Télédétection, 2003, vol. 3, n° 1, p. 1-16
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

UTILISATION DES IMAGES RSS POUR UN ÉTALONNAGE EMPIRIQUE DU MODÈLE IEM DANS UN CONTEXTE DE SOLS NUS LIMONEUX EN ZONES AGRICOLES

NICOLAS BAGHDADI*, LAURENT BONNIFAIT, CHRISTINE KING et ANNE BOURGUIGNON

Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM),
3, avenue C. Guillemin. Boîte Postale 6009.
45060 Orléans – Cedex 2. France
Téléphone : (33) 02 38 64 32 02 ; télécopieur : (33) 02 38 64 33 99
Courriel (*) : n.baghdadi@brgm.fr

(soumis le 13 février 2002 ; révisé le 19 avril 2002 ; accepté le 4 juin 2002)

Le comportement du signal radar en fonction de la rugosité de surface en sols nus limoneux a été étudié à partir d'images RSO de ERS et de RADARSAT. Les résultats indiquent une forte dépendance de l'angle d'incidence et de la polarisation sur la discrimination des différentes rugosités de surface. À forts angles d'incidence et en polarisation HH, le signal radar est plus sensible à la rugosité du sol comparativement à des configurations radar à faibles angles d'incidence ou en polarisation VV.
L'estimation des paramètres de surface en utilisant des techniques d'inversion nécessite l'utilisation de modèles de rétrodiffusion bien calibrés. Aucun des modèles existants n'est capable de simuler correctement des données radar mesurées. Nous proposons dans cette étude un étalonnage empirique du modèle IEM (*Integral Equation Model*) dans le but de mieux reproduire le coefficient de rétrodiffusion mesuré à partir des images RSO sur des sols nus. Étant donné que la longueur de corrélation est le paramètre le moins précis mais aussi le plus difficile à mesurer, nous proposons de l'estimer empiriquement à partir d'une base de données expérimentale composée d'images RSO et de mesures des paramètres du sol. Basé sur une première base de données, des relations exponentielles entre la longueur de corrélation estimée empiriquement et la rugosité de surface ont été retrouvées pour chaque configuration radar. La version étalonnée du modèle IEM, correspondant à la version originale du modèle IEM avec la fonction empirique de la longueur de corrélation, a par la suite été validée sur une seconde base de données expérimentale indépendante. Les résultats montrent un bon accord entre le coefficient de rétrodiffusion fourni par les systèmes RSO et celui simulé par le modèle IEM calibré. Cette version adaptée du modèle IEM peut être utilisée dans des procédures d'inversion pour retrouver la rugosité de surface à partir des images radar.

Mots-clefs : ruissellement ; ERS ; RADARSAT ; rugosité de surface ; modèle IEM ; longueur de corrélation.

USE OF SAR IMAGES FOR AN EMPIRICAL CALIBRATION OF IEM MODEL OVER BARE SILTY SOILS IN AGRICULTURAL AREAS

The relationship between the radar signal and the silty soil surface roughness has been examined using ERS and RADARSAT images. The results indicate a strong dependence of the discrimination of different surface roughnesses on incidence angle and polarization. At high incidence angles and in HH polarization, the radar signal is more sensitive to the soil surface roughness comparatively to radar configurations at low incidence angles or in VV polarization.
The retrieval of surface parameters, using inversion techniques, demands the use of well calibrated models and unfortunately, none of the existing models provide consistently good agreement with the measured SAR data. In this study, we propose an empirical calibration of the Integral Equation Model (IEM) in order to better reproduce the backscattering coefficient measured from SAR images over bare soils. As correlation length is not only the least accurate parameter but also the most difficult to measure, we propose its empirical estimation from an experimental data set of SAR images and soil parameters measurements. Based on a first data set, exponential relationships between optimal correlation length and rms surface height were found for each radar configuration. The new calibrated version of the IEM, corresponding to the original IEM with a coupling of the empirical function of correlation length, was then tested on another set of measured data in order to validate the calibration procedure. The results show a very good agreement between the backscattering measurements provided by spaceborne SAR systems and those given by the calibrated IEM. This adapted version of the IEM can be used in inversion techniques for retrieving rms height from radar observations.

Keywords : runoff ; ERS ; RADARSAT ; soil surface roughness ; IEM model ; correlation length.

* Correspondant principal

1. INTRODUCTION

Plusieurs régions d'Europe du nord sont confrontées à d'importants problèmes liés au ruissellement excessif. Le ruissellement se produit quand la quantité de pluie excède la capacité d'infiltration du sol (Zobeck and Onstad, 1987 ; Boiffin *et al.,* 1988 ; Brun *et al.,* 1990 ; Le Bissonnais, 1990). Les sols à texture limoneuse sont particulièrement sensibles au ruissellement car ils sont sujets au phénomène de battance, ou d'encroûtement, à la suite d'épisodes pluvieux (Le Bissonnais and Singer, 1992). Il en résulte une diminution considérable de la capacité d'infiltration, ce qui induit une amplification du ruissellement. On parle de ruissellement excessif lorsque les conséquences du ruissellement se montrent désastreuses : érosion des sols arables, pertes de cultures, coulées de boue, inondations, détérioration de l'eau de consommation, etc. (figure 1). Certaines des régions concernées par ce problème ont mis en place des stratégies d'action à l'échelle du bassin versant afin de mieux gérer les incidents liés aux excès du ruissellement de surface. Ces mesures visent à restreindre ou à contrôler le ruissellement de surface et l'érosion qui s'en suit par un meilleur aménagement du territoire, avec par exemple la création de prairies (les prairies étant caractérisées par une forte capacité d'infiltration).

La sensibilité au ruissellement d'un sol en milieu agricole dépend de la topographie, du taux de couverture végétale, de la texture, de la teneur en eau et également de la rugosité de surface. La rugosité est en effet un paramètre qui intervient de façon prépondérante dans la capacité de ruissellement d'une surface. Dans un sol limoneux, le potentiel d'infiltration dépend directement de l'état de surface du sol (figure 2). Au fil des précipitations, un sol limoneux rugueux évolue rapidement vers un état de surface lisse ce qui s'accompagne d'une diminution notable de sa capacité d'infiltration. En effet, la nature limoneuse du sol induit une forte capacité à la remobilisation. Sous l'effet de la pluie, cette caractéristique a pour conséquence une évolution rapide des états de surface mais également la formation d'une croûte de battance (Boiffin *et al.,* 1988 ; Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Ce phénomène repose sur la réorganisation des particules du sol remobilisées par l'impact des gouttes de pluie sur le sol et le ruissellement. Des agrégats argileux se forment et viennent imperméabiliser la surface ce qui augmente sa capacité de ruissellement. Une surface rugueuse comme par exemple un labour récent est moins favorable à la formation d'une croûte de battance qu'une surface lisse. La remobilisation nécessaire est en effet plus importante dans ce cas. De plus, un état de surface rugueux favorise naturellement l'infiltration et s'oppose donc au ruissellement. La rugosité se présente ainsi comme un paramètre essentiel du ruissellement qui dans le cas de sols limoneux est davantage lié aux états de surface qu'à la topographie et aux conditions climatiques. Il faut également noter que les terres agricoles nues sont les plus contributives au ruissellement. Il s'avère par conséquent primordial de pouvoir caractériser les terrains agricoles nus en terme de rugosité.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet européen FLOODGEN (*FLOOD risk reduction by spaceborne recognition of indicators of excess runoff GENerating areas*) dont l'objectif était de permettre une meilleure caractérisation du ruissellement en milieu limoneux. Le but de la présente étude était d'analyser, pour différentes configurations radar, le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la rugosité de surface pour dégager des possibilités de relations empiriques entre le signal radar et la rugosité de surface. Puis, le modèle IEM (*Integral Equation Model*) (Fung 1992), de rétrodiffusion radar, a été testé en comparant le coefficient de rétrodiffusion issu des images RSO à celui fourni par le modèle. Devant la difficulté du modèle à restituer fidèlement le coefficient de rétrodiffusion des images radar, un étalonnage empirique du modèle a été proposé dans le but d'accroître la concordance entre les coefficients de rétrodiffusion du modèle et des images.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Site d'étude

Le site d'étude choisi est localisé dans le pays de Caux au nord-ouest de la France et s'étend sur une zone de 20 km × 30 km (long. 0°50'O et lat. 49°47'N) (figure 3). Ce site souffre d'un ruissellement excessif dû à la conjonction de sols fragiles et à des pratiques agricoles intensives, responsables de pertes humaines et de nombreux dégâts matériels (King, 2001). Le site est relativement plat et le sol est composé d'environ 67 % de limon, 13 % d'argile et 17 % de sable. C'est une région très représentative des sites limoneux du nord-ouest de l'Europe, et c'est pourquoi elle a été choisie comme site pilote dans le cadre du projet européen FLOODGEN.

