

Mesures aéroportées pour l'observation du sol et des paysages : la mesure *in situ* et la télédétection

Vie
Scientifique

63

NATURES
SCIENCES
SOCIÉTÉS
2002

Compte rendu de séminaire (PEVS, Zone atelier) (suite)

Utilisation des radars pour la mesure de la rugosité de la surface continentale

MEHREZ ZRIBI

L'état de la surface du sol exerce une influence fondamentale sur la répartition de la pluie entre infiltration, rétention superficielle et ruissellement et a un rôle essentiel dans les processus hydrologiques de surface et ceux associés d'érosion (Kirkby, 1978, Boardman et al., 1990, Planchon et al., 1998). La caractérisation et la prise en compte de ces conditions de surface (état hydrique et rugosité de surface) constituent actuellement un enjeu important pour la modélisation à base physique des processus d'entrée de l'eau dans le sol, de ruissellement et d'érosion.

Les mesures classiques *in situ* sont insuffisantes et très coûteuses pour pouvoir étudier les variations spatiales et temporelles de ces conditions de surface aux échelles des bassins versants et des régions. Dans ce contexte, la télédétection apparaît comme la seule solution possible pour répondre au besoin de compréhension des différents processus de l'eau sur la surface du sol.

Depuis plusieurs années, les travaux scientifiques ont montré le potentiel du signal radar, en particulier les mesures acquises par les Radars à Ouverture Synthétique (ROS) dans la caractérisation spatio-temporelle des paramètres de surface tels que l'humidité de surface et la rugosité ou microtopographie de la surface des sols (Quesney et al., 2000, Rakotoarivony et al., 1996 ; Zribi et al., 1997). Plusieurs modèles de rétrodiffusion électromagnétique théoriques (Ulaby et al., 1986, Ogilvy, 1991) ont été développés ces dernières années dans le but de modéliser la rétrodiffusion des surfaces naturelles et ainsi d'inverser la réponse radar pour restituer les différents paramètres de la surface du sol. Ces modèles dépendent des caractéristiques du capteur (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation) et de celles de la cible (paramètres statistiques de rugosité, constante diélectrique directement liée à l'humidité surfacique (Hallikanen et al., 1985)). L'utilisation de ces modèles ne peut se faire que dans des domaines restreints au delà desquels ils ne sont plus valides.

Une description rigoureuse de la rugosité de la surface est indispensable pour bien décrire la relation d'interaction onde-surface. Elle est essentiellement basée sur deux paramètres statistiques : l'écart type des hauteurs (s) et la longueur de corrélation (l) déduits à partir de la fonction d'autocorrélation des hauteurs.

Dans la section II, je présente la notion de rugosité et comment la mesurer. La section III est dédiée à la présentation des différents types de modèles de rétrodiffusion électromagnétiques. La section IV permet à travers l'exemple de la campagne de mesures Orgeval'94 de montrer la description et les résultats de validation apportés par les mesures expérimentales.

MEHREZ ZRIBI,
Physicien,
CETP/CNRS,
10/12, av. de l'Europe,
78140 Vélizy-Villacoublay
zribi@cetp.ipsl.fr

Rugosité de surface

Notion de rugosité électromagnétique

La rugosité d'une surface est toujours définie par rapport à une échelle de référence spatiale lorsque l'on s'intéresse à l'interaction entre un sol rugueux et une onde électromagnétique. La référence spatiale naturellement introduite est la longueur d'onde. Ensuite, cette rugosité est aussi liée à l'angle d'observation de la surface. Ainsi, une surface qui paraît très rugueuse pour les ondes optiques correspond à une surface qui paraît lisse pour les micro-ondes. L'amplitude de la diffusion suivant la direction spéculaire décroît alors que la rétrodiffusion augmente lorsque la surface tend à devenir plus rugueuse. Un radar monostatique (transmission et réception localisées au même endroit) reçoit la composante rétrodiffusée de l'énergie diffusée. Ainsi, un radar monostatique ne devrait, théoriquement, recevoir aucun signal retour d'une surface lisse (spéculaire) sauf à l'incidence normale. Lorsque la rugosité de la surface augmente, la composante cohérente (spéculaire) devient négligeable et finit par être inexistante dans le cas d'une surface très rugueuse.

