

TH - EA3

Université de Caen  
D.E.A d'Instrumentation et Commande

Rapport de stage  
de  
Louis RAKOTOARIVONY

Sujet du stage :

**EFFET DE LA PERIODICITE D'UNE SURFACE  
SUR LE SIGNAL RETRODIFFUSE  
EN  
HYPERFREQUENCE**

Responsable du stage:

O. TACONET

**Centre National d'Etudes des Télécommunications  
(C.N.E.T/C.R.P.E)**

*23 mars -15 septembre 1992*

Je tiens d'abord à remercier O.Taconet d'avoir dirigé ce stage avec rigueur et patience, et qui a toujours été présente pour m'apporter des aides et conseils.

Je remercie Mr Vidal Madjar de m'avoir accueilli dans son Département, et de m'avoir permis d'effectuer ce stage dans les meilleurs conditions.

Je remercie également M.Benallegue qui m'a fait profité de ses travaux, ainsi que tous les autres membres du laboratoire pour des raisons diverses.

# Plan

1. Introduction.....	01
2. Présentation des modèles de retrodiffusion .....	04
2.1 Rappel sur les surfaces aléatoires .....	04
2.1.1 Surface aléatoire.....	04
2.1.2 Rugosité d'une surface.....	04
2.2 Retrodiffusion d'une onde électromagnétique sur une surface aléatoire plane .....	06
2.2.1 Approximation de la phase stationnaire.....	07
2.2.2 Approximation scalaire des champs.....	09
2.3 Retrodiffusion d'une onde électromagnétique sur une surface aléatoire quasi-periodique .....	11
2.3.1 Intégration incohérente (Ulaby - Le Toan).....	11
2.3.2 Modèle de Kong.....	12
3. Interpretation et comparaison expérimentale.....	19
3.1 Determination des paramètres à petite échelle.....	19
3.2 Determination des paramètres à grande échelle....	22
3.2.1 determination de la frequence centrale .....	22
3.2.2 determination de $l_x$ et $\sigma_x$ .....	22
3.3 Comparaison expérimentale.....	24
4. Perspectives et conclusion.....	29

## 1. INTRODUCTION

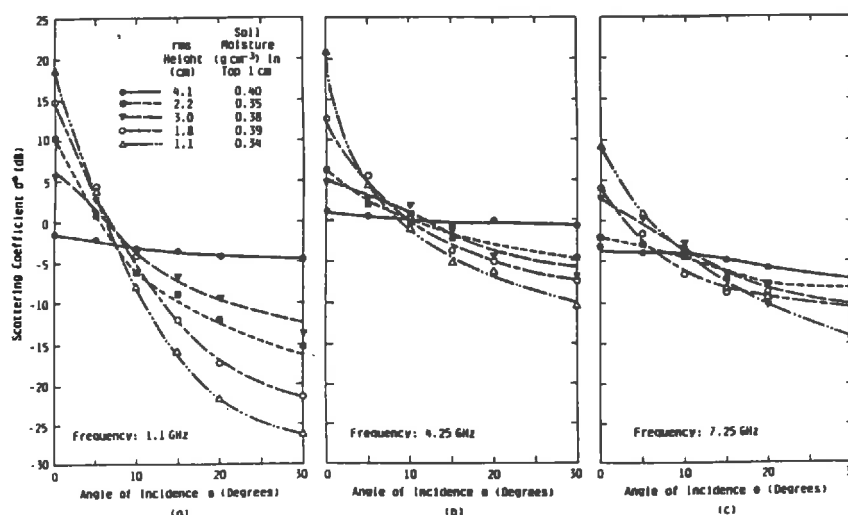
Ce stage a été effectué au laboratoire du CRPE ( Centre de Recherche en Physique de l'Environnement. ) du CNET (Centre National des Etudes des Télécommunication ). Il s'est déroulé du 23 mars 1992 au 15 septembre 1992.

Le CRPE est un laboratoire qui développe des instruments radars en vue de définir les configurations des futurs radars spatiaux. Ces radars fonctionnent dans les ondes centimétriques, et sont utilisés pour l'observation des surfaces continentales. Le CRPE dispose d'un radar (ERASME: Etude Radar des Sols et de la MER) qui fonctionne en bande C (5 GHz) et en bande X (9 GHz), et qui permet de mesurer la puissance renvoyée par le sol en polarisation HH et VV.

Une des applications des radars est d'établir une cartographie de l'humidité du sol. En effet l'onde réagit avec les molécules d'eau, et la puissance reçue par le radar est fonction de la teneur en eau de la surface observée.

La grandeur mesurée par le radar est la section efficace  $\sigma^{\circ}$  (cf p8). Sur sol nu, cette grandeur dépend non seulement de l'humidité du sol, mais également de la rugosité de la surface.

Les figures suivantes montrent l'évolution de la section efficace radar  $\sigma^{\circ}$  en fonction de l'angle d'observation  $\theta$  sur différents types de rugosité et pour une large gamme de fréquence(1 à 8 GHz).[6]



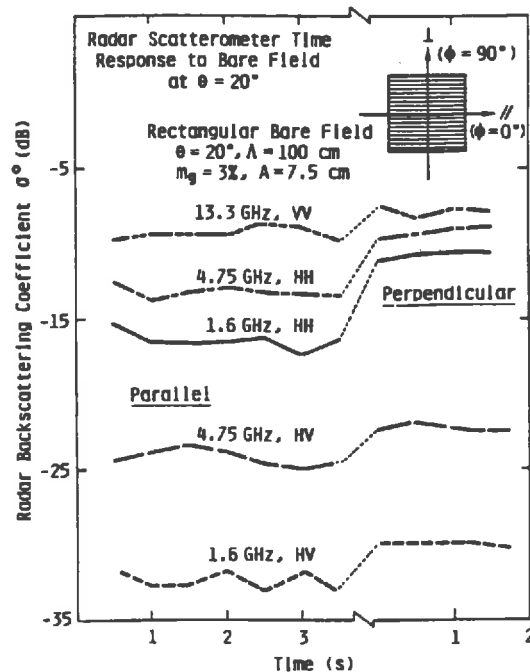
Angular response of the scattering coefficient for five fields with high levels of moisture content at (a) 1.1 GHz, (b) 4.25 GHz, and (c) 7.25 GHz.

L'énergie retrodiffusée diminue très rapidement avec l'angle d'incidence pour des surfaces de rugosité décroissante. Néanmoins, on remarque, pour une même humidité du sol, une zone étroite d'intersection de ces courbes, correspondant à un angle de visée faible (entre 10° et 20°).

Ainsi, une configuration radar simple (monofréquence, angle d'incidence faible proche de  $15^\circ$ ) a été définie pour l'évaluation de l'humidité superficielle du sol, minimisant l'influence de la rugosité.

Une configuration aussi simple ne peut être appliquée lorsque la surface n'est pas plane. Ceci est le cas des champs agricoles où les sillons présentent une périodicité assez marquée suivant une direction donnée. En effet, des mesures expérimentales ont montré que la section efficace radar n'est pas la même suivant que la visée est parallèle ou perpendiculaire à la direction des sillons. Ce phénomène a été également observé lors de l'expérience Orgeval\_89.

Pour illustrer ceci, les figures suivantes montrent l'évolution dans le temps de la section efficace radar  $\sigma^\circ$ , lorsque le radar survole un champs expérimental suivant une direction parallèle ou perpendiculaire aux sillons. [6]

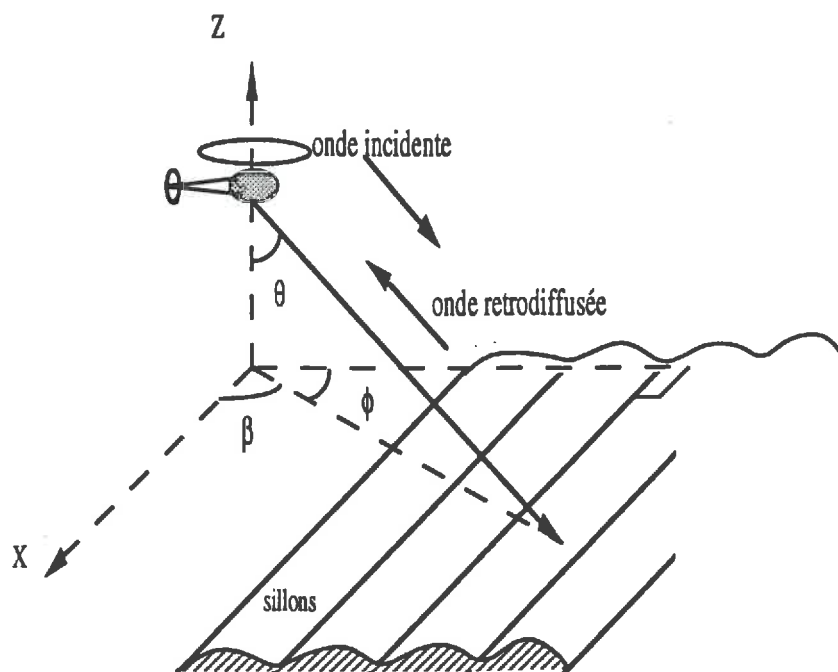


Ce travail est une étape préliminaire à la définition d'algorithme radar multi-configuration permettant d'extraire par inversion de la section efficace radar, les caractéristiques importantes du sol. Les buts du stage sont les suivants:

- construire numériquement un modèle de retrodiffusion sur ce type de surface en s'appuyant sur un modèle analytique proposé par une équipe américaine (Pr Kong du Massachusetts Institute of Technology)
- quantifier l'effet des paramètres du sol (rugosité, direction de la visée par rapport à la structure régulière).

Dans un premier temps, on présente des modèles de rétrodiffusion d'une onde électromagnétique sur une surface aléatoire. Notre problème est basé sur la diffusion d'une onde électromagnétique. Après, on fera des simulations avec ces modèles, en utilisant les données radar et de terrain, acquises pendant la campagne Orgeval\_89.

Pour situer le problème on considère le schéma suivant:



Direction de la visée par rapport  
à la direction des sillons

Le problème est de déterminer le signal retrodiffusé (par l'intermédiaire de la section efficace) en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ , et l'angle de visée  $\phi$  ou  $\beta$ , par rapport à la direction des sillons pour une surface aléatoire à structure périodique.

## 2. PRESENTATION DES MODELES DE RETRODIFFUSION

### 2.1 RAPPEL SUR LES SURFACES ALEATOIRES [4]

Le problème de la diffusion et de la transmission d'une onde électromagnétique plane sur une surface plane peut se résoudre d'une manière exacte. Ceci n'est pas le cas quand la surface est irrégulière ou aléatoire.

Avant d'aborder le problème de diffusion d'une onde électromagnétique par une surface aléatoire, il est nécessaire de définir les paramètres statistiques d'une telle surface et de sa rugosité. En effet, la nature de l'onde diffusée est étroitement liée à la rugosité de la surface.

#### 2.1.1 Surface aléatoire

Une surface est définie par sa hauteur  $z$  au dessus d'un plan de référence, en fonction des autres coordonnées d'espace.

$$z = S(x,y)$$

Pour une surface aléatoire,  $z$  est une variable aléatoire. En télédétection les paramètres utilisés sont les suivants:

- Ecart type des hauteurs :  $\sigma^2 = \langle (z - \langle z \rangle)^2 \rangle$
- Fonction de corrélation :  $\rho(r) = \rho(M_1 M_2) = \frac{\langle (z_1 - \langle z \rangle)(z_2 - \langle z \rangle) \rangle}{\sigma^2}$

La longueur de corrélation est la distance  $l$  à partir de laquelle, la fonction de corrélation cesse de décroître rapidement. A partir de cette distance, on peut dire que les points sont indépendants. Souvent on peut approximer la fonction de corrélation par une gaussienne. On a alors :

$$\rho(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{l^2}\right) \quad \text{où } l \text{ est la longueur de corrélation}$$

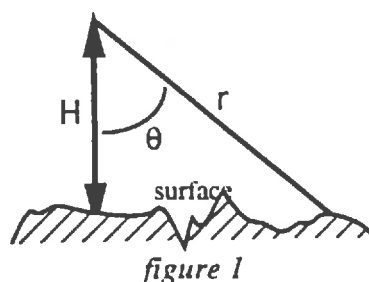
- Valeur quadratique moyenne des pentes:  $m^2 = \sigma^2 \rho''(0)$
- Rayon de courbure moyen:  $R_c = \frac{l^2}{2.76 \sigma}$

Une fois qu'on a défini ces paramètres passons à la rugosité.

#### 2.1.2 Rugosité d'une surface aléatoire

La notion de rugosité est liée à la longueur d'onde incidente, et à l'angle d'observation. En effet si on a une variation de la hauteur  $\Delta H = h$ , elle entraîne une différence de marche de  $\Delta r = 2h \cos\theta$ . La différence de phase est alors égale à

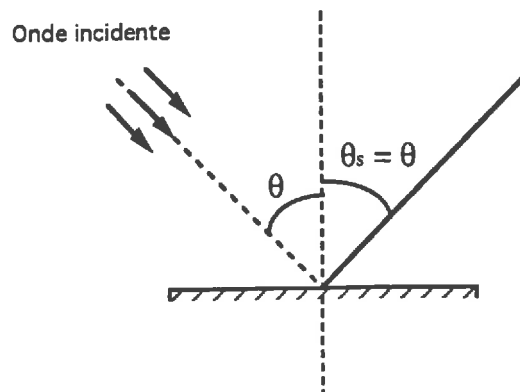
$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos\theta$$



Si  $\Delta\psi$  est petit, alors on peut avoir une interférence constructive, en revanche si  $\Delta\psi=\pi$ , on a une interférence destructive.

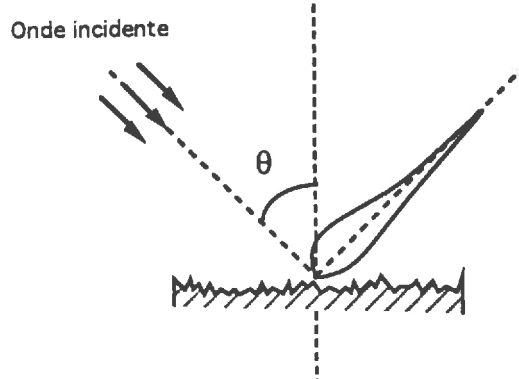
Dans le premier cas, on a un comportement spéculaire ( surface lisse ), et dans le deuxième cas on a un comportement non cohérent ( surface rugueuse ).

Le critère de Rayleigh fixe une limite entre ces deux cas extrêmes par  $\Delta\psi=\pi/2$ , et pour une surface aléatoire, on remplace  $h$  par  $\sigma$  (écart type des hauteurs). Une surface est rugueuse si  $(2k\sigma \cos\theta)^2 > 10$ . ( on a posé  $k=\frac{2\pi}{\lambda}$  )



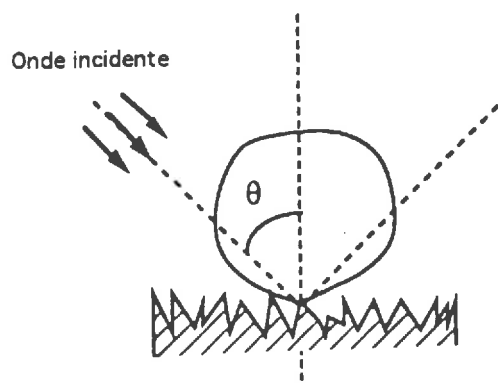
Surface lisse :

L'onde est réfléchi  
dans la direction  
spéculaire  $\theta_s = \theta$ .  
Elle est totalement  
cohérente



Surface peu rugueuse:

Une grande partie de  
l'onde est diffusée  
dans la direction  
spéculaire  $\theta_s$   
correspond à la partie  
cohérente.



Surface très rugueuse:

L'onde est diffusée  
dans toutes les  
directions. Elle est  
entièrement  
incohérente.

figure 2



## 2.2 RETRODIFFUSION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE SUR UNE SURFACE ALEATOIRE PLANE

La diffusion d'une onde électromagnétique par une surface aléatoire n'est pas un problème facile. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de faire des approximations. Les modèles qu'on va présenter ici utilisent tous l'approximation de Kirchoff, qui est aussi l'approximation de l'optique physique.

Une fois qu'on a fait cette approximation, il est nécessaire de faire des approximations supplémentaires selon les modèles, pour obtenir une expression analytique qu'on peut utiliser. Mais avant de parler des modèles, nous explicitons la signification de l'approximation de Kirchoff.

D'une manière générale, l'expression du champ électromagnétique diffusé est obtenue à l'aide du théorème de Green et s'écrit:

$$(1) \quad \mathbf{E}^s = K \mathbf{n}_s \times \int [\mathbf{n}_1 \times \mathbf{E} - \eta_s \mathbf{n}_s \times (\mathbf{n}_1 \times \mathbf{H})] \exp(i k_s \mathbf{n}_s \cdot \mathbf{r}') dS'$$

Les vecteurs sont écrits en gras, et les produits vectoriels sont notés  $\times$ .

