

Test d'un modèle simple de rétrodiffusion radar du sol nu avec un modèle simplifié et un modèle analytique

I. CHAMPION

*INRA Station de Bioclimatologie, B.P. 81, 33883 Villenave d'Ornon, France.
Tél: (33) 56843183 - Fax: (33) 56843135*

Résumé

Le suivi de l'humidité du sol dans l'espace et dans le temps est un élément clé du contrôle des ressources en eau des cultures et à une échelle plus large des études sur l'environnement. Les ondes radar sont sensibles aux variations d'humidité du sol et il faut maintenant mettre au point des algorithmes d'inversion stables afin d'interpréter en routine des séquences temporelles de mesures radar. Les modèles d'inversion doivent être obligatoirement très simples, cela suppose également qu'il soient testés et contrôlés régulièrement par des modèles plus élaborés afin de prévenir toute dérive dans l'extraction de la variable agronomique recherchée.

Ce papier présente donc un exemple d'intégration de modèles dans une stratégie d'interprétation d'une série temporelle de mesures. Dans un cas pratique où une zone de rugosité peu variable est observée par satellite ou par avion, une inversion régulière sur les données radar sera faite avec un modèle inversible (1). Le modèle inversible est une fonction linéaire du signal radar et de la teneur en eau du sol avec un terme de correction des variations d'angle d'incidence. Un modèle plus élaboré (2) développé par OH et *al.* (1992) sera utilisé ponctuellement pour évaluer des variations éventuelles de la rugosité du sol : le deuxième paramètre qui influence fortement la rétrodiffusion radar. Enfin, un modèle déterministe (3) (FUNG et *al.*, 1992) reste indispensable afin de tester le domaine de validité du modèle simple, et pour déterminer si un changement de rugosité modifie significativement l'interprétation du signal.

On observe que le modèle inversible (1) ajusté sur le jeu de données reproduit très bien les variations du signal avec la teneur en eau du sol ainsi qu'avec l'angle d'incidence. Le modèle déterministe (3) et le modèle simple (2) s'appliquent aussi de façon satisfaisante lorsque le terme de rugosité est estimé par chaque modèle indépendamment l'un de l'autre. En revanche, il existe des inadéquations entre données expérimentales et simulations par les

modèles lorsque la variable de rugosité estimée par l'un des deux modèles est introduite dans le second ainsi que dans la prise en compte de la rugosité à des fréquences variables pour le même modèle. On conclura de cette étude que les éléments existent maintenant pour interpréter en conditions réelles des séries d'images à condition d'harmoniser de façon plus complète les différentes modélisations.

Abstract

Monitoring soil moisture in space and in time is of primary importance for managing water supply to crops and on a larger scale for environmental studies such as global changes in lands suitability. Radar has proved to be very sensible to the variations of the surface moisture content, but there is still a need for simple models which can be used as an inversion algorithm in the processing of radar pictures. This paper aims at verifying if such a model can be integrated with more sophisticated ones in order to interpret a temporal sequence of measurements for the survey of soil moisture in a region where the soil roughness varies very slowly.

The simple model proposed (1) is used to survey the soil moisture on a regular base. An empirical model (2) is used from time to time to control the variations of soil roughness (OH *et al.*, 1992), and an analytic model (3) (FUNG *et al.*, 1992) is used to control the definition domain of the simple model with regard to the variations of soil status. The three models reproduce correctly the observed variations of radar signal with soil moisture and incidence angle. However, models (2) and (3), when fitted on the dataset, provide different values of estimated soil roughness and the soil roughness estimated at one frequency can not be used at other frequencies with the same model. Consequently, the state of the art does not yet allow to test simplified algorithms from analytical formulations concerning the radar detection of soil surfaces but elements do exist now to build interpretation strategy of temporal sequences for soil survey.

