SUIVI TEMPOREL DE LA RUGOSITÉ DU SOL D'UNE ZONE SAHÉLIENNE À PARTIR DES DONNÉES DU DIFFUSIOMÈTRE VENT À BORD D'ERS-1

Ramata MAGAGI[1] et Yann H. KERR[2]

[1]Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 2500, boulevard de l'Université, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
Téléphone : (819) 821 8000, poste 63281 ; télécopieur : (819) 821 79 44 ; courriel : Ramata.Magagi@Usherbrooke.ca
[2]Centre d'études spatiales de la biosphère (CESBIO),18, avenue Édouard Belin, B.P. 2801, 31401 Toulouse cedex 4, France
Téléphone : (33) 5 61 55 85 22 ; télécopieur : (33) 5 61 55 85 00 ; courriel : yann.kerr@cesbio.cnes.fr

Soumis le 15 janvier 2007 ; révisé le 19 mars 2007 ; accepté le 2 août 2007 - © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 525-540

Résumé

Le diffusiomètre vent à bord d'ERS-1 est un capteur monofréquence et monopolarisation qui acquiert simultanément trois coefficients de rétrodiffusion à différents angles d'incidence. L'objectif du présent article est de tester le potentiel de la configuration multiangulaire de ce capteur pour le suivi du profil temporel de la rugosité du sol dans une zone semi-aride du Sahel. Le site d'étude couvre une superficie de 50 x 50 km^2 autour du Super Site Central Est de l'expérience Hapex-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel). Pour chaque pixel, la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion est calculée à partir du triplet de mesures collectées simultanément par les antennes avant, milieu et arrière du capteur. La variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion, élément clé du travail qui est présenté, est fonction de la rugosité du sol et de la végétation. Pour le suivi temporel de la rugosité du sol, la méthodologie adoptée repose sur une analyse de la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion prenant en compte le processus prédominant entre la rétrodiffusion de surface et la rétrodiffusion de volume. Considérant l'importance de l'angle d'incidence sur ces processus de rétrodiffusion, une expression de la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion, qui traduit uniquement l'effet de la rugosité du sol, est générée pour la période d'avril 1992 à décembre 1993. Les résultats obtenus sur la zone d'étude montrent que la rugosité du sol n'est constante que pour certaines périodes. Ils montrent une altération de la rugosité du sol, particulièrement pendant les fortes pluies.

Mots clés : diffusiomètre vent, rugosité du sol, multiangulaire, évolution temporelle, variation angulaire, semi-aride.

TEMPORAL MONITORING OF SOIL ROUGHNESS OVER A SAHELIAN AREA FROM THE ERS-1 WINDSCATTEROMER DATA

Abstract

The ERS-1 windscatterometer is a monofrequency and monopolarization sensor that acquires quasi-simultaneously three backscattering coefficients at different incidence angles. The aim of this paper is to test the potential of multiangular windscatterometer data to determine the temporal trend of soil roughness over a semi-arid area in the Sahel. The study site covers an area of 50 x 50 km^2 around the East Super Site of the Hapex-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel) experiment. For each pixel, the angular variation of the backscattering coefficient is computed from triplet measurements collected by the fore, mid, and aft beam antennas. In this study, a key element is the angular variation of the backscattering coefficient, which depends on soil roughness and the vegetation. For the monitoring of soil roughness, the adopted approach analyzes the temporal trend of the angular variation of the backscattering coefficient with respect to the predominant process between surface and vegetation volume scatterings. Considering the influence of the incidence angle on these scattering processes, an angular variation that depends only on soil roughness is expressed from April 1992 to December 1993. The results show that, over the study site, soil roughness can be considered as a constant parameter, for certain periods only. They provide a good indication of soil roughness alteration particularly when rainfall is significant.

Key-words : windscatterometer, soil roughness, multiangular, temporal evolution, angular variation, semi-arid.

