NUMERO DE LA COUCHE
- COLONNE 2 = PROFONDEUR DE LA COUCHE (MILLIMETRES)
- COLONNE 3 = HUMIDITE VOLUMIQUE MOYENNE (SANS DIMENSION)
- COLONNE 4 = ANGLE D'INCIDENCE EN DEGRES
- COLONNE 5 = PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE EQUIVALENTE DU MILIEU D'INCIDENCE
- COLONNE 6 = PARTIE REELLE DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 7 = PARTIE IMAGINAIRE DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 8 = ANGLE DE TRANSMISSION REEL EN DEGRES
- COLONNE 9 = PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE EQUIVALENTE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 10 = PARTIE IMAGINAIRE DU VECTEUR D'ONDE (K²)
- COLONNE 11 = COEFFICIENT DE TRANSMISSION (TI)
- COLONNE 12 = FACTEUR D'ATTENUATION (EXP-(K²*Z))
- COLONNE 13 = RAPPORT D'AMPLITUDE (EN/E0)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.0	0.162	10.000	1.000	7.102	0.890	3.729	7.130	15.738	0.5397	0.9844	0.531
2	2.0	0.162	3.729	7.130	7.102	0.890	3.730	7.130	15.738	1.0000	0.9844	0.523
3	3.0	0.162	3.730	7.130	7.102	0.890	3.731	7.130	15.738	1.0000	0.9844	0.515
4	4.0	0.162	3.731	7.130	7.102	0.890	3.732	7.130	15.738	1.0000	0.9844	0.507
5	5.0	0.162	3.732	7.130	7.102	0.890	3.733	7.130	15.738	1.0000	0.9844	0.499
6	6.0	0.163	3.733	7.130	7.139	0.898	3.725	7.168	15.844	0.9987	0.9843	0.492
7	7.0	0.165	3.725	7.168	7.216	0.915	3.707	7.245	16.057	0.9973	0.9841	0.481
8	8.0	0.166	3.707	7.245	7.292	0.932	3.692	7.322	16.270	0.9973	0.9839	0.472
9	9.0	0.168	3.692	7.322	7.369	0.950	3.664	7.400	16.484	0.9973	0.9837	0.463
10	10.0	0.170	3.664	7.400	7.447	0.967	3.642	7.479	16.698	0.9973	0.9834	0.454
11	11.0	0.172	3.642	7.479	7.526	0.985	3.622	7.558	16.914	0.9974	0.9832	0.446
12	12.0	0.173	3.622	7.558	7.605	1.002	3.602	7.638	17.128	0.9974	0.9830	0.437
13	13.0	0.175	3.602	7.638	7.685	1.020	3.583	7.718	17.344	0.9974	0.9828	0.428
14	14.0	0.177	3.583	7.718	7.765	1.039	3.564	7.800	17.560	0.9974	0.9826	0.420
15	15.0	0.179	3.564	7.800	7.846	1.057	3.545	7.881	17.776	0.9974	0.9824	0.411
16	16.0	0.179	3.545	7.881	7.876	1.064	3.538	7.912	17.856	0.9990	0.9823	0.404
17	17.0	0.179	3.538	7.912	7.854	1.059	3.543	7.890	17.798	1.0007	0.9824	0.397
18	18.0	0.178	3.543	7.890	7.832	1.054	3.547	7.868	17.740	1.0007	0.9824	0.390
19	19.0	0.178	3.547	7.868	7.811	1.049	3.552	7.846	17.682	1.0007	0.9825	0.383
20	20.0	0.178	3.552	7.846	7.789	1.044	3.556	7.824	17.625	1.0007	0.9825	0.377
21	21.0	0.177	3.556	7.824	7.768	1.039	3.561	7.802	17.567	1.0007	0.9826	0.371

TABLEAU V-5. EXEMPLE DU RESULTAT DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION POUR UN PROFIL HYDRIQUE SEC

```

*****
* RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
*****
FREQUENCE                1      4.50    GIGAHERTZ
ANGLE D'INCIDENCE        1      10.00   DEGRES
POLARISATION             1    HORIZONTALE-HORIZONTALE
NOMBRE DE COUCHES MAXIMALES 1      200
EPAISEUR DE LA COUCHE    1      1.00    MILLIMETRES
NOMBRE DE COUCHES EFFECTIVES 1      89
HUMIDITE VOLUMIQUE MOYENNE 1      0.058
PROFONDEUR DE PENETRATION 1      89.0    MILLIMETRES
    
```

 RESULTATS DU CALCUL INTERMEDIAIRE

LEGENDE DU TABLEAU :

- COLONNE 1 = NUMERO DE LA COUCHE
- COLONNE 2 = PROFONDEUR DE LA COUCHE (MILLIMETRES)
- COLONNE 3 = HUMIDITE VOLUMIQUE MOYENNE (SANS DIMENSION)
- COLONNE 4 = ANGLE D'INCIDENCE EN DEGRES
- COLONNE 5 = PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE EQUIVALENTE DU MILIEU D'INCIDENCE
- COLONNE 6 = PARTIE REELLE DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 7 = PARTIE IMAGINAIRE DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 8 = ANGLE DE TRANSMISSION REEL EN DEGRES
- COLONNE 9 = PERMITTIVITE DIELECTRIQUE RELATIVE EQUIVALENTE DU MILIEU DE TRANSMISSION
- COLONNE 10 = PARTIE IMAGINAIRE DU VECTEUR D'ONDE (K")
- COLONNE 11 = COEFFICIENT DE TRANSMISSION (TI)
- COLONNE 12 = FACTEUR D'ATTENUATION (EXP-(K" * Z))
- COLONNE 13 = RAPPORT D'AMPLITUDE (EN/E0)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.0	0.008	10.000	1.000	2.867	0.077	5.886	2.867	2.162	0.7379	0.9978	0.734
2	2.0	0.008	5.886	2.867	2.867	0.077	5.886	2.867	2.162	1.0000	0.9978	0.733
3	3.0	0.008	5.886	2.867	2.867	0.077	5.886	2.867	2.162	1.0000	0.9978	0.733
4	4.0	0.008	5.886	2.867	2.867	0.077	5.886	2.867	2.162	1.0000	0.9978	0.732
5	5.0	0.008	5.886	2.867	2.867	0.077	5.886	2.867	2.162	1.0000	0.9978	0.730
6	6.0	0.009	5.886	2.867	2.872	0.078	5.881	2.872	2.176	0.9995	0.9978	0.728
7	7.0	0.009	5.881	2.872	2.883	0.079	5.870	2.883	2.199	0.9991	0.9978	0.726
8	8.0	0.010	5.870	2.883	2.894	0.080	5.859	2.894	2.223	0.9990	0.9978	0.723
9	9.0	0.011	5.859	2.894	2.905	0.081	5.847	2.905	2.249	0.9990	0.9978	0.721
10	10.0	0.012	5.847	2.905	2.916	0.082	5.836	2.916	2.275	0.9990	0.9977	0.719
11	11.0	0.013	5.836	2.916	2.927	0.083	5.825	2.928	2.304	0.9990	0.9977	0.716
12	12.0	0.014	5.825	2.928	2.938	0.084	5.813	2.939	2.333	0.9990	0.9977	0.714
13	13.0	0.014	5.813	2.939	2.950	0.086	5.802	2.951	2.361	0.9990	0.9976	0.712
14	14.0	0.015	5.802	2.951	2.962	0.087	5.790	2.962	2.392	0.9990	0.9976	0.709
15	15.0	0.016	5.790	2.962	2.974	0.088	5.779	2.974	2.423	0.9990	0.9976	0.707

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	16.0	0.017	5.779	2.974	2.984	0.089	5.769	2.984	2.450	0.9991	0.9976	0.705
17	17.0	0.017	5.769	2.984	2.992	0.090	5.761	2.993	2.472	0.9993	0.9975	0.702
18	18.0	0.018	5.761	2.993	3.001	0.091	5.752	3.002	2.496	0.9993	0.9975	0.700
19	19.0	0.019	5.752	3.002	3.010	0.092	5.744	3.011	2.520	0.9993	0.9975	0.698
20	20.0	0.019	5.744	3.011	3.019	0.093	5.735	3.019	2.544	0.9993	0.9975	0.695
21	21.0	0.020	5.735	3.019	3.027	0.094	5.727	3.028	2.570	0.9993	0.9974	0.693
22	22.0	0.020	5.727	3.028	3.036	0.096	5.718	3.037	2.594	0.9993	0.9974	0.691
23	23.0	0.021	5.718	3.037	3.045	0.097	5.710	3.046	2.620	0.9993	0.9974	0.689
24	24.0	0.022	5.710	3.046	3.054	0.098	5.701	3.055	2.646	0.9992	0.9974	0.686
25	25.0	0.022	5.701	3.055	3.064	0.099	5.693	3.064	2.672	0.9992	0.9973	0.684
26	26.0	0.023	5.693	3.064	3.072	0.100	5.681	3.077	2.711	0.9989	0.9973	0.681
27	27.0	0.024	5.681	3.077	3.083	0.103	5.665	3.094	2.759	0.9986	0.9972	0.678
28	28.0	0.025	5.665	3.094	3.110	0.105	5.650	3.111	2.812	0.9986	0.9972	0.676
29	29.0	0.026	5.650	3.111	3.128	0.107	5.634	3.128	2.864	0.9986	0.9971	0.673
30	30.0	0.027	5.634	3.128	3.145	0.109	5.618	3.145	2.916	0.9986	0.9971	0.670
31	31.0	0.028	5.618	3.146	3.163	0.112	5.603	3.164	2.972	0.9986	0.9970	0.667
32	32.0	0.029	5.603	3.164	3.180	0.114	5.587	3.181	3.027	0.9986	0.9970	0.664
33	33.0	0.030	5.587	3.181	3.199	0.117	5.571	3.200	3.084	0.9986	0.9969	0.661
34	34.0	0.031	5.571	3.200	3.217	0.119	5.555	3.218	3.141	0.9986	0.9969	0.658
35	35.0	0.033	5.555	3.218	3.235	0.122	5.539	3.236	3.202	0.9985	0.9968	0.655
36	36.0	0.034	5.539	3.236	3.255	0.124	5.522	3.256	3.265	0.9985	0.9967	0.652
37	37.0	0.035	5.522	3.256	3.276	0.128	5.504	3.277	3.334	0.9984	0.9967	0.648
38	38.0	0.036	5.504	3.277	3.297	0.131	5.486	3.299	3.403	0.9984	0.9966	0.645
39	39.0	0.037	5.486	3.299	3.319	0.134	5.468	3.320	3.476	0.9983	0.9965	0.642
40	40.0	0.038	5.468	3.320	3.341	0.137	5.450	3.342	3.547	0.9983	0.9965	0.639
41	41.0	0.040	5.450	3.342	3.363	0.140	5.432	3.365	3.623	0.9983	0.9964	0.635
42	42.0	0.041	5.432	3.365	3.385	0.144	5.414	3.387	3.697	0.9983	0.9963	0.632
43	43.0	0.042	5.414	3.387	3.408	0.147	5.396	3.410	3.775	0.9983	0.9962	0.628
44	44.0	0.043	5.396	3.410	3.431	0.151	5.378	3.433	3.853	0.9983	0.9962	0.625
45	45.0	0.044	5.378	3.433	3.454	0.154	5.360	3.456	3.931	0.9983	0.9961	0.621
46	46.0	0.046	5.360	3.456	3.486	0.159	5.335	3.488	4.040	0.9977	0.9960	0.617
47	47.0	0.048	5.335	3.488	3.527	0.166	5.304	3.529	4.179	0.9971	0.9958	0.613
48	48.0	0.050	5.304	3.529	3.568	0.173	5.273	3.570	4.324	0.9970	0.9957	0.609
49	49.0	0.052	5.273	3.570	3.610	0.180	5.242	3.613	4.471	0.9970	0.9955	0.604
50	50.0	0.054	5.242	3.613	3.653	0.187	5.211	3.656	4.622	0.9970	0.9954	0.600
51	51.0	0.056	5.211	3.656	3.697	0.194	5.180	3.700	4.776	0.9970	0.9952	0.595
52	52.0	0.058	5.180	3.700	3.742	0.202	5.149	3.744	4.931	0.9970	0.9951	0.590
53	53.0	0.060	5.149	3.744	3.787	0.210	5.118	3.790	5.092	0.9970	0.9949	0.585
54	54.0	0.062	5.118	3.790	3.833	0.218	5.087	3.836	5.254	0.9969	0.9948	0.581
55	55.0	0.064	5.087	3.833	3.880	0.226	5.056	3.883	5.420	0.9969	0.9946	0.576
56	56.0	0.066	5.056	3.883	3.932	0.235	5.022	3.935	5.604	0.9966	0.9944	0.570
57	57.0	0.068	5.022	3.935	3.990	0.245	4.985	3.993	5.809	0.9963	0.9942	0.565
58	58.0	0.071	4.985	3.993	4.049	0.256	4.949	4.053	6.016	0.9963	0.9940	0.560
59	59.0	0.073	4.949	4.053	4.109	0.267	4.912	4.113	6.228	0.9963	0.9938	0.554
60	60.0	0.076	4.912	4.113	4.170	0.278	4.876	4.174	6.443	0.9963	0.9936	0.548
61	61.0	0.078	4.876	4.174	4.232	0.290	4.840	4.237	6.661	0.9963	0.9934	0.543
62	62.0	0.080	4.840	4.237	4.295	0.302	4.804	4.300	6.884	0.9962	0.9931	0.537
63	63.0	0.083	4.804	4.300	4.359	0.314	4.769	4.365	7.107	0.9962	0.9929	0.531
64	64.0	0.085	4.769	4.365	4.425	0.327	4.733	4.431	7.335	0.9962	0.9927	0.525
65	65.0	0.088	4.733	4.431	4.491	0.339	4.698	4.498	7.566	0.9962	0.9925	0.519
66	66.0	0.090	4.698	4.498	4.561	0.353	4.662	4.568	7.807	0.9961	0.9922	0.513
67	67.0	0.093	4.662	4.568	4.634	0.367	4.625	4.641	8.058	0.9960	0.9920	0.507
68	68.0	0.095	4.625	4.641	4.708	0.382	4.588	4.716	8.311	0.9960	0.9917	0.501
69	69.0	0.098	4.588	4.716	4.784	0.397	4.552	4.792	8.568	0.9960	0.9915	0.495
70	70.0	0.100	4.552	4.792	4.860	0.412	4.516	4.869	8.827	0.9960	0.9912	0.488
71	71.0	0.103	4.516	4.869	4.938	0.428	4.480	4.947	9.088	0.9960	0.9910	0.482
72	72.0	0.105	4.480	4.947	5.017	0.444	4.444	5.027	9.353	0.9960	0.9907	0.476
73	73.0	0.108	4.444	5.027	5.098	0.460	4.409	5.108	9.620	0.9960	0.9904	0.469
74	74.0	0.110	4.409	5.108	5.179	0.477	4.374	5.190	9.890	0.9960	0.9902	0.463
75	75.0	0.113	4.374	5.190	5.262	0.494	4.340	5.271	10.161	0.9960	0.9899	0.456
76	76.0	0.115	4.340	5.274	5.346	0.511	4.305	5.350	10.434	0.9960	0.9896	0.450
77	77.0	0.118	4.305	5.358	5.431	0.529	4.271	5.444	10.709	0.9960	0.9893	0.443
78	78.0	0.120	4.271	5.444	5.518	0.547	4.238	5.532	10.988	0.9960	0.9891	0.436
79	79.0	0.123	4.238	5.532	5.606	0.565	4.204	5.620	11.267	0.9960	0.9888	0.430
80	80.0	0.126	4.204	5.620	5.695	0.584	4.171	5.710	11.548	0.9960	0.9885	0.423
81	81.0	0.128	4.171	5.710	5.785	0.603	4.139	5.801	11.831	0.9960	0.9882	0.417
82	82.0	0.131	4.139	5.801	5.876	0.623	4.106	5.893	12.116	0.9960	0.9880	0.410
83	83.0	0.133	4.106	5.893	5.969	0.642	4.074	5.986	12.403	0.9960	0.9877	0.403
84	84.0	0.136	4.074	5.986	6.063	0.662	4.043	6.081	12.691	0.9961	0.9874	0.397
85	85.0	0.138	4.043	6.081	6.158	0.683	4.011	6.177	12.980	0.9961	0.9871	0.390
86	86.0	0.140	4.011	6.177	6.206	0.693	3.996	6.225	13.126	0.9980	0.9870	0.384
87	87.0	0.140	3.996	6.225	6.206	0.693	3.996	6.225	13.126	1.0000	0.9870	0.379
88	88.0	0.140	3.996	6.225	6.206	0.693	3.997	6.225	13.126	1.0000	0.9870	0.374
89	89.0	0.140	3.997	6.225	6.206	0.693	3.997	6.225	13.126	1.0000	0.9870	0.369

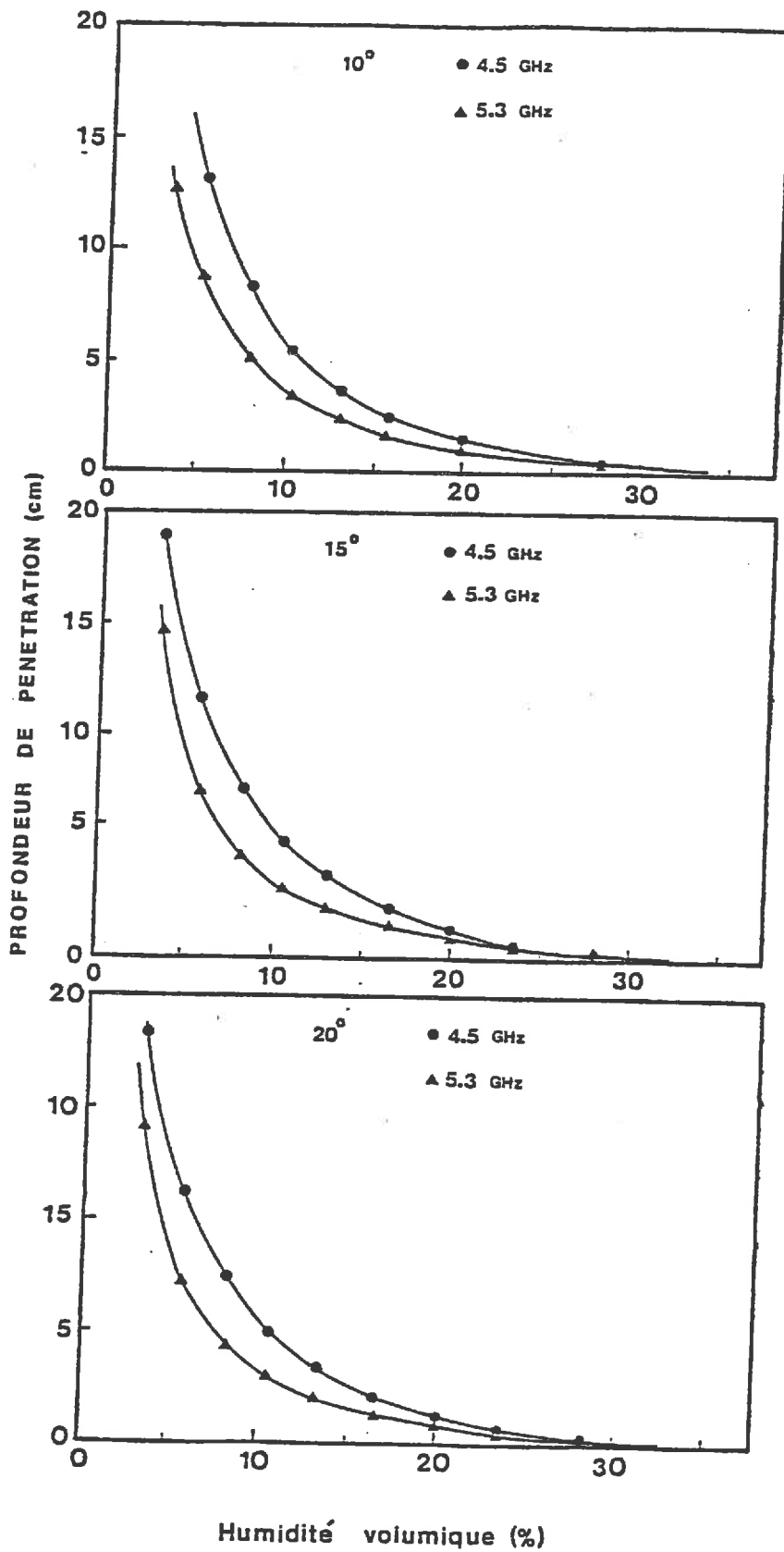


FIGURE V-9. RELATION ENTRE L'HUMIDITE VOLUMIQUE ET LA PROFONDEUR DE PENETRATION DU SIGNAL RADAR, CALCULEE A PARTIR DU MODELE (CAS PROFIL THEORIQUE HOMOGENE)

1. Permittivité diélectrique relative équivalente du milieu d'incidence
2. Partie réelle de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission
3. Partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative du milieu de transmission
4. Angle de transmission
5. Permittivité diélectrique relative équivalente du milieu de transmission
6. Partie imaginaire du vecteur d'onde
7. Coefficient de transmission
8. Facteur d'atténuation
9. Rapport d'amplitude.

Deux exemples sont présentés dans les tableaux V.4 et V.5, où les calculs ont été réalisés à partir du modèle de profondeur de pénétration présenté.