1. Introduction

L'évaluation de l'état du sol par les moyens de la télédétection est indispensable pour des applications très diversifiées. La télédétection radar a montré des résultats très prometteurs pour la détection de l'état du sol dans les années 1970 et 1980 (ULABY *et al.*, 1986) et ces résultats ont été confirmés dans la dernière décennie et quantifiés avec l'émergence de nombreux modèles analytiques prenant en compte la teneur en eau du sol et sa rugosité. Jusqu'à très récemment pour des considérations physiques, les modèles mis au point fonctionnaient pour des sols présentant des gammes de rugosités limitées aux rugosités très faibles ou très élevées. En 1992, deux modèles dont le domaine de validité a été étendu à ces valeurs de rugosité ont été mis au point et

présentent donc un progrès très appréciable pour l'interprétation du signal radar provenant du sol en termes de teneur en eau et rugosité. Ces modèles sont : un modèle simple destiné à l'inversion et basé sur des rapports de coefficients de rétrodiffusion mesurés pour des polarisations différentes (OH *et al.*, 1992), et un modèle analytique basé sur la résolution théorique de la diffusion de l'onde sur une surface aléatoire et diélectrique (FUNG *et al.*, 1992). L'existence de ces modèles dont le domaine de validité recouvre les gammes de rugosité présentes sur les surfaces agricoles permet d'envisager des stratégies d'interprétation de données radar qui seront à mettre au point selon le contexte.

La détection des variations d'humidité du sol trouve de nombreuses applications, or, la détection en routine de la teneur en eau du sol en télédétection radar nécessite la mise au point d'un algorithme d'inversion stable et facile à mettre en oeuvre. Pour un sol nu, l'algorithme sera utilisé seul. Pour les zones recouvertes de végétation soit cultivée soit naturelle, cet algorithme sera un compartiment d'un modèle plus large intégrant l'effet d'atténuation du signal du à la végétation (PREVOT *et al.*, 1993).

L'humidité du sol est le paramètre d'état du sol qui varie le plus rapidement d'un jour à l'autre sur des sols nus non cultivés ou bien sur les sols sous cultures. En effet, loin des périodes de travaux culturaux et à moins d'accidents ponctuels, la rugosité du sol varie lentement par rapport aux variations d'humidité. Cette dernière ne sera donc pas prise en compte dans l'algorithme d'inversion utilisé en routine. Les modèles d'inversion doivent être obligatoirement très simples, cela suppose également qu'il soient testés et contrôlés régulièrement par des modèles plus élaborés afin de prévenir toute dérive dans l'extraction de la variable agronomique recherchée. Ces modèles ont maintenant des domaines de validité qui se recouvrent : il semblerait donc que tous les outils existent maintenant pour l'interprétation du signal radar en termes de variables agronomiques ou pédologiques. Un exemple d'intégration de modèles pour l'interprétation d'une série temporelle de mesures est donc présenté dans cette étude.

2. Stratégie d'utilisation de modèles d'interprétation du signal radar

2.1 Le modèle inversible : $\sigma^{\circ} = f(m_v, \theta)$

L'interprétation d'une séquence temporelle de mesures radar sur une zone dont la rugosité varie peu afin de détecter des variations d'humidité du sol devra être faite par un algorithme stable donc de forme mathématique simple dont l'inversion sera faite sur une seule variable inconnue : l'humidité du sol. Par ailleurs la séquence sera constituée d'images radar acquises par des satellites ou bien lors de vols aéroportés. Dans un cas comme dans l'autre, des décalages géométriques peuvent intervenir, et

comme les images radar sont acquises en visée latérale, un même point est susceptible d'être vu d'une date à l'autre avec un angle d'incidence variable. Or, la variation du signal rétrodiffusé par un sol varie beaucoup avec l'angle, cet effet devra donc être corrigé dans l'algorithme. Le modèle suivant est donc proposé :

$$\sigma^0(\text{dB}) = C_1 + C_2 \cdot \cos(\theta)^{C_3} + D \cdot m_v \quad (\text{eq. 1})$$

La variation linéaire du signal radar en fonction de l'humidité volumique du sol m_v , est utilisée par de nombreux auteurs (ULABY *et al.*, 1986), d'autre part la variation du signal radar est de forme cosinusoidale pour des surfaces rugueuses avec un exposant C_3 de l'ordre de 3 à 4 (OH *et al.*, 1992) :