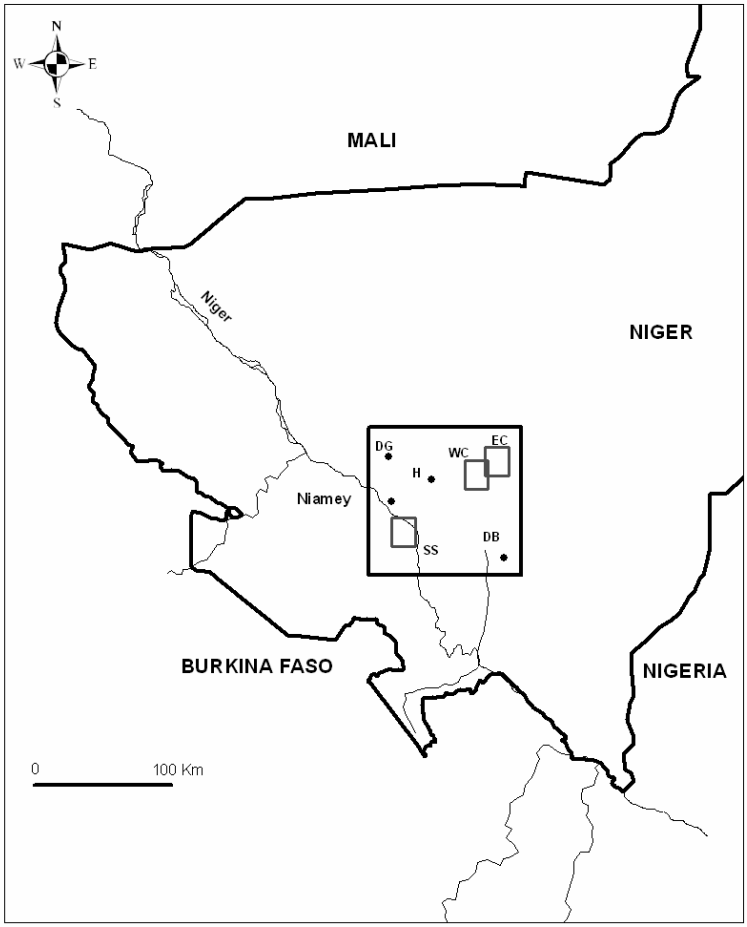
1. INTRODUCTION

La zone sahélienne, caractérisée comme semi-aride, est située entre les isohyètes 200 mm au nord et 850 mm au sud (Prince *et al*., 1995). La répartition spatio-temporelle de la pluviométrie gouverne le développement de la végétation naturelle (brousse tigrée, savane) et des cultures. Elle affecte aussi l'état de rugosité d'une surface et son humidité. Il est bien connu que la végétation, la rugosité et l'humidité du sol jouent un rôle important en hydrologie (Zribi *et al*., 2003b). En plus, dans les régions semi-arides où l'eau est le facteur limitant pour le développement de la végétation, ces paramètres de surface sont d'une grande utilité pour l'évaluation des épisodes de sécheresse. Avec le lancement des satellites ERS en 1991 et en 1995, dans plusieurs travaux en télédétection spatiale radar, la variation saisonnière des caractéristiques de surface en zones semi-arides du Sahel a été analysée (Frison *et al*., 1998 ; Kerr and Magagi, 1994 ; Magagi and Kerr, 1997, 2001 ; Wagner and Scipal, 2000 ; Woodhouse and Hoekman, 2000a). Il en ressort clairement le fort potentiel du diffusiomètre vent à bord d'ERS pour suivre l'évolution temporelle de la végétation et traduire les variations de l'humidité du sol. Cependant, l'effet de la rugosité sur le signal mesuré par le diffusiomètre n'est pas aussi perceptible que celui de la végétation et de l'humidité du sol. Quelques études portant sur le suivi et la détermination de la rugosité du sol avec le diffusiomètre vent à bord d'ERS combinent la modélisation radar et des informations auxiliaires sur la végétation (Magagi and Kerr, 2001), sur la réflectivité et la double rétrodiffusion entre le sol et la végétation (Woodhouse and Hoekman, 2000a, b). Dans d'autres études, les données du diffusiomètre vent et celles du radar à synthèse d'ouverture (RSO) d'ERS sont conjointement utilisées estimer l'humidité et la rugosité du sol (Zribi *et al*., 2003a).