Description des paramètres de rugosité

Le paragraphe qui suit décrit à partir d'un formalisme mathématique la représentation « idéalisée » et formelle d'une surface pouvant être observée par radar : on suppose qu'elle est stationnaire (elle n'évolue pas dans le temps) et ergodique (toutes les moyennes que

l'on fait sur la surface sont supposées équivalentes) : on définit une surface à moyenne nulle afin de mettre en évidence les fluctuations par rapport à la surface. Par exemple, un sol horizontal sur lequel des sillons sont tracés sera à hauteur moyenne nulle, les élévations des sillons constituant des fluctuations (la « rugosité » de la surface). La formulation proposée permet d'établir, après manipulation du signal, des paramètres caractéristiques de la rugosité de la surface (longueur de corrélation caractéristique de la variabilité spatiale du signal caractérisant par exemple les hauteurs et largeurs des sillons). Les dimensions fractales sont ici les dimensions caractéristiques d'échelles inférieures au sillon. Par exemple, au cours du vieillissement d'un labour, des mottes de terre de tailles variables vont s'organiser en relation avec le sillon.

Considérée comme stationnaire et ergodique, la surface est décrite généralement comme une surface aléatoire. On associe, pour chaque point $M(x,y)$ donné par rapport à un plan de référence, sa hauteur $Z=f(x,y)$ à une variable aléatoire et on caractérise la surface par les lois statistiques de cette variable aléatoire. On se contente habituellement des moments d'ordre 1 et 2 pour décrire la surface (Ogilvy, 1991) :

$$\text{– La hauteur moyenne : } \langle Z \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} Z p(Z) dZ = 0 \quad (1)$$

p : densité de probabilité des hauteurs souvent considérée comme gaussienne.

$$\text{– L'écart type des hauteurs } s^2 = \langle Z^2 \rangle \quad (2)$$

– L'autocovariance (égale à la fonction d'autocorrélation si $\langle z \rangle = 0$) :

$$R(u,v) = \langle Z(x+u, y+v) Z(x,y) \rangle \quad (3)$$

À l'origine, la fonction d'autocorrélation est égale au carré de l'écart type des hauteurs : $R(0,0) = s^2$. La fonction de corrélation est la fonction d'autocorrélation R normalisée par sa valeur à l'origine :

$$\rho(u,v) = \frac{R(u,v)}{s^2} \quad (4)$$

– La longueur de corrélation de la surface :

Ce paramètre est évalué à l'aide de la fonction d'autocorrélation normalisée. Dans le cas isotrope, il est défini comme étant la distance X pour laquelle

$$\rho(X) = \frac{1}{e}.$$

Les fonctions d'autocorrélations des sols sont généralement lissées par des fonctions gaussiennes ou exponentielles.

Cette description a montré à travers la difficulté de simulation de rétrodiffusion sur les surfaces naturelles son insuffisance pour décrire complètement la géométrie de la surface. Plusieurs équipes de recherche ont ainsi développé ces dernières années des approches de description de la surface du sol plus complexes (Davidson et al., 2000 ; Franschetti et al., 2000 ; Zribi et al., 2000a, Zribi et al., 2000b). Zribi et al. (2000b) propo-

sent une description basée sur le modèle fractionnaire brownien pour décrire les petites échelles (inférieures à la longueur de corrélation) à la surface du sol négligées par la première approche. La dimension fractale, lorsqu'elle existe, est définie comme 2-H où H vérifie :

$$E\left(\|h(x+\Delta x) - h(x)\|\Delta x\right)^{-H} = E\left(\Delta h_{\Delta x=1}\right) \quad (5)$$

avec $\Delta h_{\Delta x=1}$, la variation de la hauteur (x) sur une distance égale à une unité.

Ainsi, trois paramètres sont utilisés pour la description de la géométrie de surface : l'écart type des hauteurs (s), la longueur de corrélation (l) et la dimension fractale (D).