A partir de ces tableaux, on peut faire les remarques suivantes :

- L'évolution des valeurs des paramètres concernés est liée essentiellement à l'humidité,
- L'évolution de l'angle d'incidence, de la permittivité diélectrique relative équivalente du milieu d'incidence et du coefficient de transmission, lors du passage air-sol est très brutale. Ces évolutions comme celles des autres paramètres sont beaucoup plus faibles entre les différentes couches.
- Pour une couche très sèche, l'atténuation est très faible, ce qui veut dire que le signal est transmis presque totalement.

c. Relation entre la profondeur de pénétration et la teneur en eau volumique

On a calculé à partir du modèle, les profondeurs de pénétration pour des profils hydriques différents et homogènes. La figure V-9 montre les résultats des simulations réalisées. D'une part, l'augmentation de l'humidité réduit sensiblement la profondeur de pénétration, d'autre part l'augmentation de la fréquence induit une profondeur de pénétration plus faible. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par ULABY et al., 1973 et PAUSADER, 1982.

d. Rôles du profil hydrique sur la profondeur de pénétration

Le modèle et la théorie présentés montrent que ce n'est pas la teneur en eau moyenne à l'échelle du profil qui fixe la pénétration d'une onde, mais la forme du profil elle-même qui intervient.

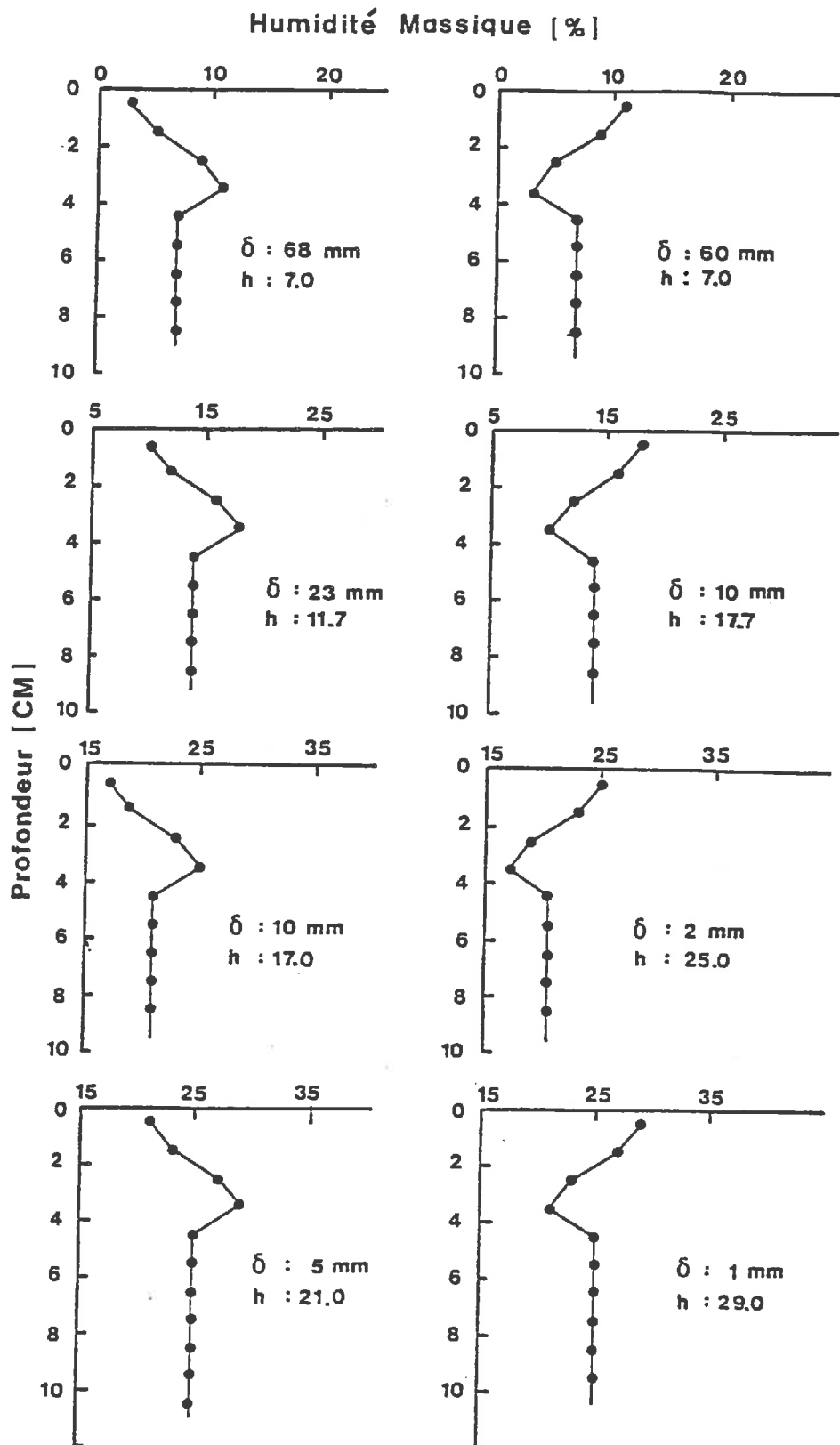


FIGURE V-10. SIMULATION THEORIQUE DU ROLE DE PROFIL HYDRIQUE DANS LA PENETRATION DE L'ONDE ELECTROMAGNETIQUE DANS LE SOL (δ : PROFONDEUR DE PENETRATION; H : HUMIDITE MASSIQUE (%) CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR $\delta - \delta$)

Pour comprendre un peu mieux ce phénomène, des simulations théoriques de différents profils hydriques ont été faites. La figure V-10 montre les résultats correspondants à des profils hydriques symétriques (en teneur en eau) pour les couches superficielles.

Ces résultats mettent en évidence le rôle du profil hydrique dans la pénétration d'une onde : un profil sec en surface facilite la pénétration de l'onde par rapport à un profil humide en surface ayant la même teneur en eau moyenne sur l'ensemble du profil.

Il en résulte que la teneur en eau moyenne dans la couche comprise entre la surface et la profondeur de pénétration peut être très différente suivant la forme du profil hydrique, alors que les valeurs mesurées sur une épaisseur constante sont identiques.

V.4.2. Profondeurs de pénétration expérimentales

a. Description et justification de la méthode

Compte-tenu de l'importance de la forme du profil hydrique dans la pénétration d'une onde dans le sol, on a appliqué le modèle de profondeur de pénétration à tous les profils hydriques observés, c'est-à-dire à toutes les répétitions et tous les jours de mesure. La profondeur de pénétration à l'échelle de la parcelle correspondant à la mesure radar réalisée d'un jour donné, est obtenue en moyennant toutes les répétitions de ce jour. L'humidité volumique moyenne correspondant à la profondeur de pénétration concernée est calculée de la même façon.

b. Résultats généraux du calcul de la profondeur de pénétration

Les résultats du calcul de la profondeur de pénétration et l'humidité volumique correspondant sont présentés dans les annexes 8 et 9. Les tableaux V.6 et V.7 montrent des exemples de ceux-ci, pour le cas de fréquence 4,5 GHz en incidence 10°. Le tableau V.8 donne les valeurs maximales et minimales obtenues. En ce qui concerne les coefficients de variation à l'échelle de la parcelle, ils varient entre 9 et 59 %.

La figure V-11 permet de comparer les relations entre l'humidité et la profondeur de pénétration calculée pour :

- des profils hydriques théoriques homogènes,
- les profils hydriques expérimentaux obtenus dans nos propres conditions expérimentales.

Tableau V-6. Exemple des resultats du calcul de la profondeur de pénétration a partir du modèle

```

*****
* RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
* (UNITE EN MILLIMETRES) *
*****

```

```

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
ANGLE D'INCIDENCE : 10.00 DEGRES
POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

```

NUMERO DU JOUR																	
REP.	*****																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

1	63.0	74.0	74.0	26.0	24.0	31.0	58.0	38.0	55.0	84.0	82.0	21.0	48.0	3.0	32.0	1.0	2
2	65.0	74.0	77.0	21.0	33.0	26.0	51.0	51.0	48.0	79.0	82.0	26.0	29.0	3.0	36.0	1.0	1
3	65.0	60.0	56.0	23.0	2.0	8.0	23.0	44.0	52.0	83.0	91.0	13.0	56.0	5.0	38.0	1.0	1
4	57.0	80.0	67.0	23.0	32.0	43.0	30.0	50.0	45.0	84.0	90.0	55.0	47.0	3.0	37.0	2.0	1
5	82.0	88.0	74.0	28.0	7.0	38.0	59.0	54.0	68.0	90.0	84.0	23.0	14.0	4.0	56.0	1.0	1
6	85.0	78.0	68.0	25.0	4.0	1.0	53.0	39.0	43.0	95.0	106.0	21.0	15.0	4.0	65.0	2.0	2
7	79.0	83.0	75.0	19.0	24.0	21.0	68.0	51.0	37.0	97.0	76.0	16.0	43.0	3.0	33.0	1.0	1
8	77.0	117.0	73.0	15.0	18.0	25.0	58.0	35.0	53.0	77.0	83.0	12.0	21.0	2.0	30.0	1.0	1
9	74.0	76.0	68.0	17.0	1.0	28.0	23.0	48.0	53.0	82.0	75.0	9.0	53.0	5.0	33.0	1.0	1
10	76.0	72.0	69.0	19.0	20.0	37.0	39.0	52.0	52.0	88.0	78.0	5.0	54.0	4.0	44.0	1.0	1
11	78.0	74.0	68.0	22.0	20.0	35.0	31.0	61.0	55.0	88.0	87.0	19.0	25.0	4.0	37.0	1.0	1
12	77.0	91.0	72.0	23.0	25.0	28.0	45.0	75.0	61.0	127.0	78.0	15.0	0.0	4.0	0.0	1.0	2
13	84.0	71.0	94.0	16.0	39.0	4.0	50.0	45.0	54.0	91.0	92.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
14	72.0	93.0	99.0	17.0	17.0	48.0	58.0	45.0	40.0	102.0	86.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
15	64.0	71.0	76.0	20.0	29.0	47.0	51.0	61.0	61.0	100.0	74.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
16	68.0	68.0	120.0	23.0	38.0	38.0	57.0	51.0	64.0	91.0	94.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
17	66.0	81.0	90.0	62.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
18	62.0	0.0	70.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.

MOYENNE	71.9	79.5	77.2	23.5	20.8	28.6	47.1	50.0	52.6	91.2	84.9	18.7	36.8	3.7	40.1	1.2	1.
EC-TYPE	8.4	12.8	14.9	10.6	12.2	14.3	13.9	9.9	8.5	11.6	8.4	11.1	16.2	0.9	10.9	0.4	0.

Tableau V-7. Exemple des resultats du calcul de l'humidité volumique prise en compte de la profondeur de pénétration

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 10.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

NUMERO DU JOUR

REP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.079	0.080	0.072	0.160	0.159	0.141	0.085	0.124	0.088	0.058	0.063	0.174	0.105	0.299	0.133	0.331	0.326
2	0.078	0.078	0.070	0.171	0.135	0.155	0.097	0.098	0.098	0.064	0.068	0.156	0.158	0.301	0.118	0.331	0.356
3	0.073	0.095	0.091	0.165	0.322	0.247	0.159	0.113	0.094	0.063	0.060	0.204	0.094	0.276	0.124	0.347	0.367
4	0.083	0.065	0.077	0.166	0.139	0.119	0.139	0.097	0.109	0.059	0.063	0.105	0.111	0.301	0.128	0.318	0.355
5	0.056	0.053	0.071	0.152	0.256	0.126	0.085	0.091	0.070	0.063	0.061	0.165	0.202	0.284	0.109	0.349	0.351
6	0.046	0.065	0.072	0.158	0.284	0.346	0.095	0.121	0.111	0.058	0.056	0.171	0.194	0.288	0.097	0.315	0.321
7	0.058	0.063	0.070	0.179	0.151	0.169	0.074	0.095	0.124	0.059	0.069	0.192	0.125	0.305	0.134	0.350	0.368
8	0.064	0.057	0.072	0.198	0.181	0.157	0.088	0.130	0.089	0.064	0.067	0.216	0.172	0.325	0.145	0.394	0.364
9	0.068	0.075	0.076	0.188	0.333	0.147	0.161	0.106	0.097	0.066	0.069	0.241	0.099	0.273	0.133	0.344	0.381
10	0.065	0.082	0.073	0.179	0.170	0.127	0.126	0.098	0.103	0.056	0.067	0.283	0.104	0.289	0.118	0.336	0.364
11	0.063	0.081	0.071	0.167	0.171	0.132	0.140	0.084	0.093	0.055	0.061	0.178	0.170	0.293	0.126	0.339	0.367
12	0.061	0.070	0.074	0.164	0.155	0.149	0.112	0.069	0.081	0.048	0.070	0.199	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.058	0.082	0.064	0.195	0.122	0.294	0.097	0.109	0.091	0.058	0.062	0.183	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.069	0.068	0.065	0.190	0.182	0.108	0.093	0.110	0.122	0.055	0.064	0.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.080	0.087	0.072	0.177	0.144	0.107	0.100	0.086	0.084	0.051	0.065	0.175	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.074	0.087	0.057	0.165	0.126	0.123	0.092	0.095	0.076	0.058	0.062	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.077	0.078	0.066	0.096	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.085	0.000	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOYENNE	0.069	0.075	0.072	0.169	0.189	0.165	0.109	0.102	0.096	0.058	0.064	0.191	0.139	0.294	0.124	0.342	0.354
C-TYPE	0.011	0.011	0.007	0.023	0.069	0.069	0.027	0.016	0.015	0.005	0.004	0.039	0.040	0.014	0.013	0.020	0.019

Tableau V-8. Valeurs minimales et maximales de la profondeur de pénétration (δ), et l'humidité volumique correspondant (θ)

CONFIGURATION		δ	θ	δ	θ
Frequence	Incidence	minimal	correspondant	maximal	correspondant
(GHz)	(degrés)	(mm)	(cm ³ /cm ³)	(mm)	(cm ³ /cm ³)
4.5	10	1.2	0.354	91.2	0.058
	15	1.1	0.354	90.1	0.057
	20	1.0	0.354	88.8	0.056
5.3	10	1.2	0.354	85.0	0.052
	15	1.2	0.354	84.0	0.352
	20	1.0	0.354	83.4	0.052

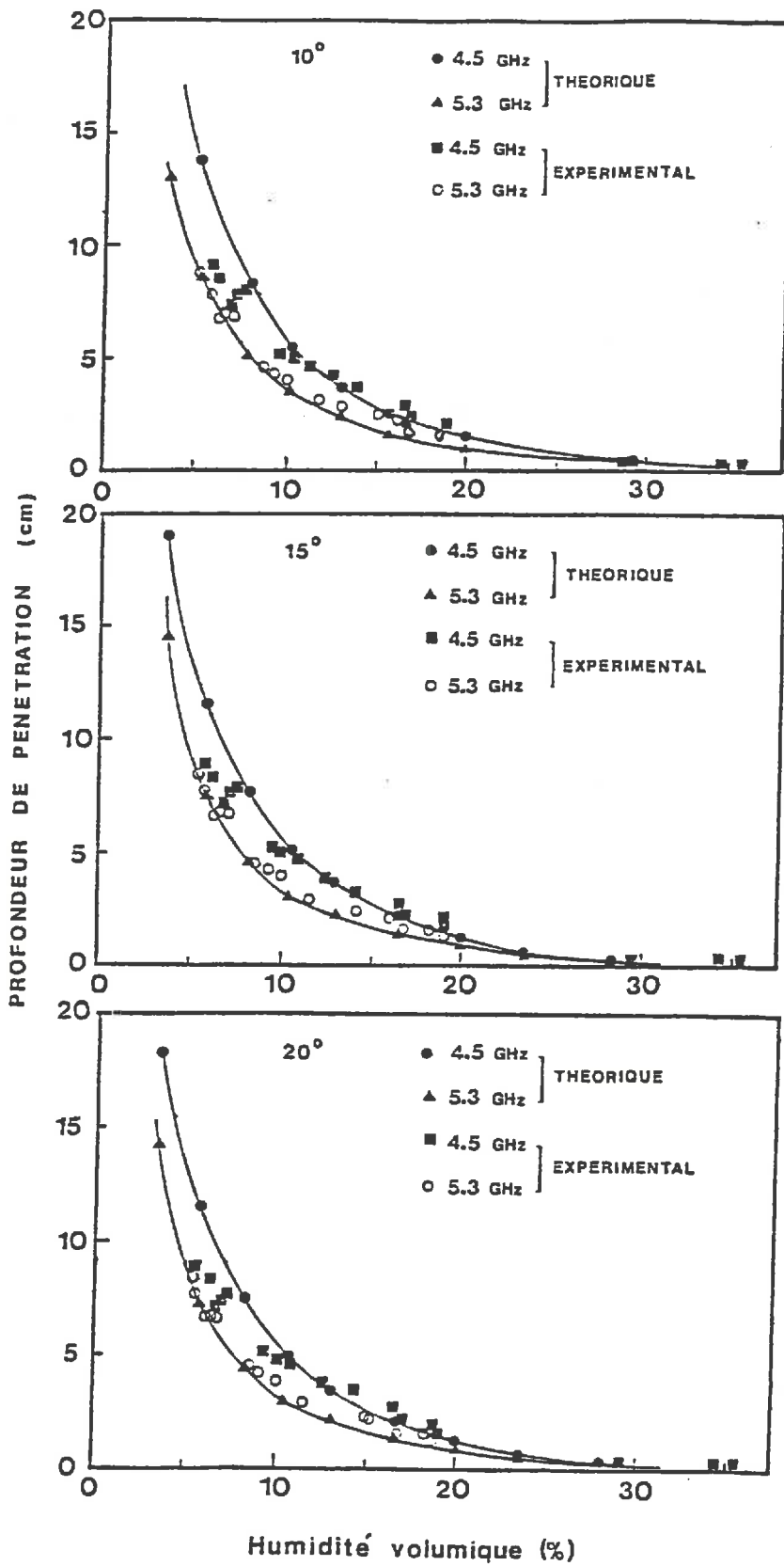


FIGURE V-11. COMPARAISON ENTRE LA PROFONDEUR DE PENETRATION THEORIQUE ET CELLE EXPERIMENTALE

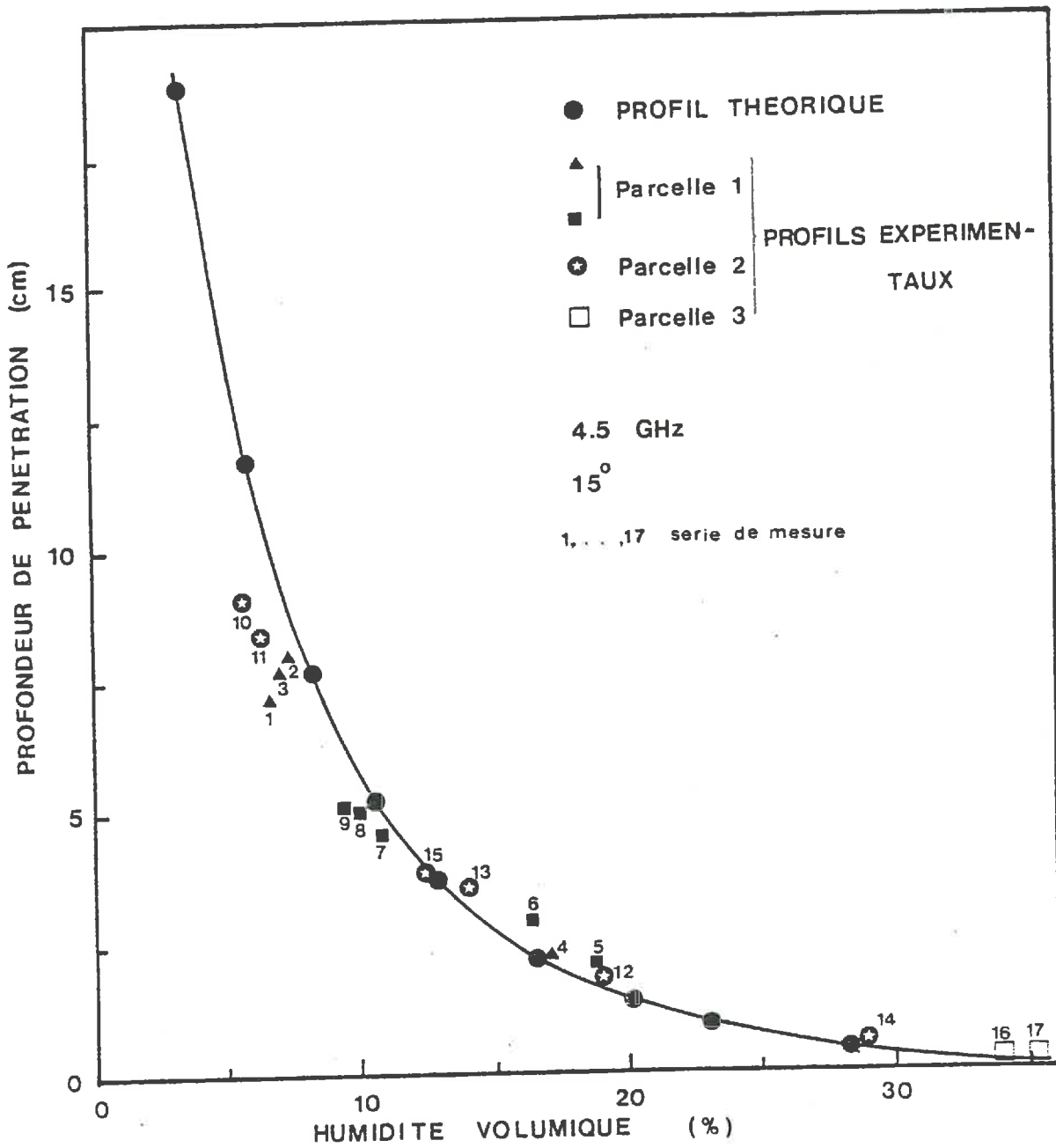


FIGURE V-11.A COMPARAISON DES PROFONDEURS DE PENETRATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE PAR DIFFERENTS ETATS STRUCTURAUX DE SURFACE ET DE PROFIL HYDRIQUE (MEME LEGENDE QUE LA FIGURE V-7) (CAS 4.5 GHZ; 15 DEGRES; H-H)