D est la sensibilité du signal radar à une variation de l'humidité du sol

C_1 est le niveau absolu du signal (dB) à incidence rasante ($\theta = 90^\circ$) pour un sol sec $m_v=0$

C_2 est l'amplitude angulaire totale du signal

C_3 détermine la forme de la décroissance angulaire du signal par la dérivée du modèle :

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = -C_2 \cdot C_3 \cdot \sin(\theta) \cdot (\cos(\theta))^{(C_3-1)}$$

2.2. Le modèle de contrôle de la rugosité :

$$\sigma^0 = g(\varepsilon(m_v, \text{texture}), \sigma, \theta, k)$$

Le modèle précédent a la simplicité indispensable pour pouvoir être utilisé en inversion, cependant, ses paramètres sont calculés pour une situation donnée de rugosité du sol, et celle-ci doit être contrôlée régulièrement sur une période longue d'observation à l'aide d'un modèle également inversible, et qui prendra en compte le paramètre de rugosité.

Le modèle choisi a été développé par OH *et al.* (1992). Il est adapté à des valeurs de rugosité typiques de celles des sols rugueux. Ce modèle est ajusté sur des rapport de polarisation p et q il utilise comme variable de rugosité la hauteur quadratique moyenne des rugosités notée σ :

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi}\right)^{[1/(3\Gamma_v)]} \cdot \exp(-k\sigma)$$

$$q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23 \cdot \sqrt{\Gamma_o} [1 - \exp(-k\sigma)] \quad (\text{eq. 2})$$

avec k : nombre d'onde ($k = 2\pi/\lambda$ ou λ est la longueur d'onde), σ^0 : hauteur quadratique moyenne des rugosités du sol.

Remarque : ce modèle est simple, mais ne sera pas utilisé directement en inversion pour l'estimation de l'humidité du sol pour deux raisons : sa complexité de forme rend difficile son inversion, d'autre part, ce modèle n'est pas fonction directement de la rugosité et de l'humidité du sol. La rugosité est exprimée à travers les fonctions de Fresnel, et l'humidité du sol à travers une formulation empirique de la constante diélectrique mise au point par HALLIKAINEN et *al.* (1985) qui prend en compte également la composition du sol. L'emboîtement des modèles ne peut que multiplier les sources d'imprécision sur l'estimation des variables, de plus il se pose autant de difficultés de validation pour la modélisation de la constante diélectrique des sols que pour la modélisation du coefficient de rétrodiffusion. On préférera donc en inversion une relation directe entre coefficient de rétrodiffusion et humidité du sol.

2.3. Le modèle analytique : $\sigma^{\circ} = g(\varepsilon(m_v, \text{texture}), \sigma, l, \theta, k)$

Le modèle inversible (eq. 1) est donc préférable pour l'extraction de l'humidité du sol mais son utilisation dans des conditions définies impose de connaître parfaitement son domaine d'application pour un jeu de paramètres ajustés. Il devra donc être testé sur le jeu de données le plus universel possible, c'est à dire un jeu de données généré par un modèle analytique validé. De plus ce modèle analytique, en cours d'exploitation des données, permettra d'affiner les interprétations et de recalibrer le modèle d'inversion si des variations importantes de rugosité sont détectées par le modèle (eq. 2).

Le modèle analytique utilisé est l'Integral Equation Model (IEM) mis au point par FUNG et *al.*, (1992). C'est un modèle complètement déterministe qui prend en compte la configuration de l'onde radar : polarisation, fréquence et angle d'incidence ; ainsi que l'état du sol : teneur en eau volumique, composition et variables de rugosité. Ces variables de rugosité sont la hauteur quadratique moyenne σ et la longueur de corrélation des rugosités l . La constante diélectrique apparaît dans les fonctions de Fresnel, elle est calculée avec l'expression de HALLIKAINEN et *al.* (1985) ainsi que dans le modèle (eq. 2) qui relie la constante diélectrique du sol à sa teneur en eau volumique et à sa composition. L'expression du coefficient de rétrodiffusion prend la forme suivante (eq. 3) :