Moyens géométriques de la mesure de la rugosité

Pour déterminer de façon géométrique les paramètres de rugosité d'un sol agricole, il est indispensable d'avoir des mesures relatives à sa surface. Plusieurs moyens peuvent être utilisés pour réaliser cette tâche. Le plus ancien est le rugosimètre à aiguille. Il est d'une longueur généralement comprise entre 1 m et 3 m, formé de baguettes qui coulisent verticalement. Il offre une faible précision avec un pas de 1 cm entre deux aiguilles voisines. Les profils de hauteurs du sol obtenus sont photographiés et numérisés par la suite. Le deuxième moyen de mesure est le profilomètre laser. Ses mesures de profils offrent une excellente précision qui peut être de l'ordre de 1 mm. Son défaut est principalement lié aux difficultés de sa mobilité sur un site agricole.

Une nouvelle méthode de mesure de la rugosité fondée sur la technique de stéréovision commence à être utilisée (Rabin et al., 1997). Elle permet d'obtenir des images tridimensionnelles (3D) de la surface du sol pour des parcelles de tailles égales à 1 m² tout en gardant une très bonne précision de l'ordre de 1 mm.

Modèles de rétrodiffusion de surface

Ayant défini les propriétés statistiques des surfaces, il faut alors modéliser la réponse d'un radar en fonction des paramètres précédemment définis et plusieurs types de modèles sont possibles. Les développements qui suivent évaluent l'utilisation des modèles de réponse des radars ; plusieurs types de modèles sont envisagés, aussi bien les modèles théoriques rigoureux que des modèles simplifiés et approchés.

Modèles analytiques

Les modèles électromagnétiques de rétrodiffusion ont pour objectif de simuler le signal radar en le reliant aux paramètres physiques de la surface du sol (humidité et rugosité). L'étude de la diffusion des surfaces rugueuses est toujours le sujet de nombreux travaux de recherche, théoriques et expérimentaux. La majorité des modèles électromagnétiques de rétrodiffusion théoriques peuvent être partagés en deux catégories : d'abord, les modèles approximatifs tels que la théorie de Kirchhoff

et des petites perturbations et ensuite des modèles plus rigoureux basés sur les équations intégrales des champs.

Les premiers modèles ont été adaptés à des conditions de rugosité extrêmes. Le modèle des petites perturbations n'est adapté que pour des surfaces très lisses. Les modèles utilisant la méthode de la phase stationnaire n'est valable que sur des surfaces très rugueuses. L'approximation scalaire des champs est valable sur des surfaces moyennement rugueuses mais on ne peut l'appliquer que sur des surfaces isotropes et de fonction d'autocorrélation gaussienne. Le modèle IEM « Integral Equation Model » a été développé pour étendre l'utilisation des modèles théoriques (Fung et al., 1992). Son calcul est basé sur l'équation de Stratton-Chu.

L'expression du modèle IEM est la suivante :

$$\sigma_{pp}^0 = \frac{k^2}{2} \exp[-2k_z^2 s^2] \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(-2k_x, 0)}{n!}, \quad p = h, v \quad (6)$$

avec $k_z = k \cos \theta_i$, $k_x = k \sin \theta_i$, θ_i est l'angle d'incidence du radar, k est le nombre d'onde, s est l'écart type des surfaces, I_{pp}^n est calculée fonction de l'angle d'incidence, de la constante diélectrique de la surface, et du coefficient de Fresnel, et $W^{(n)}(-2k_x, 0)$ est la transformée de Fourier de la fonction de corrélation de la surface d'ordre n .

À partir de deux campagnes de mesures radar (Pays de Caux'94 et SIRC /X-SAR'94), une étude de la validité de ce modèle a été conduite. Les différents travaux ont montré que le modèle IEM ne demeure valable que sur des surfaces lisses à faible ks (Rakotoarivony et al., 1996, Zribi, 1998). L'estimation de la limite sur l'écart type des hauteurs est de $ks < 1.3$.