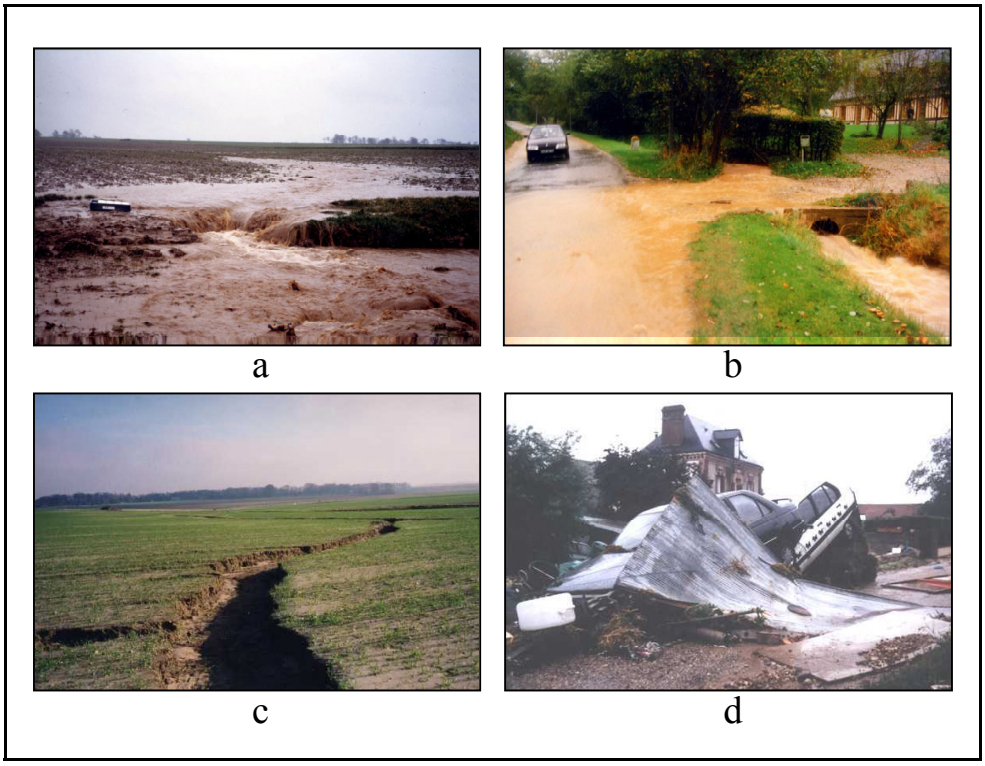


FIGURE 1 Exemples de dégât occasionné en Pays de Caux (Normandie, France) par le ruissellement excessif : a) exemple de ruissellement excessif ; b) inondation occasionnée par le ruissellement ; c) ravine due au ruissellement excessif ; d) voitures emportées par une coulée boueuse. *Examples of damage caused by excess runoff in the Pays de Caux region of Normandy, France: a) excess runoff; b) flooding; c) ravine; d) cars swept away by a mud flow.*

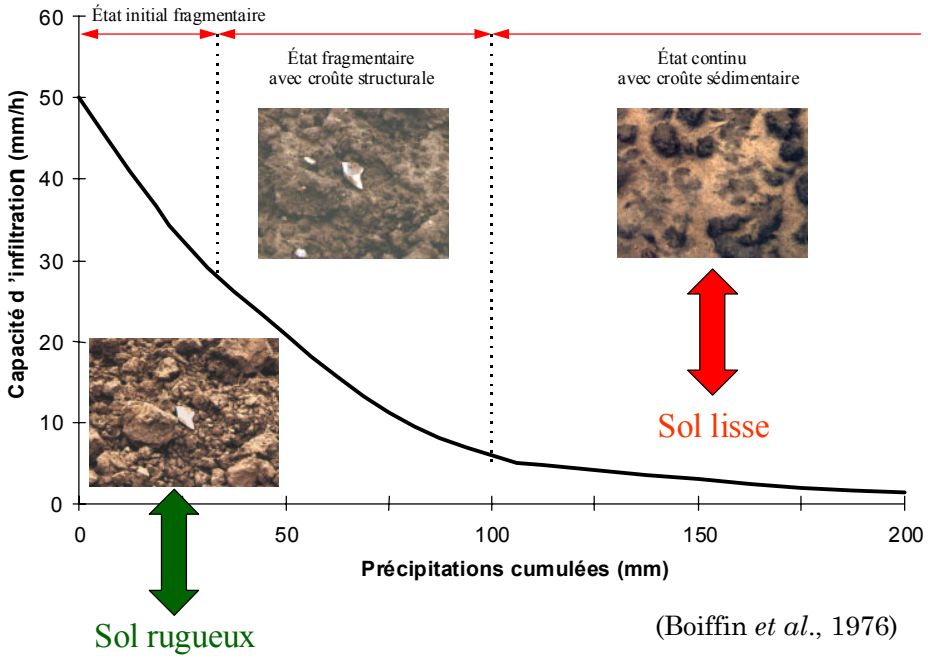


FIGURE 2 Capacité d'infiltration d'un sol limoneux en fonction de l'état de surface. *Infiltration capacity of a loamy soil according to surface state.*

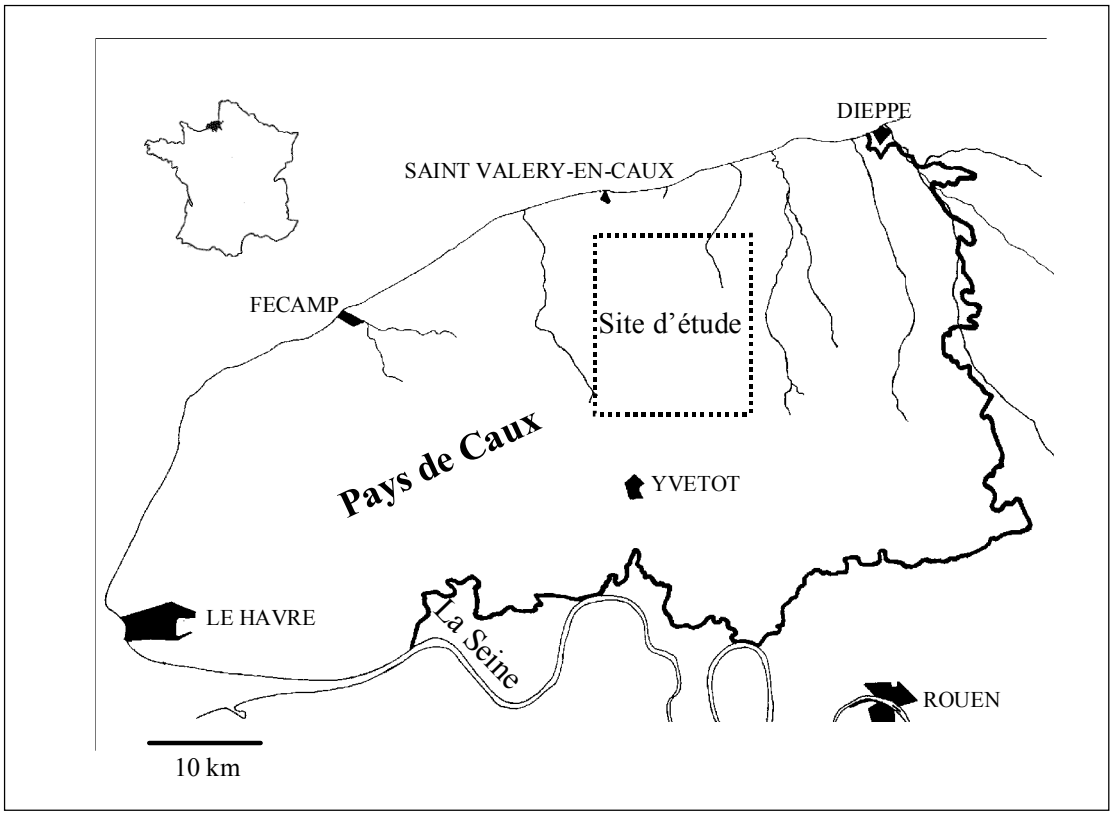


FIGURE 3 Localisation du site d'étude, Pays de Caux, nord-ouest de la France (long. 0°50'O et lat. 49°47'N). *Location of the Pays de Caux study area in northwestern France (long. 0°50' W and lat. 49°47' N).*

2.2. Données satellitaires

La période d'acquisition des données était particulièrement importante pour cette étude. Elle a été logiquement choisie en hiver, au mois de février, à l'époque de l'année où le ruissellement excessif se manifeste le plus intensément. En effet, cette époque de l'année se situe pendant les labours de l'hiver, lorsqu'un maximum de superficie est à nu et se trouve donc ainsi exposé aux précipitations abondantes de saison. Les états de surface présents sur le site étaient alors des semis d'hiver, des labours ou d'anciens chantiers de récoltes.

Nous disposons sur le pays de Caux d'images RSO de ERS et de RADARSAT ainsi que TM de Landsat acquises en 1998 (base A) et 1999 (base B) (tableau 1). Les images optiques permettent une cartographie fiable de l'occupation du sol (sols nus, forêts, prairies, etc.) alors que les images radar qui résultent de l'interaction du signal avec le milieu peuvent nous renseigner sur certains paramètres de la surface du sol. Afin d'évaluer la sensibilité de l'angle d'incidence et de la polarisation à la rugosité de surface des sols nus, les images RSO de RADARSAT ont été acquises avec différents angles d'incidence.