$$\begin{aligned} \sigma_{pp}^{\circ} = & \frac{k^2}{2} |f_{pp}|^2 \exp(-4\sigma^2 k^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4k^2 \sigma^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^n(2k \sin \theta, 0) \\ & + \frac{k^2}{2} \text{Re}(f_{pp}^* f_{pp}) \exp(-3k^2 \sigma^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2\sigma^2 k^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^n(2k \sin \theta, 0) \\ & + \frac{k^2}{8} |F_{pp}|^2 \exp(-2k^2 \sigma^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k^2 \sigma^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^n(2k \sin \theta, 0) \end{aligned} \quad (\text{eq. 3})$$

avec :

pp : polarisation HH or VV,

k : nombre d'onde : $k=2\pi/\lambda$ ou λ est la longueur d'onde,

σ : hauteur quadratique moyenne des rugosités du sol,
 l : longueur de corrélation des rugosités du sol (elle apparaît dans les intégrales),
 f et F sont des fonctions de réflexion de Fresnel.

3. Le jeu de données expérimentales

La série temporelle utilisée pour la simulation provient d'une expérimentation effectuée en 1986 à la station de bioclimatologie d'Avignon dans le sud-est de la France à l'Institut National de Recherche Agronomique.

Le radar utilisé est un radar à modulation de fréquence construit par le Centre National d'Etudes Spatiales. Le radar était accroché à la flèche d'une grue mobile sur des rails longeant les parcelles expérimentales. La flèche de la grue pouvait pivoter sur son axe en fonction de la parcelle visée et de l'angle d'incidence de la mesure (Fig. 1).

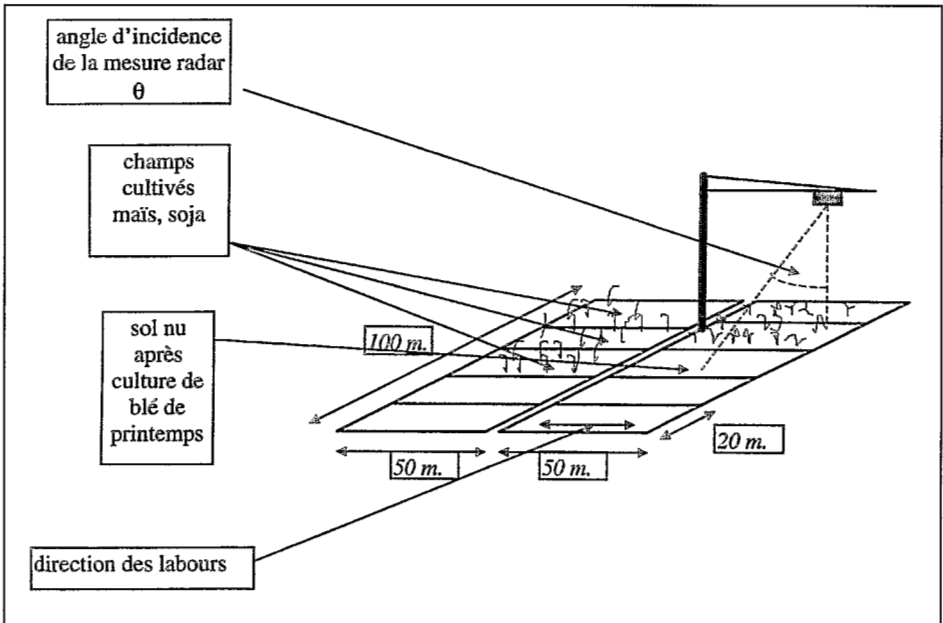


Figure 1. Plan des parcelles expérimentales.

La modulation de fréquence sur des bandes de fréquences variables avec la configuration assurerait un échantillonnage de la mesure radar en fréquence, la course du radar le long de la flèche à chaque mesure assurerait un échantillonnage spatial de la mesure. Chaque mesure radar résulte de la moyenne sur la combinaison des échantillonnages en fréquence et spatial. Les données radar ont été acquises sur plusieurs configurations d'angles d'incidence (0° à

60° par pas de 10°), de fréquences (5,3 et 9,0 GHz) et de polarisation (HH, VV et HV). A chaque mesure une calibration interne du radar permettait de corriger ses dérives électroniques et une calibration externe régulière au cours de la saison de mesure (lentille de Luneberg) assurait la calibration absolue des mesures radar à toutes les fréquences et polarisation (Tableau 1).