Modèles empiriques

Plusieurs modèles empiriques ou semi-empiriques ont été développés ces dernières années (Oh et al., 1992, Dubois et al., 1995, Shi et al., 1997). Ils ont été réalisés en se basant sur la théorie de la rétrodiffusion tout en s'appuyant sur des bases de données radar pour ajuster les coefficients introduits. Ils sont généralement limités à peu de bases de données.

Le modèle le plus utilisé est celui de Oh qui est basé sur l'utilisation de trois configurations radar (polarisations HH, VV et HV).

L'expression de ce modèle est la suivante :

$$q = \frac{\sigma_{hv}^0}{\sigma_{vv}^0} = 0.23 \sqrt{\Gamma_0} [1 - \exp(-ks)] \quad (7)$$

Γ_0 est le coefficient de Fresnel de la surface au nadir :

$$\Gamma_0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2$$

$$\sqrt{p} = \sqrt{\frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{vv}^0}} = 1 - \left(\frac{2\theta}{\pi} \right)^{[1/3\Gamma_0]} \cdot \exp(-ks) \quad (8)$$

$$\sigma_{vv}^0 = \frac{g \cos^3 \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_v(\theta) + \Gamma_h(\theta)] \quad (9)$$

avec $g = 0.7 [1 - \exp(-0.65(ks)^{1.8})]$ et θ , l'angle d'incidence.

Modèles numériques

Le problème de rétrodiffusion peut être traité aussi par une méthode numérique. Les équations qui régissent la rétrodiffusion électromagnétique ne peuvent être résolues de façon analytique qu'en introduisant des simplifications limitant le domaine de validité du modèle obtenu. On a ainsi été amené à développer des méthodes numériques telle que la méthode des moments (Harrington, 1968) qui permettent de remplacer un opérateur linéaire par un système approché d'équations linéaires. Depuis de nombreuses années, le développement des méthodes numériques permettant de résoudre des équations intégrales est un sujet de recherches intenses (Chen et al., 1989, Fung, 1994).

Par exemple, pour la polarisation horizontale des antennes radar, les équations intégrales à résoudre sont :

$$\vec{n} \times \vec{E}^i(\vec{r}) = -\frac{1}{2} \vec{K} + \vec{n} \times \int_c [j\omega\mu_0 G_1 \vec{J} - \vec{K} \times \nabla G_1] d\vec{r}' \quad (10)$$

$$0 = -\frac{1}{2} \vec{K} - \vec{n} \times \int_c [j\omega\mu_0 G_2 \vec{J} - \vec{K} \times \nabla G_2] d\vec{r}' \quad (11)$$

avec E^i le champ électrique incident, $\vec{n}$ la normale sortante à la surface, $\vec{K} = -\vec{n} \times \vec{E}$, la densité surfacique magnétique du profil, $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}$, la densité électrique du profil, et G_1 et G_2 les fonctions de Green respectivement des deux milieux 1 et 2.

Le système linéaire déduit des équations (10) et (11) est :

$$\begin{bmatrix} Q^{11} & Q^{12} \\ Q^{21} & Q^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_y \\ J_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_y^i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Le champ électrique lointain simulé pour chaque profil est calculé par :

$$E_y^s = - \int_c [j\omega\mu_0 G_1 J_y + E_y(\vec{n}' \cdot \nabla G_1)] d\vec{r}' \quad (13)$$

Finalement, la moyenne sur P profils générés permet de simuler le coefficient de rétrodiffusion mesuré par le radar :

$$\sigma^0 = \frac{2\pi p}{P L_{eff}} \left[\sum_{j=1}^P |E_j^s|^2 - \frac{1}{P} \left| \sum_{j=1}^P E_j^s \right|^2 \right] \quad (14)$$

Résultats d'épreuves de validation

Afin de valider les approches physiques développées, une fois établies les formalisations des surfaces naturelles et les paramètres essentiels pour les caractériser et pris en compte le comportement théorique des radars sur les surfaces représentées par les précédents paramètres, il s'agit alors, au cours de campagnes de mesures de vérifier l'application des modèles aux don-

nées des radars et ainsi de valider les différents modèles proposés. À cette fin, plusieurs campagnes de mesures regroupant des mesures radar (en particulier héliporté) et mesures terrain de rugosité et d'humidité ont été effectuées ces dernières années [Orgeval'94, Projet Alpilles, AIMWATER (bassin de l'Orgeval), FLODGEN (Pays de Caux)].