Les images radar ont nécessité plusieurs prétraitements avant de pouvoir être exploitables. Elles ont été étalonnées et géoréférencées. L'étalonnage a permis de calculer à partir du signal rétrodiffusé une grandeur sans dimension appelée le coefficient de rétrodiffusion (σ°). Ce paramètre dépend des paramètres physiques de la surface tels que la rugosité et l'humidité, mais également de paramètres propres au capteur comme l'angle d'incidence, la polarisation et la longueur d'onde du signal (Ulaby et al., 1986). Les images RSO de ERS et de RADARSAT ont été étalonnées radiométriquement en utilisant les algorithmes développés respectivement par les agences spatiales européenne et canadienne (Laur, 1992 ; Shepherd, 1997). De même, les images spatiales ont été géoréférencées afin de permettre une localisation juste et précise en tout point de l'image. Des cartes topographiques au 1 : 50 000 de l'IGN ont été utilisées à cet effet. Pour réduire le chatoiement (speckle) et améliorer la qualité des images RSO, nous avons utilisé un filtre médian de taille 3×3 pour l'image ERS de RADARSAT en mode fin, et de taille 5×5 pour les images ERS et RADARSAT en mode standard.

TABLEAU 1 Caractéristiques des deux bases de données utilisées dans cette étude: Pays de Caux 1998 et 1999. La dimension des pixels est de 6,25 m × 6,25 m pour l'image RSO de RADARSAT en mode fin, de 12,5 m × 12,5 m pour les images RSO de RADARSAT en mode Standard ou les images ERS, et de 30 m × 30 m pour les images TM de Landsat. *Characteristics of the two Pays de Caux databases (1998 and 1999) used during the study. Pixel size is 6.25 m × 6.25 m for the RADARSAT RSO image in fine mode, 12.5 m × 12.5 m for the RADARSAT SAR images in standard mode and the ERS images, and 30 m × 30 m for the Landsat TM images.*

Base de données A : Pays de Caux 1998	**IMAGES**	RSO de ERS (VV-23°): 23-02-1998 (descendante) RSO de RADARSAT en mode standard S5 (HH-39°) : 08-02-1998 (descendante) RSO de RADARSAT en mode fin F5 (HH-47°) : 09-02-1998 (ascendante) TM de Landsat : 14-02-1998
	Données terrain (35 mesures)	Hauteur rms : 0,25 cm à 4 cm Longueur de corrélation : 3 cm à 9 cm Humidité du sol : 30 % à 40 %.
Base de données B : Pays de Caux 1999	Images	RSO de ERS (VV-23°) : 09-02-1999 (descendante) RSO de RADARSAT en mode standard S1 (HH-23°) : 07-02-1999 (descendante) RSO de RADARSAT en mode standard S5 (HH-39°) : 04-02-1999 (Descendante) TM de Landsat : 14-03-1999
	Données terrain (21 mesures)	Hauteur rms : 0,27 cm à 3,5 cm Longueur de corrélation : 5 cm à 12 cm Humidité du sol : 35 % à 45 %.

2.3. Réalité de terrain

Deux campagnes terrain ont été réalisées en février 1998 et 1999 (tableau 1). Comme l'état de surface des parcelles peut changer très rapidement et brutalement (passage de labour en semis par exemple), il était impératif que les campagnes de terrain se fassent simultanément aux passages des satellites. Au total, 35 parcelles témoins ont été visitées en 1998 et 21 parcelles en 1999. Ces parcelles avaient une surface supérieure à 16 ha. L'objectif de ces campagnes était de recueillir le maximum d'informations sur les parcelles témoins : rugosité, humidité, direction des rangs, pourcentage de végétation verte et de végétation sèche, etc.

2.3.1. Mesures de rugosité

Des mesures de rugosité ont été effectuées sur les parcelles témoins. Ces parcelles, considérées comme étant des sols nus, étaient principalement des surfaces d'ensemencement de blé à faible densité de végétation (inférieure à 20 % de la surface) et des labours. Un profilomètre à aiguilles de 1 m de longueur avec un pas d'échantillonnage de 2 cm a été utilisé (2 cm d'écart entre les aiguilles). Les altitudes relatives des aiguilles sont enregistrées photographiquement (figure 4) et numérisées par la suite.

Le profil de rugosité peut être représenté par la fonction f(x) = z, où x se situe sur un axe horizontal et z est la hauteur du profil par rapport à cet axe. Cette distribution des hauteurs permet de définir deux paramètres statistiques utilisés pour décrire la rugosité : l'écart type des hauteurs (rms) et la longueur de corrélation (L). L'écart type des hauteurs exprime la variation verticale de la rugosité du sol. Les valeurs de rms relevées variaient de 0,25 à 4 cm (figure 5). Ces valeurs dépendaient des pratiques agricoles et des effets de la pluie sur le sol : les valeurs les plus basses correspondaient principalement aux zones d'ensemencement de blé tandis que les plus élevées correspondaient aux terrains labourés récemment. La longueur de corrélation est obtenue à partir de la fonction de corrélation laquelle décrit la relation qui peut exister entre les altitudes de deux points de la surface. La longueur de corrélation est définie comme étant la distance (depuis l'origine du profil) à partir de laquelle la fonction de corrélation est inférieure à e^{-1}. Lorsque la rugosité est relativement faible, comme c'est le cas en agriculture, la fonction de corrélation a une forme exponentielle. Inversement, pour des rugosités élevées, la fonction de corrélation est de forme gaussienne (Rakotoarivony, 1995).

Huit profils de rugosité ont été effectués pour chaque parcelle : quatre profils parallèles à la direction de rangs et quatre profils perpendiculaires. À partir de ces mesures, nous avons calculé l'écart type des hauteurs ainsi que la longueur de corrélation.

2.3.2. Mesures d'humidité

Les mesures d'humidité ont été réalisées à l'aide d'une sonde électromagnétique: le thétaprobe. Cet appareil mesure, grâce à quatre électrodes, la résistivité caractérisant les premiers 10 cm du sol. Le thétaprobe convertit lui-même cette grandeur physique en pourcentage d'humidité à partir de la composition du sol en sable et en argile qui lui a été indiquée préalablement. Des échantillons de sol ont été prélevés sur place puis analysés. Une mesure précise de la quantité d'eau volumique contenue dans les échantillons a été réalisée en laboratoire. Les résultats de ces mesures ont ainsi permis d'étalonner les valeurs mesurées sur le terrain par le thétaprobe.



FIGURE 4 Profil de rugosité réalisé à l'aide d'un profilomètre à aiguilles de 1 m de long et de 2 cm d'écart entre les aiguilles. *Surface roughness profile established using a 1-m long needle profilometer with a 2-cm interval between needles.*

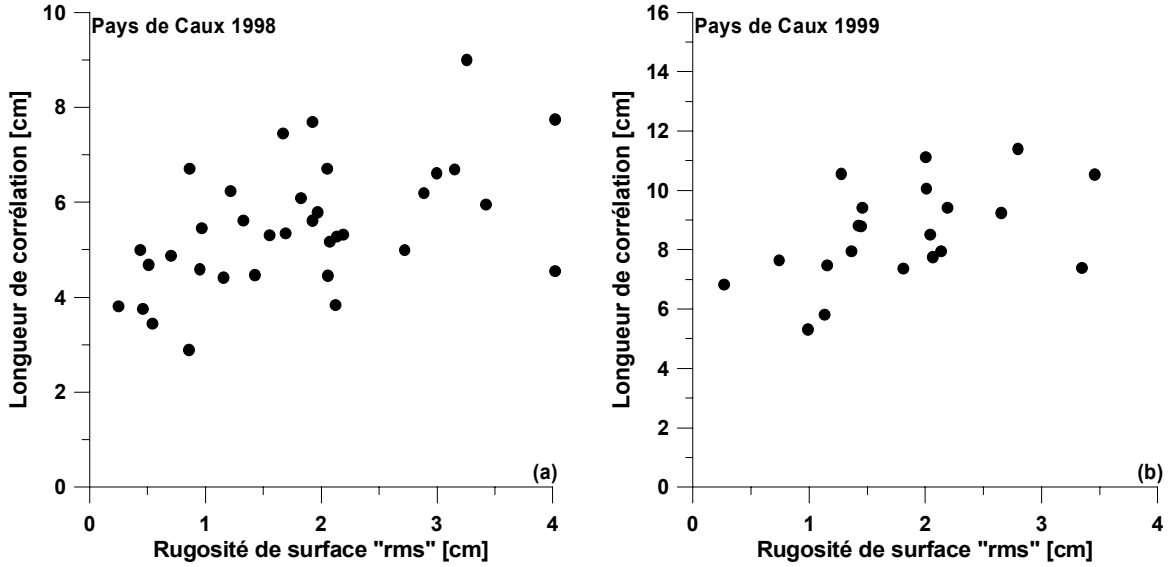


FIGURE 5 Écart type des hauteurs (rms) en fonction de la longueur de corrélation (L) pour les deux bases de données Pays de Caux, 1998 et 1999. *Standard deviation of surface height (rms) according to correlation length (L) for the 1998 and 1999 Pays de Caux databases.*

L'humidité des parcelles témoins a été mesurée les jours des acquisitions radar ou à un jour d'intervalle lorsque les conditions météorologiques étaient stables. Le taux d'humidité attribué à une parcelle à une date donnée était la moyenne d'au moins quatre mesures effectuées sur le terrain ce jour-là. De façon générale, il s'avère que la teneur en eau volumétrique était relativement élevée avec des valeurs entre 30 % et 40 % en 1998 et entre 35 % et 45 % en 1999. Pour une parcelle donnée, le taux d'humidité calculé selon le procédé décrit précédemment a été considéré homogène pour l'ensemble de la parcelle.