Tableau 1. Erreur maximale estimée sur les mesures radar en prenant en compte les effets de *speckle* et l'erreur de mesure observée au cours des étalonnages internes et externes.

Fréquence	5.3 GHz	9.0 GHz
Erreur estimée	1.5 dB	1.0 dB

La zone mesurée était un sol nu précédemment recouvert de blé de printemps et débarrassé des chaumes. L'état du sol est donc celui d'un sol d'abord cultivé puis laissé en l'état. La durée des mesures est d'une semaine, le deuxième jour de mesure le sol a été arrosé (90 mm), afin de disposer d'une gamme d'humidité de sol très large (sol sec : 0,02 g.cm⁻³, sol très humide : 0,30 g.cm⁻³), (Fig. 2).

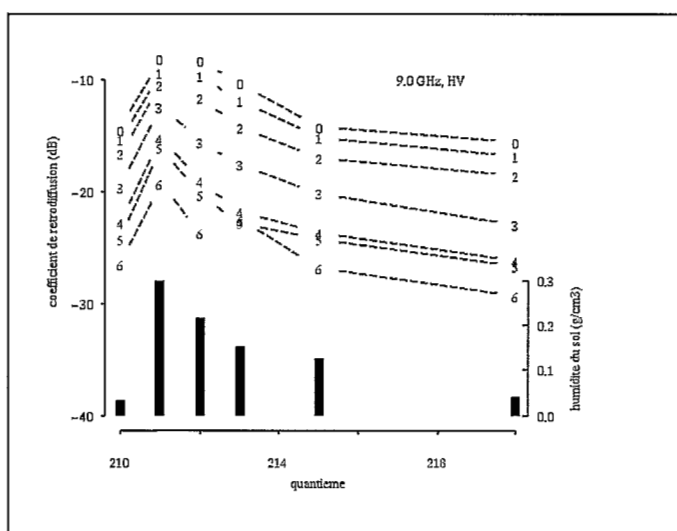


Figure 2. Variation temporelle du coefficient de rétrodiffusion pour différents angles (0 à 60°, symboles 0 à 6) et de l'humidité volumique du sol (barres) durant la semaine de mesure.

L'humidité du sol a été prélevée chaque jour de mesure radar de façon aléatoire dans la parcelle sur les 4 premiers cm affleurant la surface. Après dessèchement en étuve sur 24 heures, l'humidité pondérale était calculée (unité : g/g). La densité du sol (unité : g/cm³) mesurée sur un profil avec une sonde gamma est combinée avec l'humidité pondérale et fournit m_v la teneur en eau volumique utilisée dans les modèles (BERTUZZI *et al.*, 1987). Le cycle de mesure couvre une période courte, et le sol étant stabilisé après l'installation puis l'élimination de la culture, la rugosité du sol ne

change pas. Le sol est limono-argileux composé de 27,2 % d'argile, 61,7 % de limons, 11,05 % de sables et 1,7 % de matière organique.

4. Mise en oeuvre des modèles - Résultats

Le modèle inversible (eq. 1) est ajusté à tous les angles d'incidence, 5,3 et 9,0 GHz et aux polarisations HH, VV et HV (Tableau 2). L'écart-type résiduel total estimé après l'ajustement est 2 dB, de l'ordre de l'erreur de la mesure radar (Tableau 1).

Tableau 2. Valeurs des paramètres calculés du modèle inversible (eq. 1). L'erreur résiduelle calculée par configuration est notée R2.

	C_1	C_2	C_3	D	R2
5.3 GHz, HH	-29.2	27.2	2.8	16.7	1.9
5.3 GHz, VV	-26.0	24.0	2.7	15.4	1.9
5.3 GHz, HV	-33.0	16.0	3.2	21.9	1.6
9.0 GHz, HH	-20.9	17.4	3.9	18.1	2.1
9.0 GHz, VV	-21.5	17.1	3.1	10.9	2.2
9.0 GHz, HV	-27.0	12.9	4.2	20.3	2.4

On observe que la dynamique du signal avec les variations d'humidité du sol (Fig. 3) ainsi qu'avec l'angle d'incidence de la mesure (Fig. 4) est bien reproduite par le modèle (eq. 1). La forme cosinus paraît correcte et bien correspondre aux données observées (Fig. 4), l'exposant C_3 prend des valeurs proches de 3 (Tableau 2) ce qui est prévu par la théorie pour des sols rugueux (OH et al., 1992).