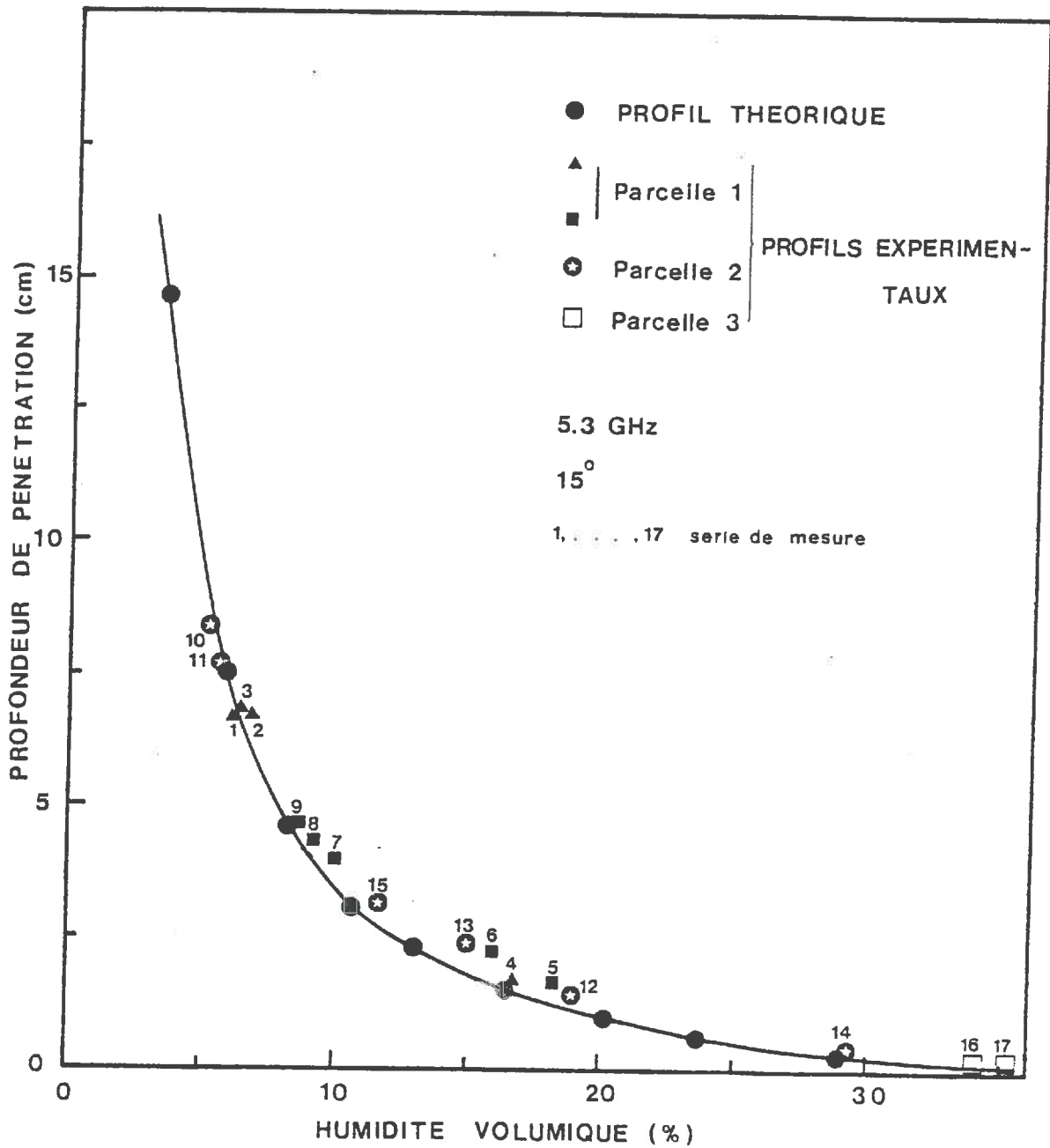


FIGURE V-11.8 COMPARAISON DES PROFONDEURS DE PENETRATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE PAR DIFFERENTS ETATS STRUCTURAUX DE SURFACE ET DE PROFIL HYDRIQUE (MEME LEGENT QUE LA FIGURE V-7) (CAS 5.3 GHZ; 15 DEGRES; H-H)

Dans l'ensemble, la relation très forte entre l'humidité volumique et la profondeur de pénétration est peu affectée par la stratification hydrique du profil obtenu en conditions naturelles. On pourrait donc, en première approximation, utiliser la relation générale obtenue à partir de profils homogènes pour l'appliquer directement à des situations réelles qui ne vérifient jamais la condition d'uniformité de la teneur en eau en fonction de la profondeur. Ce résultat nous semble important, mais il reste à vérifier sur une gamme de situations expérimentales réelles plus vaste que celle utilisée dans nos expériences. Enfin, remarquons qu'il existe cependant des différences entre les points "théoriques" et les points "réels", notamment aux faibles teneurs en eau à 4,5 GHz ; ces différences sont d'ailleurs très facilement explicables par la superposition (cf. figures V-11a et V-11b) de couches très sèches sur des couches rapidement plus humides qui "freinent" assez brutalement la propagation du signal et réduisent ainsi la profondeur de pénétration par rapport au cas homogène. A 5,3 GHz, cet effet n'est plus sensible, probablement à cause de la plus faible profondeur de pénétration pour cette fréquence.

c. Relations expérimentales entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité volumique (avec prise en compte de la profondeur de pénétration calculée).

Une première approche, très globale et simple, consiste à analyser les relations linéaires obtenues entre le coefficient de rétrodiffusion radar et la teneur en eau volumique moyenne calculée entre la surface et la profondeur de pénétration (Figures V-12 et V-13). Dans l'ensemble, on constate que les coefficients de corrélation linéaire obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus précédemment, sans prendre en compte la profondeur de pénétration. Mais un examen plus attentif de la position des points (Figures V-12 et V-13) amène à remettre en cause l'hypothèse même de linéarité de ces relations.

L'exemple de la figure V-14 illustre cette constatation. Ainsi, si l'hypothèse de linéarité semble possible dans le cas de l'absence de prise en compte de la profondeur de pénétration, elle semble par contre inopérante dans le cas où l'on prend en compte, par l'intermédiaire d'un modèle physique, la profondeur probable de pénétration de l'onde.

Sur le plan statistique, un exemple d'ajustement non linéaire est donné par la figure V-15.

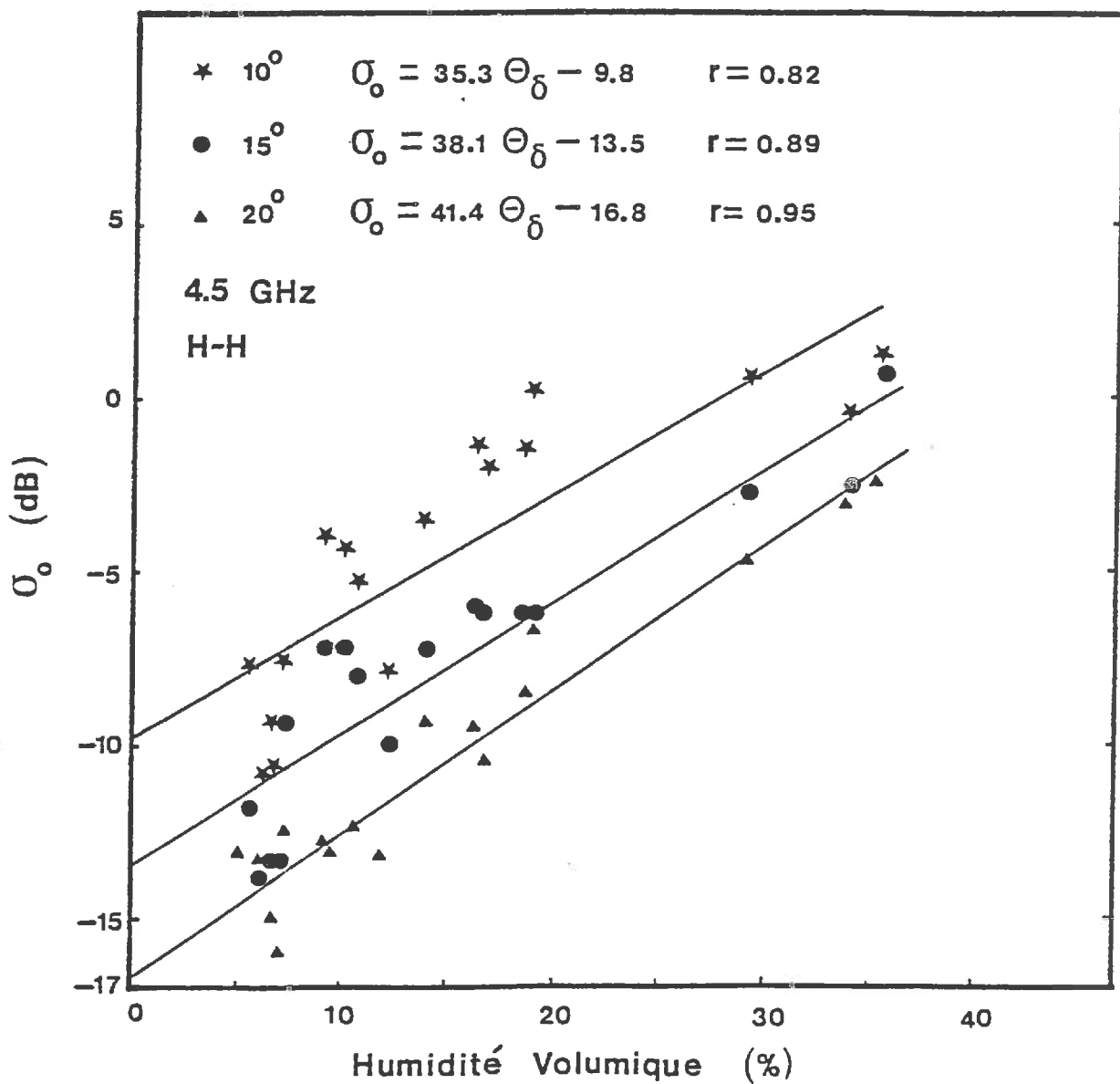


FIGURE V-12. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE PRISE EN COMPTE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION (CAS 4.5 GHZ; H-H)

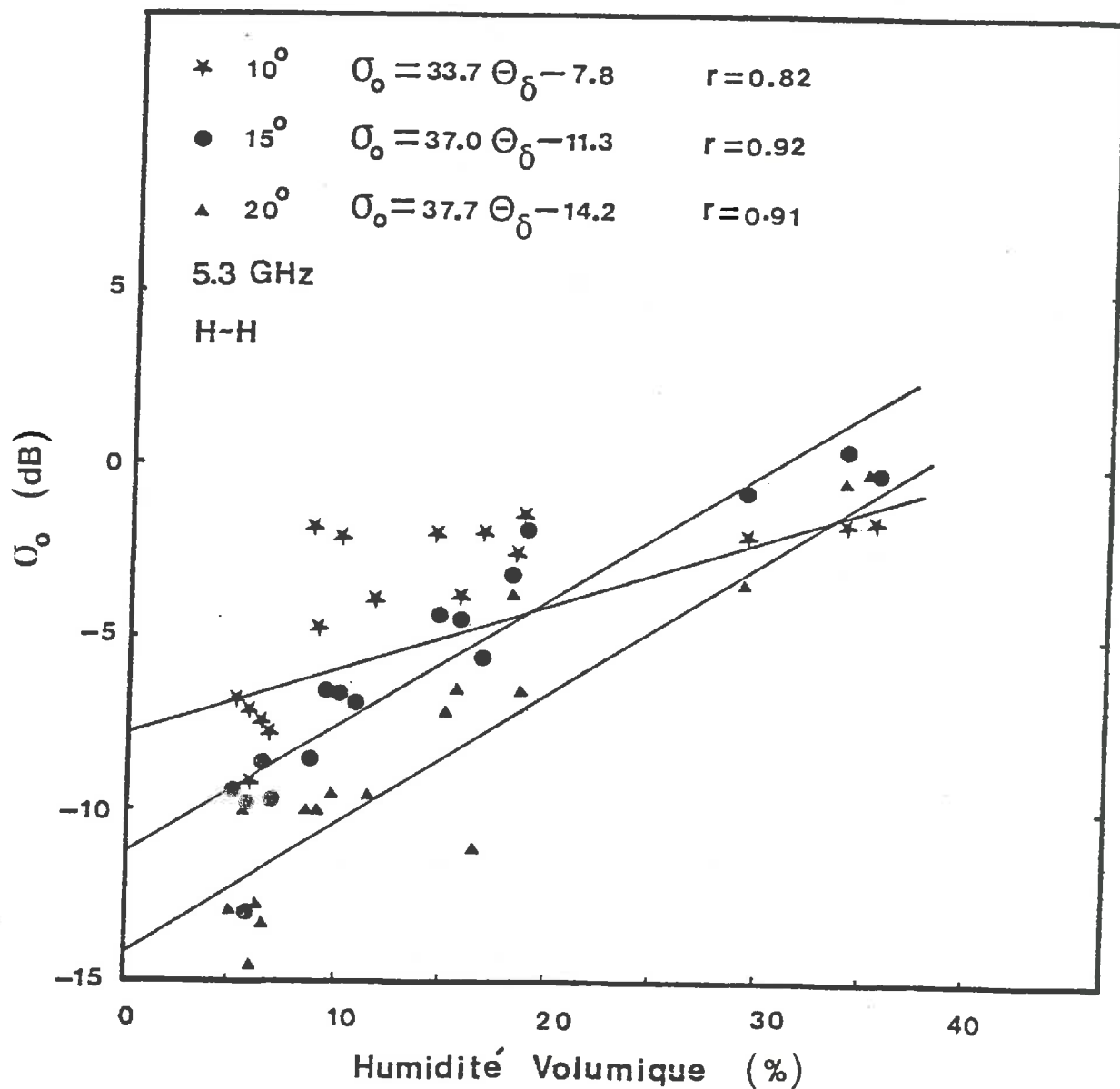


FIGURE V-13. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE PRISE EN COMPTE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION (CAS 5.3 GHZ; H-H)

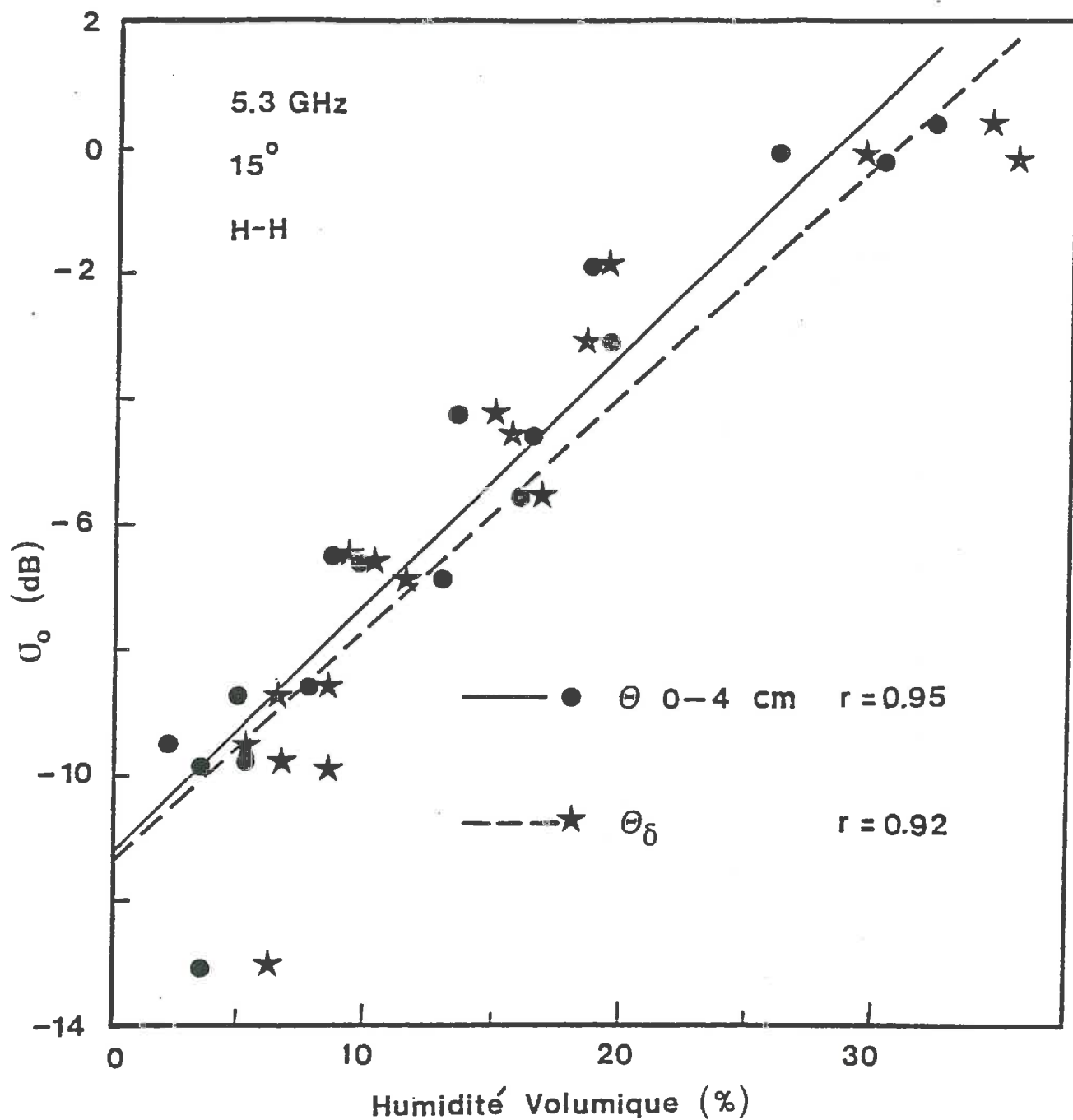


FIGURE V-14. COMPARAISON DES RELATIONS ENTRE DU COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE SANS ET AVEC PRISE EN COMPTE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION (CAS 5.3 GHz; 15 DEGRES; H-H)

En ce qui concerne donc la non-linéarité de cette relation, un travail supplémentaire reste à faire tant en ce qui concerne l'aspect purement statistique que l'aspect physique, mais remarquons néanmoins que ces résultats expérimentaux obtenus "in situ" semblent confirmer les hypothèses théoriques avancées par PAUSADER (1982).

La figure V-16 donne un exemple du "déplacement" des humidités volumiques calculées dans le cas où l'on prend en compte la profondeur de pénétration par rapport au cas où l'humidité volumique est calculée sur une profondeur arbitraire. Cette relation est non linéaire et affecte très sensiblement les fortes et les faibles teneurs en eau. Ces "décalages" sont uniquement explicables par la forme des profils hydriques rencontrés.

d. Relations expérimentales entre le coefficient de rétrodiffusion radar σ_0 et la profondeur de pénétration

Puisqu'il existe d'une part une relation (non linéaire) entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité volumique calculée avec prise en compte de la profondeur de pénétration (fig. V-15 par exemple), et d'autre part une relation entre cette même humidité et la profondeur de pénétration (figure V-11), on peut prévoir qu'il doit exister une relation directe plus ou moins nette entre le coefficient de rétrodiffusion et la profondeur de pénétration calculée. La relation obtenue à partir de nos données est fournie par la figure V-17. Cette relation semble assez stricte, à l'exception d'un point décalé par rapport à la position moyenne de l'ensemble des points. Ainsi, la conclusion importante qui semble se dégager est la suivante : un même signal (σ_0) peut être interprété comme un porteur d'informations de natures différentes et complémentaires :

- d'une part, σ_0 est un indicateur de la profondeur moyenne de pénétration de l'onde (fig. V-17),
- d'autre part, σ_0 est simultanément un indicateur de la teneur en eau volumique moyenne calculée sur cette profondeur (fig. V-15).

Une telle conception du caractère multiple et détaillé de l'information fournie par le signal σ_0 nous semble plus performante qu'une information globale affectée à une profondeur arbitraire (approche "classique").

Si ces résultats doivent être qualitativement extrapolables à d'autres situations, rappelons néanmoins que les relations quantitatives obtenues ne sont actuellement pas généralisables telles quelles (types de sol, types de profils hydriques).