Description d'une campagne de mesures (exemple Orgeval'94)

Cette campagne a eu lieu sur le bassin versant de l'Orgeval à 70 km à l'est de Paris. Ce bassin est caractérisé par une culture agricole intensive avec très peu de reliefs. Il présente plusieurs types de travaux agricoles (des labours anciens et récents, des semis de blé, des semis anciens) ce qui offre une grande diversité des paramètres de rugosité par rapport à la base de données des images stéréoscopiques. La campagne a consisté en des vols de la navette spatiale américaine portant les radars SIR-C/X-SAR. Ces vols ont permis pendant 9 jours du 7 avril au 16 avril 1994 de prendre des images radar sous plusieurs angles d'incidence à trois longueurs d'onde différentes (bandes L, C et X). Simultanément, un survol du bassin selon plusieurs axes a été réalisé par le radar héliporté ERASME du CETP (bande C et X). Ses mesures ont été enregistrées selon plusieurs angles d'incidence à deux longueurs d'onde. Dans le même cadre de cette campagne, des opérations « vérité terrain » ont été effectuées simultanément. Il s'agit principalement de mesures qui caractérisent l'état du sol, sa rugosité et son humidité sur des parcelles témoins.

Mesures Radar

La mission SIR-C/X-SAR était organisée par le JPL/NASA (États-Unis), le DARA-DLR (Allemagne) et ASI (Italie). Ces radars étaient embarqués à bord de la navette spatiale américaine. Il s'agissait de deux radars à synthèse d'ouverture. Ils fonctionnent dans trois bandes de fréquences, (1.25 GHz), (5.3 GHz), (9.6 GHz). Les images ont été acquises sous plusieurs angles d'incidence (44°, 52°, 55° et 57°), respectivement en bande L et C en polarisation horizontale et croisée, en bande X en polarisation verticale. Simultanément, le radar ERASME héliporté (Benallègue et al., 1994) a effectué plusieurs mesures sur les parcelles témoins (photos 1 et 2). Ses vols étaient faits dans deux directions, perpendiculaire et parallèle à la direction des sillons, pour tenir compte de la non isotropie du travail du sol. Il a fonctionné à deux bandes de fré-

quence C (5.3 GHz) et (9.6 GHz) pour les deux polarisations horizontale et verticale.

Mesures terrain

Mesures de rugosité

Pour calculer les paramètres de rugosité du sol, on part d'une simple mesure du profil de la surface du sol. Cette mesure est effectuée par un rugosimètre à aiguilles d'une longueur de 2 m, muni de 200 baguettes de 60 cm de hauteur et coulissant verticalement. Pour chaque parcelle, on a effectué 10 mesures de profil de 4 m (2 fois 2 m consécutifs). Ces mesures ont été réalisées parallèlement et perpendiculairement aux sillons. Les profils ont été photographiés et numérisés par la suite.

Mesures de l'humidité

Elles ont été faites simultanément aux mesures radar spatiaux et héliporté afin d'obtenir une caractérisation précise de l'humidité en évitant les risques de pluie ou de dessèchement de la surface. La méthode utilisée pour cette mesure consiste à prélever des échantillons du sol d'environ 5 cm d'épaisseur de chaque parcelle témoin et d'en déterminer le contenu pondéral en eau. D'autres techniques telle que la mesure par TDR peuvent être appliquées.