Au contraire, dans le présent article, sans aucune donnée auxiliaire et sans utiliser les modèles de rétrodiffusion, les données du diffusiomètre vent à bord d'ERS-1 sont analysées pour suivre l'évolution temporelle de la rugosité de surface en zone sahélienne. L'objectif de cet article est de montrer l'aptitude de la configuration multiangulaire du capteur à répondre à un aspect important de la télédétection radar qu'est le suivi de la rugosité du sol. Un paramètre clé de notre méthodologie est la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion σ^0, exprimée par $\frac{\partial\sigma^0}{\partial\theta}$. Pour chaque pixel, elle est déduite des mesures de rétrodiffusion provenant des antennes avant, milieu et arrière du capteur. La variation angulaire de σ^0 n'est pas affectée par l'humidité du sol (Fung 1994 ; Ulaby *et al*., 1982). Par contre, elle dépend fortement de la végétation (Wagner *et al*., 1999 a, b ; Wagner and Scipal, 2000) et de la rugosité du sol (Fung 1994 ; Ulaby *et al*., 1986). Pour atteindre notre objectif, il est primordial de soustraire l'effet de la végétation sur la variation angulaire de σ^0. La méthodologie adoptée repose sur une analyse de la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion tenant compte du processus prédominant entre la rétrodiffusion de surface et la rétrodiffusion de volume. Puis, une expression de la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion qui traduit l'effet de la rugosité du sol, uniquement, est générée pour la période d'avril 1992 à décembre 1993. Les résultats informent sur les modifications de la rugosité du sol liées aux événements pluvieux. Tout comme dans Zribi *et al*. (2003b), le présent article montre, qu'en régions semi-arides, la rugosité du sol n'est constante que pour certaines périodes. Or, beaucoup de travaux sur l'estimation de l'humidité du sol considèrent la rugosité du sol comme constante (Jarlan *et al*., 2002 ; Wagner and Scipal, 2000) malgré son effet perturbateur sur la sensibilité du signal à l'humidité du sol.

2. SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude (figure 1) couvre une superficie de 50 x 50 km^2 autour de Banizoumbou (13°31'08''N-02°39'37''E), le Super Site Est de l'expérience Hapex-Sahel (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel) qui s'est tenue à l'été 1992 (Prince *et al*., 1995). Typique des zones semi-arides du Sahel, Banizoumbou est caractérisé par une saison des pluies qui s'étend de juin à septembre. Sur cette zone, la pluie est le principal moteur pour la croissance de la végétation, sa répartition, de même que pour les variations saisonnières de l'humidité et de la rugosité du sol. Aussi, le cycle de la végétation est principalement concentré sur l'été, avec un pic autour de la mi-septembre (annexe A). Puis, la densité de la végétation diminue en raison de l'assèchement du sol lié à la fin de l'hivernage. La végétation est hétérogène (savane, brousse tigrée, culture) et éparse, avec un taux de couverture inférieur à 50 %. Dans cette région, le relief est plat. La rugosité du sol est altérée par les pratiques agricoles et la pluie.



Tiré de Kerr *et al*. (1994)

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. Les symboles EC, WC et SS désignent les Super Sites Est, Ouest et, Sud, de l'expérience HAPEX-Sahel, respectivement. *Location of the study area. The acronyms EC, WC, and SS are assigned respectively to the East, West, and South Super Sites of the HAPEX-Sahel experiment.*