- $K = \frac{-i k_s}{4\pi R_0} \exp(i k_s R_0)$  : terme de propagation
- $\mathbf{n}_s$  : vecteur unitaire dans la direction diffusée
- $\mathbf{n}_1$  : vecteur unitaire normale locale à l'interface du milieu dans lequel la diffusion est considérée.
- $\eta_s$  : impédance intrinsèque du milieu dans lequel est évalué  $\mathbf{E}^s$
- $k_s$  : nombre d'onde du milieu dans lequel est évalué  $\mathbf{E}^s$
- $R_0$  : distance entre le centre de l'aire illuminée et l'observateur
- $\mathbf{E}, \mathbf{H}$  : champs électrique et magnétique totaux sur l'interface

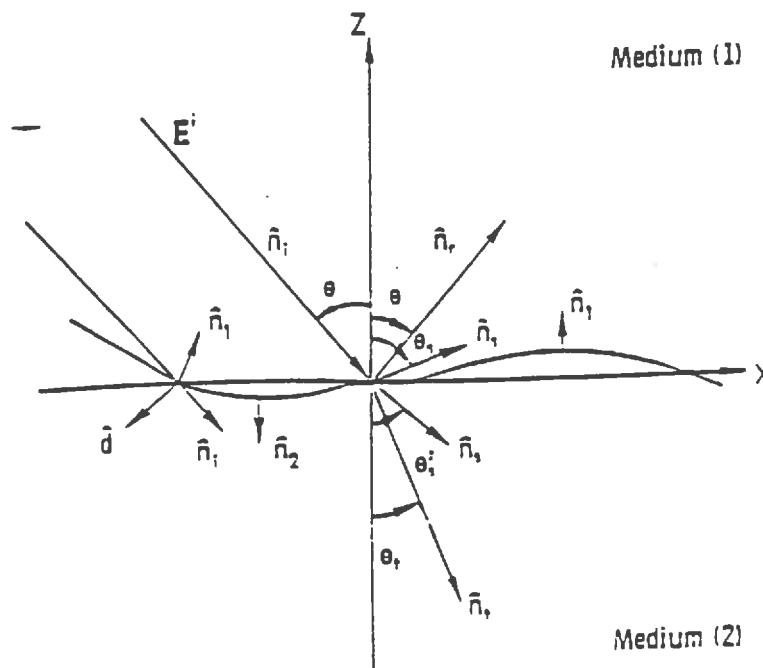


figure 3

L'approximation de kirchoff consiste à faire les deux hypothèses suivantes:

- on suppose que les dimensions horizontales de la rugosité de la surface sont grandes devant la longueur d'onde, c'est à dire que  $(l > \lambda)$  ou  $(kl > 6)$  ( $l$  est la longueur de corrélation)

- on suppose que la surface est légèrement ondulée, et tout se passe comme si l'onde interagit avec une surface réduite localement à son plan tangent. Ceci revient à dire que le rayon de courbure  $R_c$  est faible devant la longueur d'onde  $\lambda$  ( $l^2 > 2.76\sigma\lambda$ )

Cette approximation permet d'introduire les coefficients de Fresnel pour le calcul des champs tangents  $n_1 \times E$  et  $n_1 \times H$  réfléchis et transmis. Les champs réfléchis localement ont été calculés [5] dont les résultats sont les suivants:

$$(2) \quad n_1 \times E = [(1+R_{\perp})(a \cdot t)(n_1 \times t) - (1-R_{\parallel})(n_1 \cdot n_i)(a \cdot d)t] E_0 e^{-i k_1 n_i \cdot r'}$$

$$(2') \quad \eta_1 n_1 \times H = - [(1-R_{\perp})(n_1 \cdot n_i)(a \cdot t)t + (1+R_{\parallel})(a \cdot d)(n_1 \times t)] E_0 e^{-i k_1 n_i \cdot r'}$$

avec :

$a$  : polarisation de l'onde incidente  $E_i = a E_0 e^{-i k_1 n_i \cdot r}$

$R_{\perp}$  et  $R_{\parallel}$  : coefficient de fresnel pour une polarisation horizontale et verticale. dans le repère local  $n_i, t, d$

$$t = \frac{n_i \times n_1}{|n_i \times n_1|}; \quad d = n_i \times t \quad ; \quad n_i = t \times d$$

$k_1$  nombre d'onde dans le milieu 1

On peut remplacer les champs tangents de la formule (1), ce qui donne l'expression du champ diffusé dans le milieu 1 :

$$(3) \quad E^s = K n_s \times \int [n_1 \times E - \eta_s n_s \times (n_1 \times H)] e^{iQ} dS'$$

$$(4) \quad Q = k_1 (n_s - n_i) \cdot r' = x'q_x + y'q_y + z'q_z$$

Maintenant qu'on a l'expression du champ diffusé, il est encore nécessaire de faire des approximations supplémentaires pour arriver à des expressions analytiques utilisables.

### 2.2.1 Approximation de la phase stationnaire

L'approximation de la phase stationnaire est applicable aux surfaces très rugueuses c'est à dire avec le critère de Rayleigh  $(2k\sigma \cos\theta)^2 > 10$ . satisfait.

On suppose dans cette approximation que la surface est telle qu'on a un très grand nombre de points où le plan tangent donne une réflexion spéculaire. Dans le cas de la rétrodiffusion, on peut ne prendre en compte que les facettes qui sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde incidente. ( en rétrodiffusion, la source et l'observateur sont au même endroit )

- $\eta_1$  et  $\eta_s$  sont les impédance du milieu où on observe le champs diffusé et du milieu de l'onde incidente.
- p, q : polarisation de l' onde incidente et de l'onde diffusée.  
 $\bar{H}$  : polarisation perpendiculaire au plan d'incidence  
 $\bar{V}$  : polarisation parallèle au plan d'incidence

D' après les formules (6) (7) et (8) le calcul de la section efficace revient à calculer  $\langle \sigma \rangle$   
 Le calcul de cette moyenne nécessite encore de faire les hypothèses suivantes:

- La distribution des hauteurs de la surface est un processus aléatoire gaussien et stationnaire, et la fonction de corrélation est isotrope( ne dépend que de r ). Elle peut être approximée par

$$\rho(r) = 1 + \frac{r^2 \rho''(0)}{2}$$

Le calcul a été développé par Ulaby [6] et les résultats sont les suivants dans le cas de la retrodiffusion:

$$(9) \quad \sigma_{pq} = 0$$

$$(9') \quad \sigma_{pp} = \frac{R_{pp}(0)^2}{2m^2 \cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{2m}\right)$$

$\theta$  : angle d' observation  
 $R_{pp}(0)$  : coefficient de fresnel au nadir  
 $m$  : écart type des pentes.

L' approximation de la phase stationnaire est valable avec des surfaces très rugueuses  $(2k\sigma \cos\theta)^2 > 10$ . A fréquence et angle d'observation donnés, on a une diffusion purement incohérente si l'écart type des pentes  $\sigma$  est grand

Quand  $2k\sigma \cos\theta$  décroît, on voit apparaître une composante cohérente, et à la limite si  $\sigma$  tend vers 0, on a une réflexion purement cohérente.

Pour examiner le comportement de la section efficace dans cette zone de transition, on applique d'autres approximations que celles de la phase stationnaire.

### 2.2.2 Approximation scalaire des champs

Avec ce modèle on a une diffusion cohérente et incohérente, mais il est valable seulement avec des surfaces peu rugueuses à faible variation des pentes.

Ulaby [6] a fixé cette faible variation des pentes à  $m < 0.25$  ( $m$  est l' écart type des pentes). Ceci revient à dire que la normale locale  $n_l$  et la normale par rapport à l'observation  $(\theta=0)$ , ne sont pas trop inclinées l' une par rapport à l' autre.

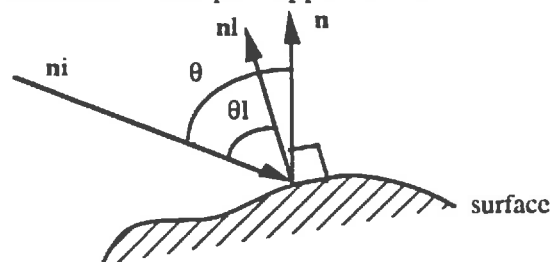


figure 5

$n$  est la normale à la surface aléatoire  
 $n_l$  est la normale locale au point considéré

Ces hypothèses permettent de faire des approximations dans le calcul de la section efficace. En effet l'équation (3) montre que le champ diffusé peut s'écrire:

$$(10) \quad E^s = KE_0 \int U_{pq} e^{iQ} dS'$$

avec  $U_{pq}$  fonction des champs tangents et tenant compte des polarisations.  $U_{pq}$  est alors fonction des coefficients de fresnel  $R_{\perp}$  et  $R_{//}$ , or ces coefficients sont fonctions de  $\theta_1$ . L'approximation précédente permet alors de faire un développement de Taylor des coefficients de Fresnel autour de la pente moyenne et on a :

$$(11) \quad R(\theta_1) = R_0(\theta) + R_1(\theta) \left( \frac{dz}{dx} \cos\phi + \frac{dz}{dy} \sin\phi \right)$$

On montre alors que  $U_{pq}$  peut se mettre sous la forme :

$$(12) \quad U_{pq} = a_0 + a_1 \frac{dz}{dx} + a_2 \frac{dz}{dy}$$

Pour calculer la section efficace il faut calculer

$$(13) \quad I_1 = \int \int \langle U_{pq} U_{pq}^* \exp[ i k l (\mathbf{n}_s - \mathbf{n}_i)(\mathbf{r}' - \mathbf{r}'') ] \rangle dS' dS''$$

$U_{pq} U_{pq}^*$  peut être développé jusqu'au premier ordre :

$$(14) \quad U_{pq} U_{pq}^* = a_0 a_0^* + a_0 a_1^* \frac{dz}{dx} + a_1^* a_0 \frac{dz}{dx} + a_0 a_2^* \frac{dz}{dy} + a_0^* a_2 \frac{dz}{dy}$$

Ceci montre que la section efficace s'écrit sous la forme :

$$(15) \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_{\text{pente}}$$

$\sigma_1$  correspond au terme  $a_0 a_0^*$ . Ce terme comprend les parties cohérente et incohérente. Ulabay [6] montre que la partie cohérente n'existe que pour un angle d'observation nul.

$\sigma_{\text{pente}}$  correspond aux termes de pente et les résultats du calcul sont les suivants:

$$(16) \quad \sigma_{pp} = \sigma_{\text{coh}} + \sigma_{\text{inc}} + \sigma_{\text{pente}}$$

$$(16') \quad \sigma_{pq} = 0$$

$$(17) \quad \sigma_{\text{coh}} = 4\pi \cos^2\theta R_{pp}(0) \delta(q_y) \delta(q_x) \exp(-q_z^2 \sigma^2)$$

$$(18) \quad \sigma_{\text{inc}} = 2k^2 R_{pp}(\theta) \cos^2\theta \int_0^{+\alpha} [\exp[-q_z^2 \sigma^2 (1-\rho)] - \exp[-q_z^2 \sigma^2]] J_0(2k \sin\theta \xi) \xi d\xi$$

$$(19) \quad \sigma_{\text{pente}} = -8k \cos\theta (k\sigma)^2 [R_{pp0}^2 \cos\theta \sin\theta + \text{Re}\{R_{pp0} R_{pp1}\} \cos^2\theta] I$$

$$(19') \quad I = \int_0^{+\alpha} \frac{d\rho}{d\xi} J_1(2k \sin\theta) \exp[-q_z^2 \sigma^2 (1-\rho)] \xi d\xi$$

- $R_{pp0}R_{pp1}$ : coefficients de Fresnel (notation de la formule (11))
- $\sigma$  écart type des hauteurs
- $q_x, q_y, q_z$  : même notation qu'en (4)
- $\rho$  : fonction de corrélation
- $J_0, J_1$  : fonction de Bessel de première espèce, d'ordre 0 et 1
- $\delta$  fonction de Dirac

### 2.3 RETRODIFFUSION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE PAR UNE SURFACE ALEATOIRE QUASI-PERIODIQUE

Dans les modèles présentés précédemment, on n'a considéré qu'une échelle spatiale qui est la partie aléatoire.

Dans la réalité, les surfaces naturelles présentent plusieurs échelles spatiales. Dans les modèles qu'on va présenter, on va considérer des surfaces à deux échelles. C'est le cas des surfaces agricoles dont les mottes représentent la partie à petite échelle, et les sillons représentent la partie à grande échelle.

#### 2.3.1 Modèle de ULABY : Intégration incohérente [2],[3]

Il faut maintenant tenir compte de la variation lente de la surface

Cette méthode considère les surfaces à deux échelles spatiales différentes. Néanmoins, il faut qu'il y ait une grande séparation des deux échelles.

Dans le cas des surfaces agricoles, on considère que la variation des sillons est lente par rapport à celle des petites perturbations. On peut faire une description de la surface comme suit :

$$Z(x,y) = C(x,y) + R(y)$$

- $Z$  est la cote au point  $x,y$
- $C$  est une variable aléatoire
- $R$  représente la variation des sillons dans la direction  $(0,y)$  de période  $T$ ,  $R(y+nT)=R(y)$

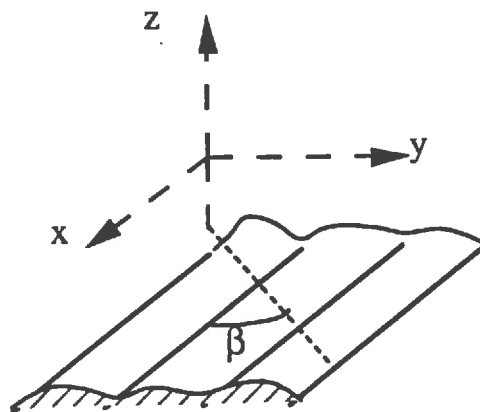


figure 6

La méthode consiste à faire une intégration incohérente de la section efficace  $\sigma^0(\theta)$  sur une période T. En effet R(y) introduit un angle local  $\theta_{\text{local}}$  en chaque point de la surface.

Le résultat est le suivant [3]:

$$\sigma^0(\theta) = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma^0(\theta_{\text{local}}(y)) \frac{dy}{\cos \alpha(y)}$$

$$\cos \theta_{\text{local}}(y) = \frac{R' \sin(\theta) \cos(\beta) + \cos \theta}{(1 + R'(y))^{1/2}}$$

$$\tan \alpha(y) = \frac{dR(y)}{dy} = R'(y)$$

Le choix de l'expression de la section efficace radar  $\sigma^0(\theta_{\text{local}}(y))$  dépend de la nature de la partie aléatoire de la surface, et utilise l'expression de la phase stationnaire, de l'approximation scalaire des champs, ou d'autres modèles.

Cette méthode permet d'observer l'effet de la direction de la visée radar par l'intermédiaire de l'angle  $\beta$ .

Des simulations sur le modèle sont données en annexe.

### 2.3.2 Modèle de KONG [1]

Ce modèle a été développé en 1984. Il considère une surface comme à deux échelles spatiales. L'apport par rapport au modèle d'Ulaby présenté précédemment est une description statistique plus générale de la surface à grande échelle. En effet le modèle de Ulaby demande d'intégrer la variation de la section efficace  $\sigma^0$  à petite échelle sur une surface connue, donc déterministe. La partie à grande échelle est située autour de la fréquence centrale  $f_c = \frac{1}{P}$ , où P est la période. La description géométrique de la surface est la suivante:

$$z = f(x,y) = \xi(x,y) + A(x) \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \psi(x)\right) + B \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \phi\right)$$

$\xi$  : variable aléatoire gaussienne telle que  $\langle \xi \rangle = 0$  et  $\langle \xi^2 \rangle = \sigma^2$ . Elle représente la partie aléatoire de longueur de corrélation l.

P : période de la partie périodique ( $f_c = \frac{1}{P}$ )

B et  $\phi$  sont des constantes

$$\Omega(x) = A(x) \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \psi(x)\right)$$

$$= \xi_c(x) \cos\left(\frac{2\pi}{P}x\right) - \xi_s(x) \sin\left(\frac{2\pi}{P}x\right)$$

La variation à grande échelle est un processus aléatoire gaussien, centré autour de la fréquence  $f_c$  avec :

- $\langle \xi_c(x) \rangle = \langle \xi_s(x) \rangle = 0$
- $\langle \xi_c(x)^2 \rangle = \langle \xi_s(x)^2 \rangle = \sigma_x^2$
- $\langle \xi_c(x) \xi_s(x) \rangle = 0$
- $\langle \Omega(x_1) \Omega(x_2) \rangle = \sigma_x^2 \exp(-r^2 / l_x^2)$

Les paramètres à grande échelle sont  $B, P, l_x, \sigma_x$

Les paramètres à petite échelle sont  $l, \sigma$

Pour fixer les paramètres d'observation, on a les figures suivantes:

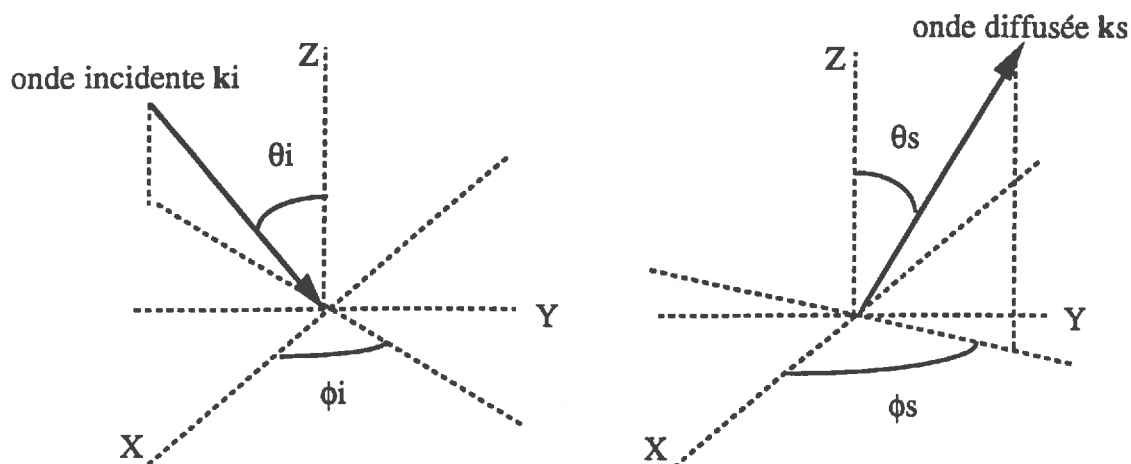


figure 7

Pour construire son modèle, Kong s'est placé dans l'hypothèse de l'approximation de Kirchoff puis, il utilise l'hypothèse de la phase stationnaire où les facettes de la surface qui donnent des réflexions spéculaires contribuent au signal retrodiffusé. Dans le cas de la rétrodiffusion ces facettes sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde.