Calcul des paramètres de surface

Les paramètres de rugosité (s et l) sont estimés à partir des fonctions d'auto-corrélation expérimentales. La figure 1

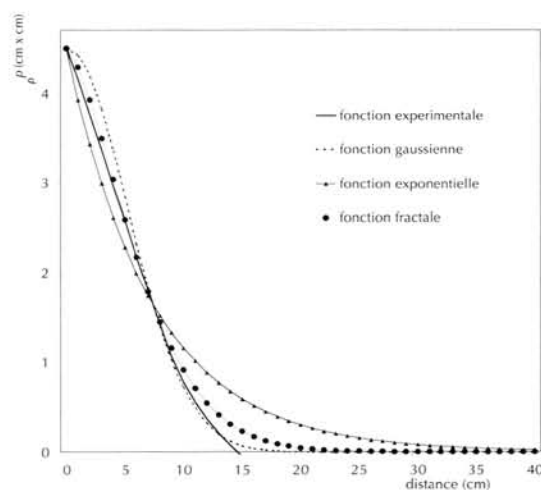


Figure 1. Parcelle témoin ($s = 2,1$ cm, $l = 9$ cm, $D = 1,27$).



1) sol lisse



2) sol labouré

Photos 1 et 2. Exemples de surfaces rugueuses agricoles.

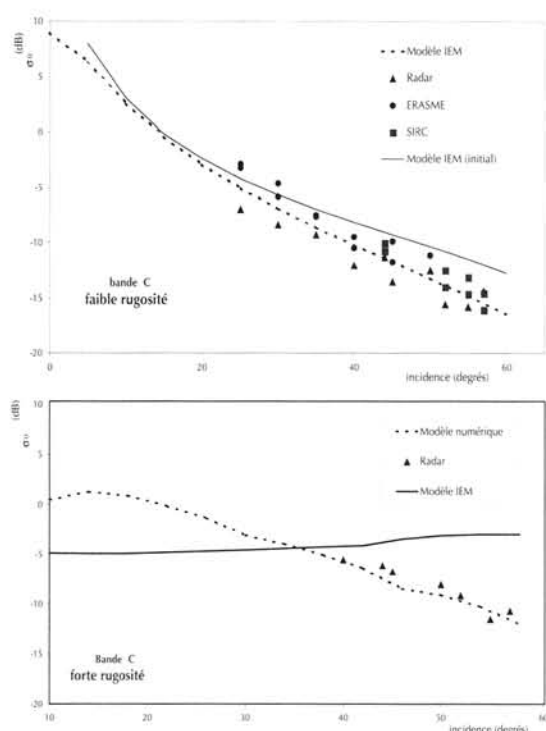


Figure 2. Comparaison entre observations issues de données SIR-C (SAR bande C) ou ERASME (radar bande C) et simulations issues (a) du modèle IEM avec ou sans prise en compte de la dimension fractale des sols, (b) de la résolution numérique par la méthode des moments ou du modèle IEM (Zribi et al., 2000c).

affiche une comparaison d'une fonction expérimentale avec une fonction gaussienne, une fonction exponentielle et une troisième déduite de l'approche fractale. Cette illustration montre l'apport de l'approche fractale à bien retrouver la forme de la fonction d'auto-corrélation, paramètre indispensable pour une meilleure simulation de la rétrodiffusion des surfaces naturelles.

Modélisation de la rétrodiffusion

La figure 2a présente une comparaison des simulations, en bande C et en fonction de l'angle d'incidence, réalisées en prenant en compte ou non la dimension fractale. Les données réelles du SAR SIR-C embarqué sur la navette américaine, et du radar hélicoptère ERASME, reportées sur la figure, montrent que l'intégration du paramètre dimension fractale dans le modèle IEM conduit à une nette amélioration des simulations (Zribi et al., 2000c). Concernant la simulation de la rétrodiffusion pour des surfaces naturelles à l'extérieur des domaines de validité des modèles analytiques, la figure 2b montre clairement l'apport de l'approche numérique dans la simulation du signal réel tel que celui acquis par les radars SIR-C et ERASME, capteurs pouvant opérer avec des angles d'incidence variant de 25 ° à 57 °.