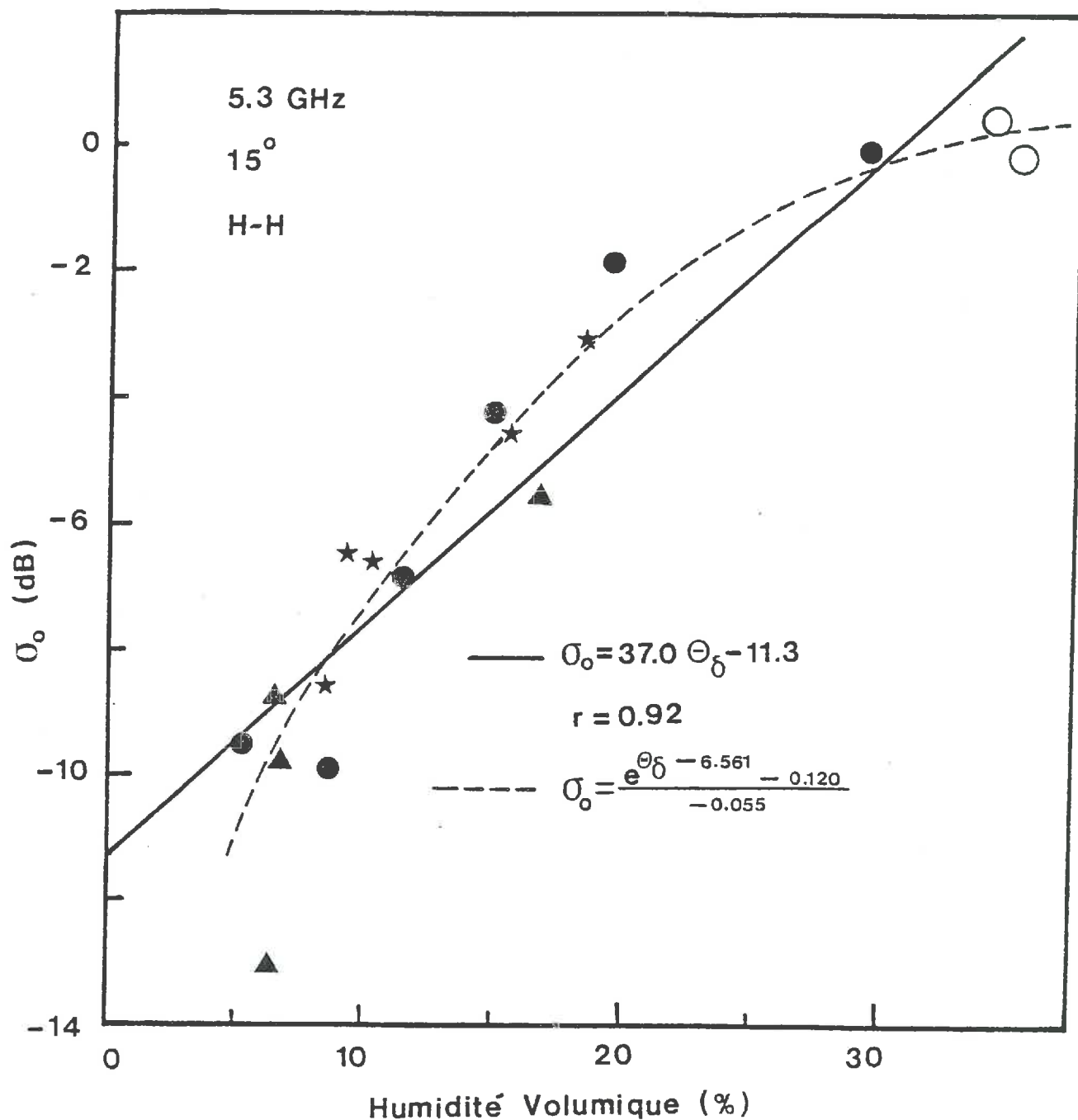


FIGURE V-15. AJUSTEMENT NON LINEAIRE DE RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE PRISE EN COMPTE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION (MEME LEGENDE QUE LA FIGURE V-7)R(CAS 5.3 GHZ; 15 DEGRES; H-H)

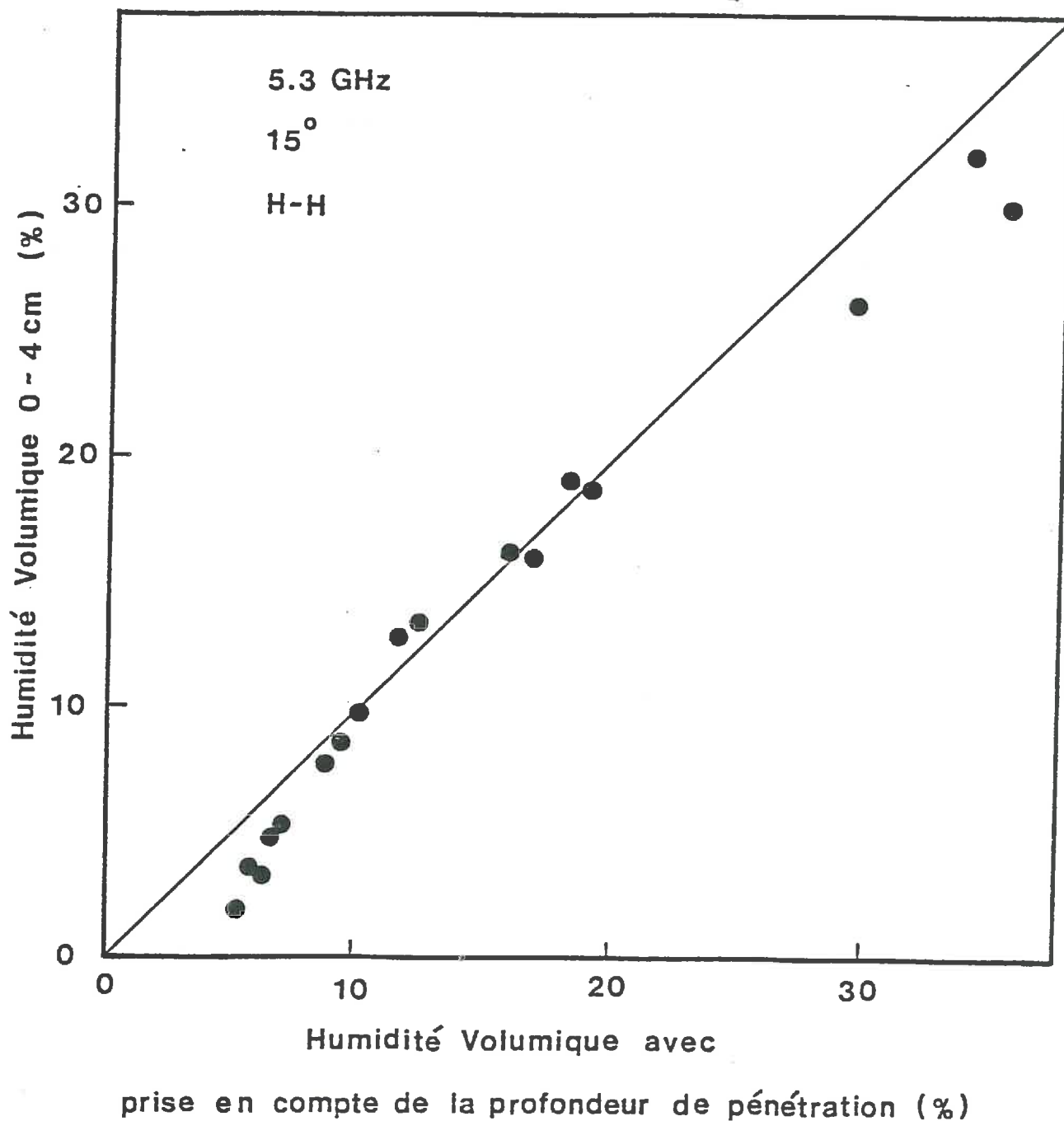


FIGURE V-16. RELATION ENTRE L'HUMIDITE VOLUMIQUE DE PROFONDEUR DONNEE (0-4 CM), ET CELLE DE PRISE EN COMPTE DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION (CAS 5.3 GHZ; 15 DEGRES; H-H)

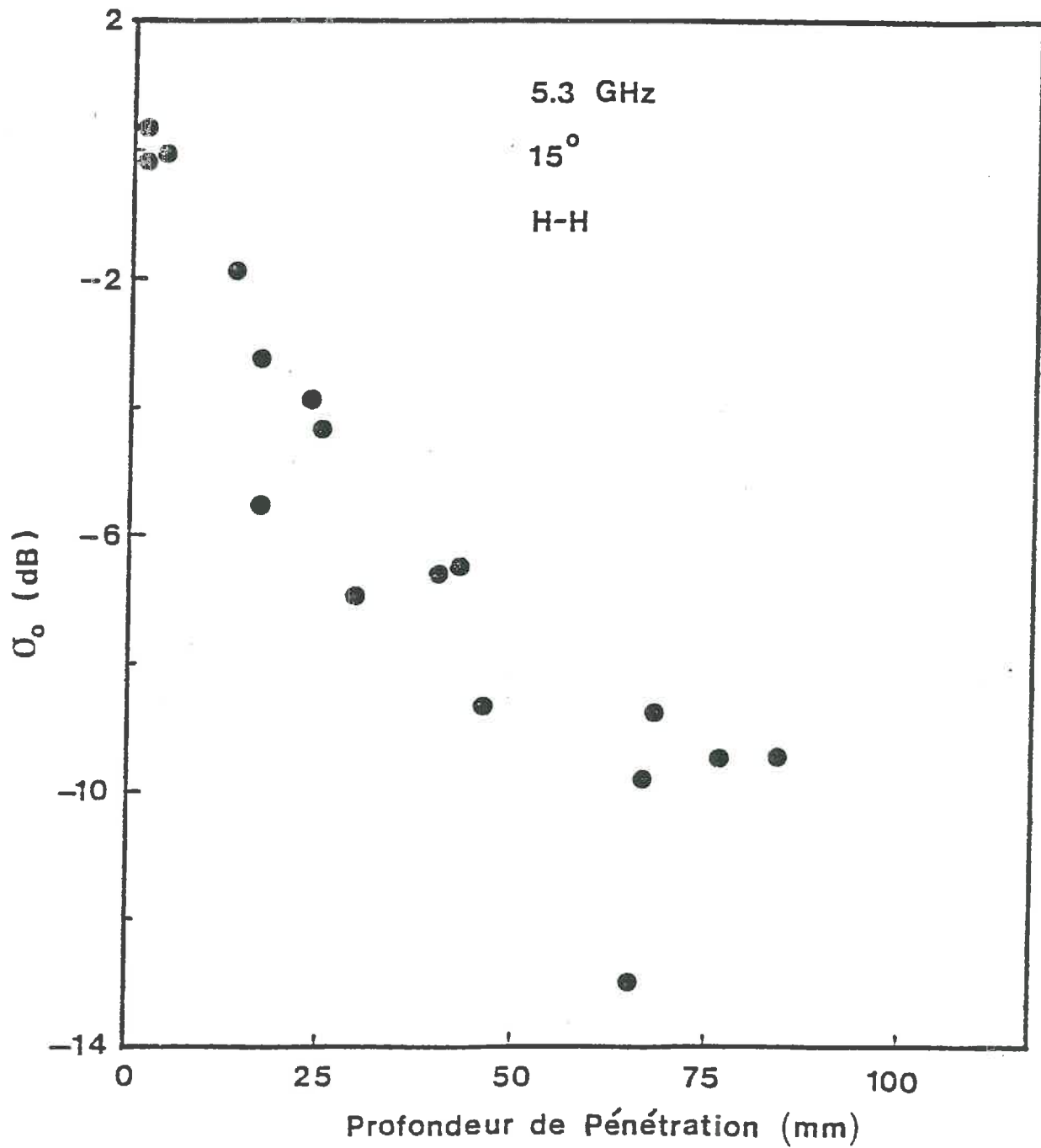


FIGURE V-17. RELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET LA PROFONDEUR DE PENETRATION δ

En conclusion, nous dirons simplement que l'introduction de modèles plus ou moins sophistiqués de calcul de la profondeur de pénétration nous semble avoir des conséquences importantes :

- elle permet de s'affranchir de l'approche purement statistique de la "meilleure relation obtenue entre σ_0 et l'humidité volumique".
- elle permet de remettre en cause l'hypothèse de linéarité entre σ_0 et l'humidité volumique, rarement discutée.
- elle permet "d'éclater" l'information globale et moyenne fournie par σ_0 en plusieurs informations complémentaires et tout à fait centrales pour l'utilisation ultérieure de ces informations dans des modèles de transfert.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté a constitué la première réalisation d'un projet nouveau pour la Station de Science du Sol d'Avignon, à savoir "l'utilisation des micro-ondes pour l'estimation de la teneur en eau superficielle des sols et son utilisation pour la modélisation des transferts hydriques". Il s'agit donc d'une thématique nouvelle pour notre laboratoire, mais ce travail s'inscrit dans la continuité de l'ensemble des recherches internationales dans ce domaine depuis une décennie. Ainsi, un certain nombre de résultats obtenus ne nous semblent pas former une innovation, mais plutôt une confirmation d'autres résultats acquis par tels ou tels auteurs. Cependant, quelques aspects moins développés dans la littérature nous semblent importants : analyser en détail (relations σ_0 , profondeur de pénétration, humidité volumique). Nous avons d'ailleurs montré dans ce mémoire ce que l'on pouvait espérer en attente.

Si l'on essaie de synthétiser les résultats acquis, il semble possible de dégager les conclusions suivantes :

- 1/ L'utilisation d'une configuration optimale des mesures radar proposée par plusieurs auteurs pour la mesure de la teneur en eau superficielle est bien confirmée par nos propres résultats.
- 2/ L'approche empirique de la relation statistique linéaire " σ_0 /teneur en eau volumique" permet bien de dégager des relations linéaires optimales et acceptables sur un plan statistique. Sur un plan physique, il nous semble que l'information acquise ainsi reste très fruste.
- 3/ Les relations très nettes, théoriques et expérimentales, entre l'humidité volumique moyenne et la profondeur de pénétration mettent en évidence toute l'importance de cette profondeur de pénétration dans l'interprétation du signal radar. Sur un plan théorique, l'effet de la forme du profil hydrique sur les modalités de pénétration de l'onde radar est clairement mis en évidence.
- 4/ Le couplage entre les mesures d'humidités volumiques faites in situ, la profondeur de pénétration et le signal σ_0 permettent :
 - de remettre en cause l'hypothèse de linéarité dans le cas où l'on prend en compte la profondeur de pénétration
 - de décomposer l'information σ_0 en deux informations complémentaires (profondeur, humidité volumique moyenne).

Ainsi, si le signal radar σ_0 permet d'obtenir des informations sur la profondeur moyenne de pénétration et l'humidité moyenne sur cette profondeur, il reste le problème de la forme du profil hydrique correspondant. A cet égard, une voie possible à tester réside dans l'évolution au cours du temps du signal radar enregistré.

Enfin, pour l'avenir, deux voies, au minimum, se dégagent :

- l'élargissement des conclusions acquises à d'autres situations (texture, forme des profils hydriques), soit par voie expérimentale, soit par voie théorique.
- le couplage entre l'estimation de la teneur en eau superficielle et la modélisation des transferts hydriques dans les sols.

BIBLIOGRAPHIE

- BECKER F., 1978 -**
Physique fondamentale de la Télédétection. Ecole d'Eté de Physique Spatiale. Centre National d'Etudes Spatiales. Toulouse, France.
- BERNARD R., P.H. MARTIN, J.L. THONY, M. VAUCLIN et D. VIDAL-MADJAR, 1982 -**
C-Band Radar Determination Surface Soil Moisture. Remote Sensing of Environment, 12(3): 189-200 pp.
- BERNARD R., O. TOCANET, 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. Sens. GE22(4): 388-394 pp.
- BERTUZZI P., L. BRUCKLER et C. GRÔS -**
Régression linéaire avec erreur sur les variables : Application à l'étalonnage d'un Gammadensimètre à transmission et d'un Humidimètre à Neutrons. Station de Science du Sol, INRA, Avignon, à paraître.
- BRADLEY G.A. and F.T. ULABY, 1981 -**
Aircraft radar response to soil moisture. Remote Sensing of Environment 11(66): 419-438 pp.
- DELHOMME J.P., 1976 -**
Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Université Pierre et Marie Curie de Paris-6, France, Thèse.
- DOBSON M.C., F.T. ULABY, M.T. HALLIKAINEN, and M.A. EL-RAYES, 1985 -**
Microwave dielectric behaviour of wet soil - Part II: Dielectric Mixing Model. IEE. Trans. Geosci. Rem. Sens. 23(1): 35-46 pp.
- FLUHR M.A., 1981 -**
Etude de l'influence des propriétés géométriques de surfaces de sol nu sur la réflectivité radar. Université Paul Sabatier de Toulouse, France, Thèse.
- GIRARD C.M. et C. KING, 1979 -**
Programme d'Etude en Hyperfréquences des Sols Cultivés. Société Française de Photogramétrie et Télédétection, N° 73-74:17-32 pp.
- GUERIN A., 1984 -**
Etude des Propriétés Diélectriques des Sols en band X. Applications à la Télédétection. Université Paul Sabatier de Toulouse, France, Thèse.
- HALLIKAINEN M.T., F.T. ULABY, M.C. DOBSON, M.A. EL-RAYES, et L.K. WU, 1985 -**
Microwave Dielectric Behaviour of Wet Soil. Part I: Empirical Models and Experimental Observations. IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 23(1):25-34 pp.
- HIROSAWA H., S. KOMIYAMA et A.Y. MATSUZAKA, 1978 -**
Cross-polarized Radar Backscatter from Moist Soil. Remote Sensing of Environment 7: 211-217 pp.

- KIM Y.S., R.K. MOORE, K. SOOFI and J.E. BARE, 1981 -**
Surface-Based Radar Scatterometer Study of Kansas Rangeland. *Remote Sensing of Environment* 11(4): 253-266 pp.
- KOBAYASHI T. et H. HIROSAWA, 1985 -**
Measurement of Radar Backscatter from Rough Soil Surface using linear and circular polarization. *Int. J. of Remote Sensing* 6(2): 345-352 pp.
- MONNIER G., P. STENGEL et J.C. FIES, 1973 -**
Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. agron.* 24(5): 533-545 pp.
- PAUSADER M., 1982 -**
Contribution à la Télédétection hyper-fréquence : Etude des relations entre la réflectivité radar et l'humidité du sol. Université Paul Sabatier de Toulouse, France, Thèse.
- STENGEL P., 1984 -**
Analyse de la porosité. Séminaire CEE-Agrimed, Avignon (FRA), 1983/03/14-5, 54 pp.
- STENGEL P., Y. GABILLY, P. BERTUZZI, J.C. GAUDU et A. BRIFAULT, 1986 -**
La double sonde gamma LPC-INRA. Définition, expérimentation et utilisation en agronomie. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 141:109-119 pp.
- ULABY F.T., 1974 -**
Radar Measurement of Soil Moisture Content. *IEEE Trans. Ant. Propag.* AP22(2): 257-265 pp.
- ULABY F.T., J. CIHLAR et R.K. MOOVE, 1974 -**
Active microwave measurement of soil water content. *Remote Sensing of Environment* 3(3): 185-204 pp.
- ULABY F.T., P.P. BATLIVALA et M.C. DOBSON, 1978 -**
Microwave backscatter dépendance on surface roughness, soil moisture, and soil texture. Part I : Bar soil. *IEEE Transactions on Geoscience electronics*, 16(4), 287-295 pp.
- ULABY F.T., R.K. MOORE and A.K. FUNG, 1982 -**
Microwave remote sensing, active and passive. Volume II : Radar Remote sensing and surface scattering and emission theory. Addison-Wesley Publishing Co. Inc. USA.
- WANG J.R., T.J. SCHMUGGE, 1980 -**
An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Trans. Geo. Rem. Sens.*, 18(4).

ANNEXE

LISTE DES ANNEXES

1. Description du modèle de profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un milieu absorbant.
2. Principe de fonctionnement du scatteromètre RAMSES II
3. Principe de mesure de la densité apparente sèche d'un sol par la méthode gammadensimétrie.
4. Résultats expérimentaux :
 - a. Coefficient de rétrodiffusion Radar
 - b. Profils hydriques moyens expérimentaux
 - c. Analyses statistiques
5. Résultats de l'analyse de la régression linéaire pour la teneur en eau massique.
6. Résultats de l'analyse de la régression linéaire pour la teneur en eau volumique.
7. Relation linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion radar et l'humidité massique.
 - a. Pour la fréquence de 4,5 GHz
 - b. Pour la fréquence de 5,3 GHz
8. Résultats du calcul de la profondeur de pénétration des profils hydriques expérimentaux
9. Résultats du calcul de l'humidité volumique avec prise en compte de la profondeur de pénétration.