Comme dans l'approximation de la phase stationnaire (équations (6) et (7)), le calcul du champ diffusé revient à calculer l'intégrale

$$(21) \quad \mathbb{I} = \int_{A_0} e^{iQ} dS_{\perp}$$

$A_0$  est la projection de la surface sur le plan  $(x, y)$

Dans le cas de la rétrodiffusion,  $\theta_i = \theta_s$  et  $\phi_i = \phi_s - \pi$  donc  $(\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i) = -2\mathbf{k}_i$ , et la phase  $Q$  est égale à :

$$Q = -2k [\sin\theta_i \cos\phi_i x' + \sin\theta_i \sin\phi_i y' - \cos\theta_i z']$$

avec  $z' = f(x, y) = \xi(x, y) + A(x) \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \psi(x)\right) + B \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \phi\right)$

Dans le calcul de la section efficace, le calcul de  $\langle \mathbb{I} \mathbb{I}^* \rangle$  est différent de celui de la phase stationnaire. En effet, dans le modèle de Kong, la partie périodique  $B \cos\left(\frac{2\pi}{P}x + \phi\right)$  introduit de fonctions de Bessel. On considère que la fonction de corrélation à petite échelle est gaussienne  $\rho(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{l^2}\right)$

Les résultats du calcul sont les suivants: [1]

$$(23) \quad \sigma_{pq} = 0$$

$$(23') \quad \sigma_{pp} = \frac{k^2 R^2}{\cos^2 \theta} \sum_{u=-\alpha}^{+\alpha} J_u(2k_{zi}B)^2 \exp\left(-4k_{zi}^2(\sigma^2 + \sigma_x^2)\right) \sum_{m=1}^{+\alpha} \frac{(2k_{zi}\sigma)^{2m}}{m!} \frac{l^2}{m} \\ \left[ \exp\left(-\left(\left(k_{xi} + \frac{\pi}{P}u\right)^2 + k_{yi}^2\right) \frac{l^2}{m}\right) + \sum_{m'=1}^{+\alpha} \sum_{n=0}^{m'} \frac{1}{2^{m'}} C(n, m') \frac{(2k_{zi}\sigma_x)^{2m}}{m!} \frac{l^2}{mq} \right. \\ \left. \exp\left(-\left(k_{xi} + (u+m'-2n)\frac{\pi}{P}\right)^2 + k_{yi}^2\right) \frac{l^2}{mq} - k_{yi}^2 \frac{l^2}{m}\right]$$

- R est le coefficient de Fresnel au nadir.
- $l_x$  : longueur de corrélation à petite et grande échelle
- $\sigma, \sigma_x$ : écart type des hauteurs à petite et grande échelle
- P la période
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- B amplitude de la partie périodique
- $C(n, m')$  : combinaison  $n, m'$
- $J_u$  est la fonction de Bessel d'ordre u, de première espèce
- $q = \left(1 + \frac{l^2 m'}{l_x^2 m}\right)^{1/2}$

D'après l'expression de la section efficace, on remarque que:

- la direction des sillons (partie périodique) est prise en compte (angle  $\phi_i$ )
- quand on est en visée perpendiculaire à la direction des sillons ( $\phi_i=0$ ), la contribution du terme  $\exp\left[-\left\{\left(k_{xi} + \frac{\pi}{P}u\right)^2 + k_{yi}^2\right\} \frac{l^2}{m}\right]$  à la section efficace n'est importante que si

$$(24) \quad k_{xi} + \frac{\pi}{P}u = 0 \quad \text{ou encore} \quad \sin\theta_i = \frac{\lambda}{2P} u$$

Ceci correspond aux modes de Bragg, dont l'amplitude est  $J_u(2k_{zi}B)^2$

(Notons  $\sigma_{\perp}$  et  $\sigma_{//}$  la section efficace correspondant à  $\phi_i=0$  (perpendiculaire aux sillons) et  $\phi_i=90$  (parallèle aux sillons))

Au cours des différentes simulations on a pu constater l'influence des différents paramètres sur la section efficace  $\sigma^0(\theta)$ :



*Influence de paramètres à grande échelle :*

- l' amplitude B : Quand l' amplitude B augmente,  $\sigma_{\perp}$  et  $\sigma_{//}$  sont de plus en plus écartés.

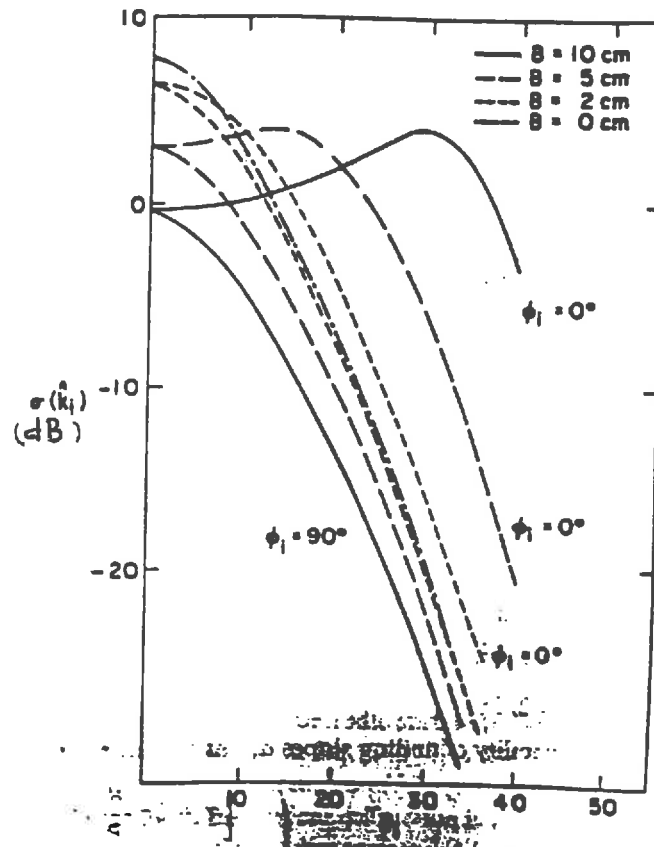
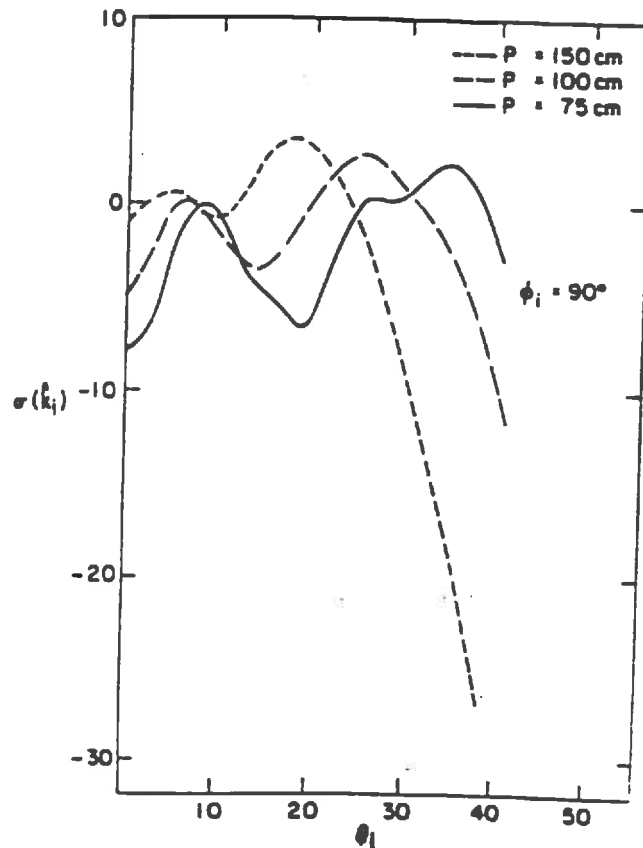


figure 8

- la période P : D'après l'équation de Bragg, P joue sur l'écartement des modes. Plus P est grand, plus les modes sont de plus en plus serrés.

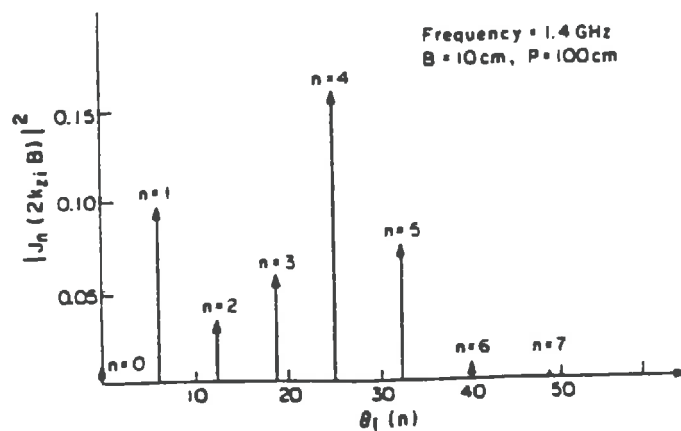
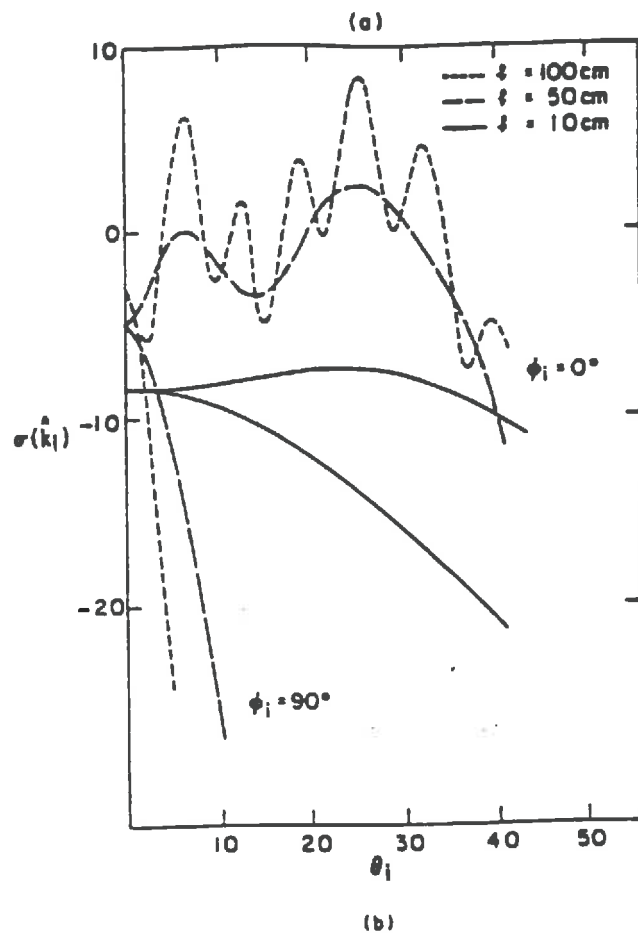


$\sigma(k_i)$  as a function of  $\theta_i$  for different values of  $P$  at 1.4 GHz with  $\sigma = 1$  cm,  $l = 50$  cm,  $B = 10$  cm,  $\sigma_x = 0$ , and  $\epsilon_1 = (6.0 + j0.6)\epsilon_0$ .

figure 9

#### *Influence des paramètres à petite échelle :*

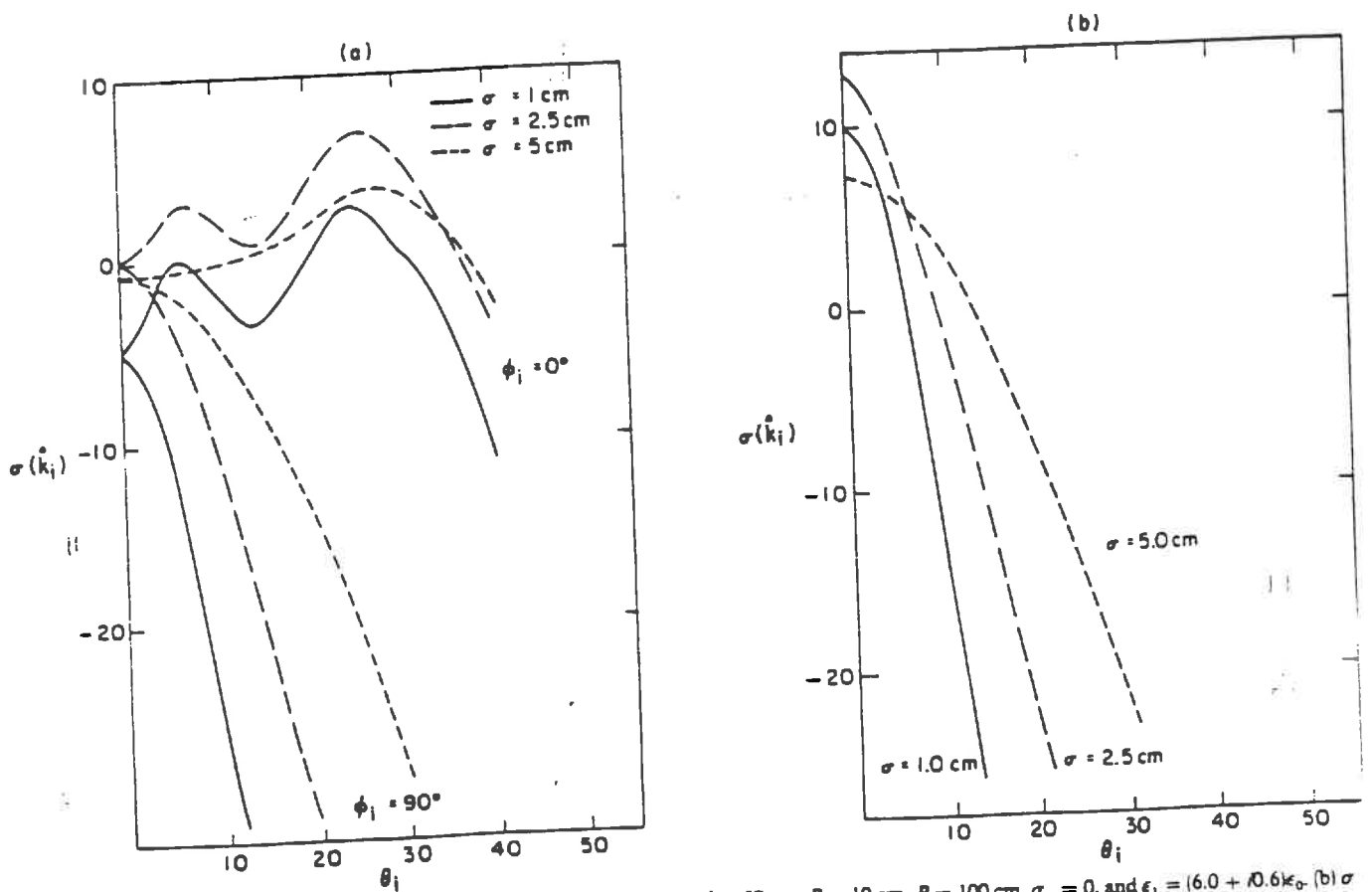
- longueur de corrélation  $l$  : Quand  $l$  augmente, la décroissance de  $\sigma_{//}$  en fonction de  $\theta$  est accentuée, tandis que les modes sont de plus en plus marqués sur  $\sigma_{\perp}$ . Ce résultat va dans le bon sens car plus la longueur de corrélation est grande, plus la surface aléatoire à petite échelle est lisse vis à vis de la longueur d'onde du radar. A cette échelle la rétrodiffusion devient essentiellement d'origine spéculaire et fortement cohérente, donc décroît rapidement avec l'angle d'incidence  $\theta$ . Cette réponse est modulée par la surface à grande échelle, mais l'influence fortement.



6. (a)  $\sigma(k_1)$  as a function of  $\theta_1$  for different values of  $l$  at 1.4 GHz with  $\sigma = 1$  cm,  $B = 10$  cm,  $P = 100$  cm,  $\sigma_z = 0$ , and  $\epsilon_1(6.0 + j0.6)\epsilon_0$ . (b) Location and amplitudes of the modes for  $B = 10$  cm.

(modos de Bragg)

- l' écart type des hauteurs  $\sigma$ : Si  $\sigma$  est grand, la surface aléatoire à petite échelle devient rugueuse vis à vis de la longueur d'onde radar. A petite échelle la rétrodiffusion devient incohérente, et l'énergie est diffusée dans toutes les directions. La dépendance avec l'angle d'incidence  $\theta$  devient plus faible. Aussi les modes de Bragg sont moins marqués.



(a)  $\sigma(k_i)$  as a function of  $\theta$ , for different values of  $\sigma$  at 1.4 GHz with  $l = 50$  cm,  $B = 10$  cm,  $P = 100$  cm,  $\sigma_x = 0$ , and  $\epsilon_1 = (6.0 + j0.6)\epsilon_0$ . (b)  $\sigma(k_i)$  as a function of  $\theta$ , for different values of  $\sigma$  at 1.4 GHz with  $l = 50$  cm,  $B = 0$  cm,  $\sigma_x = 0$ , and  $\epsilon_1 = (6.0 + j0.6)\epsilon_0$ .

figure 10

### 3. INTERPRETATION ET COMPARAISON EXPERIMENTALES

Au cours de l'année 1989, des mesures de section efficace radar sur le site agricole d'Orgeval ont été faites avec le radar ERASME.