3. DESCRIPTION DES DONNÉES DU DIFFUSIOMÈTRE VENT

Le diffusiomètre vent à bord d'ERS-1 est un capteur en bande C (5,3 GHz) avec une polarisation VV. Sa résolution spatiale est de 50 km et sa répétitivité est de 3 à 4 jours. Avec ses antennes avant, milieu et arrière, trois coefficients de rétrodiffusion (σ^0) sont mesurés quasi simultanément à des azimuts et à des angles d'incidence propres à chaque antenne. En raison de la géométrie du capteur, les angles d'incidence des antennes avant et arrière sont très similaires (ESA, 1993). Par ailleurs, une différence d'environ 10° est enregistrée entre l'angle d'incidence de l'antenne du milieu et ceux des deux autres antennes. De ce fait, pour chaque point de mesure, trois coefficients de rétrodiffusion sont disponibles à deux angles d'incidence différents. Les mesures sont effectuées à des nœuds distants de 25 km et à des angles d'incidence compris entre 18° et 46° pour l'antenne du milieu et entre 26° et 59° pour les antennes avant et arrière. Pour cette étude, les données de rétrodiffusion sont acquises entre avril 1992 et décembre 1993. En raison de la forte variabilité de σ^0 avec l'angle d'incidence du capteur (Abdel-Messeh and Quegan, 2000 ; Ulaby *et al.*, 1986), l'évolution temporelle des données du diffusiomètre vent est analysée au sein de trois intervalles angulaires 18°-29°, 30°-39° et 40°-46°. Les mesures de l'antenne du milieu effectuées sur le site d'étude d'avril 1992 à décembre 1993 sont présentées sur la figure 2. À l'exception des variations du signal dues à l'humidité du sol, une légère différence est constatée entre les courbes correspondant aux intervalles angulaires 30°-39° et 40°-46°. De même que dans Frison et Mougin (1996), ces deux courbes sont en parfait accord avec le cycle végétal au Sahel. Quant à la courbe correspondant à l'intervalle angulaire 18°-29°, elle est très bruitée en raison tant de la forte sensibilité du signal aux angles d'incidence appartenant à cet intervalle (figure 3) qu'à la forte sensibilité du signal aux caractéristiques du sol.