Conclusion

Depuis quelques années, une avancée importante a été faite dans l'interprétation de la rétrodiffusion par les surfaces naturelles dans le domaine hyperfréquence actif. Cela s'est fait à travers l'amélioration de la description de la rugosité et aussi des approximations apportées aux modèles de rétrodiffusion. Malgré cela, plusieurs sols restent encore à l'extérieur des domaines de validité des différents modèles développés. Plusieurs pistes de recherche sont ouvertes pour améliorer l'approche directe :

- continuer à améliorer la description de la rugosité ;
- passer des modèles de rétrodiffusion surfaciques aux modèles volumiques ;
- développer encore plus les approches numériques considérées comme exactes.

Concernant l'approche d'inversion, il est encore difficile de restituer simultanément l'humidité et la rugosité, en particulier pour des radars mono-configuration tel que ERS2. Généralement on s'arrête à l'inversion d'un seul paramètre : l'humidité ou la rugosité de la surface (Quesney et al., 2000, Baghdadi et al., 2001).

Les nouveaux ROS multi-configurations tel que ASAR-ENVISAT vont permettre une nette progression dans les approches d'inversion développées pour la restitution simultanée des paramètres de la surface du sol.

BIBLIOGRAPHIE

- Baghdadi N., King C., Bourguignon A., Remond A., 2001, Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields. *International Journal of Remote Sensing*, in press.
- Benallegue, M., O. Taconet, D. Vidal-Madjar, F. Baudin, P. Lancelin and G. Laurent, 1994, Evaluation of Calibration Method for an Helicopter-Borne Microwave Scatterometer Devoted to Land Use, *Int. J. Remote. Sensing*, 15 (3), 645–56.
- Boardman J., Foster, I.D.L., Dearing, J.A., (Ed.), 1990, *Soil erosion on agricultural land*, Wiley, Chisester (UK), 687 p.
- Chen, M. F., K. S. Chen and A. K. Fung, 1989, A Study of the Validity of the Integral Equation Model by Moment Method Simulation-Cylindrical Case, *Remote Sensing of Environment*, 29, 217–28.
- Davidson, M. W. J., Le Toan, T., Mattia, F., Satalino, G., Manninen, T., and Borgeaud, M., 2000, On the characterisation of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 630–640.
- Dubois, P.C., Van Zyl, J., and Engman, T., 1995, Measuring soil moisture with imaging radars, *IEEE Geoscience and remote sensing*, (33) 4.
- Franschetti, G., Iodice, A., Maddaluno, S., and Riccio, D., 2000, A fractal-based theoretical framework for retrieval of surface parameters from electromagnetic backscattering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 641–650.
- Fung, A.K., Li, Z., and Chen, K.S., 1992, Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing* 30, 356–369.
- Fung, A. K., 1994, *Microwave Scattering and Emission Models and their Applications*, Artech House.
- Hallikainen, M. T., Ulaby, F. T., Dobson, M. C., El-Rayes, M. Wu, L., 1985, Microwave dielectric behavior of Wet Soil- Part I : Empirical Models and Experimental Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-2 (1), 25–34.