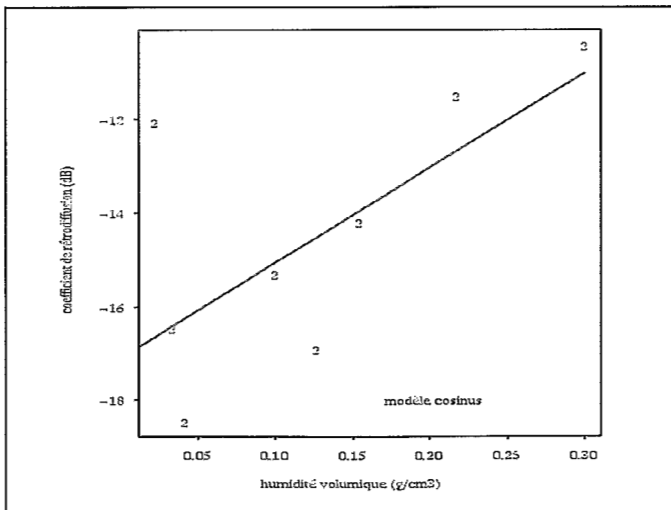


Figure 3. Variation du signal rétrodiffusé par le sol avec sa teneur en eau volumique et modèle inversible (ligne solide). Mesure faite à 9,0 GHz, polarisation HV et 20° d'angle d'incidence.

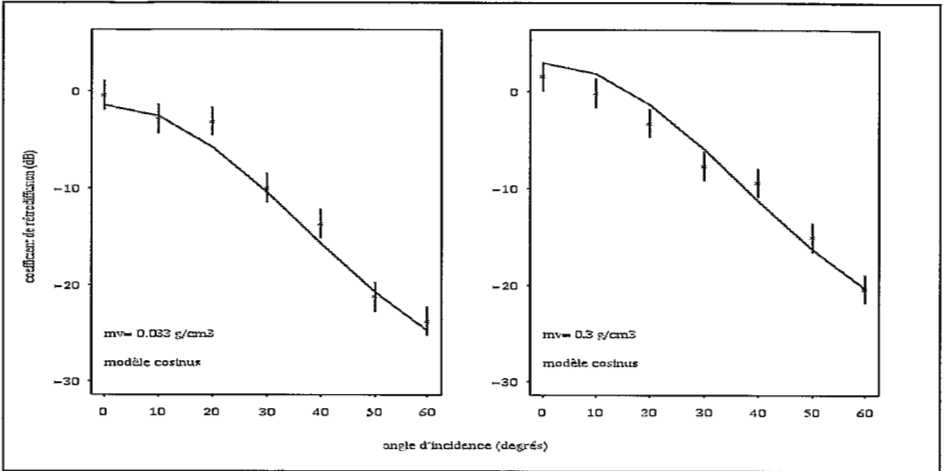


Figure 4. Variation du signal rétrodiffusé par le sol avec l'angle d'incidence et modèle inversible (ligne solide) pour deux valeurs extrêmes de la teneur en eau du sol. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur estimée sur la mesure pour la configuration choisie (5.3 GHz, HH: 1,5 dB).

La deuxième étape consiste à appliquer le modèle simple de OH *et al.* (1992) (eq. 2) afin d'estimer la rugosité du sol connaissant son humidité de surface. On considérera que dans une situation réelle, la composition du sol est connue par les cartes pédologiques et qu'elle ne varie pas afin de calculer la constante diélectrique du sol. Le modèle est calculé avec la hauteur quadratique moyenne de la rugosité σ ajustée. La valeur de rugosité obtenue est 1,8 cm avec une incertitude de 0,7 cm sur la valeur estimée. Le modèle avec la valeur de rugosité estimée sur le jeu de données paraît reproduire correctement le comportement du signal observé sauf aux angles faibles (Fig. 5).