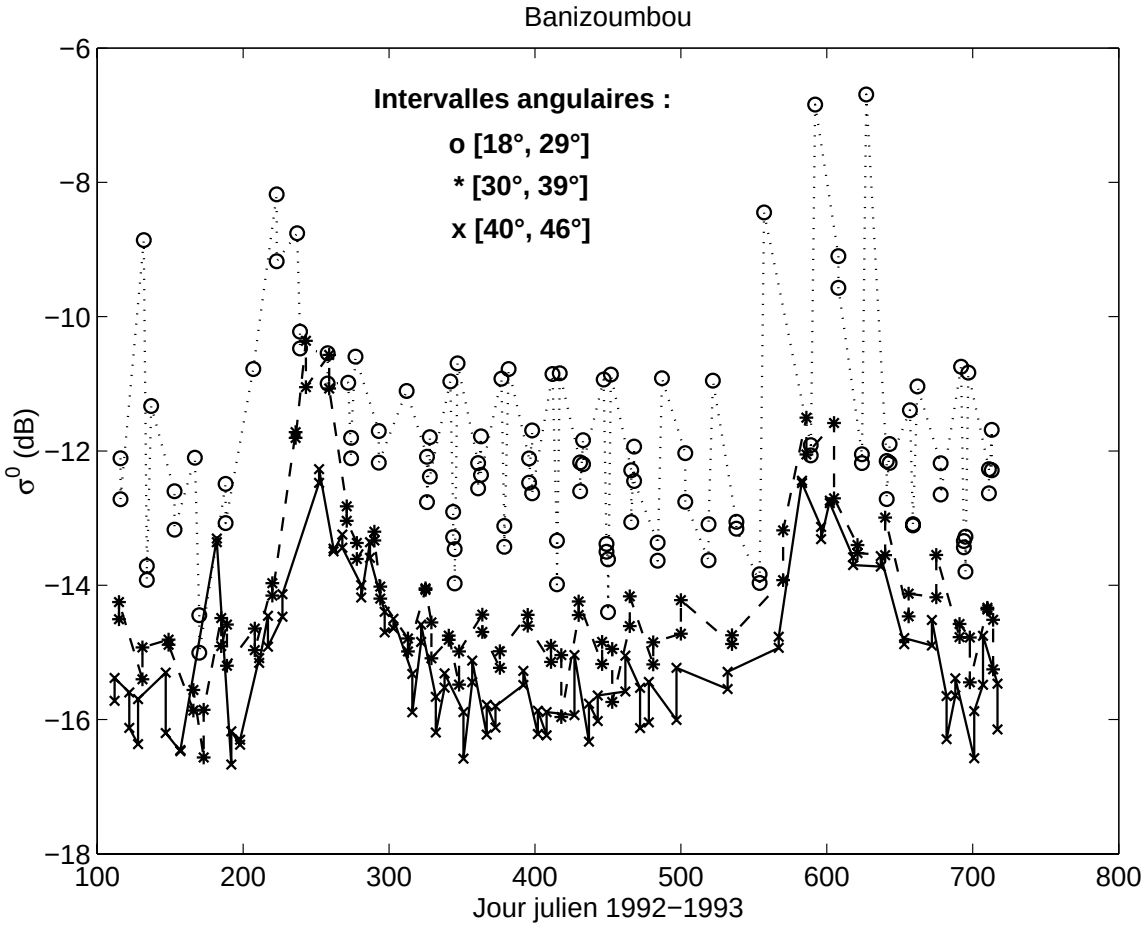
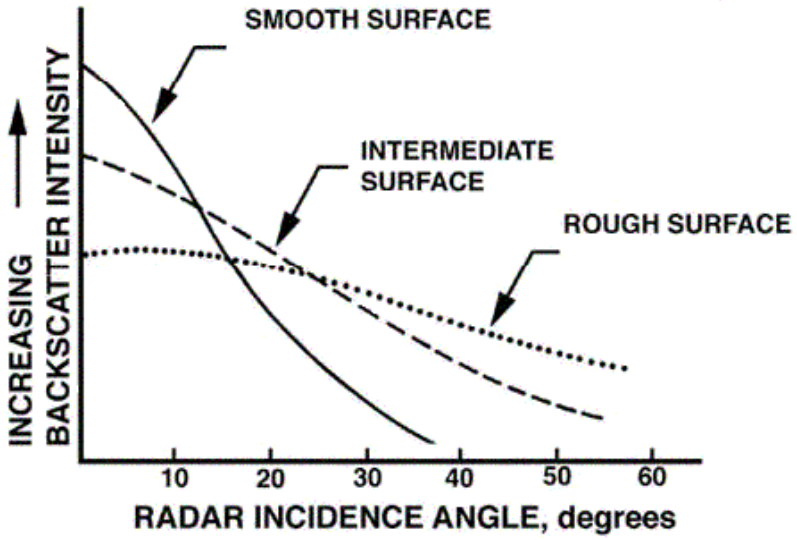


Figure 2 : Évolution temporelle des données du diffusiomètre vent d'ERS-1 d'avril 1992 à décembre 1993. Les mesures sont celles acquises par l'antenne du milieu dans les intervalles angulaires 18°-29°, 30°-39°, et 40°-46°. *Temporal evolution of the ERS-1 windscatterometer data from April 1992 to December 1993. The measurements were acquired by the mid beam antenna within the 18°-29°, 30°-39°, and 40°-46° angular intervals.*



Source : http://satftp.soest.hawaii.edu/space/hawaii/vfts/kilauea/radar_ex/page2.html