Plusieurs parcelles test ont été étudiées pour avoir une gamme assez large du type de travail du sol. Parallèlement, on a fait des mesures au sol pour savoir les caractéristiques (composition, humidité, rugosité) au cours de l'année.

Le dépouillement de cette campagne de mesures est encore en cours, néanmoins, on a déjà quelques données exploitables. (voir photographie en annexe)

Pour faire un premier test sur les deux modèles, ( Ulaby 1982, Kong 1984 ), on a étudié un champs de semis de blé au mois de décembre. On a fait ce choix car les petits sillons sont bien marqués.

Pour faire une simulation on a besoin des paramètres du sol qui sont

- la constante diélectrique du sol
- les paramètres de rugosité

La constante diélectrique du sol peut être obtenu si on connaît la composition du sol et son humidité. Les résultats des mesures sont les suivants

- humidité : 0.148 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>
- sable : 4.5%
- argile : 19.3 %
- limon : 74.7 %

On a alors la constante diélectrique suivante :  $\epsilon_r = 7.0 - i 1.02$

Les paramètres de rugosité peuvent être obtenus si on a le profil du sol. Le rugosimètre est un appareil qui permet de d'avoir le profil du sol sur une longueur donnée. Dans notre cas, on a un rugosimètre à aiguille qui donne la hauteur de 512 points sur une longueur de 2 mètres.

Sur le champs de semis de blé, on a fait des mesures de rugosité, parallèlement et perpendiculairement aux sillons.

#### 3.1 DETERMINATION DES PARAMETRES A PETITE ECHELLE

On a utilisé deux méthodes pour obtenir la longueur de corrélation  $l$  et l'écart type moyen  $\sigma$ .

La première méthode consiste à supposer que sur un profil parallèle aux sillons, on n'a que la partie aléatoire de la surface.

$\sigma$  est alors l'écart type moyen des hauteurs.

Pour la longueur de corrélation, on fait l'autocorrélation du profil parallèle qu'on normalise avec  $\sigma$ . On fait alors un ajustement d'une gaussienne sur cette fonction pour avoir la longueur de corrélation.

La figure 11 montre un profil parallèle aux sillons, et la figure 12 montre la fonction d'autocorrélation correspondante.

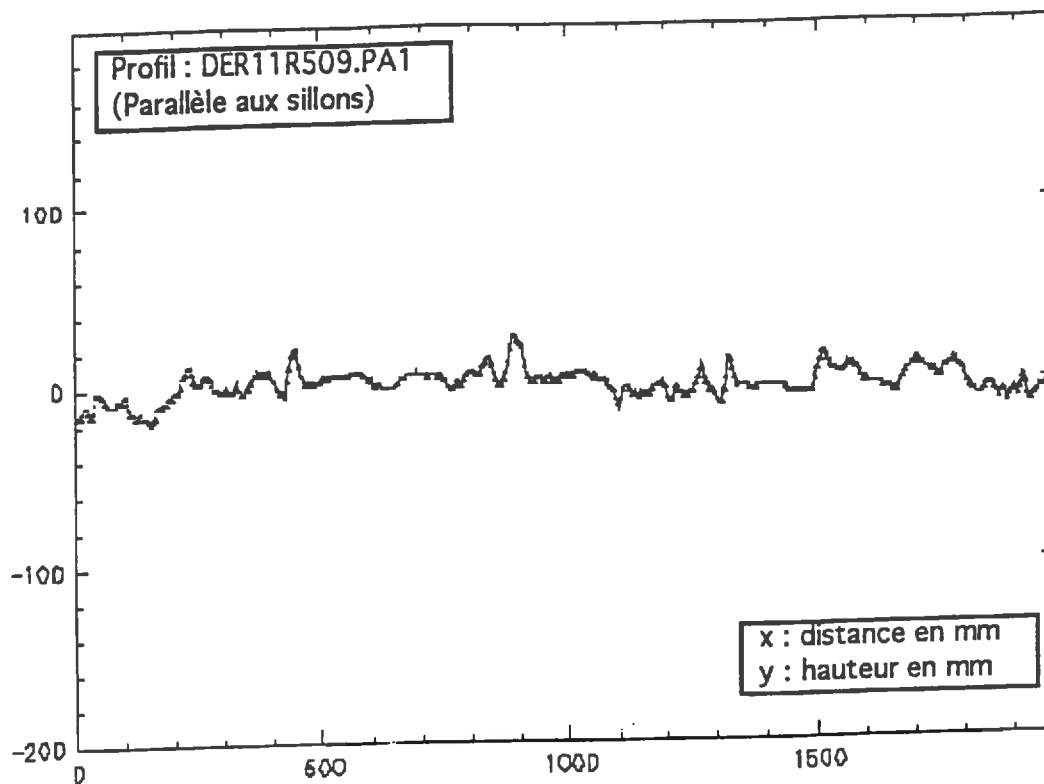


figure 11

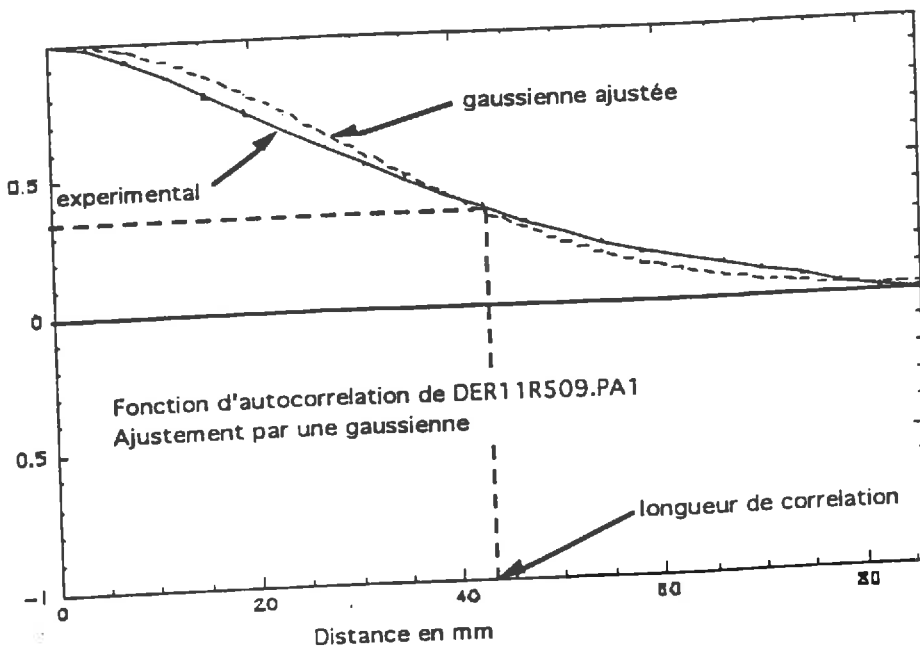


figure 12

La deuxième méthode utilise des profils perpendiculaires aux sillons. On fait un filtrage de la partie périodique pour ne garder que la partie aléatoire (hautes fréquences). On utilise la première méthode sur le profil filtré pour avoir les paramètres. Les figures 13 à 15 montrent respectivement, un profil perpendiculaire aux sillons, ce même profil filtré, puis son spectre.

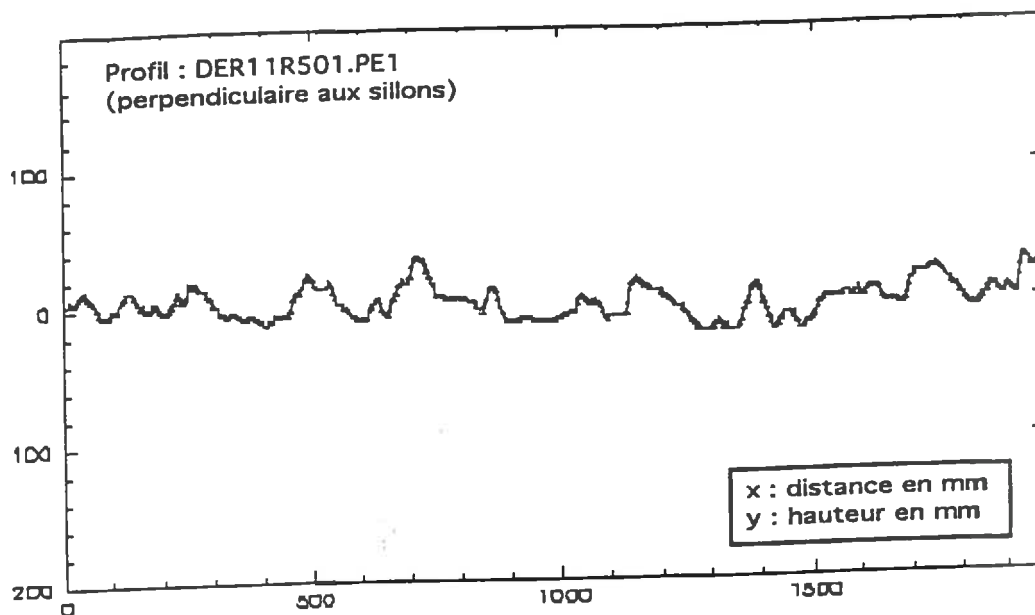


figure 13

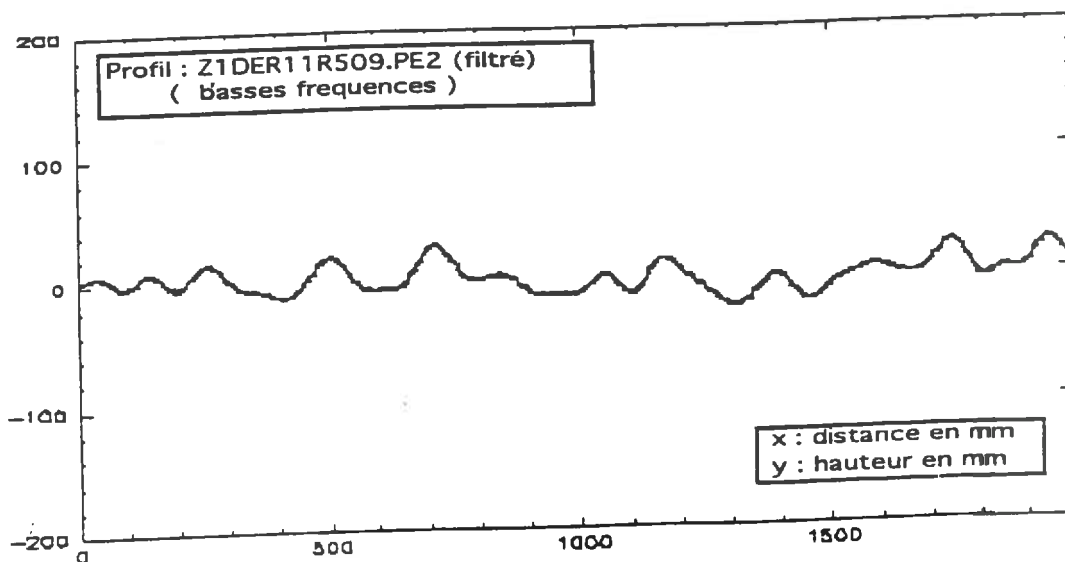
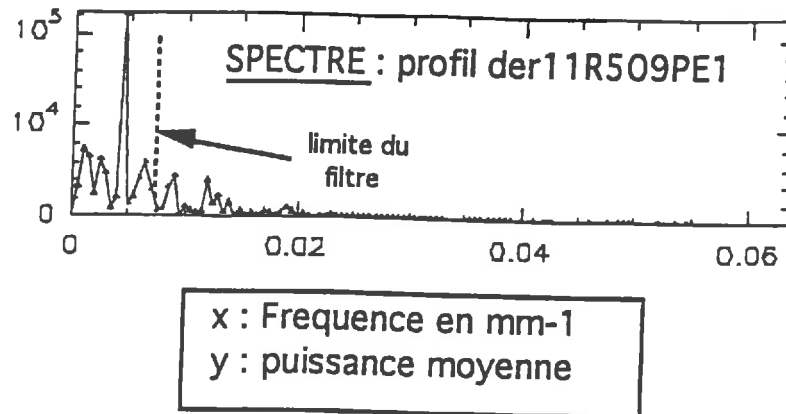


figure 14



*figure 15*

Les deux méthodes ont été utilisées sur quatre profils (2 // et 2  $\perp$ ) obtenues en deux emplacements différents, et les résultats sur le premier emplacement sont les suivants:

- avec la première méthode :  $l = 5.8$  cm et  $\sigma = 0.73$  cm
- avec la deuxième méthode :  $l = 1.95$  cm et  $\sigma = 0.53$  cm

Dans la suite on va garder les résultats de la première méthode car, une partie de la partie périodique a sûrement été enlevée lors du filtrage, les deux (petite et grande échelle) spectres se recouvrant. Ainsi la deuxième méthode sous estime la longueur de corrélation car elle ne garde que les très hautes fréquences.

Les résultats sur le deuxième emplacement (2<sup>ème</sup> profil //) sont les suivants :

$$l = 3.1 \text{ cm et } \sigma = 0.88 \text{ cm}$$

L'estimation de l'écart type des hauteurs sur les deux emplacements sont proches. Par contre on observe une différence dans l'estimation de la longueur de corrélation. Elle est due à la difficulté de la description statistique précise de la surface aléatoire à petite échelle.

### 3.2 DETERMINATION DES PARAMETRES A GRANDE ECHELLE

#### 3.2.1 Détermination de la fréquence centrale

En analysant les spectres des profils perpendiculaires, on a constaté un pic maximum toujours présent à  $6.02 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ . Ceci correspond à une longueur spatiale de 16.6 cm.. Visuellement cette longueur correspond à la période des sillons.

#### 3.2.1 Détermination de $\sigma_x$ et $l_x$

On sait que le transformé de Fourier de la fonction d'autocorrélation est égale à la puissance spectrale. Or d'après la description de la partie quasi périodique, sa fonction d'autocorrélation est [1] :



$$\langle A(x_1) \cos\left(\frac{2\pi}{p} x_1 + \psi(x_1)\right) A(x_2) \cos\left(\frac{2\pi}{p} x_2 + \psi(x_2)\right) \rangle =$$

$$\sigma_x^2 \exp(-r^2 / l_x^2) \cos\left(\frac{2\pi}{p} (x_1 + x_2)\right)$$

Sa transformée de Fourier est une gaussienne centrée sur la fréquence  $\frac{1}{p}$  et égale à

$$\sigma_x^2 \pi^{1/2} l_x \exp(-\pi^2 l_x^2 f^2)$$

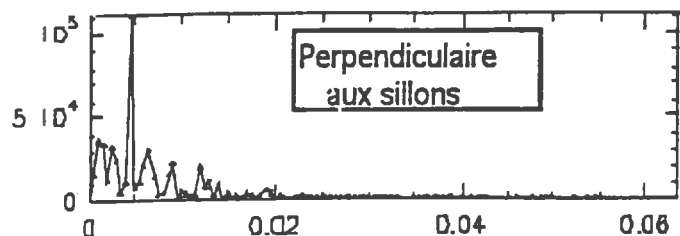
En effet, par hypothèse, la variation des hauteurs à grande échelle est un processus aléatoire gaussien.

Pour extraire les paramètres  $\sigma_x$  et  $l_x$ , on fait un ajustement d'une gaussienne sur le spectre du profil perpendiculaire filtré correspondant à la partie quasi périodique.

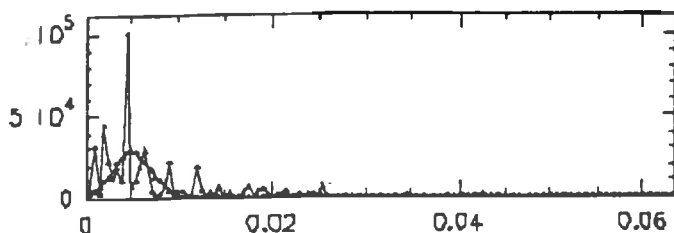
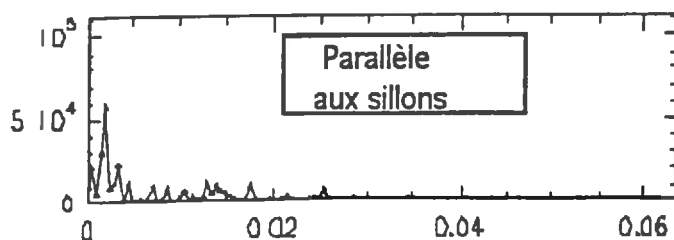
On applique cette méthode à deux profils perpendiculaires. Les résultats sur le premier profil sont présentés dans la figure 16.

On trouve :

- sur le premier profil :  $\sigma_x = 0.63$  cm et  $l_x = 10.9$  cm
- sur le deuxième profil :  $\sigma_x = 0.97$  cm et  $l_x = 13.5$  cm



**SPECTRES :**  
 x : fréquence en mm-1  
 y : puissance moyenne



Différence des deux spectres et ajustement par une gaussienne pour le calcul de:  
 $\sigma_x$  et  $l_x$

figure 16

### 3.3 COMPARAISON EXPERIMENTALE

Les résultats expérimentaux sont les suivants:

Angle (deg)	10	15	20	25	30
$\sigma(\theta)$ (dB)					
$\beta=65^\circ$ ou $\phi=25^\circ$	2.89	-1.69	-5.95	-8.91	-11.8
$\beta=45^\circ$ ou $\phi=45^\circ$	-0.18	-4.06	-8.20	-11.90	-14.84

Trois simulations vont être présentées. Dans chaque simulation on a pris les paramètres suivants :

- Fréquence = 5.35 GHz
- P = 16.6 cm
- $\sigma = 0.73$  cm ; l = 5.8 cm
- $\epsilon_r = 7.0 - i 1.02$

Sur les figures, l'axe x est l'angle d'observation  $\theta$  en degré, et l'axe y représente la section efficace radar en dB.