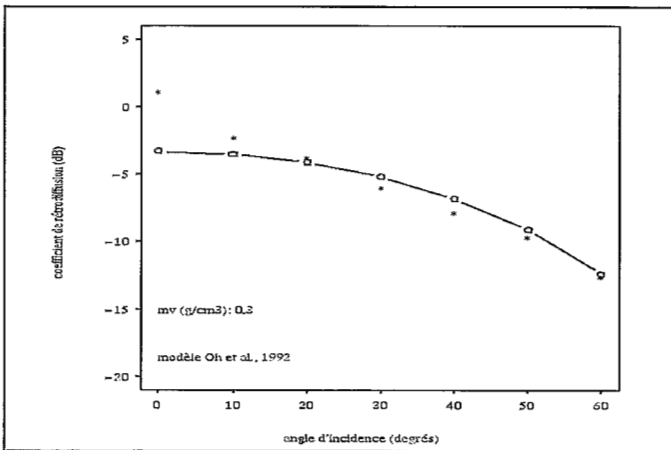


Figure 5. Variation du coefficient de rétrodiffusion avec l'angle d'incidence modélisé par le modèle simple avec la valeur de la hauteur quadratique moyenne des rugosités σ égale à 1,8 cm (mesure effectuée à 9,0 GHz, HH).

Le modèle analytique doit permettre au cours du dépouillement de la campagne de mesure de vérifier si l'algorithme est toujours valable ou bien si une variation de l'état du sol sort de son domaine de validité afin ensuite éventuellement de recadrer ce domaine de validité par l'utilisation d'un jeu différent de paramètres (C_1, C_2, C_3, D). Afin de tester ce modèle, Le modèle (eq. 3) de FUNG *et al.* est appliqué sur le jeu de données expérimentales (Fig. 6).

Deux valeurs de rugosité inconnues : la hauteur quadratique moyenne σ et la longueur de corrélation des rugosités l doivent être estimées par le modèle. Les valeurs obtenues sont $\sigma = 0,6$ cm et $l = 2,5$ cm.

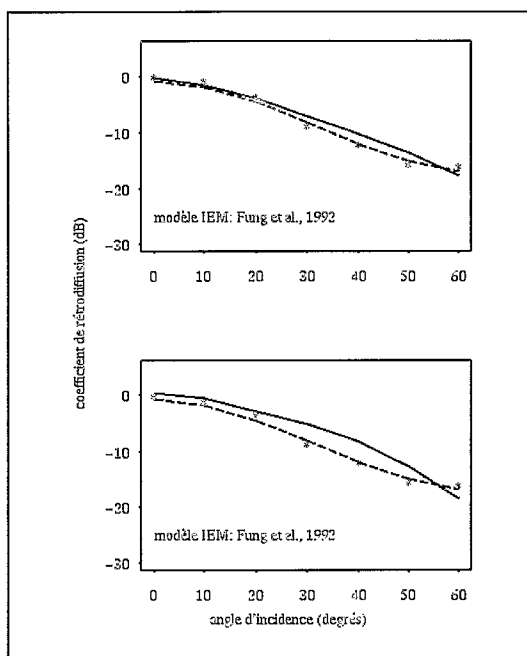


Figure 6. Variation du coefficient de rétrodiffusion avec l'angle d'incidence modélisé par le modèle analytique (trait plein). Pour comparaison le modèle inversible est figuré en pointillé. Les valeurs observées sont notées par des points. Mesures effectuées à 9,0 GHz, polarisation HH. Sur la figure du haut, les valeurs sont calculées par le modèle analytique avec des valeurs de rugosité ajustées sur le jeu de données acquis à 9,0 GHz. Sur la figure du bas, les valeurs de rugosité estimées pour la fréquence 5 GHz sont utilisées.