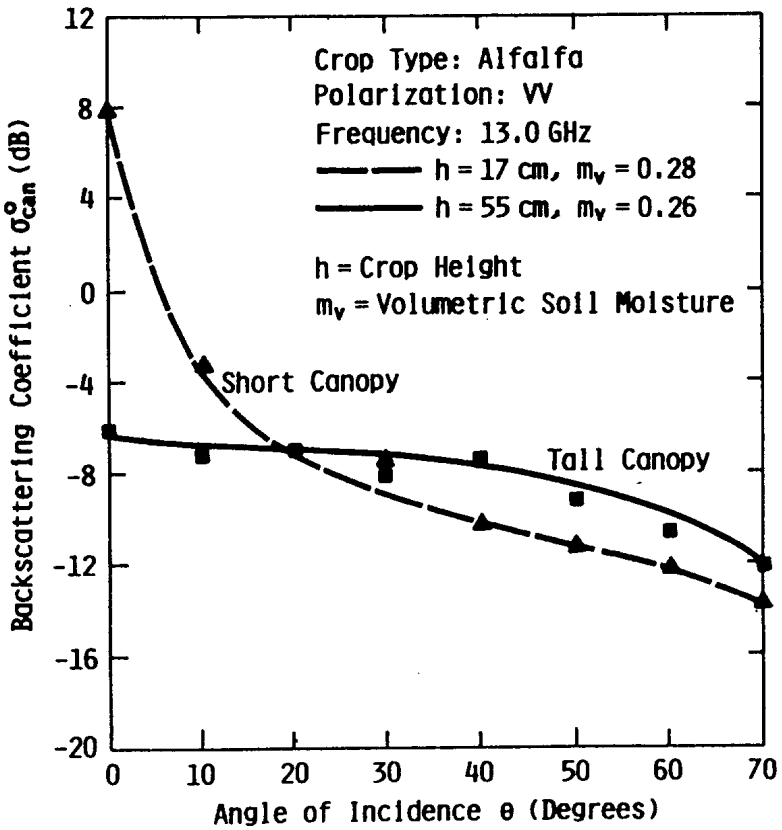
Figure 3 : Comportement général de σ^0 suite à une variation de l'angle d'incidence, θ, et pour plusieurs valeurs de la rugosité du sol. *General behavior of* σ^0 *with changes in the incidence angle* θ *and in the soil roughness.*

4. DÉPENDANCE ANGULAIRE DU COEFFICIENT DE RÉTRODIFFUSION

Il ressort clairement de la figure 2 que la réponse du coefficient de rétrodiffusion (σ^0) à une variation des paramètres de surface est très influencée par l'angle d'incidence. Dans cette section, l'analyse de la dépendance angulaire de σ^0 s'articule autour d'un bref aperçu du comportement de σ^0 en fonction de l'angle d'incidence, de la rugosité du sol et de la végétation (section 4.1), de l'extraction de la variation angulaire de σ^0 mesurée par le diffusiomètre vent (section 4.2) et d'une présentation du contenu théorique de la variation angulaire des mesures du diffusiomètre vent (section 4.3).

4.1. Aperçu sur le comportement du coefficient de rétrodiffusion

Pour analyser le profil temporel de la rugosité du sol, nous utilisons la variation angulaire de σ^0, déduite des mesures du diffusiomètre vent. Il est alors utile de rappeler le comportement général de σ^0 en fonction de l'angle d'incidence θ, de la rugosité du sol (figure 3) et de la végétation (figure 4). Très brièvement, la dépendance angulaire du coefficient de rétrodiffusion décroît avec le degré de rugosité du sol et le taux de couverture végétale. Aux angles entre 30° et 60° correspondent une légère dynamique angulaire de σ^0 et un accroissement de σ^0 avec la rugosité du sol et la végétation (figures 3 et 4). Aux angles d'incidence plus faibles, $\theta < 30°$ correspond une forte dynamique angulaire de σ^0. Enfin, aux angles inférieurs à 17°-20°, σ^0 baisse avec le degré de rugosité et le taux de couverture végétale (figures 3 et 4). En résumé, la rugosité du sol et la végétation affectent non seulement la magnitude du signal mais aussi sa variation angulaire (figures 3 et 4). Cette dernière est analysée dans le temps afin de l'affranchir de l'effet de la végétation et d'attribuer ensuite son contenu à la rugosité du sol (voir la section 5).