#### MODÈLE DE KONG SANS LA PARTIE QUASIPERIODIQUE:

- B = 0.63 cm
- $\sigma_x = 0$  cm ;  $l_x$  n'intervient pas

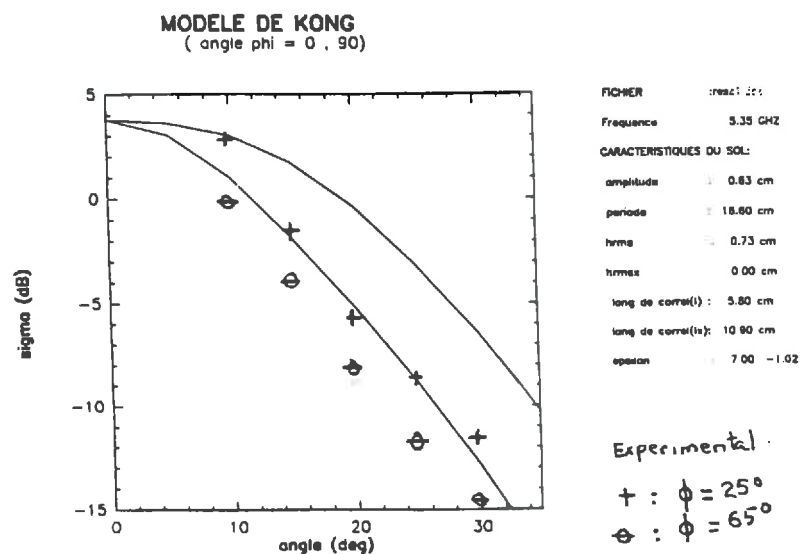


figure 17

MODÈLE DE KONG QUASI PERIODIQUE :

- B= 0 cm
- $\sigma_x = 0.63$  cm ;  $l_x = 10.9$  cm

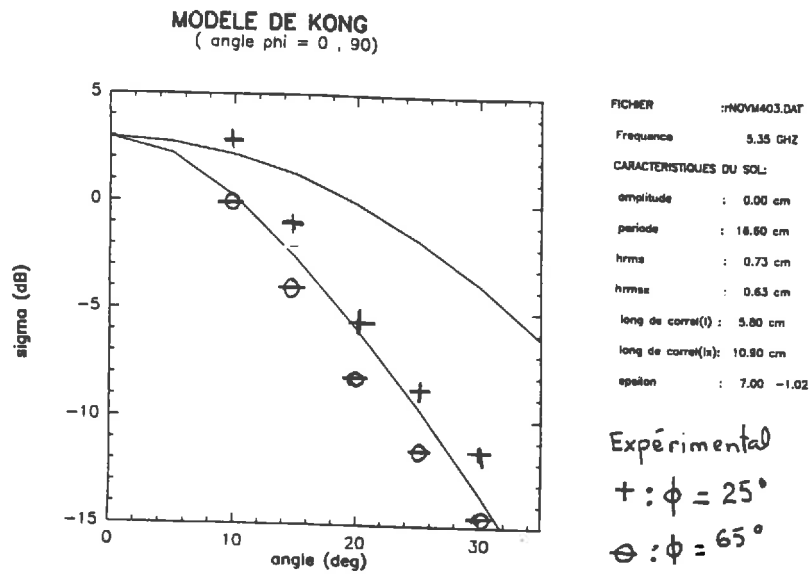


figure 18

MODÈLE DE ULABY-ET LE TOAN:

- $R(y) = 0.63 \cos \frac{2\pi}{p} y$  cm
- $\sigma = 0.73$  cm ;  $l = 5.8$  cm

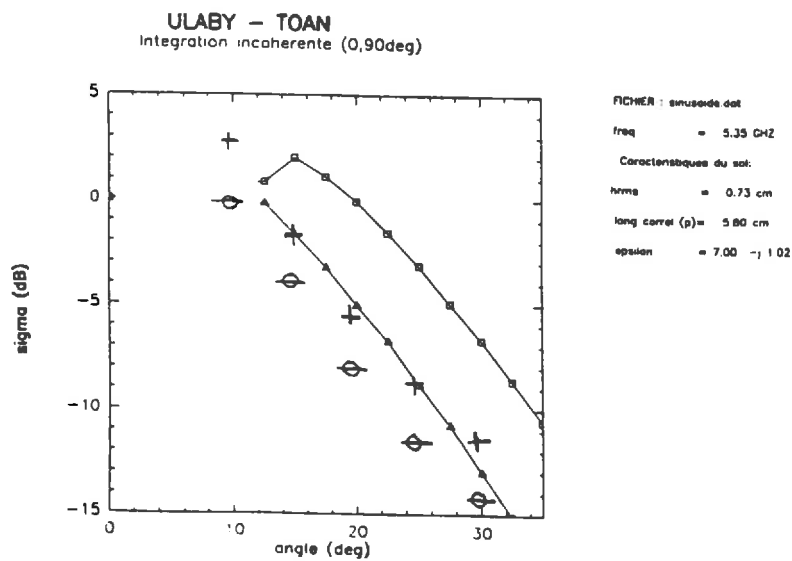


figure 19

Sur le profil étudié, les simulations donnent une variation très comparable de la section efficace radar  $\sigma^0(\theta)$  avec l'angle d'incidence  $\theta$  et l'angle de visée  $\phi$  ou  $\beta$ . On remarque que les modèles mettent tous en évidence l'influence de la visée radar ( $\phi$  ou  $\beta$ ). Ce phénomène a été observé lors de l'expérience Orgeval\_89.

De plus les pentes des courbes de simulation sont les mêmes que celles des courbes expérimentales.

D'autre part, on a remarqué lors des simulations que ce sont les paramètres à petite échelle qui sont déterminants pour la description de la surface: En premier lieu la longueur de corrélation de la partie aléatoire, en second lieu l'écart type des hauteurs à petite échelle.

En effet en faisant les mêmes simulations mais en prenant la longueur de corrélation à petite échelle du deuxième emplacement, ( $l = 3.1$  cm au lieu de  $l = 5.8$  cm) on obtient une variation faible de la section efficace radar  $\sigma^0(\theta)$  avec l'angle d'incidence, et un faible écartement des deux visées  $\sigma_{\perp}$  et  $\sigma_{//}$ .

Les simulations sont données par les figures suivantes:

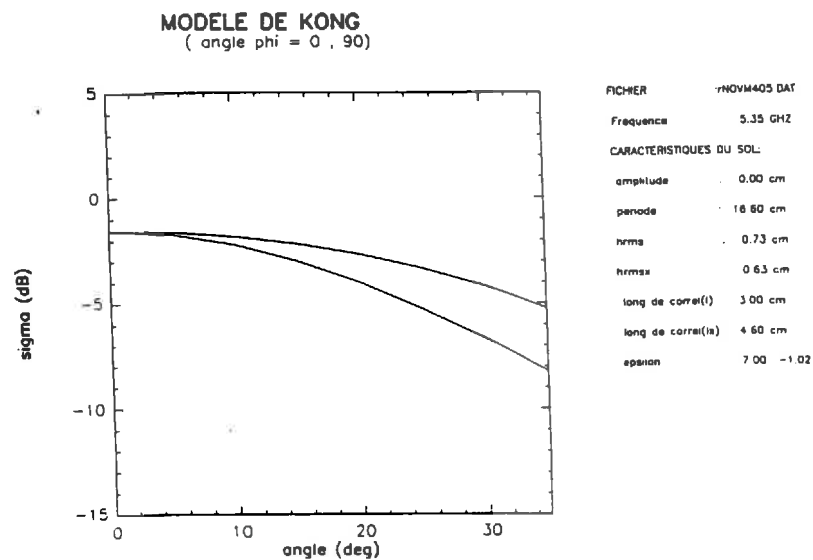
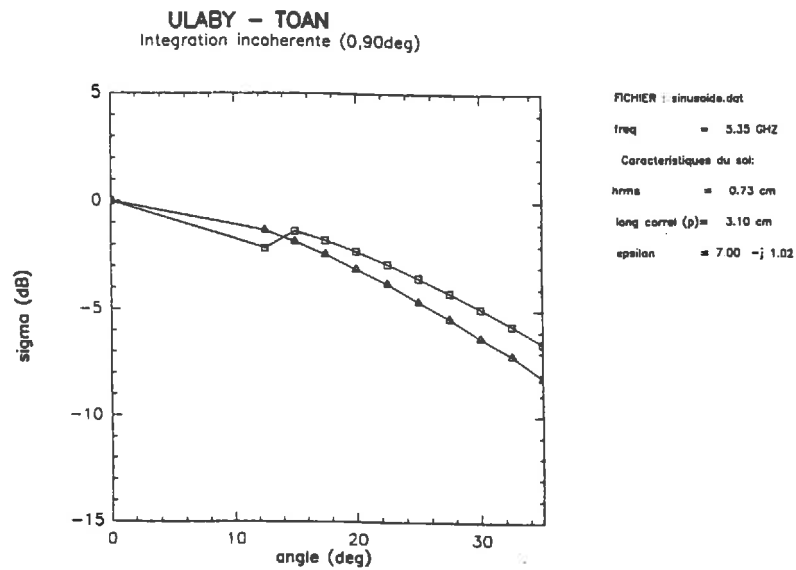


figure 20

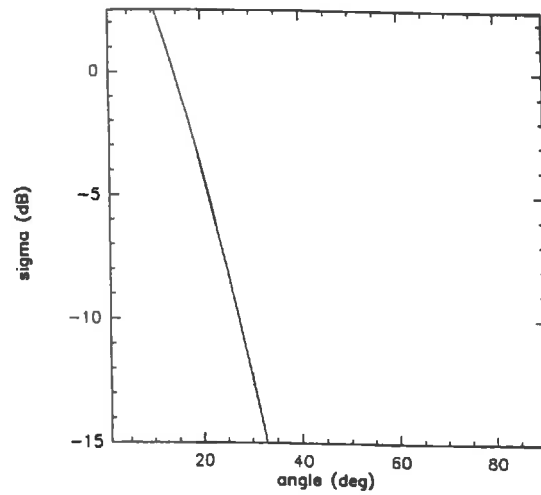


*figure 21*

En effet la longueur de corrélation  $l$  à petite échelle est le facteur influent. Pour  $l = 3$  cm la surface à petite échelle est assez rugueuse et le modèle de l'approximation scalaire simule à petite échelle, une faible variation de la section efficace radar  $\sigma^0(\theta)$  avec l'angle d'incidence  $\theta$ .

Par contre pour un  $l = 5.8$  cm, la surface est lisse et le modèle de l'approximation scalaire simule une décroissance rapide de la section efficace radar  $\sigma^0(\theta)$  à petite échelle avec l'angle d'incidence  $\theta$ . ( figures 22 et 23 )  
(Ces simulations utilisent l'approximation scalaire des champs)

## Section efficace



## MODELE DE KIRCHOFF

: champs scalaires

freq = 5.35 GHz

Caracteristiques du sol:

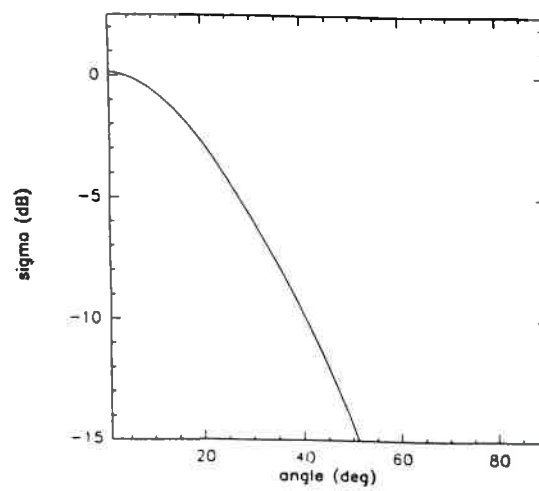
hrms = 0.73 cm

long corral (p) = 5.80 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

figure 22

## Section efficace



## MODELE DE KIRCHOFF

champs scalaires

freq = 5.35 GHz

Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long corral (p) = 3.00 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

figure 23

#### 4. PERSPECTIVES ET CONCLUSION

D'après les simulations on voit qu'il y a une légère différence avec les données expérimentales. On remarque quand même que:

- les modèles mettent tous en évidence l'influence de la visée du radar par rapport aux sillons ( $\beta$  ou  $\phi$ ). Ce phénomène a été observé lors de l'expérience Orgeval\_89.

- les pentes des courbes de simulation sont les mêmes que celles des courbes expérimentales. Ceci est très encourageant car on n'a qu'une erreur de translation entre les deux courbes. On peut dire que cette erreur vient de la constante diélectrique du sol, car ceci intervient comme facteur multiplicatif dans les modèles.

En effet, on n'a qu'une mesure de l'humidité du sol pour le mois de décembre, alors que celle-ci risque de fluctuer.

D'autre part on a remarqué lors des simulations que ce sont les paramètres à petite échelle qui sont déterminants pour la description de la surface: en premier lieu la longueur de corrélation de la partie aléatoire, et puis en second lieu, l'écart type moyen de la partie aléatoire.

Le travail peut se poursuivre sur trois axes:

- Valider les modèles avec un jeu de données expérimentales plus complet.

Actuellement, une base de données sur les champs expérimentaux de l'expérience "Orgeval89" est en cours d'élaboration. D'autre part, le CRPE bénéficiera bientôt des données du radar à ouverture synthétique du satellite européen ERS-1, opérationnel depuis 1991, et qui survole des champs agricoles hollandais.

On bénéficiera également des données radar à ouverture synthétique polarisé aéroporté de la NASA/JPL, qui a survolé en juin et juillet 1991 les sites français et hollandais.

- Essayer d'introduire des modèles qui tiennent compte de la totalité du spectre de la surface. Dans ce cas on ne sera plus limité aux surfaces à deux échelles

- Trouver des méthodes d'inversion permettant de déduire les caractéristiques de la surface ( en particulier humidité et rugosité à petite échelle ), en définissant une multi-configuration radar optimum ( plusieurs angles de visée, plusieurs angles d'incidence ou de fréquence...)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : R.T Shin and J.A. Kong : Scattering of electromagnetic waves from a randomly perturbed quasiperiodic surface (J. Appl. Phys. 56 (1), 1, July 1984
- [2] : Fawwaz T. Ulaby, F. Kouyate, Andrian K. Fung : A backscatter model for a randomly perturbed periodic surface (IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, Vol GE-20, no 4 October 1982)
- [3] : A. Baudoin, Thuy Le Toan, Q.H.J. Gwyn : SAR observation and modeling of C-Band backscatter variability due to Multiscale Geometry and soil moisture. (IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, Vol 28 no 5, september 1990)
- [4] : Notes de cours de M. D. Vidal Mdjar : Diffusion d'une onde électromagnétique par les surfaces rugueuses aléatoires. (CNET/CRPE)
- [5] : Thèse de M. Autret : Etude théorique de la sensibilité du signal retrodiffusé en hyperfréquence aux paramètres caractéristiques d'un sol agricole: humidité et rugosité. (Université Paris 7)
- [6] : Ulaby F.T, R.K. MOORE & FUNG 1982: microwave remote sensing: Active and passive, Vol II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory, Ch 12 reading MA: Addison-wesley.



## ANNEXES

11

11

11

## Annexe 1: Simulations avec les modèles de KONG

Ces simulations ont permis de :

- vérifier si l'implantation du modèle est correcte. (On a utilisé les mêmes paramètres que dans la publication de Kong)
- tester la sensibilité du modèle par rapport aux paramètres

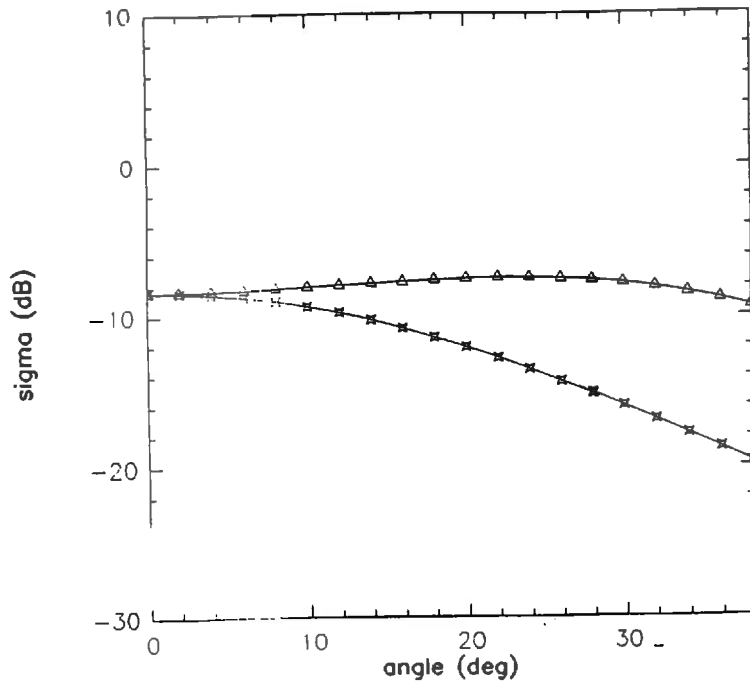
La première série de simulation est faite avec  $\sigma_x=0$  (On ne considère que la partie sinusoïdale dans la description de la surface)

- Les fichiers rf1.dat, rf2.dat : sensibilité avec la fréquence
- Les fichiers b1.dat, rb2.dat, rb3.dat, rb4.dat: sensibilité avec l'amplitude B
- Les fichiers rl1.dat, rl2.dat, rl3.dat : sensibilité avec la longueur de corrélation
- Les fichiers rp1.dat, rp2.dat, rp3.dat: sensibilité avec la période de la partie périodique.