ANNEXE 1

Description du Modèle de Profondeur de
pénétration d'une onde électromagnétique
dans un milieu absorbant.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

$$= \sqrt{(\theta'_t)} \sin \theta'_t$$

avec :

$\sqrt{(\theta'_t)}$ est un indice réel apparent dépendant de l'angle réel de refraction par la relation : (Becker, 1978)

$$\sqrt{(\theta'_t)} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \theta'_t} \sqrt{\frac{(n'_t{}^2 - n''_t{}^2) \cos^2 \theta'_t + \sqrt{(n'_t{}^2 + n''_t{}^2)^2 \cos^4 \theta'_t + 4n'_t{}^2 n''_t{}^2 \cos^2 \theta'_t}}{2}}$$

ou d'après ce qui précède :

$$\sqrt{(\theta'_t)} = \frac{1}{\sqrt{2} \cos \theta'_t} \sqrt{\varepsilon'_{rt} \cos^2 \theta'_t + \sqrt{\varepsilon'_{rt}{}^2 \cos^4 \theta'_t + \varepsilon''_{rt}{}^2 \cos^2 \theta'_t}}$$

Ainsi, un milieu complexe "t" caractérisé par $(\varepsilon', \varepsilon'')$ a un indice réel équivalent (θ'_t) ou une permittivité diélectrique réelle équivalente (ε_{rte})

$$\sqrt{\varepsilon_{rte}} = \sqrt{(\theta'_t)}$$

$$\text{ou } \varepsilon_{rte} = (\sqrt{(\theta'_t)})^2$$

L'angle réel θ'_t correspondant est donné par Becker (1978), page 73.

Calculs intermédiaires nécessaires :

$$n'{}^2 - n''{}^2 = \varepsilon'_r$$

$$2n'n'' = \varepsilon''_r$$

$$a/ \quad n'' = \frac{\varepsilon''_r}{2n'}$$

$$\text{ou } n'^2 - \frac{\varepsilon''^2}{4 n'^2} = \varepsilon'_r$$

$$\text{ou } 4 n'^4 - \varepsilon''^2 = 4 \varepsilon'_r n'^2$$

$$\text{ou } 4 n'^4 - 4 \varepsilon'_r n'^2 - \varepsilon''^2 = 0$$

supposons que : $X = n'^2$

$$4 X^2 - 4 \varepsilon'_r X - \varepsilon''^2 = 0$$

$$\begin{aligned} d &= 16 \varepsilon'_r{}^2 - 4(4)(-\varepsilon''^2) \\ &= 16 \varepsilon'_r{}^2 + 16 \varepsilon''^2 = 16(\varepsilon'_r{}^2 + \varepsilon''^2) \end{aligned}$$

$$\sqrt{d} = 4\sqrt{(\varepsilon'_r{}^2 + \varepsilon''^2)}$$

$$X = \frac{4 \varepsilon'_r + 4\sqrt{(\varepsilon'_r{}^2 + \varepsilon''^2)}}{8} = \frac{\varepsilon'_r + \sqrt{\varepsilon'_r{}^2 + \varepsilon''^2}}{2}$$

ON obtient finalement :

$$n'^2 = \frac{\varepsilon'_r + \sqrt{\varepsilon'_r{}^2 + \varepsilon''^2}}{2}$$

$$\text{b/ } n' = \frac{\varepsilon''}{2 n''}$$

$$\text{ou } \frac{\varepsilon''^2}{4 n''^2} - n''^2 = \varepsilon'_r$$

$$\text{ou } \varepsilon''^2 - 4 n''^4 = 4 \varepsilon'_r n''^2$$

$$\text{ou } 4 n''^4 + 4 \varepsilon'_r n''^2 - \varepsilon''^2 = 0$$

supposons que : $X = n''^2$

$$4 X^2 + 4 \epsilon'_{rt} X - \epsilon''_{rt}{}^2 = 0$$

$$d = 16 \epsilon'_{rt}{}^2 - 4(4)(-\epsilon''_{rt}{}^2)$$

$$= 16 \epsilon'_{rt}{}^2 + 16 \epsilon''_{rt}{}^2$$

$$= 16(\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2)$$

$$\sqrt{d} = 4\sqrt{\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2}$$

$$X = \frac{-4 \epsilon'_{rt} + 4\sqrt{\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2}}{8} = \frac{-\epsilon'_{rt} + \sqrt{\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2}}{2}$$

on obtient finalement :

$$n''^2 = \frac{-\epsilon'_{rt} + \sqrt{\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2}}{2}$$

on retrouve bien :

$$n'^2 - n''^2 = \epsilon'_{rt}$$

et on a :

$$n'^2 + n''^2 = \epsilon'_{rt} + \epsilon''_{rt}{}^2$$

L'angle réel θ'_t calculé a partir de relation suivante (Becker, 1978) :

$$\tan^2 \theta'_t = \frac{\epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i \left[(-\epsilon'_{rt} - \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i) + \sqrt{(\epsilon'_{rt}{}^2 + \epsilon''_{rt}{}^2) + \epsilon_{ri}^2 \sin^4 \theta_i + 2 \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i (-\epsilon'_{rt})} \right]}{2 \left(\frac{\epsilon''_{rt}{}^2}{4} - \epsilon_{ri} \sin^2 \theta_i \cdot (-\epsilon'_{rt}) \right)}$$

a permittivité diélectrique réel équivalente donnée par la relation suivante :

$$\epsilon_e = \frac{1}{2 \cos^2 \theta'_t} \left[(\epsilon'_{rt} \cos^2 \theta'_t) + \sqrt{\epsilon'_{rt}{}^2 \cos^4 \theta'_t + \epsilon''_{rt}{}^2 \cos^2 \theta'_t} \right]$$

Pour chaque passage de couche "i" à "t", le problème est donc entièrement réel (θ'_t ; ϵ_{rte}).

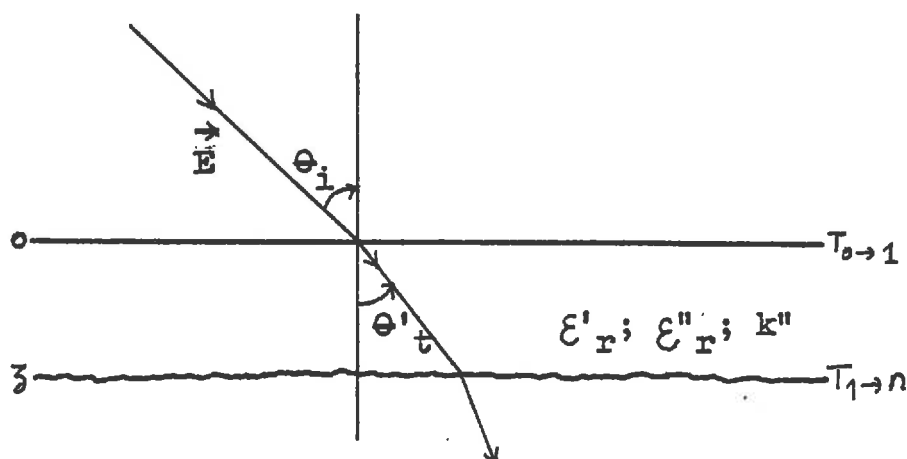
Le coefficient de transmission entre les couche "i" et "t" ou "i" et "t'" est donc, dans le cas général et réel :

$$T_{i,t} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_{ri}} \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_{ri}} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_{rte}} \cos \theta'_t}$$

Le vecteur d'onde (partie imaginaire) est déterminé par l'angle réel θ'_t ; on a donc la relation suivante :

$$k'' = \frac{1}{2} \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon'_r \left[\sqrt{1 + \frac{\epsilon''_r{}^2}{\epsilon'^2_r \cos^2 \theta'_t}} - 1 \right]}$$

CAS D'UN SYSTEME MULTICOUCHE



Soit E_0 l'amplitude incidence.

E_1 est l'amplitude transmise.

cette amplitude E_1 est alors atténuée dans la couche $0 - z_1$:

$$E'_1 = E_1 e^{-k''(z_1 - z_0)} = E_0 \cdot T_{0 \rightarrow 1} \cdot e^{-k''_1(z_1 - z_0)}$$

De la même façon on a :

$$E_2(\text{transmise}) = E_1' \cdot T_{1-2}$$

et l'atténuation est telle que :

$$E_2' = E_2 \cdot e^{-k_2''(z_2 - z_1)}$$

$$= E_1' \cdot T_{1-2} \cdot e^{-k_2''(z_2 - z_1)}$$

$$= E_0 \cdot T_{0-1} \cdot e^{-k_1''(z_1 - z_0)} \cdot T_{1-2} \cdot e^{-k_2''(z_2 - z_1)}$$

$$E_2' = \vec{E}_0 \cdot T_{0-1} \cdot T_{1-2} \cdot e^{-k_1''(z_1 - z_0) + k_2''(z_2 - z_1)}$$

pour n couches on peut écrire de la même façon :

$$E_n' = \vec{E}_0 \cdot T_{0-1} \cdot T_{1-2} \cdot \dots \cdot T_{(n-1)-n} \cdot e^{-k_1''(z_1 - z_0) + k_2''(z_2 - z_1) + \dots + k_n''(z_n - z_{(n-1)})}$$

on obtient donc le rapport d'amplitude (E_n'/E_0):

$$\frac{E_n'}{E_0} = T_{0-1} \cdot T_{1-2} \cdot \dots \cdot T_{(n-1)-n} \cdot e^{-k_1''(z_1 - z_0) + k_2''(z_2 - z_1) + \dots + k_n''(z_n - z_{(n-1)})}$$

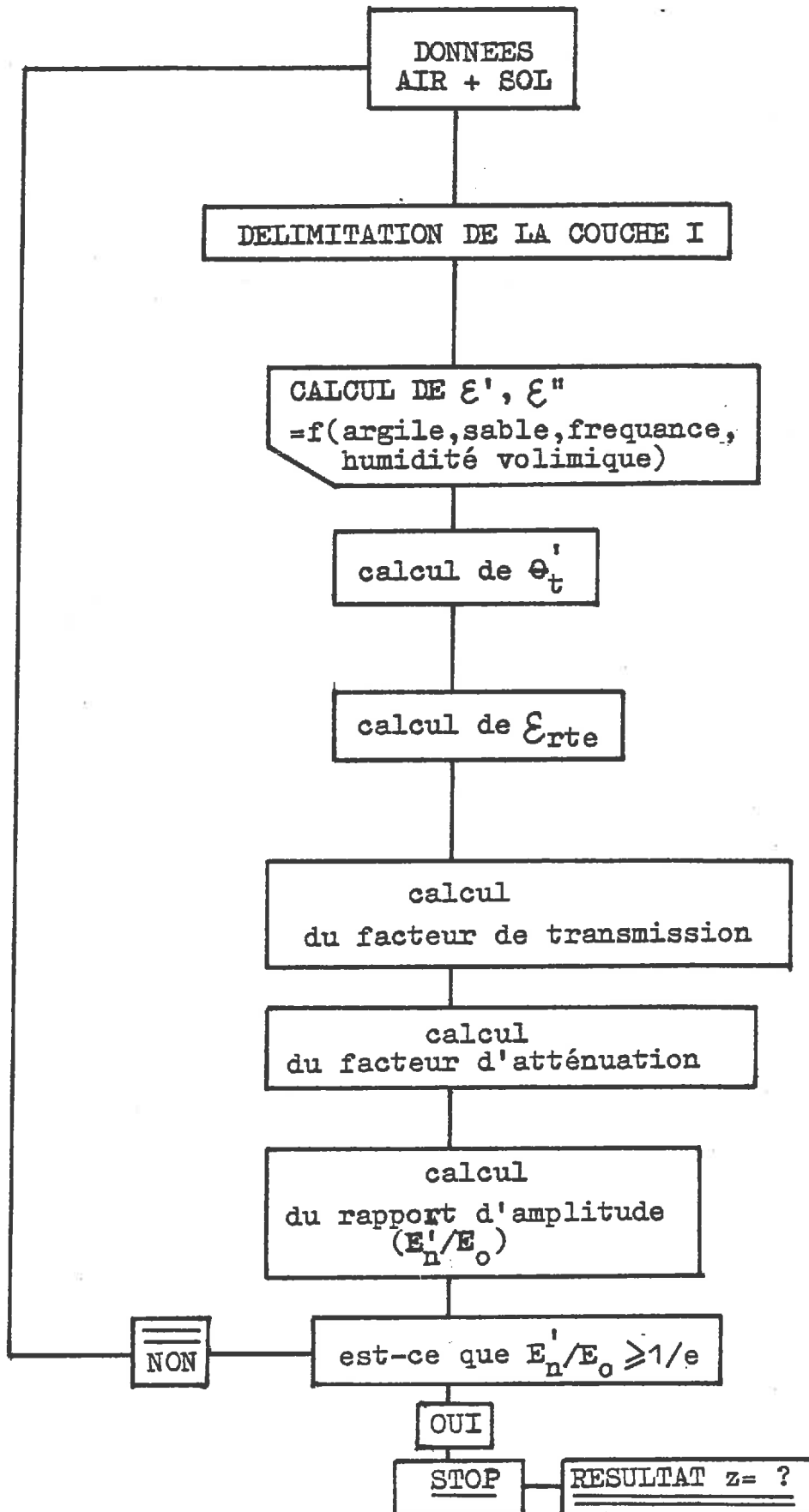
Or par définition de la profondeur de pénétration le rapport d'amplitude égale à $1/e$ (0.37).

L'inconnu de cette équation est finalement "n". on incrément

"n" jusqu'à ce que :

$$\prod_{i=1}^n T_{(i-n)-i} \cdot e^{\sum_{i=1}^n k_i''(z_i - z_{(i-1)})} = 1/e$$

RESUME ET ORGANIGRAMME DU CALCUL



ANNEXE 2

Principe de Fonctionnement du Scatteromètre RAMSES II

LE SCATTEROMETRE DE TERRAIN : RAMSES

Le système radar utilisé pour les mesures expérimentales sur le terrain, est le scattéromètre RAMSES développé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), et destiné à mesurer l'amplitude du signal rétrodiffusé par le sol à partir d'une plate-forme située à une dizaine de mètres de la surface. RAMSES (Radar multifréquence Sol pour l'Etude des Signatures Spectrales) est un radar continu à modulation de fréquence (type F M / C W), fonctionnant à quatre fréquences centrales 1,5 - 3 - 4,5 - 9 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'ondes de 20 - 10 - 6,6 - 3,3 cm et à quatre combinaisons de polarisation H H, V V, H V, V H (émission et réception horizontale ou verticale) (tableau 2).

L'appareil peut être placé sur un support situé à une dizaine de mètres du sol et soumis à un déplacement circulaire en site et en gisement commandé par un mécanisme de contrôle à distance.

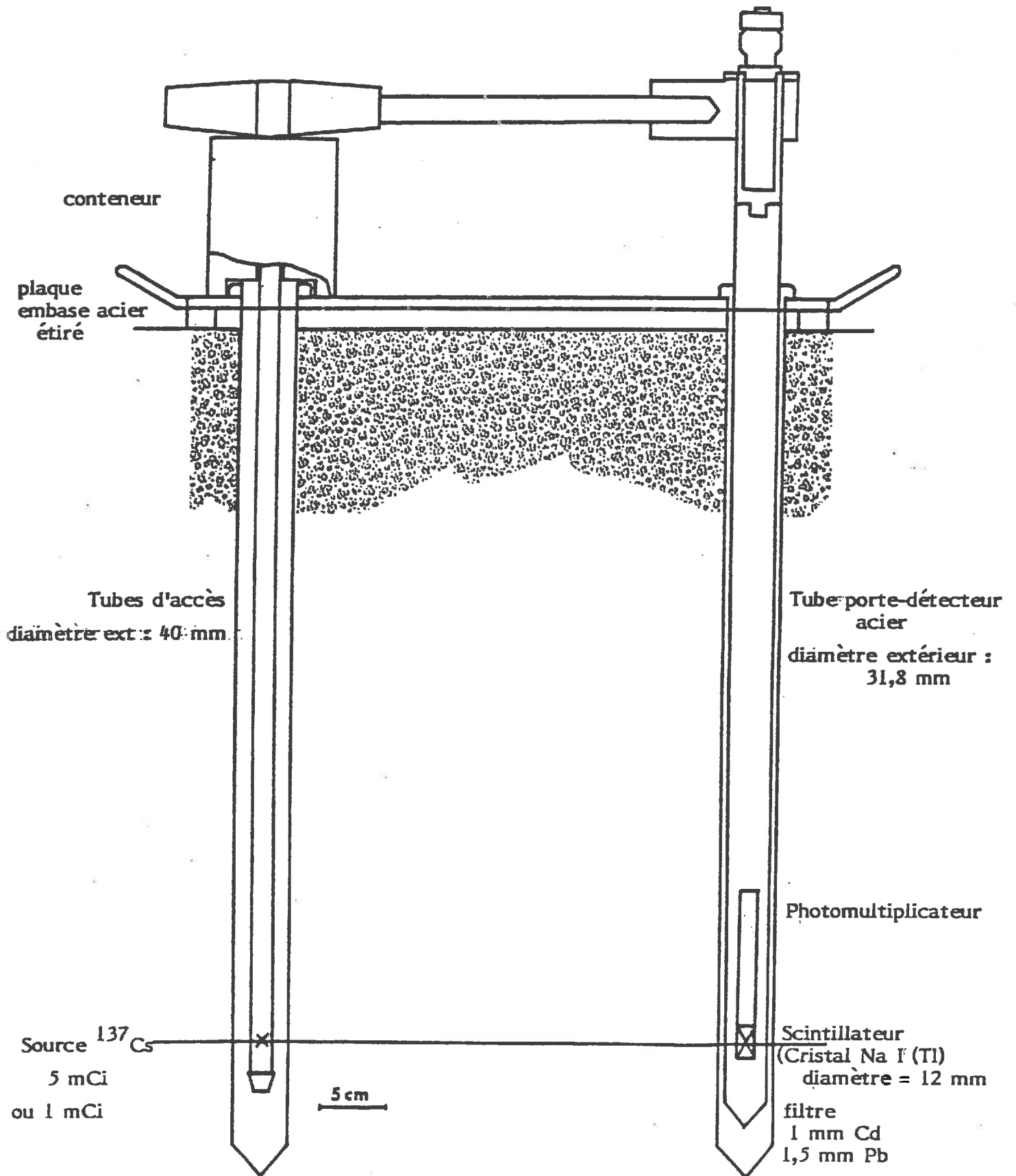
La figure 3 présente le schéma de l'appareil dont le principe général est le suivant :

Une onde à fréquence modulée est émise par un cornet rectangulaire à large bande permettant les fréquences de 1,5 à 9 GHz. L'antenne de réception de type parabolique est située à côté du cornet émetteur pour assurer une observation quasi-monostatique. L'onde électromagnétique rétrodiffusée par la cible et une fraction de l'onde émise au même instant sont mélangées dans le récepteur. Du déphasage des deux ondes, résulte un signal de battement dont le spectre est centré sur la fréquence de battement F_b .

L'information sur la puissance rétrodiffusée est contenue dans le spectre. Pour éliminer les échos parasites et ne garder que l'écho correspondant à la distance radar-cible, un filtre passe-bas est utilisé. Après le filtrage vidéo, l'amplitude du signal qui représente la puissance rétrodiffusée est mesurée à l'aide d'un détecteur quadratique.

ANNEXE 3

Principe de mesure de la densité apparente sèche
d'un sol par la méthode Gammadensimétrie.



DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

Double Sonde

La source radioactive est fixée à l'extrémité d'une tige d'acier, graduée en centimètres, couissant dans un conteneur blindé.

Au repos, elle est maintenue dans celui-ci par un dispositif de verrouillage excluant sa mise à l'air accidentelle, conformément aux réglementations en vigueur relatives à la radioprotection. Un écrou de serrage placé sur le conteneur permet de maintenir la source à la profondeur choisie pour la mesure.

Le détecteur et une partie de la chaîne de comptage (photomultiplicateur, alimentation H.T., amplificateur, seuillage et circuit de mise en forme) sont placés à l'intérieur d'un tube d'acier inoxydable (\varnothing : 31,8/29,8).

La tige porte-source et le tube porte-détecteur sont maintenus parallèles par un dispositif constitué d'une tige de couplage et d'une plaque embase placée à la surface du sol pendant la mesure. La plaque embase permet notamment de réaliser des mesures à la proximité immédiate de la surface en réduisant l'effet d'interface avec l'air.

Différentes distances de scrutation (épaisseur de matériau compris entre la source et le détecteur) peuvent être obtenues selon l'équipement : 30-20 et 15 cm avec une source de 5 mCi ; 15-10 cm avec une source de 1 mCi.

Cet ensemble constitue la double sonde proprement dite, son poids est de 18 kg.

Echelle de comptage

Les impulsions mises en forme dans le tube porte détecteur sont transmises par un câble blindé au circuit de comptage contenu dans un boîtier indépendant.

Ce boîtier est réalisé en résine armée, il est étanche à la pluie et pèse 5 kg. Il comporte les fonctions de sélection du temps de mesure (10 s, 30 s, 100 s, 300 s) ainsi qu'un test de vérification du circuit de comptage. Le nombre d'impulsions est affiché sur un cadran à cristaux liquides comportant également un témoin de charge des batteries et un témoin de dépassement de capacité d'affichage.

Ce boîtier comporte les batteries d'alimentation (Cadmium Nickel, 6 V) qui permettent une autonomie de 15 h de fonctionnement pour une durée de charge de 15 h (6 V, 700 mA).

PRINCIPE DE LA METHODE

Le principe de la méthode consiste à introduire la source émettrice (^{137}Cs) et le détecteur (cristal scintillateur) dans deux trous parallèles préalablement forés. Un assemblage mécanique permet de maintenir face à face la source et le détecteur durant l'auscultation.