2.3.3. Direction des rangs

Lorsqu'elle était perceptible, la direction des rangs a été relevée avec une boussole. Pour une parcelle labourée, l'amplitude du signal était très différente selon que la visée du radar était parallèle ou perpendiculaire à la direction des rangs. La rugosité était maximale dans la direction perpendiculaire aux rangs et minimale dans la direction parallèle. L'angle existant entre la direction du rang et la visée du radar ϕ, était compris entre 0° (visée parallèle aux rangs) et 90° (visée perpendiculaire aux rangs).

2.4. Modélisation du coefficient de rétrodiffusion avec le modèle IEM

Les modèles de rétrodiffusion permettent de simuler le coefficient de rétrodiffusion d'une surface à partir des caractéristiques physiques du sol et pour une configuration radar donnée. L'inversion de ces modèles est particulièrement intéressante car les paramètres physiques de la surface peuvent être retrouvés par ce procédé à partir d'images radar et sans besoin de mesures de terrain. En pratique, il s'avère que les modèles ne simulent pas toujours correctement le comportement du signal ce qui rend l'inversion difficile voire impossible. L'étalonnage de ces modèles est souvent nécessaire pour corriger les biais éventuels.

Le modèle IEM (*Integral Equation Method*), développé par Fung en 1992 (Fung, 1994), est le modèle le mieux adapté puisque son domaine de validité recouvre les gammes de rugosité communes aux surfaces agricoles (rms ≤ 3 cm). Dans ce modèle, les caractéristiques physiques du sol sont prises en compte par le biais de paramètres d'entrée tels que l'humidité (mv), l'écart type des hauteurs (rms), la forme de la fonction d'autocorrélation et la longueur de corrélation (L). Le modèle tient compte aussi des paramètres du capteur tel que l'angle d'incidence, la polarisation, et la fréquence.

Pour une surface agricole, l'expression du coefficient de rétrodiffusion du modèle IEM est donnée par (contribution de surface) :

$$\sigma^{\circ}_{pp} = \frac{k^2}{2} |f_{pp}|^2 \, e^{-4rms^2k^2\cos^2\theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(4rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!} \times W^{(n)}(2k\sin\theta, 0)$$
$$+ \frac{k^2}{2} \mathrm{Re}(f^{*}_{pp} F_{pp}) e^{-3rms^2k^2\cos^2\theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(4rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!} \times W^{(n)}(2k\sin\theta, 0)$$
$$+ \frac{k^2}{8} |F_{pp}|^2 e^{-2rms^2k^2\cos^2\theta} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(rms^2k^2\cos^2\theta)^n}{n!} \times W^{(n)}(2k\sin\theta, 0) \quad (1)$$

avec :

$$f_{hh} = \frac{-2R_h}{\cos\theta}$$

$$f_{vv} = \frac{2R_v}{\cos\theta}$$

$$F_{hh} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left(4R_h - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1 + R_h)^2\right)$$

$$F_{vv} = 2\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta}\left(1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_r\cos^2\theta}{\mu_r\varepsilon_r - \sin^2\theta}\right)(1 - R_v)^2 + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r}\right)(1 + R_h)^2\right)$$

$R_h = \dfrac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r(1 - \sin^2\theta)}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r(1 - \sin^2\theta)}}$: coefficient de Fresnel pour la polarisation horizontale

$R_v = \dfrac{\cos\theta - \sqrt{\dfrac{1}{\varepsilon_r}(1 - \sin^2\theta)}}{\cos\theta + \sqrt{\dfrac{1}{\varepsilon_r}(1 - \sin^2\theta)}}$: coefficient de Fresnel pour la polarisation verticale

$$W^n(a,b) = \frac{1}{2\pi}\iint \rho^n(x,y) e^{-i(ax+b)} \, dxdy$$

ε_r : constante diélectrique
μ_r : permittivité
θ : angle d'incidence
k : nombre d'onde
rms : écart type des hauteurs de la surface
pp : polarisation de l'onde incidente et de l'onde rétrodiffusée ; h pour horizontale et v pour verticale
Re : partie réelle d'un nombre complexe
f^{*}_{pp} : le conjugué du nombre complexe f_{pp}
$\rho(x,y)$ est la fonction de corrélation de la surface. Elle a une forme exponentielle dans le cas des surfaces de faible rugosité et gaussienne pour des surfaces aux fortes rugosités :

$$\rho(x,y) = e^{-\frac{|x| + |y|}{L}} \quad : \text{ exponentielle} \qquad (2)$$
$$= e^{-\frac{x^2 + y^2}{L^2}} \quad : \text{ gaussienne}$$

L : longueur de corrélation

Cependant, différentes études ont montré une certaine inadéquation lorsque les simulations faites à partir du modèle IEM sont confrontées à des données expérimentales utilisant différents capteurs radar des satellites : ERS, RADARSAT, ERASME, SIR-C/X, RENE (Rakotoarivony *et al.,* 1996 ; Remond*,* 1997 ; Zribi *et al.,* 1997 ; Baghdadi *et al*., 2002b).

3. RÉSULTATS

3.1. Comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la rugosité de surface

Dans un premier temps, le potentiel des capteurs RSO de ERS et de RADARSAT pour la caractérisation des sols nus en terme de rugosité de surface a été analysé. On s'est intéressé aux sols nus puisque c'est sur ce type de surface que le ruissellement est le plus actif. Pour un sol nu, le coefficient de rétrodiffusion σ° dépend de deux paramètres physiques de la surface : la rugosité et l'humidité. La sensibilité du signal radar vis à vis de la rugosité de surface a été étudiée pour les différentes configurations radar. Le but était de déterminer la configuration radar la plus sensible à ce paramètre dans le cas de sols limoneux.

Pour chaque parcelle témoin, nous avons calculé le coefficient de rétrodiffusion moyen. L'écart type des hauteurs (rms) utilisé dans cette étude a été calculé à partir de la fonction de corrélation moyenne établie grâce aux profils mesurés dans les directions parallèle et perpendiculaire aux rangs. La visée du radar n'était pas systématiquement parallèle ou perpendiculaire aux rangs des parcelles et, de ce fait, le capteur radar percevait une rugosité intermédiaire aux rugosités propres à chaque direction. L'influence de la visée du radar sur le coefficient de rétrodiffusion n'a pas été analysé en détail puisque le nombre de données disponibles ne permettait pas de séparer la base de données suivant des classes d'humidité et de rugosité homogènes.

Le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'humidité n'a pu être étudié à cause de la faible dynamique des données d'humidité (de 30 % à 45 %). En effet, le taux d'humidité était très homogène et ses variations durant la campagne étaient trop faibles pour induire des variations sur le coefficient de rétrodiffusion. Quelle que soit la configuration radar considérée, aucune relation n'est apparue entre le coefficient de rétrodiffusion et l'humidité du sol. D'après des études antérieures, l'intensité du signal radar devrait augmenter avec la teneur en humidité du sol et les configurations radar optimales devraient correspondre à des angles d'incidence entre 10° et 20°. Selon la littérature, une augmentation de l'humidité de surface de 5 % produit en moyenne une augmentation du coefficient de rétrodiffusion d'environ 1 dB pour des configurations radar en bande C, polarisation HH ou VV, et à des angles d'incidence inférieurs à 20°, (Ulaby *et al.*, 1978 ; Le Toan *et al.*, 1994 ; Boisvert *et al.*, 1995).

Dans une perspective de cartographie opérationnelle de la rugosité de surface, le coefficient de rétrodiffusion a été représenté en fonction du rms pour chacune des configurations radar, sans distinction d'humidité ou de direction de rangs. Conformément à la littérature (Oh *et al.*, 1992 ; Fung, 1994 ; Baghdadi *et al.*, 2002a), le coefficient de rétrodiffusion a augmenté avec la rugosité (figure 6). À une incidence de 23°, la polarisation HH a présenté la meilleure dynamique de σ° en fonction du rms comparativement à la polarisation VV (environ 4 dB pour HH-23° contre 3 dB pour VV-23°). Ainsi, pour le même angle d'incidence, un comportement très différent a été constaté grâce à la polarisation. Cela suggère que la polarisation HH est plus sensible que la polarisation VV à la rugosité de surface (Autret *et al.*, 1989).

La configuration RADARSAT à 39° (de 1998 et 1999) a montré une dynamique d'environ 5,5 dB (5 dB en 1998 et 6 dB en 1999). Mais des quatre configurations étudiées, c'est RSO de RADARSAT à 47° qui a présenté la meilleure dynamique (environ 7 dB) ce qui signifie que la sensibilité du signal radar vis à vis de la rugosité a augmenté avec l'angle d'incidence, ce qui va dans le même sens que les études antérieures réalisées avec des diffusomètres (Ulaby *et al.*, 1986).