La deuxième série de simulation tient compte de la partie quasi-périodique (l'amplitude de la partie périodique B nul ou non nul et on fait varier la longueur de corrélation l)

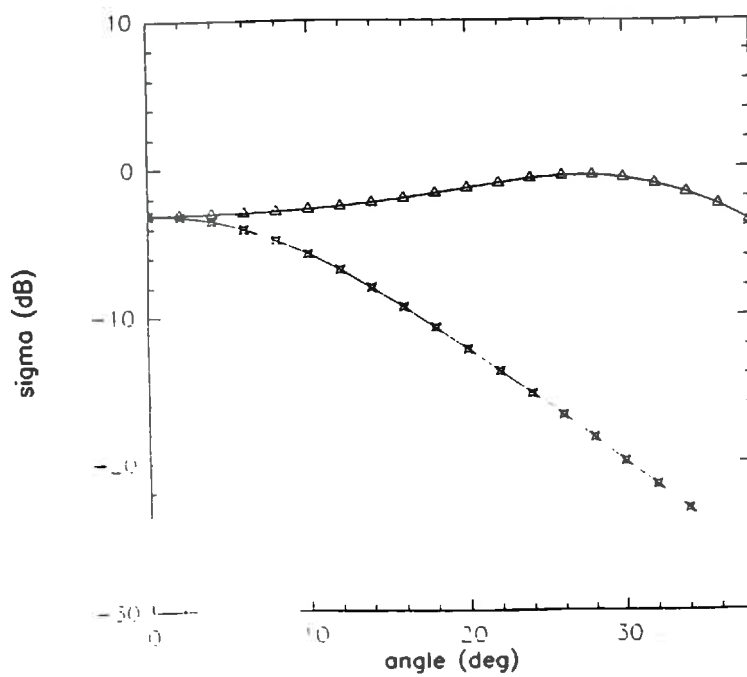
- Les fichiers rqp1.dat, rqp2.dat, rqp3.dat : B=0
- Les fichiers rqp3.dat et rqp4.dat : B non nul

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



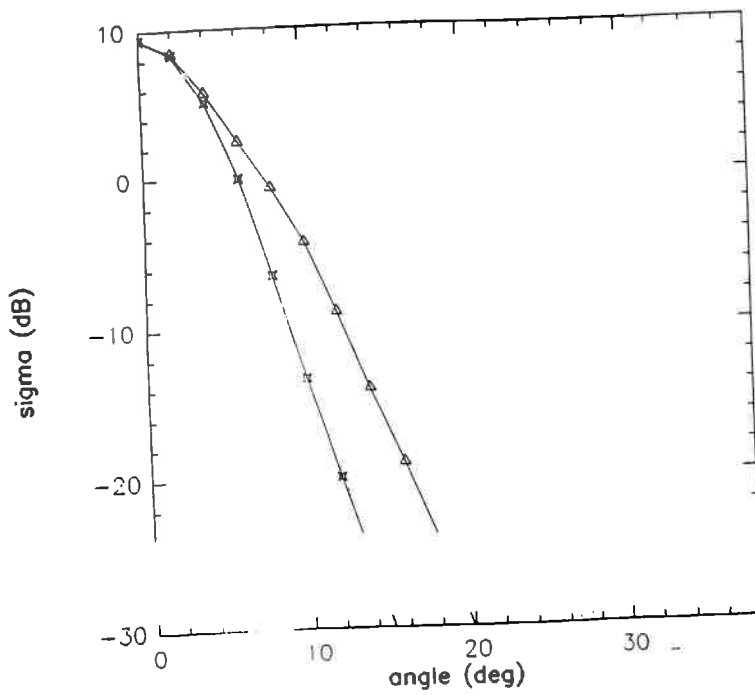
FICHER :rf1.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.10 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 0.10 m  
 epsilon 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



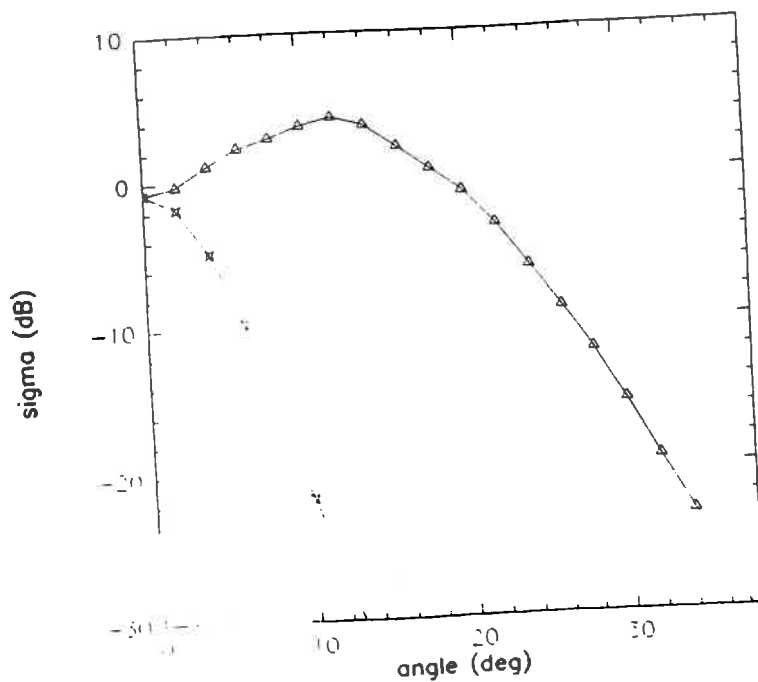
FICHER :rf2.dat  
 Frequence 2.50 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.10 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 0.10 m  
 epsilon 6.00 -0.60

### MODELE DE KONG ( angle phi = 0 et 90 deg )



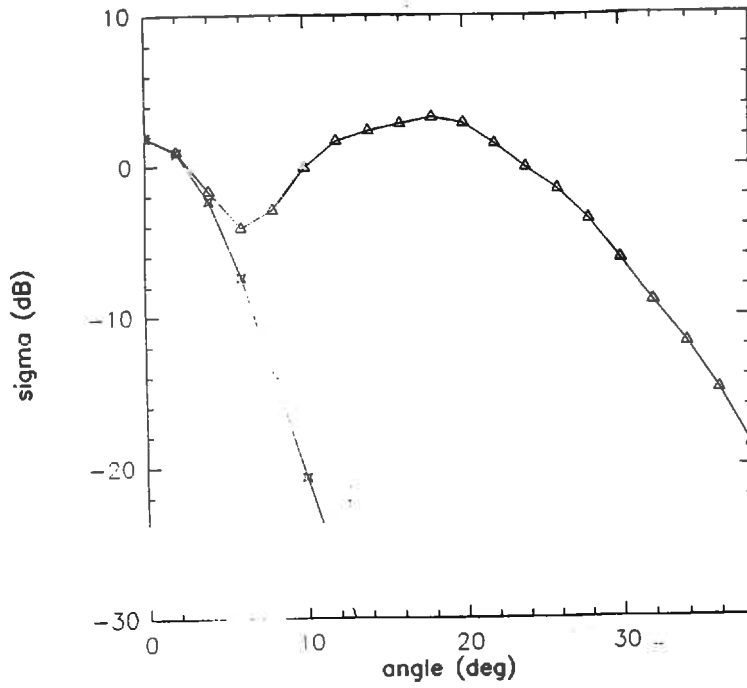
FICHER :rb1.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.01 m  
 periode : 1.00 m  
 long de corref : 0.50 m  
 epsilon : 6.00 -0.60

### MODELE DE KONG ( angle phi = 0 et 90 deg )



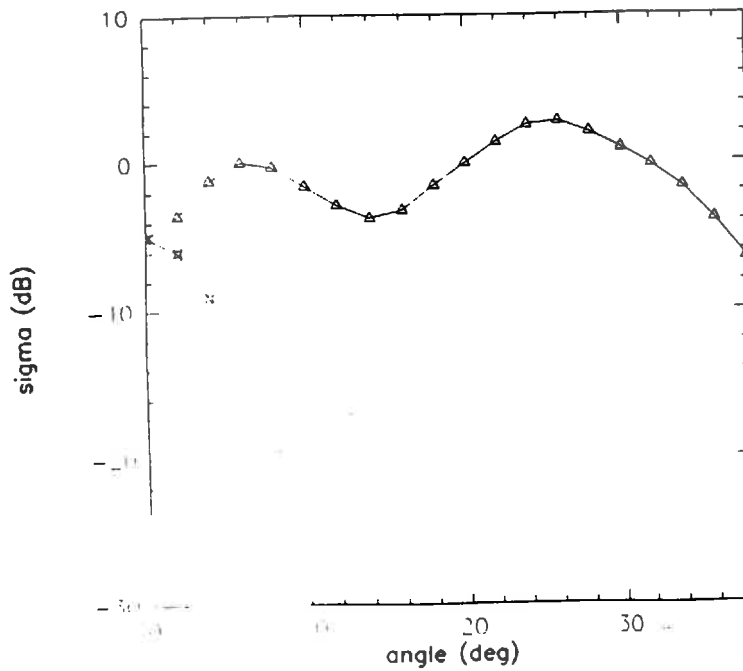
FICHER :rb2.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.05 m  
 periode : 1.00 m  
 long de corref : 0.50 m  
 epsilon : 6.00 -0

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



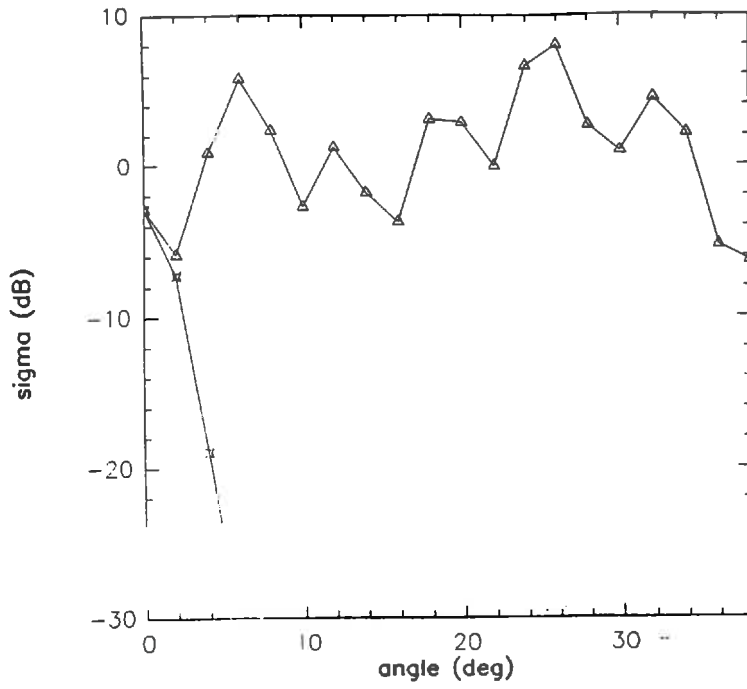
FICHER :rb3.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.07 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 0.50 m  
 epsilon 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



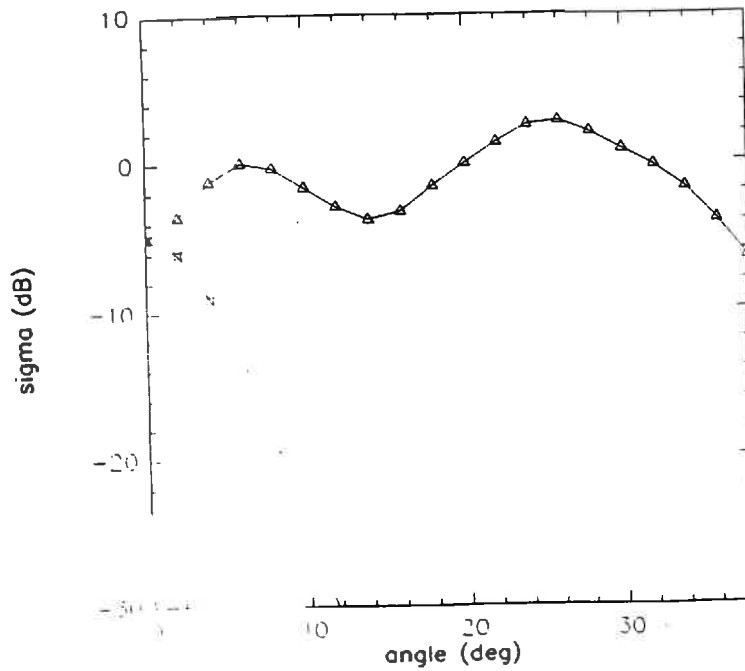
FICHER :rb4.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.10 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 0.50 m  
 epsilon 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



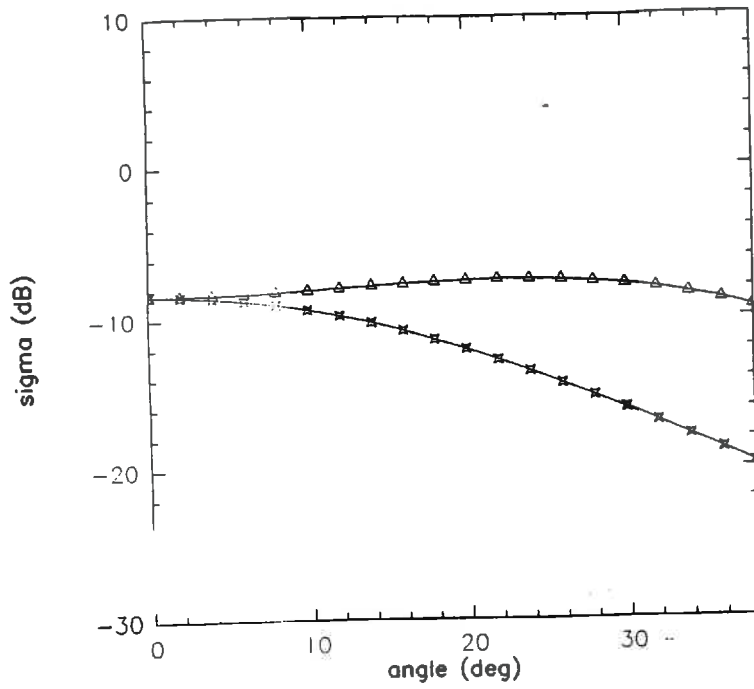
FICHER : r1.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.10 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 1.00 m  
 epsilon 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



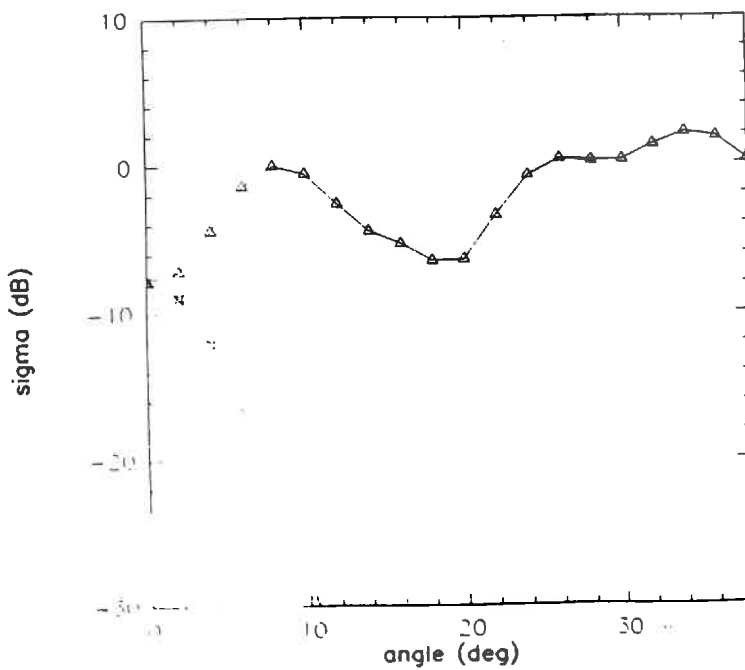
FICHER r2.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms 0.01 m  
 amplitude 0.10 m  
 periode 1.00 m  
 long de correl 0.50 m  
 epsilon 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



FICHER : r13.dot  
 Frequence : 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.10 m  
 periode : 1.00 m  
 long de correl : 0.10 m  
 epsilon : 6.00 -0.60

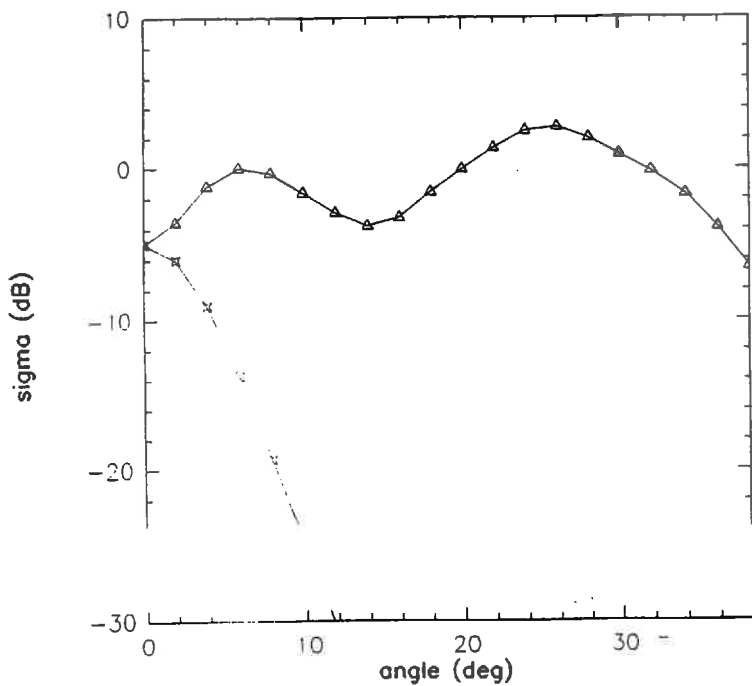
**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 et 90 deg )