Le spectre de faible énergie du rayonnement détecté est partiellement éliminé par un dispositif de seuillage des impulsions résultant des photons d'énergie inférieure à 0,1 MeV et par des filtres mécaniques disposés autour du détecteur. Cependant, la conception retenue ne permet pas d'opérer dans les conditions d'application de l'équation d'atténuation. Une relation entre le nombre de photons comptés et la densité est obtenue expérimentalement par des mesures dans des matériaux de densité et de nature chimique connus avec précision. La relation expérimentale est linéaire entre 1 000 kg et 2 500 kg/m³.

Préparation du site de mesure

La préparation du site de mesure requiert un soin particulier. Son objet réside dans la réalisation de deux trous permettant l'accès de la sonde. Cette préparation ne doit pas être perturbatrice de l'échantillon et un parallélisme rigoureux des trous doit être visé. Un guide de perçage est livré avec la sonde à cet effet.

Une technique de perçage est adoptée par l'utilisateur en fonction des propriétés du milieu rencontré.

Dans le domaine des applications agronomiques, la plupart des problèmes rencontrés (hormis la présence de cailloux) peuvent être résolus au moyen d'une tarière constituée d'un tube d'acier (\varnothing : 40 mm extérieur) refendu sur lequel un bord d'attaque est aménagé. L'outil de perçage ainsi constitué présente l'avantage d'être autoguidé durant le perçage et permet ainsi la réalisation de trous parfaitement rectilignes. Le trou peut ensuite être tubé ou non selon l'état de cohésion du milieu.

Le cas de sols très meubles et agrégés peut également être traité avec un outil de ce type, mais de diamètre inférieur (\varnothing : 35 mm). Le perçage est alors effectué au travers de tubes d'accès, ouverts à leur extrémité et chanfreinés à 45° vers l'intérieur. L'enfoncement du tube simultanément au perçage permet d'éviter l'éboulement de la terre dans le trou.

Des tubes d'aluminium de diamètre 40 x 36 sont aisément disponibles dans le commerce.

Dans la plupart des cas, la technique de perçage décrite permet de limiter à une valeur inférieure à 2 mm l'écart à la distance nominale de scrutation. Il est cependant utile de mesurer cette distance à la cote de la mesure soit pour rejeter les mesures réalisées avec des écarts de scrutation non négligeables, soit pour leur apporter une correction.

La mesure d'écartement réel entre les tubages peut être effectuée à partir d'une tranchée si le profil ausculté doit être observé, soit par la mesure hors du sol entre deux tiges enfoncées dans les tubes. Il est alors possible de déterminer l'écartement précis entre les tubes à la cote de scrutation par application du théorème de Thalès.

La préparation du site de mesure est l'opération la plus limitante du rendement. Aussi, est-il souvent nécessaire de procéder aux mesures à deux personnes, l'une effectuant les avant-trous, l'autre réalisant les comptages.

De cette manière, il est possible de scruter jusqu'à 20 profils complets par jour.

Le sol prélevé pour le perçage des avant-trous peut être utilisé pour le dosage de l'humidité par gravimétrie.

CARACTERISTIQUES DE LA MESURE

1/ Volume de mesure-résolution

La distance à l'axe source détecteur à partir de laquelle l'effet de voisinage d'un milieu de densité différente est significatif sur la mesure de la densité en un milieu donné varie, selon l'écart de densité entre ces milieux et la distance retenue pour la scrutation, de 2,5 à 3,5 cm.

Il est par ailleurs possible de réaliser des mesures à partir de 3 à 5 cm de la surface.

2/ Précision de la mesure

Dans un premier temps, l'étalonnage permet d'établir une relation statistique :

$$\rho_0 = - a \ln C + b \quad (1)$$

C = nombre de coups par seconde

ρ_0 = masse volumique normalisée (g.cm^{-3})

ρ_0 est une valeur de masse volumique obtenue selon le processus suivant :

Partant de la loi d'atténuation,

$$C = C_0 e^{-l (\rho_d \mu_s + \rho_w \mu_w \theta)}$$

l = longueur traversée par le rayonnement (cm)

ρ_d = masse volumique du sol sec (g.cm^{-3})

μ_s = coefficient d'absorption massique du sol sec ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$)

ρ_w = masse volumique de l'eau (g.cm^{-3})

μ_w = coefficient d'absorption massique de l'eau ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$)

θ = teneur en eau volumique

On écrit :

$$C = C_0 e^{-l (\rho_d \mu_s + \rho_w \mu_w \frac{\rho_d W}{\rho_w})}$$

W = teneur en eau pondérale

$$C = C_0 e^{-l \rho_d (\mu_s + \mu_w W)}$$

Si l'on choisit pour référence la valeur du coefficient d'absorption massique du calcaire (μ_0), on peut écrire :

$$C = C_0 e^{-l \rho_d \mu_0 \left(\frac{\mu_s}{\mu_0} + \frac{\mu_w}{\mu_0} W \right)}$$

Un sol quelconque, de densité ρ_d , de coefficient d'absorption massique μ_s et de teneur en eau W , a le même comportement vis-à-vis de l'atténuation du rayonnement gamma qu'un milieu constitué de calcaire sec dont la densité serait ρ_0

$$\rho_0 = \rho_d \left(\frac{\mu_s}{\mu_0} + \frac{\mu_w}{\mu_0} W \right)$$

Dans le cas de l'étalonnage, W étant nul, on prend pour valeur de densité

$$\rho_0 = \rho_d \left(\frac{\mu_s}{\mu_0} \right)$$

L'analyse statistique de la relation (1) permet d'obtenir l'estimation de ρ_0 et son erreur associée.

Connaissant ρ_0 , on détermine alors la masse volumique sèche du matériau scruté par la relation :

$$\rho_d = \frac{\rho_0}{\left(\frac{\mu_s}{\mu_0} + \frac{\mu_w}{\mu_0} W\right)} \quad (2)$$

La détermination de l'incertitude sur ρ_d fait alors intervenir un calcul d'erreur à partir des 5 variables de la relation (2) et de leur erreur associée :

$$\Delta\rho_d = f(\Delta\rho_c, \Delta W, \Delta\mu_s, \Delta\mu_w, \Delta\mu_0)$$

Dans le cas général, le coefficient d'absorption massique du sol est peu différent de celui du calcaire.

Dans la pratique, on a alors :

$$\mu_0 = 0,0776 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\mu_s \approx \mu_0$$

$$\mu_w = 0,0857 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\rho_d \approx \frac{\rho_0}{1 + 1,1 W}$$

W est déterminée par gravimétrie sur des échantillons prélevés au lieu de mesure.

3/ Incidence de la température sur la mesure

Le tableau ci-dessous montre les variations de comptage enregistrées et leur incidence sur la mesure de ρ_0 lorsqu'on soumet l'appareillage à différentes températures en enceinte climatique.

t° (°C)	C/s	masse volumique mesurée
12	570 ± 1,6	1,670
21,5	58 ± 1,6	1,660
30,5	575 ± 1,6	1,662

ANNEXE 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX

A N N E X E 4-A

RESULTATS EXPERIMENTAUX

DE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR (σ_0)

Selon les configurations utilisees en polarisation H-H
(unite decibel (dB))

N° de JOUR (serie) (de mesure)	FREQUENCES (GHz) et ANGLES D'INCIDENCE (°)					
	4.5			5.3		
	10	15	20	10	15	20
1	-10.87	-13.38	-15.50	-9.20	-13.09	-14.69
2	- 7.52	- 9.31	-12.48	-7.88	- 9.81	-13.29
3	- 9.28	-13.29	-16.65	-7.57	- 8.76	-11.84
4	- 2.03	- 6.11	-10.55	-1.85	- 5.23	-11.17
5	- 1.46	- 6.30	- 8.51	+2.51	- 3.23	- 3.81
6	- 1.26	- 6.02	- 9.52	-0.38	- 4.59	- 6.61
7	- 5.20	- 8.08	-12.42	-2.25	- 6.61	- 9.51
8	- 4.38	- 7.11	-13.12	-4.74	- 6.50	-10.45
9	- 3.99	- 7.11	-12.82	-1.92	- 8.65	-10.49
10	- 7.72	-11.89	-13.12	-6.95	- 9.41	-13.05
11	-10.92	-13.70	-13.23	-7.23	- 9.77	-10.43
12	+ 0.22	- 6.11	- 6.73	+1.39	- 1.86	- 6.74
13	- 3.46	- 7.27	- 9.32	-2.18	- 4.27	- 9.71
14	+ 0.57	- 2.73	- 9.32	+2.16	- 0.07	- 3.32
15	- 7.85	-10.17	-13.28	-3.95	- 6.87	- 9.71
16	- 0.46	- 2.68	- 3.08	+1.69	+ 0.41	- 1.84
17	+ 1.21	+ 0.84	- 2.48	+1.74	- 0.15	- 1.62

A N N E X E 4. B

Profils hydriques moyens (teneurs en eau volumique)
obtenus pendant la campagne de mesures (cm^3/cm^3)

z (cm)	No. de jour (série de mesures)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0-1	.020	.015	.025	.161	.154	.128	.051	.026	.022	.009	.017	.177	.165	.294	.054	.340	.354
1-2	.026	.048	.056	.180	.192	.159	.089	.074	.057	.017	.040	.200	.164	.280	.133	.326	.329
2-3	.036	.068	.057	.175	.201	.172	.108	.108	.096	.022	.044	.193	.111	.268	.162	.317	.283
3-4	.055	.080	.057	.130	.208	.178	.134	.134	.126	.033	.044	.160	.096	.208	.177	.302	.239
4-5	.080	.086	.069	.095	.210	.285	.152	.151	.145	.045	.050	.122	.082	.120	.150	.290	.203
5-6	.106	.088	.093	.094	.211	.188	.166	.162	.162	.065	.068	.103	.096	.111	.129	.261	.168
6-7	.136	.098	.122	.120	.212	.188	.178	.174	.172	.088	.097	.107	.112	.128	.132	.221	.162
7-10	.191	.134	.174	.178	.217	.202	.193	.191	.186	.140	.149	.159	.156	.164	.159	.185	.180

NOTE: z = Profondeur sur laquelle l'échantillon a été prélevé

A N N E X E 4-C

RESULTATS DE L'ANALYSE STATISTIQUE
DE LA TENEUR EN EAU EXPERIMENTALE

Jour N°: 1 (18 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.016	0.003	1.19	0.020	0.004	20.18
1 - 2	0.024	0.005	1.19	0.026	0.007	25.05
2 - 3	0.030	0.013	1.19	0.036	0.015	42.56
3 - 4	0.047	0.023	1.19	0.055	0.027	48.95
4 - 5	0.067	0.029	1.19	0.080	0.035	43.50
5 - 6	0.089	0.034	1.19	0.106	0.040	37.51
6 - 7	0.113	0.026	1.22	0.138	0.032	23.07
7 - 10	0.144	0.010	1.33	0.191	0.013	6.87

Jour N°: 2 (17 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.012	0.002	1.19	0.016	0.002	15.88
1 - 2	0.040	0.019	1.19	0.048	0.023	47.65
2 - 3	0.057	0.020	1.19	0.068	0.024	35.19
3 - 4	0.067	0.021	1.19	0.080	0.025	30.66
4 - 5	0.072	0.019	1.19	0.086	0.023	26.33
5 - 6	0.074	0.018	1.19	0.088	0.021	23.72
6 - 7	0.080	0.017	1.22	0.098	0.021	21.21
7 - 10	0.101	0.022	1.33	0.134	0.030	22.10

Jour N°: 3 (18 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.021	0.006	1.19	0.025	0.008	29.87
1 - 2	0.047	0.004	1.19	0.056	0.004	7.42
2 - 3	0.047	0.005	1.19	0.057	0.006	10.22
3 - 4	0.048	0.011	1.19	0.057	0.013	22.89
4 - 5	0.058	0.019	1.19	0.069	0.022	32.09
5 - 6	0.079	0.022	1.19	0.093	0.026	27.49
6 - 7	0.101	0.031	1.22	0.122	0.038	31.24
7 - 10	0.131	0.033	1.33	0.174	0.044	25.27

Jour N°: 4 (17 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.136	0.018	1.19	0.161	0.021	13.26
1 - 2	0.151	0.012	1.19	0.180	0.015	8.24
2 - 3	0.147	0.017	1.19	0.175	0.020	11.66
3 - 4	0.109	0.026	1.19	0.130	0.032	24.29
4 - 5	0.080	0.036	1.19	0.095	0.042	44.74
5 - 6	0.079	0.018	1.19	0.094	0.021	22.63
6 - 7	0.098	0.019	1.22	0.120	0.024	19.77
7 - 10	0.134	0.014	1.33	0.178	0.018	10.33

Jour N°: 5 (16 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.110	0.067	1.40	0.128	0.089	69.67
1 - 2	0.145	0.036	1.32	0.192	0.048	24.90
2 - 3	0.162	0.032	1.24	0.201	0.040	19.94
3 - 4	0.171	0.029	1.21	0.208	0.036	17.17
4 - 5	0.176	0.029	1.20	0.210	0.034	16.33
5 - 6	0.177	0.030	1.19	0.211	0.035	16.71
6 - 7	0.178	0.030	1.19	0.212	0.036	16.81
7 - 10	0.181	0.029	1.20	0.217	0.035	16.07

Jour N°: 6 (16 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.092	0.064	1.40	0.128	0.089	69.67
1 - 2	0.120	0.046	1.32	0.159	0.061	38.27
2 - 3	0.139	0.035	1.24	0.172	0.043	24.96
3 - 4	0.147	0.032	1.21	0.178	0.038	21.61
4 - 5	0.155	0.030	1.20	0.185	0.036	19.41
5 - 6	0.157	0.029	1.19	0.188	0.035	18.53
6 - 7	0.158	0.030	1.19	0.188	0.036	18.91
7 - 10	0.168	0.024	1.20	0.202	0.028	13.97

Jour N°: 7 (16 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C. V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.037	0.024	1.40	0.051	0.034	66.57
1 - 2	0.067	0.039	1.32	0.089	0.051	57.32
2 - 3	0.087	0.039	1.24	0.108	0.048	44.33
3 - 4	0.110	0.039	1.21	0.134	0.039	29.06
4 - 5	0.127	0.026	1.20	0.152	0.032	20.80
5 - 6	0.139	0.018	1.19	0.166	0.021	12.76
6 - 7	0.149	0.015	1.19	0.178	0.018	9.93
7 - 10	0.161	0.011	1.20	0.193	0.014	7.13

Jour N°: 8 (16 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.019	0.009	1.40	0.026	0.012	45.24
1 - 2	0.056	0.028	1.32	0.074	0.037	49.82
2 - 3	0.087	0.028	1.24	0.108	0.034	31.71
3 - 4	0.111	0.023	1.21	0.134	0.028	21.17
4 - 5	0.126	0.021	1.20	0.151	0.025	16.60
5 - 6	0.136	0.019	1.19	0.162	0.023	14.22
6 - 7	0.146	0.015	1.19	0.174	0.018	10.05
7 - 10	0.159	0.008	1.20	0.191	0.010	5.10

Jour N°: 9 (16 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C. V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.016	0.008	1.40	0.022	0.011	47.58
1 - 2	0.043	0.028	1.32	0.057	0.037	65.41
2 - 3	0.078	0.030	1.24	0.096	0.037	38.66
3 - 4	0.104	0.026	1.21	0.126	0.032	25.21
4 - 5	0.121	0.020	1.20	0.145	0.024	16.56
5 - 6	0.135	0.012	1.19	0.162	0.015	9.05
6 - 7	0.144	0.011	1.19	0.172	0.013	7.43
7 - 10	0.155	0.008	1.20	0.186	0.010	5.43

Jour N°: 10 (17 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.007	0.002	1.18	0.009	0.002	25.54
1 - 2	0.014	0.005	1.18	0.017	0.005	31.61
2 - 3	0.019	0.007	1.18	0.022	0.008	35.11
3 - 4	0.028	0.009	1.18	0.033	0.010	30.51
4 - 5	0.038	0.012	1.18	0.045	0.014	31.59
5 - 6	0.055	0.016	1.18	0.065	0.019	28.34
6 - 7	0.074	0.021	1.20	0.088	0.026	29.13
7 - 10	0.109	0.018	1.28	0.140	0.023	16.64

Jour N°: 11 (16 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.015	0.004	1.18	0.017	0.004	25.81
1 - 2	0.034	0.006	1.18	0.040	0.008	19.01
2 - 3	0.037	0.003	1.18	0.044	0.003	6.75
3 - 4	0.037	0.003	1.18	0.044	0.004	9.11
4 - 5	0.042	0.007	1.18	0.050	0.008	16.85
5 - 6	0.058	0.013	1.18	0.068	0.016	22.74
6 - 7	0.081	0.024	1.20	0.097	0.029	30.11
7 - 10	0.116	0.016	1.28	0.149	0.021	14.19

Jour N°: 12 (11 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.150	0.046	1.18	0.177	0.054	30.30
1 - 2	0.169	0.021	1.18	0.200	0.024	12.22
2 - 3	0.164	0.028	1.18	0.193	0.033	16.92
3 - 4	0.136	0.049	1.18	0.160	0.058	35.98
4 - 5	0.103	0.057	1.18	0.122	0.067	54.78
5 - 6	0.088	0.043	1.18	0.103	0.050	48.57
6 - 7	0.089	0.021	1.20	0.108	0.026	23.95
7 - 10	0.123	0.018	1.28	0.159	0.023	16.70

Jour N°: 13 (16 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C. V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.138	0.018	1.19	0.165	0.022	13.33
1 - 2	0.138	0.025	1.19	0.164	0.030	18.21
2 - 3	0.093	0.041	1.19	0.111	0.049	44.34
3 - 4	0.081	0.041	1.18	0.096	0.049	50.82
4 - 5	0.070	0.027	1.18	0.082	0.031	38.05
5 - 6	0.084	0.029	1.15	0.096	0.034	34.93
6 - 7	0.098	0.035	1.15	0.112	0.041	36.34
7 - 10	0.128	0.026	1.22	0.156	0.031	20.17

Jour N°: 14 (12 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.247	0.012	1.19	0.294	0.014	4.73
1 - 2	0.235	0.013	1.19	0.280	0.016	5.72
2 - 3	0.225	0.019	1.19	0.268	0.022	8.23
3 - 4	0.174	0.058	1.18	0.208	0.068	32.98
4 - 5	0.102	0.047	1.18	0.120	0.056	46.46
5 - 6	0.096	0.027	1.15	0.111	0.031	28.09
6 - 7	0.111	0.021	1.15	0.128	0.024	18.75
7 - 10	0.135	0.011	1.22	0.164	0.013	8.01

Jour N°: 15 (11 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.046	0.018	1.19	0.054	0.021	38.91
1 - 2	0.111	0.020	1.19	0.133	0.024	18.18
2 - 3	0.136	0.008	1.19	0.162	0.010	5.97
3 - 4	0.149	0.025	1.18	0.177	0.030	17.07
4 - 5	0.127	0.057	1.18	0.150	0.029	19.29
5 - 6	0.112	0.027	1.15	0.129	0.031	24.21
6 - 7	0.114	0.022	1.15	0.132	0.025	19.37
7 - 10	0.131	0.012	1.22	0.159	0.014	8.93

Jour N°: 16 (12 profils)

1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.286	0.013	1.19	0.340	0.015	4.45
1 - 2	0.274	0.015	1.19	0.326	0.018	5.46
2 - 3	0.264	0.016	1.20	0.317	0.019	5.88
3 - 4	0.247	0.029	1.22	0.302	0.035	11.74
4 - 5	0.237	0.024	1.22	0.290	0.029	10.62
5 - 6	0.216	0.051	1.21	0.261	0.062	23.73
6 - 7	0.185	0.044	1.20	0.221	0.053	23.77
7 - 10	0.152	0.035	1.22	0.185	0.043	23.00

Jour N°: 17 (12 profils)

Profondeur (cm)	H	Ec-Type	ρ (gr/cm ³)	θ	Ec-Type	C.V (%)
1	2	3	4	5	6	7
0 - 1	0.297	0.016	1.19	0.354	0.019	5.31
1 - 2	0.276	0.020	1.19	0.329	0.024	7.35
2 - 3	0.237	0.058	1.20	0.283	0.069	24.39
3 - 4	0.198	0.067	1.21	0.239	0.080	33.70
4 - 5	0.168	0.056	1.21	0.203	0.067	33.24
5 - 6	0.141	0.035	1.20	0.168	0.042	24.86
6 - 7	0.136	0.024	1.19	0.162	0.029	17.84
7 - 10	0.149	0.012	1.21	0.180	0.014	7.95

NOTES :

-
- H = Humidite massique (sans dimension; g/g)
 - ρ = Densite apparente seche
 - θ = humidite volumique (sans dimension; cm³/cm³)
 - Ec-type = Ecart type
 - C.V = Coefficient de variation

A N N E X E 5

RESULTATS DES ANALYSES

DE LA REGRESSION LINEAIRE

ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE MASSIQUE

Selon les configurations utilisees en polarisation H-H

(Tableau du coefficient de correlation)

Profondeur prise en compte (cm)	FREQUENCES (GHz) et ANGLES D'INCIDENCE (°)					
	4.5			5.3		
	10	15	20	10	15	20
0 - 1	0.797	0.853	0.947	0.778	0.902	0.872
0 - 2	0.815	0.865	0.948	0.808	0.924	0.889
0 - 3	0.834	0.880	0.947	0.837	0.936	0.901
0 - 4	0.845	0.891	0.943	0.859	0.942	0.913
0 - 5	0.844	0.895	0.930	0.868	0.934	0.920
0 - 6	0.838	0.891	0.911	0.871	0.920	0.921
0 - 7	0.830	0.884	0.891	0.870	0.906	0.918
0 - 10	0.821	0.869	0.846	0.874	0.876	0.906