La troisième étape consisterait à injecter la valeur de rugosité estimée par le modèle simple au temps t dans le modèle analytique afin de tester le domaine de validité de l'algorithme d'inversion. La teneur en eau du sol ainsi que sa hauteur quadratique moyenne sont connues, en revanche la longueur de corrélation des rugosités utilisée dans ce modèle doit être estimée. Or, on observe que les valeurs σ estimées par les deux modèles sont différentes : $\sigma = 1,8$ cm pour le modèle simple (eq. 2) et $\sigma = 0,6$ cm pour le modèle analytique (eq. 3).

Par ailleurs, le modèle IEM ne reproduit pas très bien l'évolution angulaire observée sur les données expérimentales même lorsque les deux paramètres de rugosité sont ajustés (Fig. 6, haut). Enfin, il semble que la modélisation du signal en fonction de la fréquence ne reproduise pas les observations expérimentales entre 5,3 et 9,0

GHz : un jeu de valeurs de rugosité ajusté avec le modèle analytique à 5,3 GHz ne s'applique pas à 9,0 GHz où apparaît un biais (Fig. 6, bas).

Conclusion

L'extension récente de la modélisation radar sur sol nu à des valeurs de rugosité intermédiaires entre le domaine de la physique optique et celui qui est couvert par les résolutions de Kirchhoff constitue un progrès décisif qui permet d'envisager l'utilisation couplée de différents modèles pour l'interprétation de données. L'existence de modèles dont les domaines de définition sont superposables permettrait de les intégrer dans une stratégie d'interprétation du signal adaptée à une problématique donnée.

Dans cette étude nous nous sommes posé le problème d'interpréter des mesures régulières pour le suivi de l'humidité du sol compte tenu de la variation possible de sa rugosité. Dans cette stratégie, les trois modèles de rétrodiffusion (de complexité échelonnée entre l'algorithme inversible et le modèle analytique) fournissent des solutions à des échelles de temps différentes.

Ces modèles sont faciles à mettre en oeuvre pour un non spécialiste, et donnent de bons résultats. Cependant, il reste encore des difficultés dans la prise en compte du terme de rugosité du sol qui provoque un biais dans la modélisation du signal pour des fréquences variables. De plus les valeurs de rugosité estimées sont légèrement différentes selon les modèles. Or, le signal radar étant très sensible à la rugosité du sol dans ces gammes de valeur, une variation peut conduire à des biais importants, et des distorsions sur l'estimation des autres variables. Ces difficultés conduisent à se poser la question de la signification réelle de ces paramètres de rugosité et de leur rapport avec la hauteur quadratique moyenne des rugosités effectivement mesurées dans le champ et à souhaiter une meilleure harmonisation des différentes modélisations du signal radar. Cependant, la différence entre les valeurs de rugosités estimées n'est pas très importante en valeur absolue ce qui témoigne de leur bonne adéquation générale avec les données observées. Leur application intégrée devient donc maintenant tout à fait envisageable dans un avenir proche pour l'interprétation de mesures radar à des fins de surveillance de l'état de surface du sol.

Bibliographie

BERTUZZI P., BRUCKLER L., GABILLY Y., GAUDU J.C. (1987). « Calibration, field testing and error analysis of a gamma-ray probe for in-situ measurement of dry bulk, density », *Soil Science*, 149, 169-178.

I. CHAMPION

- HALLIKAINEN, M., ULABY F.T., DOBSON M.C., EL-RAYES M., WU L.K. (1985). « Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I: empirical models and experimental observations », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE - 23, pp. 25-34.
- FUNG A.K., LI Z., CHEN K.S. (1992). « Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface », *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, Vol. 30, N. 2, pp. 356-369. March 1992.
- OH Y., SARABANDI K., ULABY F.T. (1992). « An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces », *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, Vol. 30, N. 2, pp. 370-381. March 1992.
- PREVOT L., CHAMPION I., GUYOT G. (1993). « Estimating Surface Soil Moisture and Leaf Area Index of a Wheat Canopy Using a Dual-Frequency (C and X) Scatterometer », *Remote Sensing Environ.*, 46:331-339.
- ULABY F. T., MOORE R.K., FUNG A.K. (1986). Microwave remote sensing. active and passive, Artech House, 1986, Vol. III: from theory to applications.