FICHER : rp1.dat  
 Frequence : 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.10 m  
 periode : 0.75 m  
 long de correl : 0.50 m  
 epsilon : 6.00 -0.60

### MODELE DE KONG

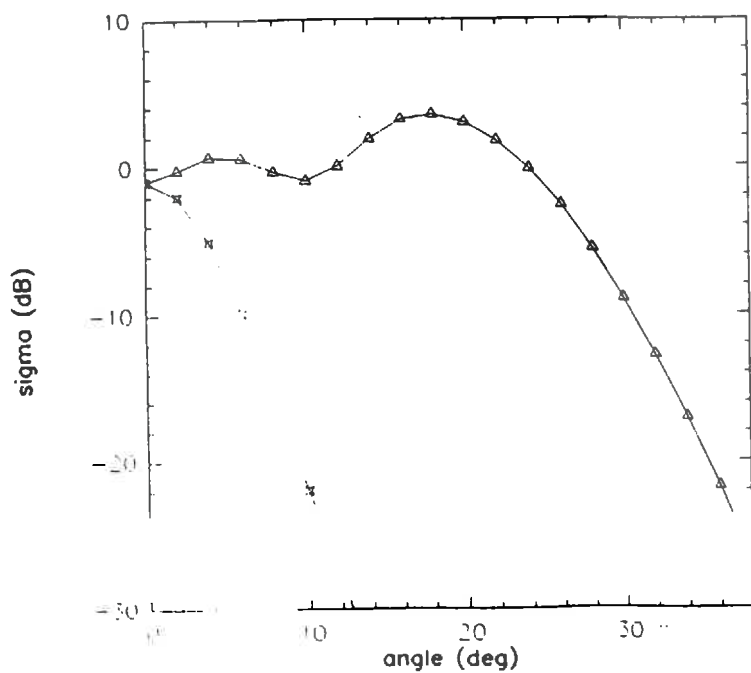
( angle phi = 0 et 90 deg )



FICHER :rp2.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.10 m  
 periode : 1.00 m  
 long de correl : 0.50 m  
 epsilon : 6.00 -0.60

### MODELE DE KONG

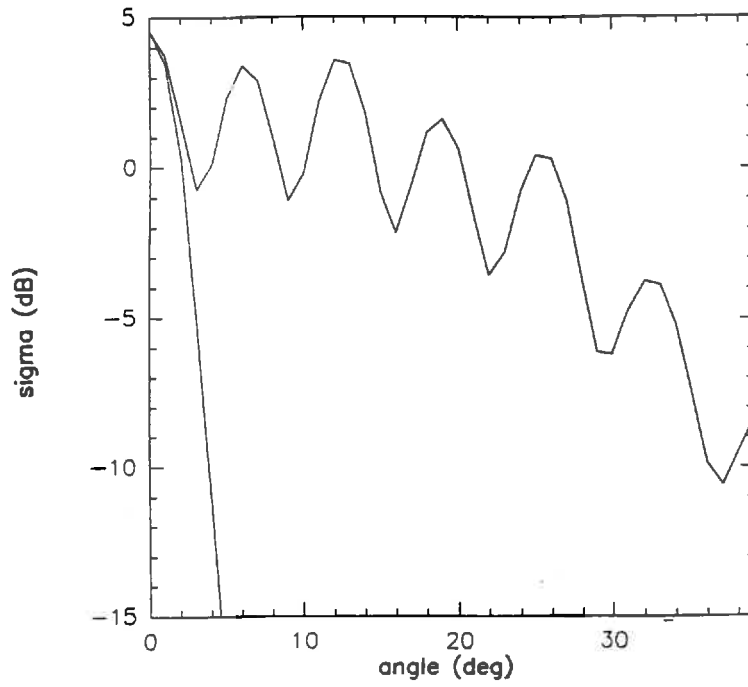
( angle phi = 0 et 90 deg )



FICHER :rp3.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 hrms : 0.01 m  
 amplitude : 0.10 m  
 periode : 1.50 m  
 long de correl : 0.50 m  
 epsilon : 6.00 -0.60

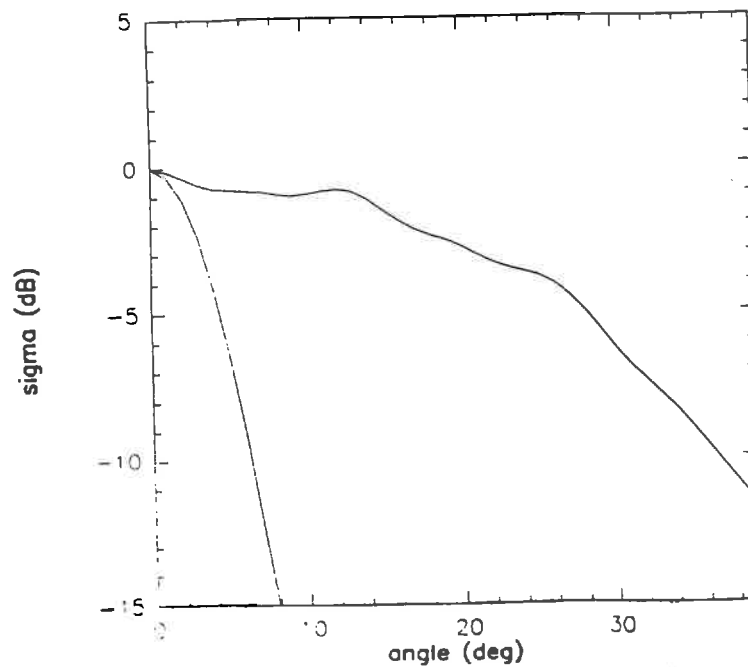


**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



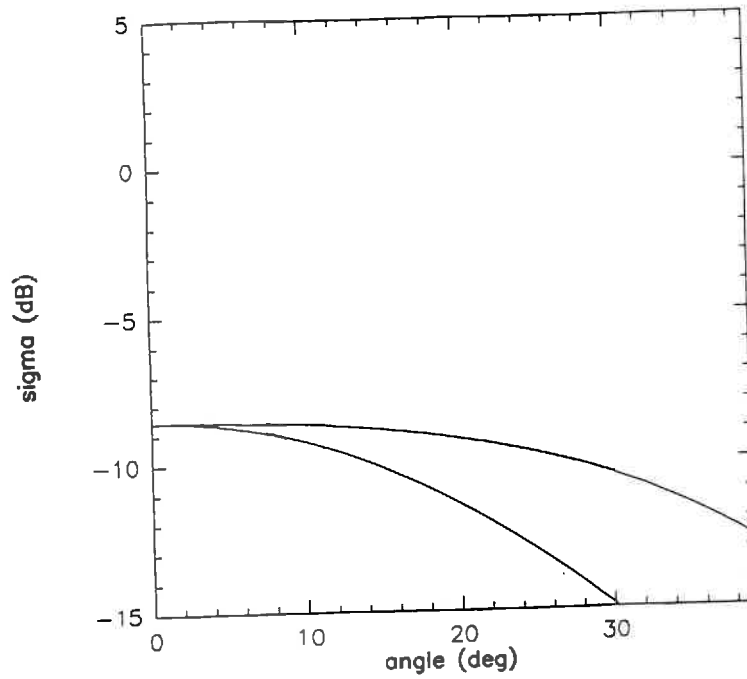
FICHER : rqp1.dat  
 Frequence : 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 100.00 cm  
 hrms : 1.00 cm  
 hrmax : 5.00 cm  
 long de corref(l) : 100.00 cm  
 long de corref(x) : 300.00 cm  
 epsilon : 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



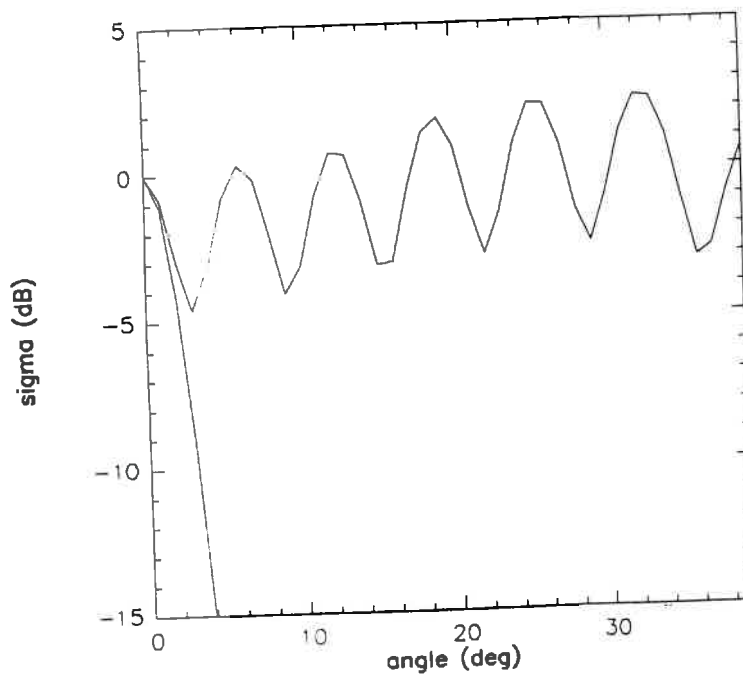
FICHER : rqp2.dat  
 Frequence : 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 100.00 cm  
 hrms : 1.00 cm  
 hrmax : 5.00 cm  
 long de corref(l) : 50.00 cm  
 long de corref(x) : 300.00 cm  
 epsilon : 6.00 -0.60

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



FICHER : rqp3.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 100.00 cm  
 hrms : 1.00 cm  
 hrmsx : 5.00 cm  
 long de correi(l) : 10.00 cm  
 long de correi(x) : 300.00 cm  
 epsilon : 6.00 -0.60

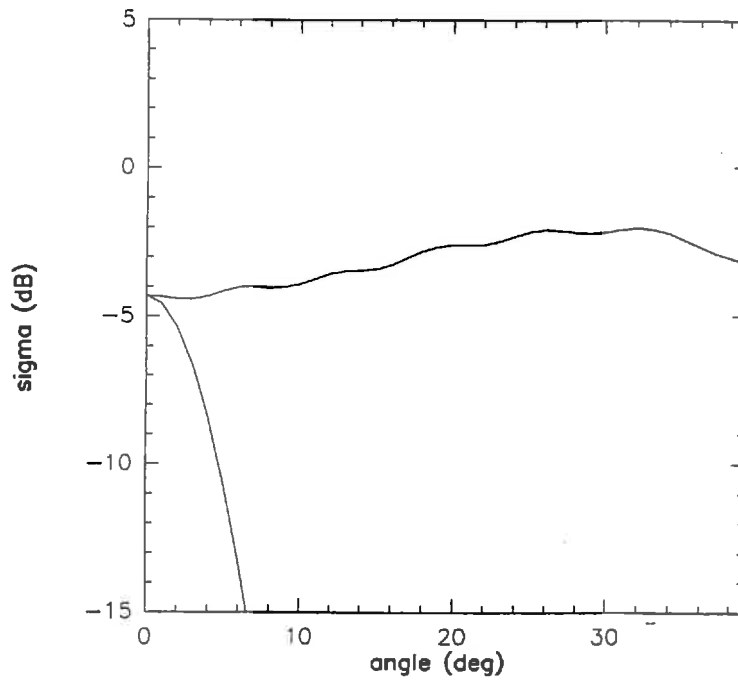
**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



FICHER : rqp4.dat  
 Frequence 1.40 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 10.00 cm  
 periode : 100.00 cm  
 hrms : 1.00 cm  
 hrmsx : 5.00 cm  
 long de correi(l) : 100.00 cm  
 long de correi(x) : 300.00 cm  
 epsilon : 6.00 -0.60

# MODELE DE KONG

( angle phi = 0 , 90)



FICHER : rqp5.dat  
Frequence : 1.40 GHZ  
CARACTERISTIQUES DU SOL:  
amplitude : 10.00 cm  
periode : 100.00 cm  
hrms : 1.00 cm  
hrmsx : 5.00 cm  
long de carrel(l) : 50.00 cm  
long de carrel(lx) : 300.00 cm  
epsilon : 6.00 -0.60

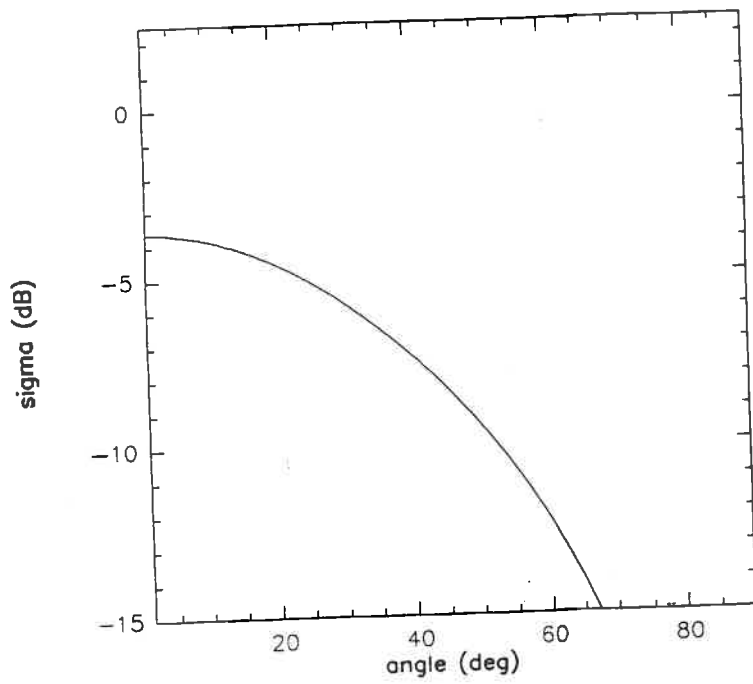
## Annexe 2 : Simulation avec le modèle de Ulaby - Le Toan

Dans tous les cas on a considéré la partie modulante (variation lente) comme une sinusoïde dont l'amplitude est 0.63 cm (même ordre de grandeur que  $\sigma_x$  dans le modèle de Kong sur la parcelle de maïs), et de période 16.6 cm .

On a fait varier la longueur de corrélation  $l$ .

La section efficace à intégrer utilise l'expression de "l'approximation scalaire des champs", dont l'évolution en fonction de  $\theta$  est donnée.

## Section efficace



MODELE DE KIRCHOFF

: champs scalaires

freq = 5.35 GHZ

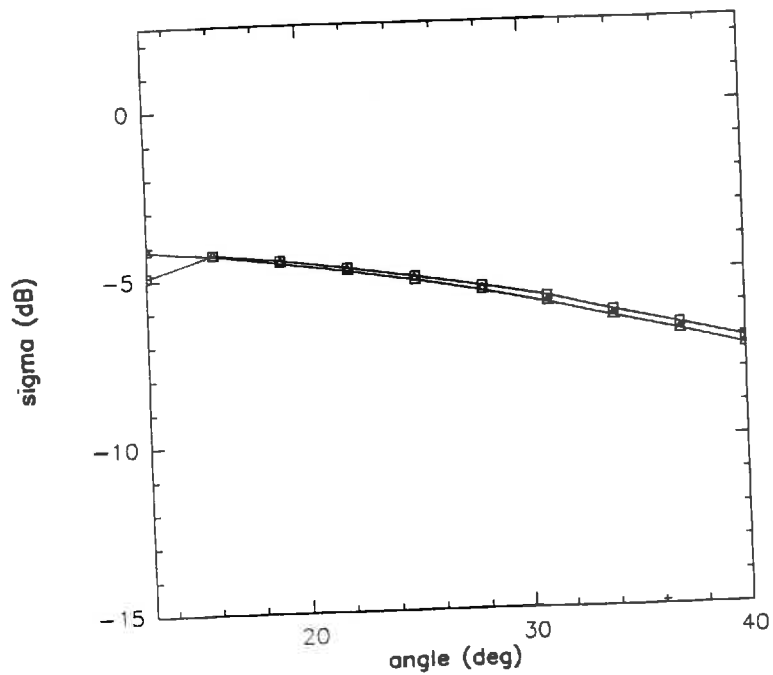
Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long correl (p) = 1.95 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

## ULABY - TOAN Integration incoherente (0,90deg)



FICHER : sinusoide.dat

freq = 5.35 GHZ

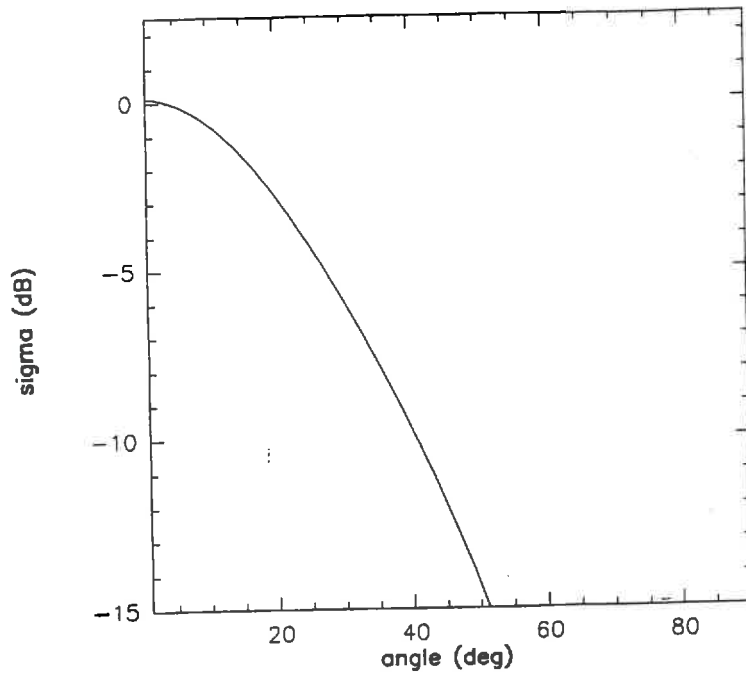
Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long correl (p) = 1.95 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