Le comportement du coefficient de rétrodiffusion en fonction de la rugosité de surface a montré deux tendances. Jusqu'à un certain seuil de rms dépendant pour une fréquence donnée de l'angle d'incidence et de la polarisation, la tendance était linéaire et fortement croissante. Au-delà, cette tendance s'est amortie et σ° a cru modérément avec le rms. Des relations exponentielles empiriques reliant le signal radar à la rugosité de surface rms (cm) ont été établies (Sano *et al.,* 1998) :

$$\sigma°(\theta, pp) = a + b\, e^{-k\, rms} \qquad (3)$$

où k est le nombre d'onde : $k = 2\pi/\lambda \approx 1{,}111 m^{-1}$ pour la bande C (f = 5,3 GHz). Les paramètres a et b dépendent de l'humidité du sol, de l'angle d'incidence, de la polarisation et de la longueur

d'onde radar. Les relations obtenues entre le coefficient de rétrodiffusion et la rugosité de surface ne sont pas identiques d'une année à l'autre pour une même configuration radar (VV-23° et HH-39°) puisque l'humidité du sol n'était pas identique (humidité moyenne d'environ 33,5 % en 1998 contre 41 % en 1999).

Ces relations sont valides pour des sols limoneux nus ou à faible couvert végétal, avec un taux d'humidité relativement important et avoisinant les 40 % et une gamme de rugosité entre 0,25 et 4 cm.

Dans l'optique d'une cartographie de la rugosité de surface, c'est la configuration de RSO de RADARSAT à 47° qui a semblé être la plus adaptée pour une inversion empirique. Baghdadi *et al*., (2002a) ont montré qu'il était possible avec la relation (3) de cartographier la rugosité des sols limoneux en trois classes avec une configuration radar à fort angle d'incidence: sol lisse si rms < 1cm, sol moyennement rugueux si 1cm ≤ rms ≤ 2cm et sol rugueux si rms > 2cm.

3.2. Évaluation du modèle IEM

Des simulations de σ° ont été effectuées pour les deux bases de données, Pays de Caux 1998 et 1999. Une valeur de σ° simulée a été obtenue pour chacune des parcelles et pour chaque configuration radar, ERS-VV-23°, Rsat-HH-23°, Rsat-HH-39° et Rsat-HH-47°. Le coefficient de rétrodiffusion simulé était dans l'ensemble très différent de celui mesuré par le radar quelque soit la configuration du capteur (figure 7). Les statistiques sur la différence entre σ° SAR et σ° simulé ont montré l'existence d'un biais entre les valeurs observées et simulées qui pouvaient atteindre 4,2 dB. Le modèle IEM a surestimé en général le coefficient de rétrodiffusion. Les configurations de RSO de RADARSAT à fort angle d'incidence (HH-39° et HH-47°) présentaient des biais importants avec des valeurs supérieures à 2 dB. Ces résultats sont particulièrement gênants vu le fort potentiel des configurations à fort angle d'incidence pour la cartographie de la rugosité de surface. L'écart type de la différence entre le σ° radar et le σ° IEM s'est avéré être très important pour ERS-VV-23° de 1998 avec une valeur de 4,5 dB. Ce paramètre était plus faible pour les autres configurations pour lesquelles on avait un écart type d'environ 3 dB.

L'inadéquation constatée entre le modèle IEM et les données satellitaires pourrait être directement liée à la forme de la fonction d'autocorrélation, et à l'incertitude des mesures de la longueur de corrélation (Baghdadi *et al*., 2002b). Les autres paramètres d'entrée du modèle IEM comme par exemple le rms, l'humidité du sol et l'angle d'incidence sont des paramètres relativement précis. La fonction d'autocorrélation utilisée était de type exponentielle ce qui correspond aux rugosités agricoles. De récentes études ont montré que les paramètres de rugosité calculés à partir de mesures terrain (rms et L) sont très sensibles à la longueur du profil de rugosité (Baghdadi *et al*., 2000). Ces travaux ont montré que L augmente avec la longueur de profil. De plus, Oh and Kay (1998) ont montré par des simulations que la détermination de la longueur de corrélation est peu fiable en utilisant des profilomètres conventionnels de 1 ou 2 m de long (erreur supérieure à 50 %), alors que la précision associée au rms était de l'ordre de 15 %.

3.3. Calibration empirique du modèle IEM

Pour améliorer la performance du modèle IEM, un étalonnage empirique a été proposé. Il consiste à utiliser une forme donnée pour la fonction d'autocorrélation (exponentielle par exemple) et à estimer la longueur de corrélation optimale (L_{opt}) qui permet une meilleure adéquation entre modèle IEM et coefficient de rétrodiffusion observé (images). L'approche consiste à fournir un ajustement de la longueur de corrélation, pour chaque configuration radar et chaque rms, en contraignant le modèle IEM à une meilleure restitution du coefficient de rétrodiffusion observé. Le paramètre de calibration empirique L_{opt} est un paramètre de forçage qui intègre à la fois la longueur de corrélation vraie, mais aussi les imperfections du modèle.

À l'exception de la longueur de corrélation, tous les paramètres d'entrée du modèle IEM ont été fournis à partir des bases de données (données mesurées). Pour une parcelle et une configuration données, deux solutions étaient parfois possibles pour L_{opt}. Seule la solution qui vérifiait une relation croissante entre L_{opt} et le rms a été retenue. La valeur la plus faible a été le plus souvent considérée comme étant le paramètre L_{opt}.

Baghdadi *et al*. (2002b) ont montré suite à une étude réalisée à partir d'images RSO de ERS et de RADARSAT (bande C, configurations VV-23°, HH-39° et HH-47°) que L_{opt} dépendait de la rugosité et de l'angle d'incidence ce qui permet de faire l'hypothèse que le modèle IEM ne décrit pas proprement la dépendance angulaire. En effet, si IEM avait un comportement correct, la valeur de L_{opt} serait la même quelque soit l'angle d'incidence considéré. L'influence d'autres paramètres, comme par exemple la longueur d'onde radar et la polarisation, n'avait pas été étudiée faute de bases de données appropriées.

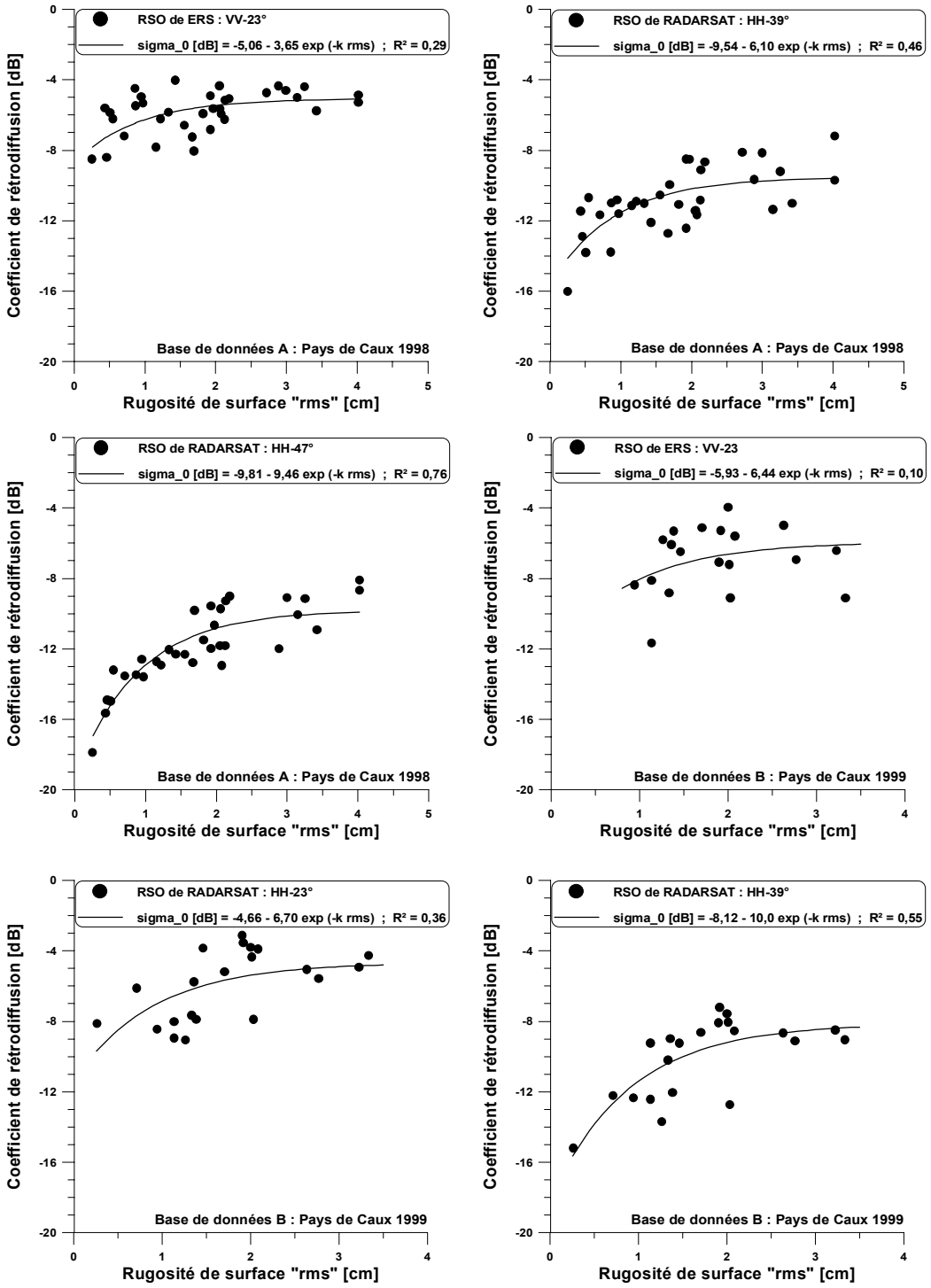


FIGURE 6 Relations entre coefficient de rétrodiffusion et rugosité de surface (rms) pour les différentes configurations radar des deux bases de données : VV-23°, HH-23°, HH-39° et HH-47. *Relationship between backscattering coefficient and surface roughness (rms) for the various radar configurations of the two databases: VV-23°, HH-23°, HH-39° and HH-47°.*