A N N E X E 6

RESULTATS DES ANALYSES
DE LA REGRESSION LINEAIRE
ENTRE LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR ET L'HUMIDITE VOLUMIQUE
Selon les configurations utilisees en polarisation H-H

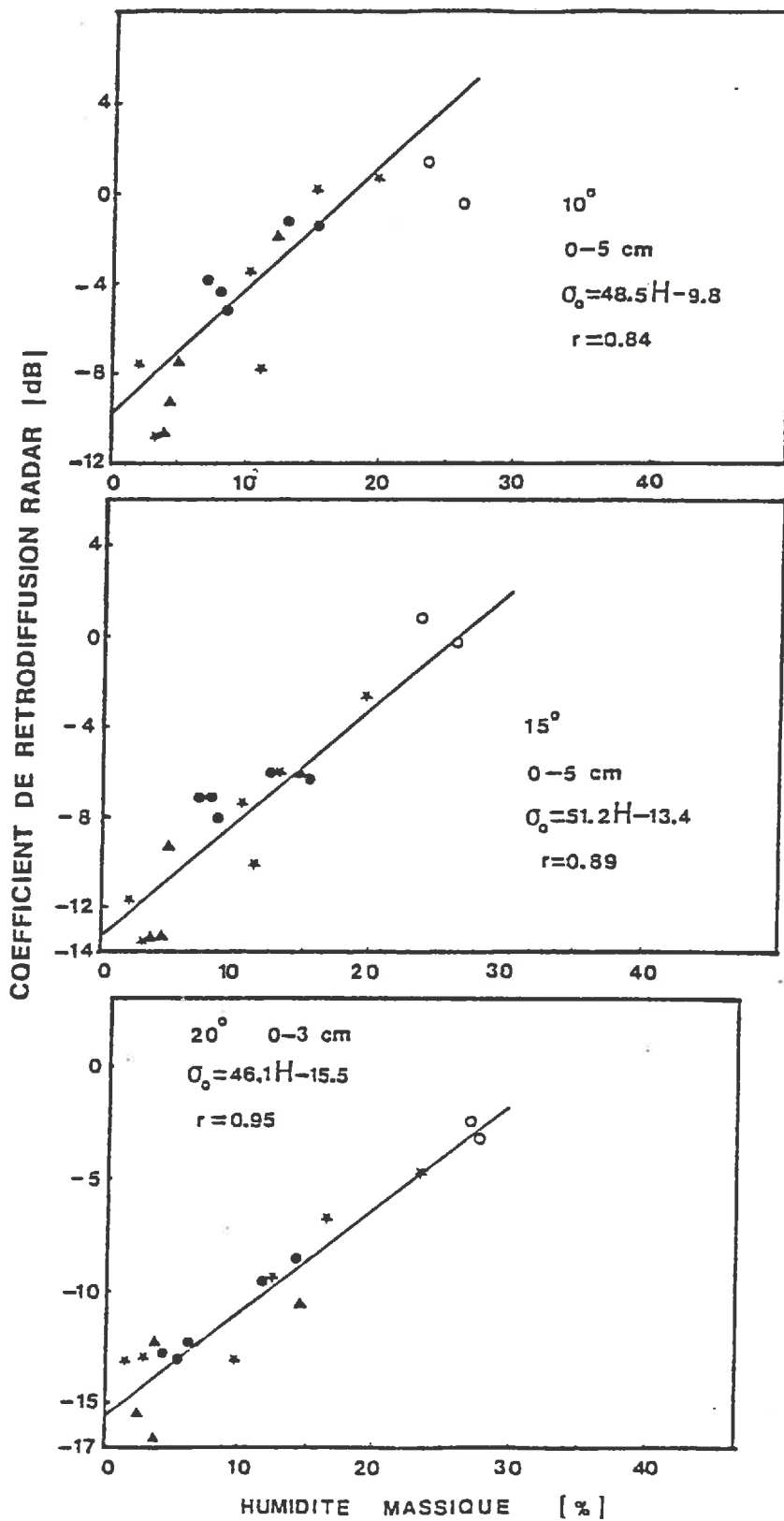
(Tableau du coefficient de correlation)

Profondeur prise en compte (cm)	FREQUENCES (GHz) et ANGLES D'INCIDENCE (°)					
	4.5			5.3		
	10	15	20	10	15	20
0 - 1	0.817	0.865	0.953	0.804	0.914	0.892
0 - 2	0.837	0.878	0.953	0.838	0.936	0.911
0 - 3	0.854	0.892	0.949	0.864	0.945	0.920
0 - 4	0.859	0.899	0.941	0.879	0.962	0.927
0 - 5	0.852	0.897	0.924	0.882	0.933	0.928
0 - 6	0.842	0.890	0.902	0.879	0.916	0.924
0 - 7	0.831	0.880	0.880	0.875	0.898	0.917
0 - 10	0.817	0.859	0.830	0.869	0.861	0.896

ANNEXE 7

Relation linéaire entre le coefficient de
rétrodiffusion Radar et l'humidité massique

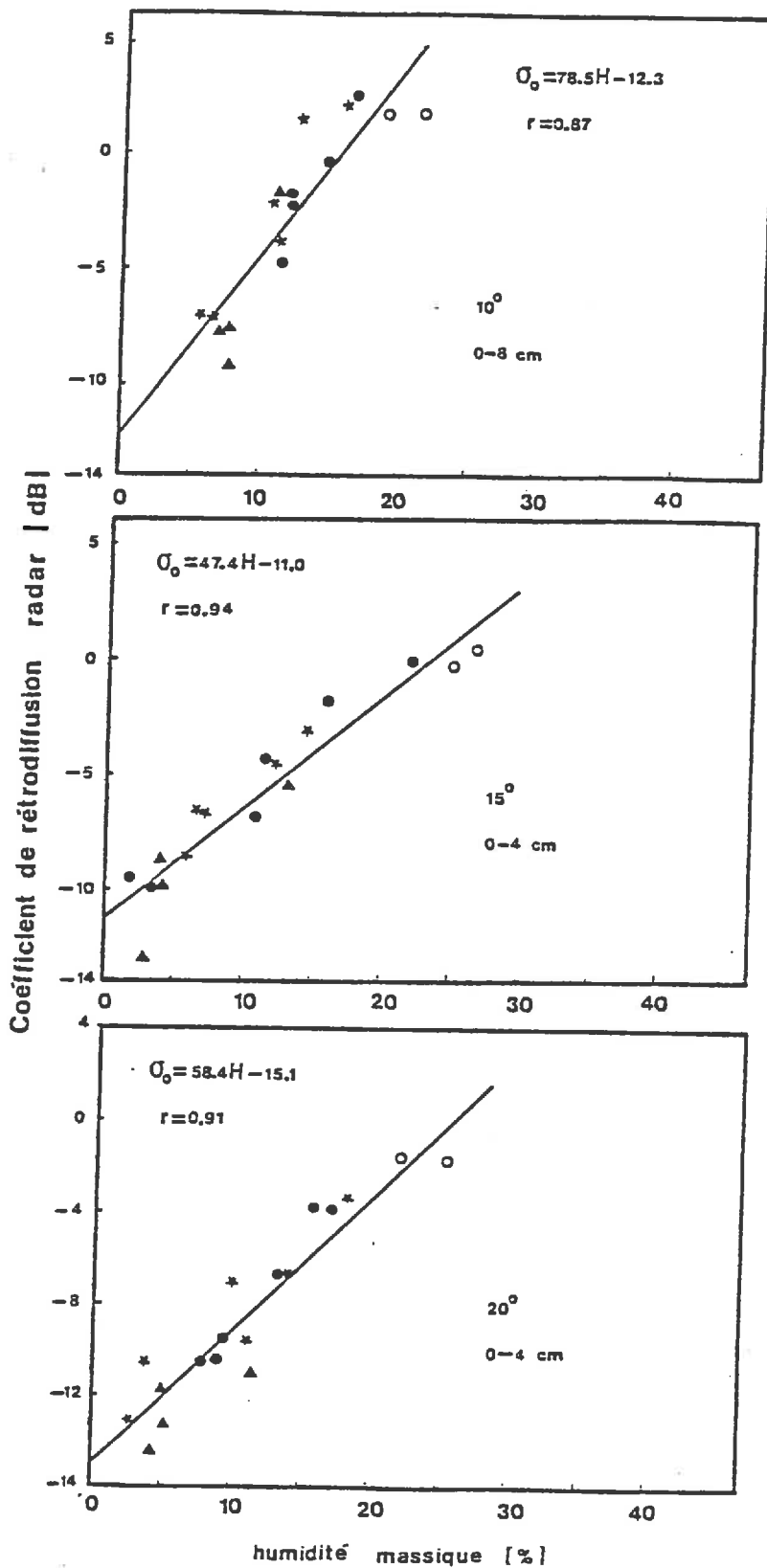
Annexe 7.A



Relation linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion Radar et l'humidité massique (cas 4,5 GHz, H-H)

- ▲ sol nu très fin
- sol nu lisse fissuré
- ★ sol nu fin
- sol nu peu rugueux ($H_{rms} = 1,29$)

Annexe 7.B



Relation linéaire entre le coefficient de rétrodiffusion Radar et l'humidité massique (cas 5,3 GHz, H-H)

- ▲ sol nu très fin
- sol nu lisse fissuré
- ★ sol nu fin
- sol nu peu rugueux ($h_{rms} = 1,29$)

ANNEXE 8

Résultats du calcul de la profondeur de pénétration
des profils hydriques expérimentaux.

 * RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 15.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	62.0	73.0	73.0	25.0	23.0	30.0	57.0	37.0	54.0	83.0	81.0	20.0	47.0	3.0	32.0	1.0	1.0
2	65.0	73.0	77.0	21.0	32.0	25.0	51.0	50.0	47.0	78.0	81.0	25.0	28.0	3.0	35.0	1.0	1.0
3	65.0	59.0	56.0	22.0	2.0	7.0	23.0	43.0	51.0	82.0	90.0	13.0	55.0	5.0	37.0	1.0	1.0
4	57.0	80.0	67.0	22.0	31.0	42.0	30.0	49.0	44.0	83.0	89.0	54.0	46.0	3.0	36.0	2.0	1.0
5	82.0	88.0	73.0	27.0	6.0	37.0	58.0	54.0	68.0	88.0	84.0	22.0	14.0	4.0	54.0	1.0	1.0
6	85.0	77.0	67.0	24.0	4.0	1.0	52.0	39.0	42.0	94.0	104.0	20.0	15.0	4.0	63.0	2.0	2.0
7	79.0	82.0	74.0	18.0	24.0	21.0	68.0	50.0	37.0	96.0	76.0	15.0	41.0	3.0	33.0	1.0	1.0
8	76.0	115.0	72.0	14.0	17.0	24.0	58.0	34.0	52.0	76.0	82.0	11.0	20.0	1.0	29.0	1.0	1.0
9	73.0	76.0	67.0	16.0	1.0	27.0	23.0	47.0	52.0	81.0	74.0	8.0	52.0	5.0	33.0	1.0	1.0
10	75.0	71.0	68.0	18.0	20.0	36.0	38.0	51.0	51.0	87.0	78.0	4.0	53.0	4.0	43.0	1.0	1.0
11	77.0	73.0	67.0	21.0	19.0	35.0	30.0	61.0	54.0	88.0	86.0	19.0	21.0	3.0	37.0	1.0	1.0
12	77.0	89.0	71.0	23.0	24.0	27.0	44.0	74.0	60.0	125.0	77.0	14.0	0.0	3.0	0.0	1.0	1.0
13	83.0	70.0	93.0	15.0	38.0	3.0	50.0	44.0	53.0	90.0	91.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	71.0	91.0	97.0	16.0	17.0	47.0	57.0	44.0	39.0	101.0	85.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	63.0	70.0	76.0	19.0	28.0	47.0	51.0	60.0	60.0	99.0	73.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	67.0	67.0	118.0	22.0	37.0	37.0	56.0	50.0	64.0	90.0	93.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	65.0	80.0	89.0	61.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	61.0	0.0	69.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MOYENNE	71.3	78.5	76.3	22.6	20.2	27.9	46.6	49.2	51.7	90.1	84.0	18.0	35.6	3.4	39.3	1.2	1.1
EC-TYPE	8.4	12.5	14.5	10.6	11.9	14.3	13.8	9.9	8.6	11.4	8.1	11.0	16.2	1.1	10.3	0.4	0.3

 * RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *
 * *****

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 20.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	61.0	72.0	73.0	23.0	22.0	29.0	56.0	36.0	53.0	82.0	81.0	19.0	46.0	2.0	31.0	1.0	1.0
2	64.0	72.0	76.0	20.0	31.0	24.0	50.0	49.0	46.0	77.0	80.0	24.0	20.0	2.0	35.0	1.0	1.0
3	64.0	58.0	55.0	21.0	1.0	7.0	22.0	42.0	50.0	81.0	89.0	12.0	54.0	4.0	36.0	1.0	1.0
4	56.0	79.0	66.0	21.0	30.0	40.0	29.0	48.0	43.0	82.0	87.0	53.0	45.0	2.0	35.0	1.0	1.0
5	81.0	87.0	72.0	25.0	6.0	36.0	57.0	53.0	67.0	87.0	83.0	21.0	13.0	3.0	52.0	1.0	1.0
6	85.0	76.0	67.0	23.0	3.0	1.0	51.0	38.0	41.0	73.0	102.0	19.0	14.0	3.0	61.0	1.0	1.0
7	78.0	81.0	73.0	17.0	23.0	20.0	67.0	49.0	36.0	94.0	75.0	14.0	39.0	2.0	32.0	1.0	1.0
8	75.0	113.0	71.0	14.0	16.0	23.0	57.0	33.0	51.0	75.0	81.0	11.0	19.0	1.0	28.0	1.0	1.0
9	72.0	74.0	66.0	15.0	1.0	26.0	22.0	46.0	51.0	80.0	73.0	7.0	51.0	4.0	32.0	1.0	1.0
10	74.0	69.0	67.0	17.0	19.0	35.0	37.0	50.0	50.0	86.0	77.0	3.0	51.0	3.0	42.0	1.0	1.0
11	77.0	71.0	67.0	20.0	19.0	33.0	29.0	60.0	53.0	86.0	85.0	17.0	19.0	3.0	35.0	1.0	1.0
12	76.0	87.0	70.0	21.0	23.0	26.0	43.0	74.0	59.0	123.0	76.0	13.0	0.0	3.0	0.0	1.0	1.0
13	83.0	68.0	91.0	14.0	37.0	3.0	49.0	43.0	52.0	88.0	89.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	70.0	90.0	95.0	15.0	16.0	46.0	56.0	43.0	38.0	99.0	84.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	62.0	69.0	75.0	18.0	27.0	45.0	50.0	59.0	59.0	97.0	72.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	66.0	66.0	115.0	21.0	36.0	36.0	55.0	49.0	63.0	89.0	91.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	64.0	78.0	87.0	59.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	60.0	0.0	68.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moyenne	70.4	77.1	75.2	21.4	19.4	26.9	45.6	48.2	50.7	88.8	82.8	17.0	33.7	2.7	38.1	1.0	1.0
EC-TYPE	8.6	12.4	13.9	10.2	11.8	13.8	13.8	10.1	8.6	11.1	7.8	11.0	16.6	0.9	10.0	0.0	0.0

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *
 *

FREQUENCE : 5.30 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 10.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

P.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
57.0	62.0	67.0	19.0	19.0	25.0	52.0	32.0	49.0	80.0	77.0	16.0	38.0	3.0	27.0	2.0	2.0	
59.0	65.0	70.0	16.0	27.0	21.0	44.0	44.0	43.0	74.0	74.0	20.0	14.0	3.0	32.0	2.0	1.0	
61.0	49.0	49.0	18.0	2.0	7.0	19.0	36.0	46.0	77.0	84.0	11.0	45.0	5.0	31.0	1.0	1.0	
52.0	75.0	60.0	17.0	25.0	33.0	25.0	44.0	38.0	80.0	81.0	37.0	35.0	3.0	30.0	2.0	1.0	
79.0	85.0	67.0	21.0	6.0	30.0	52.0	48.0	64.0	81.0	79.0	18.0	12.0	4.0	34.0	1.0	1.0	
85.0	72.0	63.0	19.0	4.0	1.0	46.0	32.0	37.0	87.0	95.0	17.0	13.0	4.0	41.0	3.0	2.0	
76.0	78.0	69.0	15.0	21.0	17.0	62.0	45.0	31.0	88.0	69.0	13.0	28.0	3.0	27.0	1.0	1.0	
72.0	98.0	66.0	12.0	15.0	20.0	51.0	29.0	48.0	72.0	75.0	10.0	16.0	2.0	24.0	1.0	1.0	
68.0	66.0	62.0	14.0	2.0	23.0	19.0	40.0	46.0	75.0	68.0	7.0	41.0	5.0	27.0	1.0	1.0	
71.0	60.0	64.0	15.0	17.0	30.0	30.0	45.0	43.0	84.0	72.0	4.0	21.0	4.0	34.0	2.0	1.0	
73.0	61.0	64.0	17.0	16.0	28.0	25.0	54.0	48.0	84.0	81.0	15.0	15.0	4.0	31.0	2.0	1.0	
73.0	75.0	65.0	18.0	20.0	22.0	37.0	69.0	55.0	117.0	70.0	12.0	0.0	4.0	0.0	1.0	2.0	
80.0	59.0	83.0	13.0	32.0	4.0	44.0	39.0	48.0	85.0	83.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
67.0	78.0	84.0	13.0	14.0	39.0	49.0	38.0	32.0	95.0	79.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
58.0	56.0	68.0	15.0	24.0	39.0	43.0	54.0	54.0	96.0	69.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
62.0	56.0	98.0	18.0	31.0	31.0	49.0	45.0	59.0	85.0	84.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
59.0	65.0	80.0	39.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
54.0	0.0	61.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DIYENNE	67.0	68.2	68.9	17.6	17.2	23.1	40.4	43.4	46.3	85.0	77.5	14.6	25.3	3.7	30.7	1.6	1.2
DIYENNE-TYPE	9.7	12.3	11.1	6.0	9.7	11.4	13.1	10.0	9.1	10.5	7.3	7.3	12.5	0.9	4.6	0.7	0.5

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *
 *

FREQUENCE : 5.30 BIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 15.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

EP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	57.0	61.0	66.0	18.0	19.0	24.0	51.0	31.0	49.0	79.0	76.0	15.0	37.0	3.0	26.0	2.0	2.0
2	58.0	64.0	70.0	16.0	26.0	20.0	44.0	44.0	42.0	73.0	74.0	19.0	14.0	3.0	32.0	2.0	1.0
3	60.0	48.0	48.0	17.0	2.0	6.0	19.0	36.0	45.0	77.0	83.0	11.0	43.0	4.0	31.0	1.0	1.0
4	51.0	74.0	60.0	17.0	25.0	33.0	25.0	43.0	38.0	79.0	81.0	30.0	33.0	3.0	29.0	2.0	1.0
5	79.0	84.0	67.0	20.0	6.0	29.0	52.0	47.0	63.0	81.0	78.0	17.0	11.0	4.0	34.0	1.0	1.0
6	84.0	72.0	63.0	19.0	4.0	1.0	45.0	32.0	36.0	86.0	94.0	16.0	12.0	4.0	40.0	2.0	2.0
7	75.0	77.0	68.0	14.0	20.0	16.0	62.0	44.0	31.0	87.0	69.0	13.0	27.0	3.0	26.0	1.0	1.0
8	72.0	97.0	65.0	12.0	14.0	20.0	51.0	28.0	47.0	72.0	74.0	9.0	16.0	2.0	23.0	1.0	1.0
9	68.0	65.0	61.0	13.0	1.0	22.0	18.0	40.0	45.0	75.0	68.0	7.0	40.0	5.0	27.0	1.0	1.0
10	70.0	59.0	63.0	14.0	16.0	29.0	30.0	44.0	42.0	83.0	71.0	4.0	19.0	4.0	34.0	1.0	1.0
11	73.0	60.0	63.0	17.0	16.0	27.0	24.0	54.0	47.0	84.0	80.0	15.0	14.0	3.0	30.0	1.0	1.0
12	73.0	74.0	64.0	17.0	20.0	22.0	36.0	69.0	54.0	116.0	70.0	12.0	0.0	3.0	0.0	1.0	2.0
13	79.0	58.0	82.0	12.0	32.0	3.0	43.0	38.0	47.0	84.0	83.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	66.0	77.0	83.0	13.0	14.0	38.0	48.0	37.0	32.0	94.0	78.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	57.0	55.0	68.0	15.0	23.0	39.0	43.0	53.0	54.0	95.0	69.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	61.0	55.0	96.0	17.0	30.0	30.0	48.0	45.0	58.0	84.0	83.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	59.0	64.0	79.0	37.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	54.0	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
YENNE	66.4	67.3	68.1	16.9	16.7	22.4	39.9	42.8	45.6	84.4	76.9	13.7	24.2	3.4	30.2	1.3	1.2
-TYPE	9.7	12.3	10.9	5.7	9.6	11.4	13.1	10.1	8.9	10.3	7.0	5.8	12.2	0.8	4.8	0.5	0.5