### Section efficace



MODELE DE KIRCHOFF

: champs scalaires

freq = 5.35 GHZ

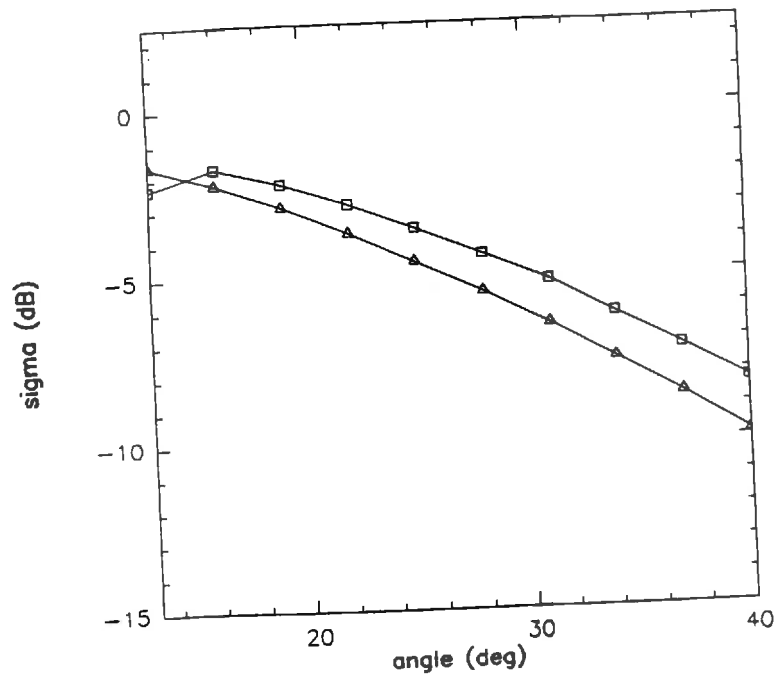
Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long correl (p)= 3.00 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

### ULABY - TOAN Integration incoherente (0,90deg)



FICHER : sinusoide.dat

freq = 5.35 GHZ

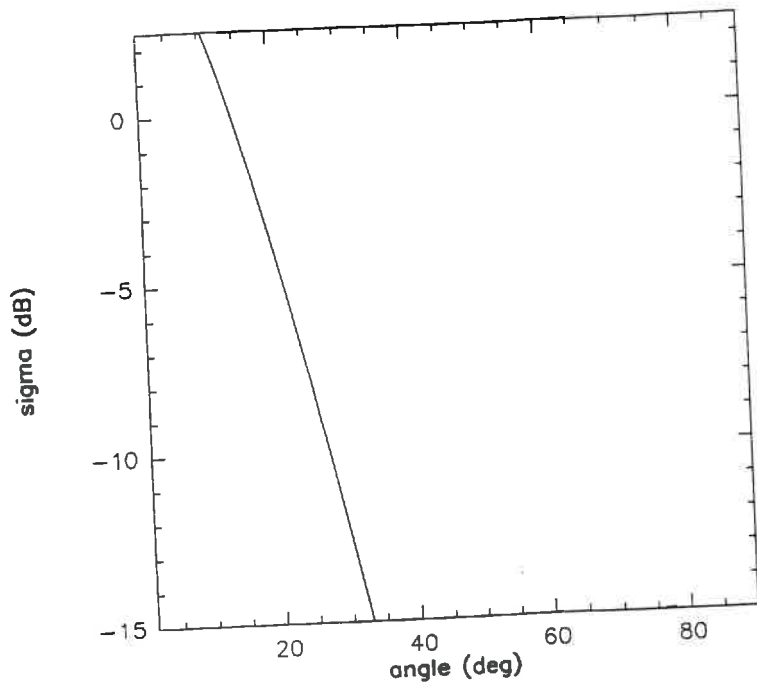
Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long correl (p)= 3.00 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

### Section efficace



MODELE DE KIRCHOFF

: champs scalaires

freq = 5.35 GHZ

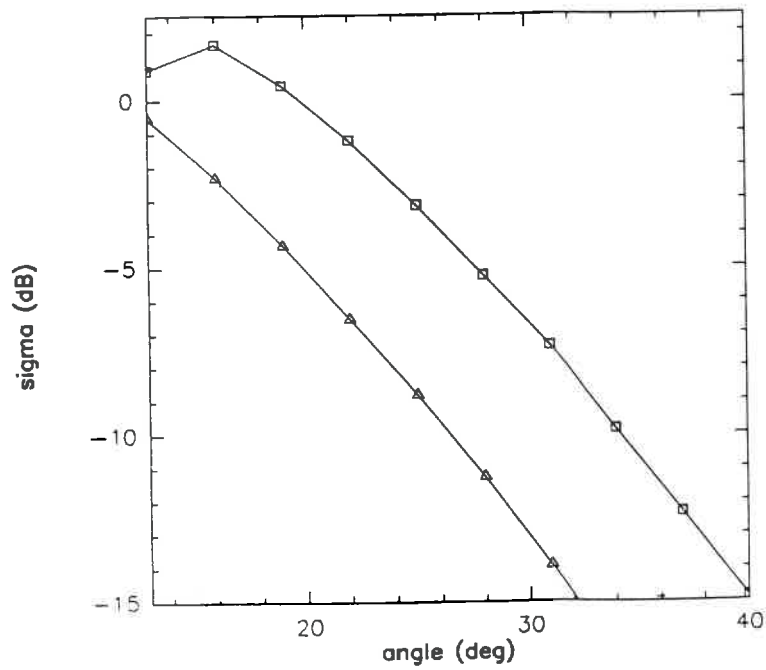
Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

long correl (p)= 5.80 cm

epsilon = 7.00 -j 1.02

### ULABY - TOAN Integration incoherente (0,90deg)



FICHER : sinusoide.dat

freq = 5.35 GHZ

Caracteristiques du sol:

hrms = 0.73 cm

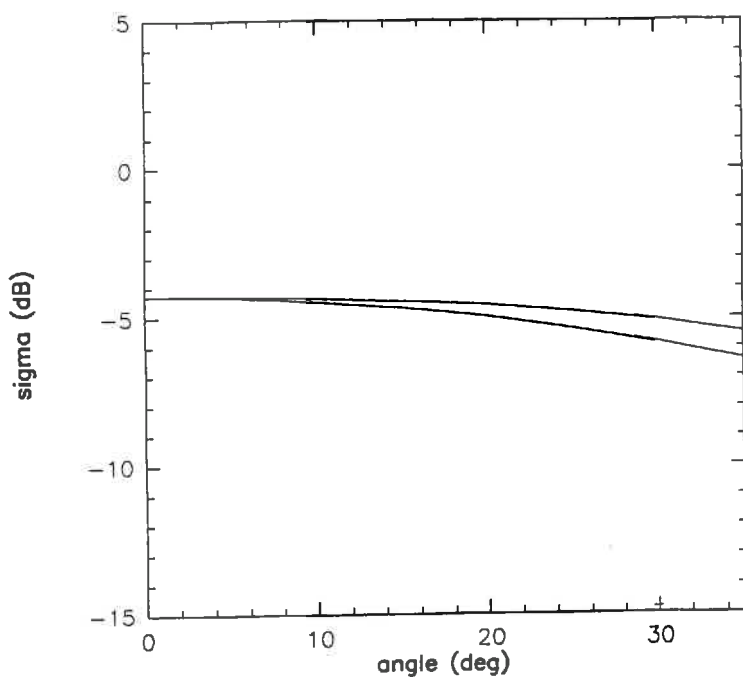
long correl (p)= 5.80 cm

epsilon = 7.00 -j 1.0

Annexe 3 : Simulation avec le modèle de Kong sur une parcelle de maïs du mois de décembre. On a fait varier la longueur de corrélation  $l$  dans les deux cas  $l_x=4.6$  et  $10.9$  cm.

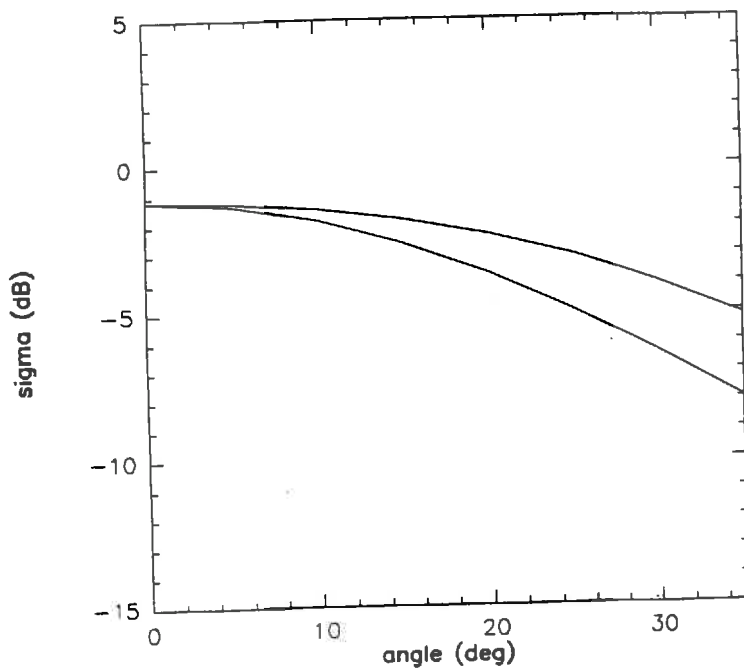


**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



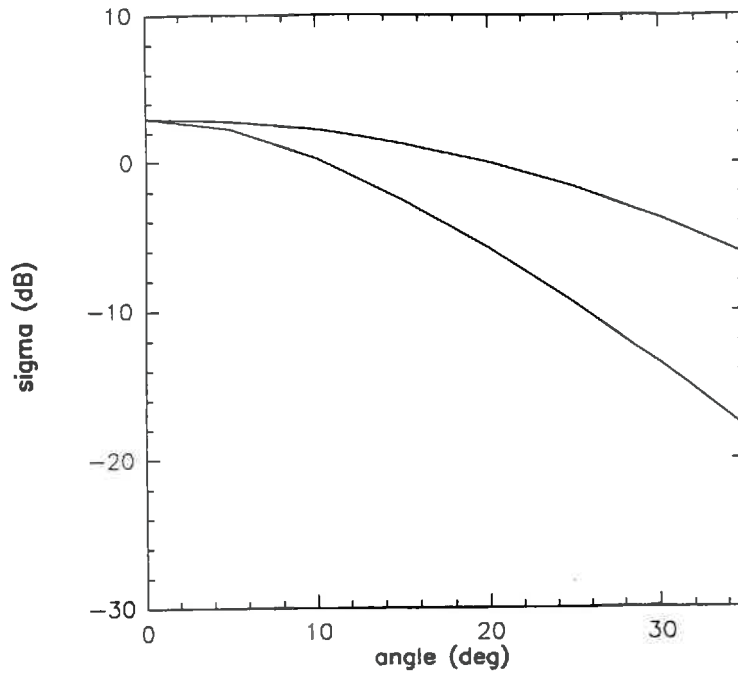
FICHER :rNOVM401.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmax : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 1.95 cm  
 long de correl(x): 10.90 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



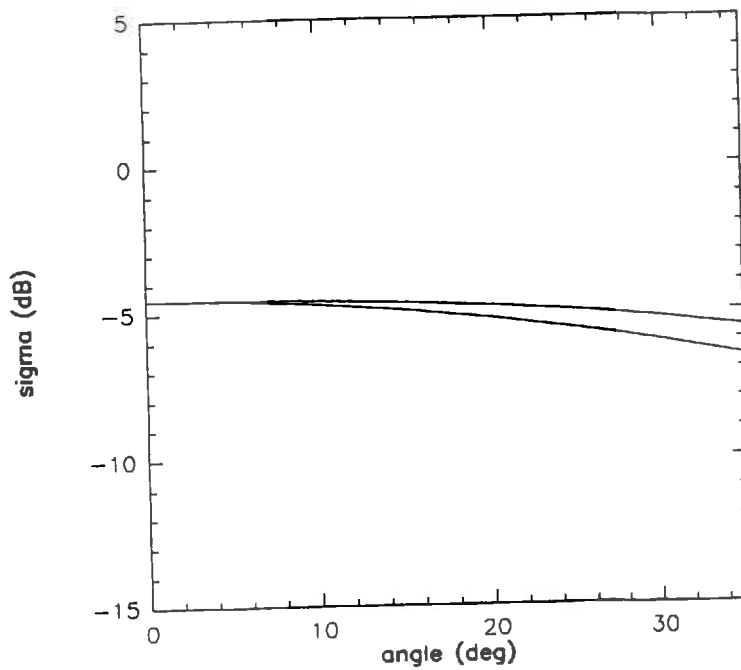
FICHER :rNOVM402.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmax : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 3.00 cm  
 long de correl(x): 10.90 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



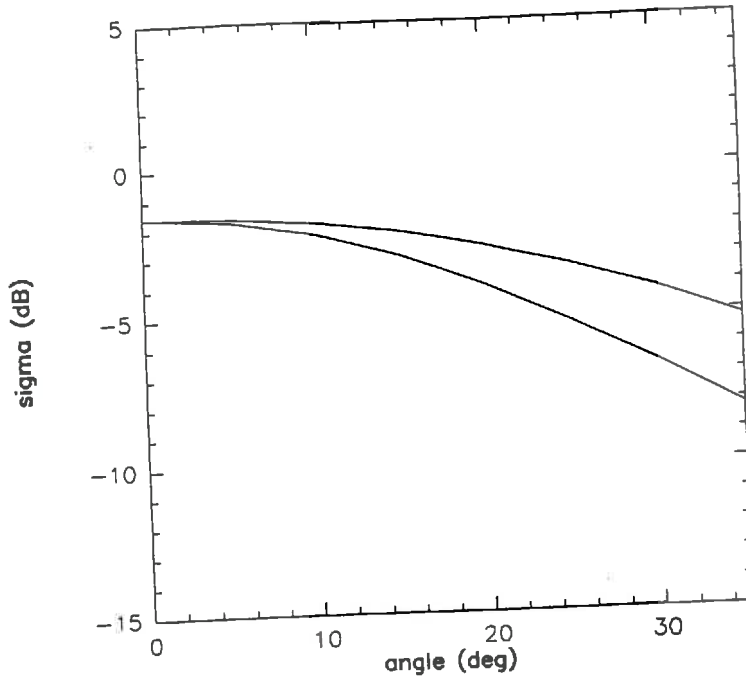
FICHER :NOVM403.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmsx : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 5.80 cm  
 long de correl(lx): 10.90 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



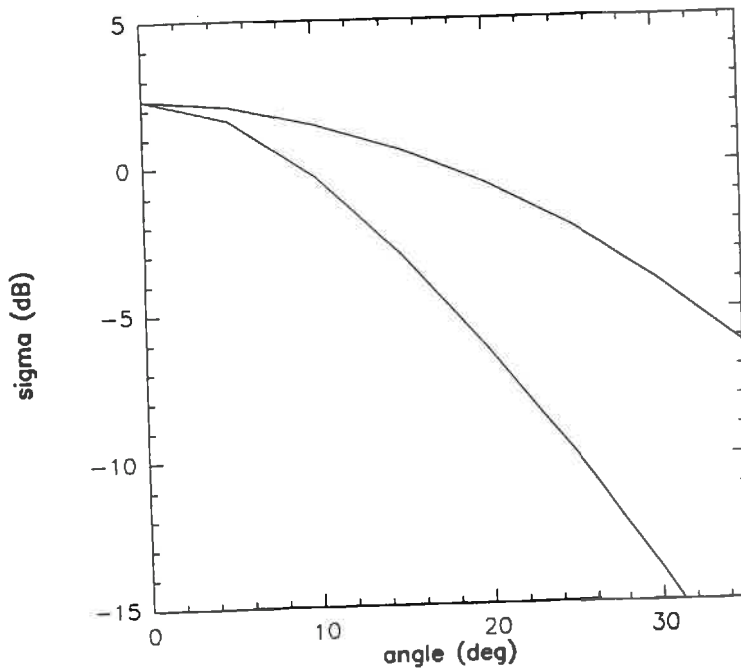
FICHER :NOVM404.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmsx : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 1.95 cm  
 long de correl(lx): 4.60 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



FICHER :rNOVM405.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmsx : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 3.00 cm  
 long de correl(lx) : 4.60 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

**MODELE DE KONG**  
( angle phi = 0 , 90)



FICHER :rNOVM406.DAT  
 Frequence 5.35 GHZ  
 CARACTERISTIQUES DU SOL:  
 amplitude : 0.00 cm  
 periode : 16.60 cm  
 hrms : 0.73 cm  
 hrmsx : 0.63 cm  
 long de correl(l) : 5.80 cm  
 long de correl(lx) : 4.60 cm  
 epsilon : 7.00 -1.02