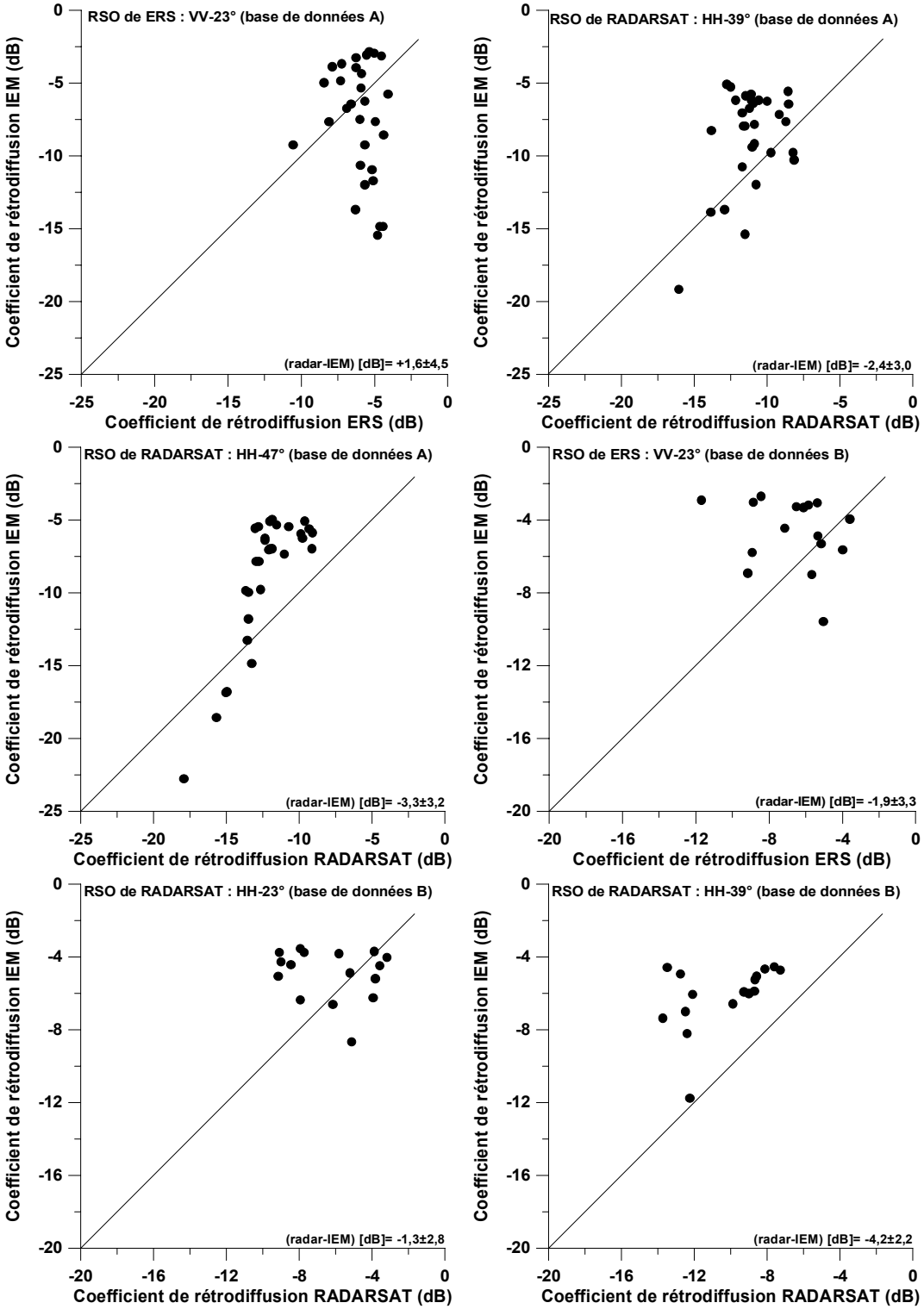


FIGURE 7 Comparaison entre coefficient de rétrodiffusion simulé par IEM et coefficient de rétrodiffusion obtenu à partir des images radar. *Comparison of the backscattering coefficient simulated by the Integrated Equation Model and that obtained from the radar images.*

Le comportement de L_{opt} en fonction de la rugosité de surface a été étudié en considérant seulement les points avec un rms ≤ 3 cm (domaine de validité d'IEM) et pour chaque configuration radar. On a pu remarquer deux tendances (figure 8) : la première correspond aux faibles valeurs de rms et se caractérise par un L_{opt} sensiblement constant. La seconde tendance se définit pour des valeurs de rms plus élevées et un L_{opt} qui augmente avec le rms suivant une loi exponentielle :

$$L_{opt}(\text{rms},\theta,\text{pp}) = e^{\alpha \text{krms} + \beta} \quad (4)$$

où α et β sont les coefficients de l'exponentielle qui dépendent de l'angle d'incidence (θ) et de la polarisation (pp). L_{opt} s'est avéré fortement dépendante de rms et de la configuration radar (tableau 2).

Pour les configurations communes aux deux bases de données, les exponentielles établies sur chaque base de données indépendantes étaient statistiquement semblables (figure 8). Ce résultat suggère que l'étalonnage est robuste et que les courbes empiriques de L_{opt} sont généralisables à d'autres sites limoneux sans qu'il y ait besoin de les redéfinir avec de nouvelles mesures de terrain et de nouvelles simulations. Baghdadi *et al.,* (2002b) ont obtenu les mêmes conclusions en utilisant des données collectées sur deux sites avec des conditions d'humidité différentes (site 1 : Pays de Caux, humidité de 30 à 40 % ; site 2 : Vallée du Rhône, Sud de la France, humidité de 5 à 25 %).

Quatre configurations radar ont été utilisées dans la phase d'étalonnage : VV-23°, HH-39° et HH-47° de la base A, et HH-23° de la base B. Afin d'évaluer la qualité de l'étalonnage, des simulations de σ° ont été réalisées pour ces quatre configurations en utilisant comme longueur de corrélation la valeur respective donnée par les courbes empiriques de L_{opt}. Après calibration, le biais s'est trouvé fortement diminué pour être inférieur à 0.5dB quelle que soit la configuration radar. D'autre part, la dispersion observée avant calibration se trouve maintenant considérablement réduite (figure 9). Les écarts types témoignent de cette amélioration avec des valeurs sensiblement plus faibles. L'écart type passe de 4,5 à 1,1 dB pour VV-23°, de 2,8 à 2 dB pour HH-23°, de 3 à 1,3 dB pour HH-39°, et de 3,2 à 1,1 dB pour HH-47°.

Pour valider l'étalonnage, nous avons utilisé les deux configurations restantes : VV-23° et HH-39° de la base B. Dans les simulations de σ°, nous avons utilisé l'expression de L_{opt} établie à partir des configurations VV-23° et HH-39° de la base A. Les résultats de la validation du modèle IEM sur la base de 1999 en utilisant la calibration empirique établie sur la base de 1998 ont confirmé la robustesse de l'étalonnage empirique proposée pour IEM puisqu'on a retrouvé des améliorations sensibles (figure 10). En effet, on a obtenu un biais et des fluctuations du même ordre de grandeur que précédemment entre σ° radar et σ° IEM.

4. DISCUSSION

Cette étude montre que la cartographie de la rugosité de surface en différentes classes est possible et autoriserait ainsi le suivi temporel des états de surface. Les images RSO de RADARSAT-1 apparaissent les plus adaptés puisque contrairement à ERS, il permet une polarisation HH et un angle d'incidence variable allant de 20° à 50°. Le capteur ASAR d'ENVISAT lancé le premier mars 2002 ainsi que le futur RSO de RADARSAT-2 présentent également des configurations optimales pour cette application qui mériteraient d'être testées.

Dans le cadre de cette étude nous avons montré que le modèle de rétrodiffusion IEM présente des défauts non négligeables puisqu'il ne restitue pas fidèlement le coefficient de rétrodiffusion obtenu par les capteurs ROS. La calibration semi-empirique qui a été réalisée a permis de corriger une partie des erreurs (réduction du biais et des fluctuations). Cet étalonnage s'est avéré robuste et généralisable, puisqu'il était applicable sur une base de données indépendante de celle à partir de laquelle il a été établi. De même, la dépendance trouvée entre la longueur de corrélation optimale et l'écart type des hauteurs a conduit à une diminution du nombre des paramètres indépendants du sol. L'inversion du signal radar ne dépendait plus que de l'humidité et de l'écart type des hauteurs (un paramètre en moins : la longueur de corrélation).