- Kirkby, M.J., (Ed.), 1978, Hillslope hydrology, Wiley, Chichester (UK), 389 p.
- Harrington, R., F., 1968, Field Computation by Moment Method, IEEE PRESS, Series on Electromagnetic Waves.
- Ogilvy, O., 1991, Theory of Wwave Scattering from Random Rough Surfaces, Adam Hilder.
- Oh, Y., Sarabandi, K., and Ulaby, F.T., 1992, An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 30, 370-381.
- Planchon O., M. Esteves and N. Silvera, 1998 a : Micro-topography induced by ridging in Senegal : Measurement, modelling and consequences on overland flow and erosion. XVle Congrès Mondial de Science du sol, AISS, Montpellier. CD-rom.
- Quesney, A., Le Hégarat-Masclé S., O. Taconet, D. Vidal-Madjar, J.P. Wigner, C. Loumagne, and M. Normand, 2000. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. Remote Sensing of Environment 72, 290-303.
- Ogilvy, O., 1991, Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces, Adam Hilder.
- Rabin, B., Zribi, M., Ciarletti, V., Boissard, P., Taconet, O., Chapron, M., 1997, Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three dimensional surface representation, Physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel 7-10 April, France, 333-339.
- Rakotoarivony, L., O. Taconet, D. Vidal-Madjar, P. Bellemain, 1996, Radar Backscattering over agricultural bare soils, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 10, 187-209.
- Shi, J., Wang, J., Hsu, A.Y., O'Neill, P.E., Engmann, T., 1997, Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-Band SAR Image Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35, 1254-1265.
- Ulaby, F., Moore, R., K., Fung, A., K., 1986, Microwave Remote Sensing Active and Passive, Vol III, From Theory to Applications, Artech House, Inc.
- Zribi, M., Taconet, O., Le Hégarat-Masclé, S., Vidal-Madjar, D., Emblanch, C., Loumagne, C. and Normand, M., 1997, Backscattering behavior and simulation comparison over bare soils using SIRC/XSAR and ERASME 1994 data over Orgeval, Remote Sensing of Environment 59 : 256-266.
- Zribi, M., 1998, Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol, thèse de l'Université Paul Sabatier.
- Zribi, M., Ciarletti, V., Taconet, O., Boissard, P., Chapron, M., Paillé, J., Rabin, B., 2000-a, Backscattering on soil structure described by plane facets. International Journal of Remote Sensing 21, 137-153.
- Zribi, M., Ciarletti, V., Taconet, O., Paillé, J., Boissard, P., Chapron, M., 2000-b, Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three dimensional surface representation : Analysis with a Brownian model. Remote Sensing of Environment 72, 159-169.
- Zribi, M., Ciarletti, V., Taconet, O., 2000-c, Validation of a rough surface model based on fractional brownian geometry with SIRC and ERASME radar data over Orgeval site. Remote Sensing of Environment 73, 65-72.

Conférence de citoyens « Changements climatiques et citoyenneté »

Avis et recommandations du panel de citoyens (La Villette, 10 février 2002)

S'inspirant de l'exemple de la Conférence de citoyens que le précédent gouvernement avait organisée au sujet des OGM, la Commission française du développement durable et la Cité des Sciences et de l'Industrie de La Villette ont pris l'initiative de rééditer l'expérience autour du thème « Changements climatiques et citoyenneté ». Un panel de seize citoyens a été constitué. Ses membres ont reçu au cours de deux week-ends une formation sur les aspects scientifiques, économiques, sociaux, éthiques et politiques du changement climatique. Suite à cette formation, ils ont formulé les questions dont ils souhaitaient débattre en public avec des experts scientifiques et des représentants des mondes politique, économique et associatif. Ce qu'ils ont fait les 9 et 10 février 2002 à la Cité des Sciences. À l'issue de ces deux journées, ils ont rédigé le document suivant.

Nous citoyens, à la lumière des données scientifiques actuelles, sommes convaincus que c'est notre mode de vie qui génère une quantité de gaz à effet de serre supérieure à ce que notre planète peut absorber de façon naturelle.

Ce surplus est responsable du réchauffement de notre atmosphère. Il en résultera des changements climatiques mondiaux qui deviendront de moins en moins maîtrisables dans le temps.

Face aux conséquences désormais prévisibles du changement climatique, il est urgent que nous prenions collectivement conscience de l'ampleur du phénomène et de ses effets.

Nous, citoyens, considérons que le problème lié aux changements climatiques nous concerne tous et ne doit plus demeurer l'apanage des scientifiques et des politiques.

Seule l'émergence d'instances de concertation destinées à favoriser le débat public, telle que cette conférence de citoyens, nous fera prendre la mesure du problème et changer nos comportements en conséquence.

Choix énergétiques

Attendu que :

- les émissions de GES sont dues principalement à la consommation d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) ;
- les sources d'énergie fossile sont en voie d'épuisement et leur prix ne tient pas compte des effets induits par les émissions de GES ;
- l'énergie nucléaire présente des risques à l'exploitation, génère des déchets radioactifs, et présente, en cas de transfert aux pays en voie de développement, deux dangers principaux :