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DE LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *
 *

FREQUENCE : 5.30 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 20.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

EP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	56.0	60.0	66.0	17.0	18.0	23.0	51.0	30.0	48.0	79.0	76.0	15.0	36.0	2.0	26.0	1.0	1.0
2	57.0	62.0	69.0	15.0	26.0	19.0	43.0	43.0	41.0	72.0	73.0	19.0	13.0	2.0	31.0	1.0	1.0
5	60.0	47.0	47.0	16.0	1.0	6.0	18.0	35.0	44.0	76.0	83.0	10.0	41.0	4.0	30.0	1.0	1.0
1	51.0	74.0	59.0	16.0	24.0	32.0	24.0	43.0	37.0	78.0	80.0	26.0	30.0	2.0	28.0	2.0	1.0
5	78.0	84.0	66.0	20.0	5.0	29.0	51.0	46.0	62.0	80.0	78.0	17.0	10.0	3.0	33.0	1.0	1.0
1	84.0	71.0	62.0	18.0	3.0	1.0	45.0	31.0	35.0	85.0	93.0	15.0	11.0	3.0	39.0	2.0	1.0
7	75.0	76.0	67.0	14.0	20.0	16.0	61.0	44.0	30.0	86.0	68.0	12.0	25.0	2.0	26.0	1.0	1.0
1	71.0	95.0	64.0	11.0	14.0	19.0	50.0	27.0	46.0	71.0	73.0	9.0	15.0	1.0	22.0	1.0	1.0
0	67.0	64.0	60.0	12.0	1.0	22.0	18.0	39.0	44.0	74.0	67.0	6.0	37.0	4.0	26.0	1.0	1.0
1	70.0	58.0	63.0	14.0	16.0	29.0	29.0	43.0	41.0	82.0	70.0	3.0	18.0	3.0	33.0	1.0	1.0
0	72.0	59.0	62.0	16.0	15.0	26.0	24.0	53.0	47.0	83.0	80.0	14.0	14.0	3.0	29.0	1.0	1.0
0	72.0	73.0	64.0	16.0	19.0	21.0	35.0	68.0	54.0	115.0	69.0	11.0	0.0	3.0	0.0	1.0	1.0
0	79.0	57.0	81.0	11.0	31.0	3.0	43.0	37.0	46.0	84.0	82.0	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	65.0	76.0	82.0	12.0	13.0	37.0	47.0	37.0	31.0	93.0	77.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	56.0	54.0	67.0	14.0	22.0	38.0	42.0	52.0	53.0	94.0	68.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	61.0	54.0	94.0	16.0	29.0	30.0	47.0	44.0	58.0	84.0	82.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	58.0	62.0	78.0	33.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	53.0	0.0	59.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	65.8	66.2	67.2	15.9	16.1	21.9	39.2	42.0	44.8	83.5	76.2	12.7	22.7	2.7	29.4	1.2	1.0
C-TYPE	9.8	12.3	10.7	5.0	9.6	11.2	13.0	10.1	9.1	10.3	7.1	5.4	11.5	0.9	4.6	0.4	0.0

 *
 * PROFONDEUR DE PENETRATION CALCULEE *
 * A PARTIR DU MODELE ETABLI *
 * (UNITE EN MILLIMETRES) *
 *

 FREQUENCE (GHZ)

NUMERO *****

DE JOUR *****
 4.50 5.30

10.00 15.00 20.00 10.00 15.00 20.00

1	71.89	71.28	70.44	67.00	66.44	65.83
2	79.47	78.47	77.06	68.24	67.29	66.24
3	77.22	76.33	75.22	68.89	68.11	67.22
4	23.47	22.59	21.41	17.59	16.94	15.94
5	20.81	20.19	19.37	17.19	16.75	16.06
6	28.62	27.87	26.87	23.12	22.44	21.94
7	47.12	46.62	45.62	40.44	39.94	39.25
8	50.00	49.19	48.25	43.37	42.81	42.00
9	52.56	51.75	50.75	46.31	45.62	44.81
10	91.18	90.12	88.76	85.00	84.35	83.53
11	84.87	84.00	82.81	77.50	76.94	76.19
12	18.75	18.00	17.00	14.56	13.69	12.75
13	36.82	35.64	33.73	25.27	24.18	22.73
14	3.67	3.42	2.67	3.67	3.42	2.67
15	40.09	39.27	38.09	30.73	30.18	29.36
16	1.17	1.17	1.00	1.58	1.33	1.17
17	1.25	1.08	1.00	1.25	1.25	1.00

 COEFFICIENT
 DE CORRELATION 0.8206 0.8953 0.9491 0.8189 0.9165 0.9061

ANNEXE 9

Résultats du calcul de l'humidité volumique avec prise en compte de la profondeur de pénétration des profils hydriques expérimentaux.

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 15.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP.	*****																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.078	0.080	0.071	0.160	0.158	0.140	0.084	0.122	0.086	0.057	0.062	0.174	0.105	0.299	0.133	0.331	0.326
2	0.078	0.077	0.070	0.171	0.134	0.154	0.097	0.097	0.097	0.062	0.067	0.156	0.160	0.301	0.116	0.331	0.356
3	0.073	0.094	0.091	0.165	0.322	0.247	0.159	0.112	0.093	0.062	0.059	0.204	0.094	0.276	0.123	0.347	0.367
4	0.083	0.065	0.077	0.166	0.138	0.119	0.139	0.096	0.108	0.058	0.063	0.105	0.111	0.301	0.127	0.318	0.355
5	0.056	0.053	0.070	0.151	0.256	0.125	0.083	0.091	0.070	0.062	0.061	0.164	0.202	0.284	0.110	0.349	0.351
6	0.046	0.064	0.071	0.158	0.284	0.346	0.094	0.121	0.110	0.058	0.055	0.169	0.194	0.288	0.098	0.315	0.321
7	0.058	0.062	0.069	0.179	0.151	0.169	0.074	0.094	0.124	0.058	0.069	0.191	0.126	0.305	0.134	0.350	0.368
8	0.063	0.057	0.071	0.197	0.179	0.155	0.088	0.129	0.088	0.063	0.066	0.215	0.171	0.325	0.144	0.394	0.364
9	0.067	0.075	0.075	0.188	0.333	0.145	0.161	0.105	0.096	0.065	0.068	0.241	0.099	0.273	0.133	0.344	0.381
10	0.064	0.082	0.071	0.179	0.170	0.126	0.125	0.096	0.102	0.055	0.067	0.283	0.104	0.289	0.117	0.336	0.364
11	0.062	0.081	0.070	0.167	0.169	0.132	0.139	0.084	0.092	0.055	0.060	0.178	0.175	0.293	0.126	0.339	0.367
12	0.061	0.070	0.073	0.164	0.153	0.148	0.111	0.068	0.080	0.047	0.069	0.198	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.057	0.082	0.063	0.194	0.120	0.294	0.097	0.108	0.090	0.057	0.061	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.068	0.068	0.064	0.190	0.182	0.107	0.092	0.109	0.122	0.054	0.063	0.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.078	0.087	0.072	0.177	0.143	0.107	0.100	0.085	0.083	0.050	0.064	0.175	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.073	0.087	0.057	0.164	0.125	0.122	0.091	0.093	0.076	0.057	0.061	0.189	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.076	0.078	0.065	0.096	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.084	0.000	0.079	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOYENNE	0.068	0.074	0.071	0.169	0.189	0.165	0.108	0.101	0.095	0.057	0.063	0.190	0.140	0.294	0.124	0.342	0.354
EC-TYPE	0.010	0.011	0.007	0.023	0.070	0.069	0.028	0.016	0.015	0.005	0.004	0.039	0.041	0.014	0.013	0.020	0.019

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 4.50 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 20.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP. *****

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.076	0.079	0.071	0.160	0.156	0.139	0.083	0.121	0.085	0.056	0.062	0.173	0.104	0.299	0.131	0.331	0.326
2	0.076	0.077	0.069	0.171	0.133	0.153	0.096	0.096	0.095	0.061	0.066	0.155	0.178	0.301	0.116	0.331	0.356
3	0.071	0.094	0.090	0.165	0.322	0.247	0.158	0.111	0.092	0.061	0.058	0.203	0.094	0.276	0.122	0.347	0.367
4	0.082	0.064	0.076	0.166	0.137	0.117	0.137	0.094	0.107	0.056	0.061	0.105	0.111	0.301	0.126	0.318	0.355
5	0.055	0.052	0.069	0.151	0.256	0.124	0.082	0.089	0.069	0.061	0.060	0.163	0.202	0.284	0.111	0.349	0.351
6	0.046	0.063	0.071	0.157	0.284	0.346	0.093	0.120	0.108	0.057	0.054	0.168	0.193	0.288	0.098	0.315	0.321
7	0.057	0.061	0.068	0.179	0.148	0.168	0.072	0.092	0.122	0.057	0.068	0.190	0.127	0.305	0.133	0.350	0.368
8	0.061	0.056	0.070	0.197	0.177	0.154	0.087	0.127	0.086	0.061	0.065	0.215	0.171	0.325	0.143	0.394	0.364
9	0.066	0.074	0.074	0.188	0.333	0.144	0.159	0.104	0.095	0.064	0.067	0.241	0.099	0.273	0.132	0.344	0.381
10	0.063	0.081	0.070	0.178	0.168	0.125	0.124	0.095	0.101	0.054	0.066	0.283	0.106	0.289	0.117	0.336	0.364
11	0.062	0.080	0.070	0.166	0.169	0.130	0.138	0.083	0.090	0.052	0.059	0.177	0.177	0.293	0.124	0.339	0.367
12	0.060	0.069	0.072	0.163	0.151	0.147	0.110	0.068	0.078	0.046	0.068	0.197	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.057	0.080	0.062	0.194	0.119	0.294	0.095	0.106	0.089	0.055	0.060	0.181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.066	0.067	0.063	0.190	0.180	0.106	0.091	0.108	0.121	0.053	0.062	0.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.077	0.086	0.071	0.177	0.141	0.106	0.099	0.084	0.082	0.048	0.063	0.174	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.071	0.086	0.057	0.164	0.124	0.121	0.090	0.092	0.075	0.056	0.060	0.189	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.075	0.077	0.064	0.097	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.083	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

 MOYENNE 0.067 0.073 0.070 0.168 0.187 0.164 0.107 0.099 0.093 0.056 0.062 0.189 0.142 0.294 0.123 0.342 0.354
 EC-TYPE 0.010 0.012 0.007 0.023 0.070 0.070 0.028 0.016 0.015 0.005 0.004 0.039 0.042 0.014 0.012 0.020 0.019

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 5.30 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 10.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.071	0.076	0.065	0.160	0.152	0.135	0.077	0.115	0.079	0.054	0.057	0.172	0.102	0.299	0.124	0.331	0.326
2	0.070	0.073	0.063	0.169	0.127	0.149	0.087	0.089	0.090	0.058	0.061	0.151	0.184	0.301	0.108	0.331	0.356
3	0.066	0.089	0.082	0.163	0.322	0.247	0.153	0.104	0.086	0.056	0.054	0.202	0.096	0.276	0.115	0.347	0.367
4	0.076	0.059	0.070	0.164	0.132	0.111	0.130	0.087	0.100	0.054	0.056	0.120	0.120	0.301	0.120	0.318	0.355
5	0.052	0.049	0.063	0.148	0.256	0.120	0.075	0.082	0.064	0.057	0.056	0.158	0.202	0.284	0.109	0.349	0.351
6	0.046	0.058	0.065	0.155	0.284	0.346	0.086	0.112	0.102	0.052	0.050	0.165	0.192	0.288	0.100	0.315	0.321
7	0.054	0.058	0.063	0.178	0.143	0.164	0.066	0.086	0.115	0.052	0.061	0.188	0.131	0.305	0.126	0.350	0.368
8	0.058	0.053	0.065	0.196	0.174	0.149	0.080	0.121	0.081	0.058	0.060	0.214	0.170	0.325	0.138	0.394	0.364
9	0.060	0.069	0.069	0.187	0.333	0.139	0.154	0.097	0.090	0.059	0.061	0.241	0.105	0.273	0.125	0.344	0.381
10	0.059	0.076	0.065	0.177	0.163	0.119	0.117	0.089	0.096	0.052	0.061	0.283	0.157	0.289	0.110	0.336	0.364
11	0.057	0.076	0.065	0.164	0.163	0.125	0.132	0.075	0.084	0.050	0.055	0.175	0.178	0.293	0.118	0.339	0.367
12	0.056	0.065	0.066	0.161	0.144	0.142	0.104	0.063	0.072	0.044	0.063	0.196	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.054	0.074	0.057	0.193	0.111	0.294	0.088	0.101	0.083	0.052	0.055	0.178	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.062	0.063	0.058	0.189	0.176	0.099	0.084	0.101	0.114	0.050	0.057	0.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.072	0.083	0.065	0.176	0.137	0.099	0.091	0.079	0.075	0.048	0.058	0.172	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.066	0.082	0.054	0.163	0.118	0.113	0.084	0.085	0.069	0.052	0.055	0.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.068	0.073	0.059	0.113	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.076	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOYENNE	0.062	0.069	0.065	0.168	0.184	0.159	0.101	0.093	0.088	0.053	0.058	0.189	0.149	0.294	0.118	0.342	0.354
EC-TYPE	0.009	0.011	0.006	0.020	0.073	0.072	0.028	0.016	0.015	0.004	0.003	0.038	0.039	0.014	0.011	0.020	0.019

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 5.30 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 15.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP. *****

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

1	0.071	0.075	0.064	0.160	0.152	0.134	0.075	0.114	0.079	0.052	0.056	0.171	0.102	0.299	0.122	0.331	0.326
2	0.069	0.073	0.063	0.169	0.126	0.148	0.087	0.089	0.088	0.057	0.061	0.150	0.184	0.301	0.108	0.331	0.356
3	0.065	0.088	0.081	0.162	0.322	0.246	0.153	0.104	0.084	0.056	0.053	0.202	0.098	0.276	0.115	0.347	0.367
4	0.074	0.058	0.070	0.164	0.132	0.111	0.130	0.086	0.100	0.053	0.056	0.129	0.123	0.301	0.118	0.318	0.355
5	0.052	0.048	0.063	0.148	0.256	0.119	0.075	0.081	0.063	0.057	0.055	0.157	0.201	0.284	0.109	0.349	0.351
6	0.044	0.058	0.065	0.155	0.284	0.346	0.085	0.112	0.100	0.051	0.050	0.163	0.192	0.288	0.099	0.315	0.321
7	0.053	0.057	0.062	0.177	0.140	0.163	0.066	0.084	0.115	0.052	0.061	0.188	0.131	0.305	0.125	0.350	0.368
8	0.058	0.053	0.064	0.196	0.172	0.149	0.080	0.119	0.079	0.058	0.059	0.214	0.170	0.325	0.136	0.394	0.364
9	0.060	0.068	0.068	0.187	0.333	0.137	0.151	0.097	0.089	0.059	0.061	0.241	0.106	0.273	0.125	0.344	0.381
10	0.058	0.076	0.064	0.177	0.161	0.117	0.117	0.087	0.095	0.051	0.060	0.283	0.158	0.289	0.110	0.336	0.364
11	0.057	0.075	0.064	0.164	0.163	0.124	0.130	0.075	0.083	0.050	0.054	0.175	0.177	0.293	0.117	0.339	0.367
12	0.056	0.064	0.065	0.160	0.144	0.142	0.103	0.063	0.071	0.044	0.063	0.196	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.053	0.074	0.057	0.193	0.111	0.294	0.086	0.100	0.082	0.052	0.055	0.178	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.061	0.062	0.058	0.189	0.176	0.098	0.083	0.100	0.114	0.050	0.057	0.217	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.071	0.083	0.065	0.176	0.135	0.099	0.091	0.078	0.075	0.047	0.058	0.171	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.065	0.081	0.054	0.162	0.117	0.111	0.083	0.085	0.068	0.051	0.054	0.187	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.068	0.073	0.059	0.115	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.076	0.000	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

MOYENNE 0.062 0.069 0.064 0.168 0.183 0.159 0.100 0.092 0.087 0.052 0.057 0.189 0.149 0.294 0.117 0.342 0.354
 EC-TYPE 0.009 0.011 0.006 0.019 0.073 0.072 0.028 0.015 0.015 0.004 0.004 0.037 0.038 0.014 0.010 0.020 0.019

 *
 * RESULTATS DU CALCUL DES HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNEES *
 * CORRESPONDANT A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 * (SANS DIMENSION) *
 *

FREQUENCE : 5.30 GIGAHERTZ
 ANGLE D'INCIDENCE : 20.00 DEGRES
 POLARISATION : HORIZONTALE-HORIZONTALE

 NUMERO DU JOUR

REP. *****

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.069	0.075	0.064	0.159	0.150	0.133	0.075	0.112	0.077	0.052	0.056	0.171	0.102	0.299	0.122	0.331	0.326
2	0.067	0.072	0.063	0.168	0.126	0.147	0.086	0.088	0.086	0.055	0.060	0.150	0.184	0.301	0.106	0.331	0.356
3	0.065	0.087	0.079	0.161	0.322	0.246	0.151	0.102	0.083	0.055	0.053	0.201	0.100	0.276	0.113	0.347	0.367
4	0.074	0.058	0.069	0.163	0.131	0.110	0.128	0.086	0.098	0.052	0.055	0.131	0.129	0.301	0.117	0.318	0.355
5	0.051	0.048	0.062	0.148	0.256	0.119	0.073	0.079	0.061	0.056	0.055	0.157	0.201	0.284	0.108	0.349	0.351
6	0.044	0.057	0.063	0.154	0.284	0.346	0.085	0.111	0.098	0.050	0.049	0.161	0.191	0.288	0.099	0.315	0.321
7	0.053	0.056	0.061	0.177	0.140	0.163	0.064	0.084	0.113	0.051	0.060	0.187	0.132	0.305	0.125	0.350	0.368
8	0.056	0.052	0.062	0.195	0.172	0.147	0.079	0.117	0.077	0.056	0.058	0.214	0.170	0.325	0.135	0.394	0.364
9	0.059	0.068	0.067	0.186	0.333	0.137	0.151	0.096	0.088	0.058	0.060	0.241	0.110	0.273	0.124	0.344	0.381
10	0.058	0.075	0.064	0.177	0.161	0.117	0.116	0.086	0.094	0.050	0.059	0.283	0.159	0.289	0.109	0.336	0.364
11	0.056	0.075	0.062	0.163	0.160	0.122	0.130	0.074	0.083	0.049	0.054	0.174	0.177	0.293	0.115	0.339	0.367
12	0.055	0.064	0.065	0.159	0.142	0.141	0.102	0.061	0.071	0.044	0.062	0.195	0.000	0.295	0.000	0.349	0.330
13	0.053	0.073	0.056	0.192	0.109	0.294	0.086	0.099	0.080	0.052	0.054	0.176	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.060	0.062	0.057	0.189	0.174	0.097	0.082	0.100	0.113	0.049	0.056	0.216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.069	0.083	0.064	0.175	0.133	0.098	0.090	0.077	0.074	0.046	0.057	0.170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.065	0.081	0.053	0.161	0.116	0.111	0.082	0.084	0.068	0.051	0.054	0.186	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.067	0.073	0.058	0.120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.075	0.000	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MOYENNE	0.061	0.068	0.063	0.168	0.182	0.158	0.099	0.091	0.085	0.052	0.056	0.188	0.150	0.294	0.116	0.342	0.354
EC-TYPE	0.009	0.011	0.006	0.019	0.074	0.073	0.028	0.015	0.015	0.004	0.003	0.037	0.037	0.014	0.010	0.020	0.019

 *
 * HUMIDITES VOLUMIQUES MOYENNES CORRESPONDANT *
 * A LA PROFONDEUR DE PENETRATION *
 *

 FREQUENCE (GHZ)

NUMERO	4.50			5.30		
	10.00	15.00	20.00	10.00	15.00	20.00
E JOUR						
1	0.0688	0.0680	0.0669	0.0625	0.0617	0.0609
2	0.0746	0.0741	0.0733	0.0692	0.0686	0.0681
3	0.0719	0.0711	0.0702	0.0649	0.0642	0.0634
4	0.1689	0.1686	0.1683	0.1680	0.1678	0.1676
5	0.1874	0.1886	0.1875	0.1835	0.1827	0.1818
6	0.1654	0.1647	0.1637	0.1595	0.1587	0.1580
7	0.1089	0.1084	0.1072	0.1006	0.0998	0.0989
8	0.1016	0.1006	0.0994	0.0930	0.0921	0.0910
9	0.0957	0.0947	0.0934	0.0875	0.0865	0.0853
10	0.0583	0.0574	0.0563	0.0530	0.0524	0.0516
11	0.0643	0.0635	0.0625	0.0576	0.0570	0.0563
12	0.1906	0.1901	0.1895	0.1888	0.1889	0.1883
13	0.1393	0.1401	0.1420	0.1488	0.1494	0.1504
14	0.2940	0.2940	0.2940	0.2940	0.2940	0.2940
15	0.1242	0.1237	0.1229	0.1176	0.1168	0.1156
16	0.3418	0.3418	0.3418	0.3418	0.3418	0.3418
17	0.3540	0.3540	0.3540	0.3540	0.3540	0.3540
EFFICIENT	0.8206	0.8953	0.9491	0.8189	0.9165	0.9061
CORRELATION						