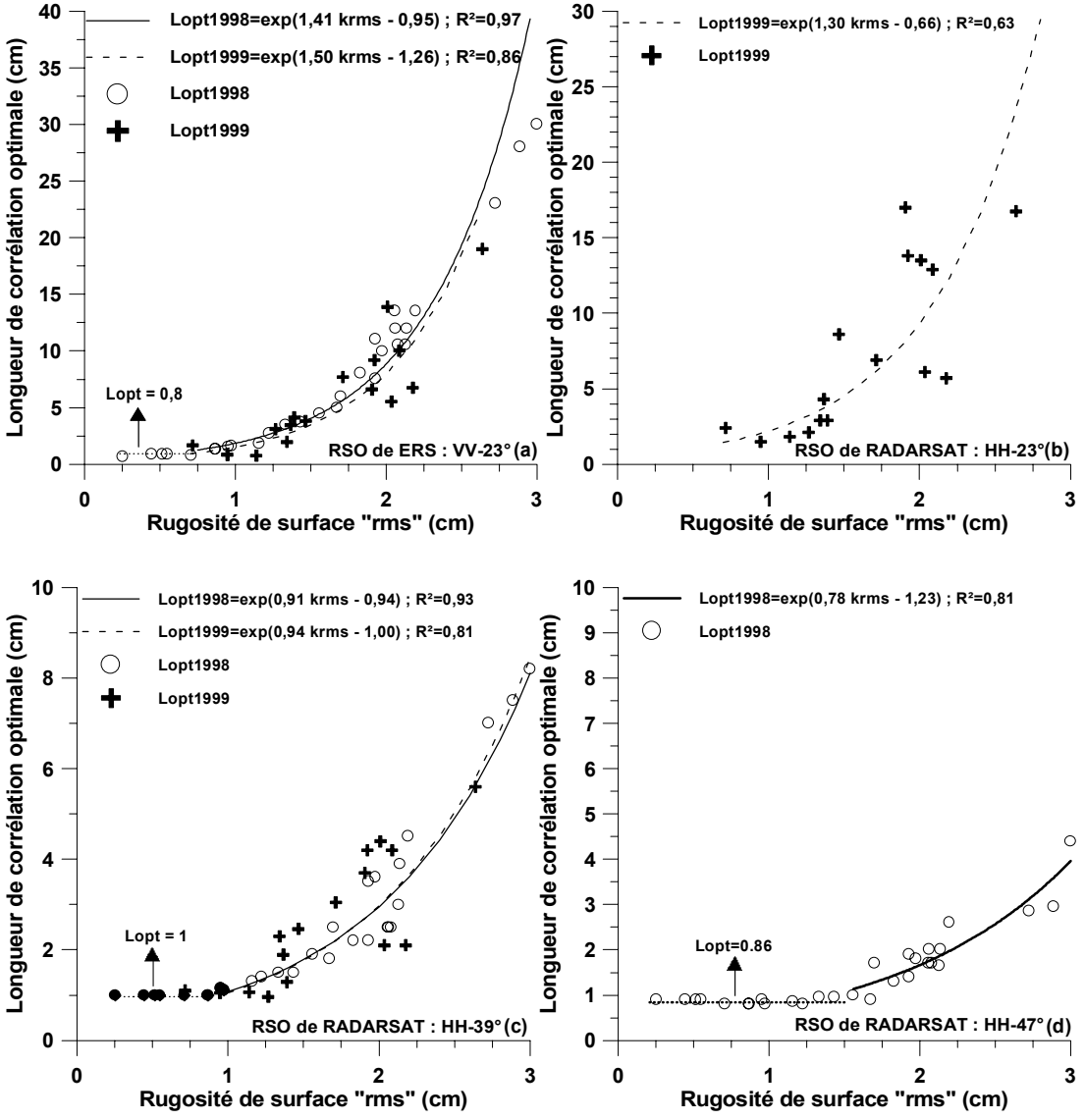


FIGURE 8 Longueur de corrélation optimale (L_{opt}) en fonction de la rugosité de surface : a) VV-23°, b) HH-23°, c) HH-39°, d) HH-47°. *Optimal correlation length (L_{opt}) according to surface roughness: a) VV-23°, b) HH-23°, c) HH-39°, d) HH-47°.*

TABLEAU 2 Coefficients α et β de l'exponentielle L_{opt} (rms,θ,pp) = $e^{\alpha krms + \beta}$ pour les différentes configurations radar. *Coefficients α and β of the exponential L_{opt}* (rms,θ,pp) = $e^{\alpha krms + \beta}$ *for the various radar configurations.*

	RSO de ERS-VV-23°		RSO de RADARSAT-HH-23°		RSO de RADARSAT-HH-39°		RSO de RADARSAT-HH-47°	
	Base 1998	**Base 1999**	**Base 1998**	**Base 1999**	**Base 1998**	**Base 1999**	**Base 1998**	**Base 1999**
	1,41	1,5	---	1,3	0,91	0,94	0,78	---
	–0,95	–1,26	---	–0,66	0,94	–1	-1,23	---
R^2	0,97	0,86	---	0,63	0,93	0,81	0,81	---

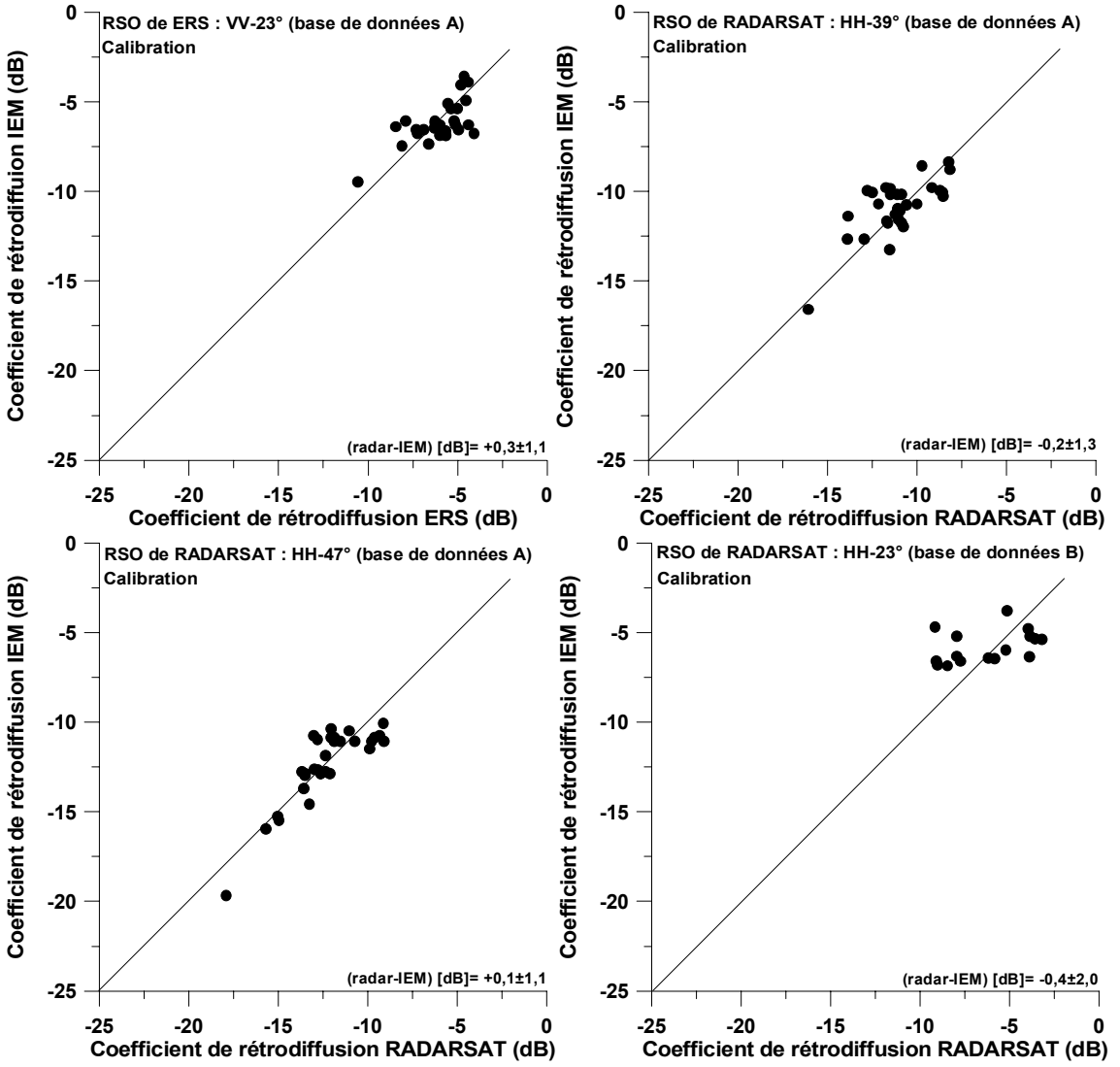


FIGURE 9 Résultats de l'étalonnage : comparaison entre coefficients de rétrodiffusion simulés en utilisant le modèle IEM étalonné (avec L_{opt}) et ceux extraits à partir des images radars. On utilise dans les simulations réalisées sur la base de 1998 l'expression de L_{opt} établie à partir de la même base de données. *Calibration results: comparison of backscattering coefficients simulated using the calibrated Integrated Equation Model (with L_{opt}) and those derived from the radar images. For modelling the backscattering coefficients of the 1998 database, we use the L_{opt} expression established from the same database.*

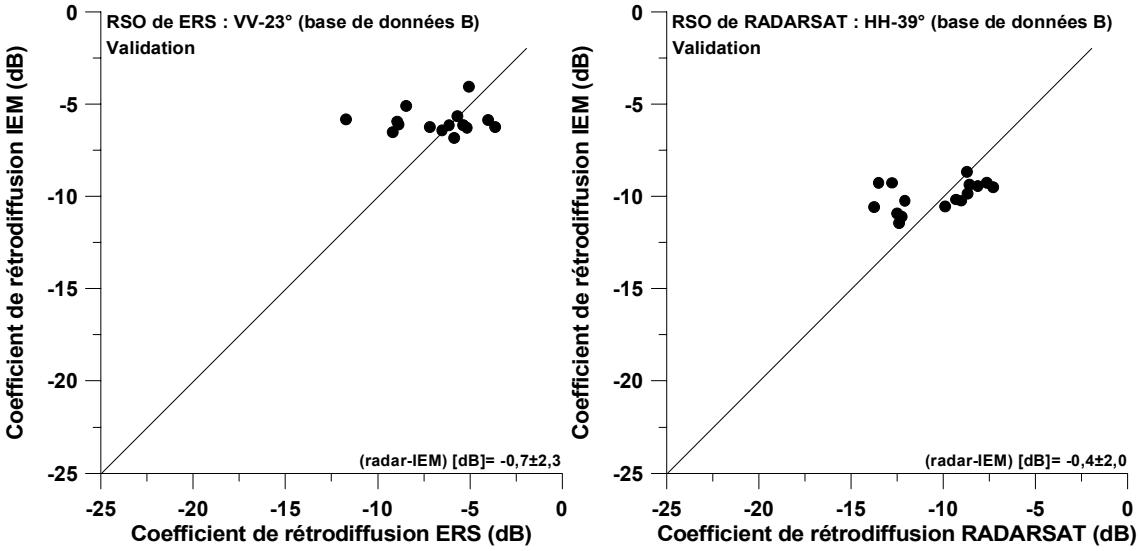


FIGURE 10 Résultats de la validation : comparaison entre coefficients de rétrodiffusion simulés en utilisant le modèle IEM calibré (avec L_{opt}) et ceux extraits à partir des images radars. On valide sur la base de 1999 l'expression de L_{opt} établie à partir des configurations VV-23° et HH-39° de la base de 1998. Validation results: comparison of backscattering coefficients simulated using the calibrated Integrated Equation Model (with L_{opt}) and those derived from the radar images. For modelling the backscattering coefficients of the 1999 database, we use the L_{opt} expression established using the VV-23° and HH-39° configurations of the 1998 database.

5. CONCLUSIONS

Cette étude avait comme premier objectif l'évaluation du potentiel des capteurs RSO de ERS et de RADARSAT-1 pour l'extraction de la rugosité de surface qui est un paramètre essentiel dans le phénomène de ruissellement de régions agricoles. Les résultats montrent que le signal radar était davantage sensible à la rugosité avec une polarisation HH et avec un fort angle d'incidence.

Le modèle de rétrodiffusion IEM est un outil permettant, en utilisant des méthodes d'inversion, d'extraire l'humidité et la rugosité d'une surface nue à partir d'images radar. Cependant, une mauvaise corrélation entre données simulées et données mesurées a été mise en évidence et affecte l'efficacité du modèle de référence. Une calibration semi-empirique a été réalisée et évaluée dans le but de corriger ces imperfections. Il s'avère que la calibration élaborée à partir d'une base de données expérimentales est fiable et robuste lorsqu'elle est appliquée sur une autre base de données. Cet étalonnage se trouve donc validé ce qui permet d'envisager une utilisation opérationnelle du modèle IEM dans sa version calibrée.

L'étape suivante serait d'évaluer cet étalonnage sur d'autres sites d'études. D'autres configurations radar seront également étudiées à partir des images RSO de RADARSAT et de ASAR (polarisations VV et HH, et différents angles d'incidence).

Remerciements

Cette étude a été financée par le programme de recherche du BRGM (PRD316). Elle a bénéficié des campagnes d'acquisition du programme européen FLOODGEN. Les auteurs remercient l'équipe de l'INRA d'Orléans pour son support logistique pendant les campagnes terrains et l'Agence Spatiale Canadienne pour la fourniture des images RSO de RADARSAT de 1999 dans le cadre du programme PPUR.

Références

Autret, M., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D. (1989) Theoretical study of the sensitivity of the microwave backscattering coefficient to the soil surface parameters. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, no 1, p. 171-179.

Baghdadi, N., Paillou, P., Davidson, M., Grandjean, G. and Dubois, P. (2000) Relationship between profile length and roughness parameters for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no 17, p. 3375-3381.

Baghdadi, N., King, C., Bourguignon, A. and Remond, A. (2002a) Potential of ERS and RADARSAT data for surface roughness monitoring over bare agricultural fields. *International Journal of Remote Sensing* (sous presse).

Baghdadi, N., King, C., Chanzy, A. and Wigneron, J.P. (2002b) An empirical calibration of the Integral Equation Model based on SAR data, soil moisture, and surface roughness measurement over bare soils. *International Journal of Remote Sensing* (sous presse).

Boiffin, J., Sebillotte, M., Jomier, L. and Paris, C. (1976) Climat, stabilité, structurale et battance : essai d'analyse d'un comprtement du sol au champ. *Annales Agronomiques*, vol. 27, no 3, p. 295-325.

Boiffin, J., Papy, F. and Eimberck, M. (1988) Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré: I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, vol. 8, p. 663-673.

Boisvert, J.B., Pultz, T.J., Brown, R.J. and Brisco, B. (1995) Potential of synthetic aperture radar for large scale soil moisture monitoring: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no 1, p. 1-13.

Brun, C., Bernard, R. and Vidal Madjar, D. (1990) Mapping saturated areas with a helicopter borne C band scatterometer. *Water Resources Research*, vol. 26, no 5, p. 945-955.

Fung, A.K. (1994) Microwave Scattering and Emission Models and their Applications. Artech House, Inc., Boston, London, 573 p.

King, C. (2001) FLOODGEN final report, BRGM, Orléans, France. CEE project no ENV4-CT96-0368, 65 p.

Laur, H. (1992) Derivation of backscattering coefficient σ°, in ERS-1.SAR.PRI products. European Space Agency Esrin Publ., Neuilly, France, 16 p.

Le Bissonnais, Y. (1990) Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. In Bryan R.B. (réd*.). Soil eRSOion – experiments and models*. Catena, Suppl., 17, p. 13-28.

Le Bissonnais, Y. and Singer, M.J. (1992) Crusting, Runoff and ERSOion Response to Soil Water Content and Successive Rainfalls. Soil Science Society American Journal, vol. 56, p. 1898-1903.

Le Bissonnais, Y. et Le Souder, C. (1995) Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et gestion des sols, vol. 2, no 1, p. 43-56.

Le Toan, T., Merdas, M., Smacchia, P., Souyris, J.C., Beaudoin, A., Nagid, Y. and Lichtenegger, J. (1994) Soil moisture monitoring using ERS-1. 2nd ERS-1 Symposium ESA, Hambourg, p. 883-888.

Oh, Y. and Kay, Y. (1998) Condition for precise measurement of soil surface roughness. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no 2, p. 691-695.

Oh, Y., Sarabandi, K. and Ulaby, F.T. (1992) An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no 2, p. 370-381.

Rakotoarivony, L. (1995) Validation de modèles de diffusion électromagnétique: Comparaison entre simulations et mesures radar héliporté sur des surfaces agricoles de sol nu. Thèse de doctorat, Université de Caen, 175 p.

Rakotoarivony, L., Taconet, O., Vidal Madjar, D., Bellemain, P. and Benallègue, M. (1996) Radar backscattering over agricultural bare soils. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 10, no 2, p. 187-209.

Remond, A. (1997) Image SAR: potentialités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Pub. BRGM no 261, Orléans, 254 p.

Sano, E.E., Huete, A.R., Troufleau, D., Moran, M.S. and Vidal, A. (1998) Relation between ERS-1 synthetic aperture radar data and measurements of surface roughness and moisture content of rocky soils in a semiarid range land. *Water Resources Research*, vol. 34, no 6, p. 1491-1498.

Shepherd, N. (1997) Extraction of beta nought and sigma nought from RADARSAT CDPF products. Report no AS97-5001, Canadian Space Agency, 7 p.

Ulaby, F.T., Batlivala, P.B. and Dobson, M.C. (1978) Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part I - Bare soil. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 16, p. 286-295.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K. (1986) Microwave Remote Sensing: Active and Passive. *Volume Scattering and Emission Theory-Advanced Systems and Applications*. Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts, vol. 3, 1100 p.

Zobeck, T.M. and Onstad, C.A. (1987) Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil & Tillage Research*, vol. 9, p. 1-20.

Zribi, M., Taconet, O., Le Hegarat Mascle, S., Vidal Madjar, D., Emblanch, C., Loumagne, C. and Normand, M. (1997) Backscattering behavior and simulation: Comparison over bare soils using SIR-C/X-SAR and ERASME 1994 data over Orgeval. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, p. 256-266.