Tiré de Ulaby *et al.* (1986)

Figure 4 : Comportement de σ^0 suite à une variation de l'angle d'incidence, θ, et de la végétation. *Behavior of* σ^0 *with changes in the incidence angle,* θ *, and in the vegetation.*

4.2. Extraction de la variation angulaire de σ^0

Étant donné la forte dépendance du coefficient de rétrodiffusion à l'angle θ, avant d'effectuer une analyse temporelle des mesures de σ^0, l'angle d'incidence de ces mesures doit habituellement être corrigé. Cette correction consiste en une méthode de normalisation des mesures à un angle de référence θ_f dans le but de générer des coefficients de rétrodiffusion $\sigma^0(\theta_f)$, dont la variation dépend principalement de celle des caractéristiques de surface. La méthode de normalisation linéaire développée par Kennett et Li (1989 a, b) est exprimée par :

$$\sigma^0(\mathrm{dB}) = \sigma^0{}_{45}(\mathrm{dB}) + \mathrm{K}(\theta, t)(\theta - 45°) \qquad (1)$$

Dans cette équation, le terme clé pour notre étude est $\mathrm{K}(\theta, t)$ qui est la pente en dB/° de la relation σ^0 *vs* θ, supposée linéaire.

$\mathrm{K}(\theta, t) = \dfrac{\partial \sigma^0}{\partial \theta}$ informe sur le degré de rugosité d'une surface et est fortement corrélé à la densité de végétation (Wagner and Scipal, 2000), d'où sa dépendance à l'angle d'incidence (θ) et au temps (t).

Avec le triplet de coefficients de rétrodiffusion mesurés quasi simultanément par le diffusiomètre vent, dans cet article, la variation angulaire de σ^0, $\dfrac{\partial \sigma^0}{\partial \theta}$, est calculée à chaque nœud à partir de la relation σ^0 *vs* θ, supposée linéaire :

$$\sigma^0(\mathrm{dB}) = \sigma_0{}^0(\mathrm{dB}) + \mathrm{K}\theta \qquad (2)$$

où :

$\mathrm{K} = \dfrac{\partial \sigma^0}{\partial \theta}$ est la pente de la régression linéaire de σ^0 *vs* θ ;

$\sigma_0^0(\mathrm{dB}) = \left(\sigma^0(\mathrm{dB})\right)_{\theta=0}$ est l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire.

La relation entre σ^0 et θ n'est généralement pas linéaire sur un grand intervalle angulaire (figure 3). Cependant, elle peut être supposée linéaire sur un intervalle angulaire restreint. Considérant la différence de 10° entre les angles d'incidence des antennes avant et milieu, l'équation (2) n'est vraie que si elle représente une première approximation du profil angulaire de σ^0. L'erreur d'évaluation de σ^0 par l'équation (2) est calculée à chaque nœud par :

$$\mathrm{E}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{3}\left(\sigma_i^0(\mathrm{dB}) - \sigma^0_{\mathrm{diffusiomètre},i}(\mathrm{dB})\right)^2}{3} \qquad (3)$$

où :

l'indice *i* est attribué aux antennes avant, milieu et arrière ;

$\sigma^0_{diffusiomètre,i}$ est le coefficient de rétrodiffusion mesuré par les antennes avant, milieu et arrière du diffusiomètre vent ;

σ^0 est le coefficient de rétrodiffusion des antennes avant, milieu et arrière simulé par l'équation 2.

Sur la figure 5, les histogrammes des valeurs de E, pour les années 1992 et 1993, montrent un comportement similaire. En 1992, E est inférieur à 1,4 avec une valeur moyenne de 0,11 dB. En 1993, E est inférieur à 0,37, avec une valeur moyenne de 0,08 dB. Cependant, en 1992, il y avait quatre valeurs de E supérieures à 0,4. Celles-ci correspondent aux acquisitions pour lesquelles on constate une différence d'au moins 1 dB entre les mesures des antennes avant et arrière, malgré leurs angles d'incidence identiques. De ce fait, nous soulignons une bonne concordance des valeurs de E en 1992 et en 1993.

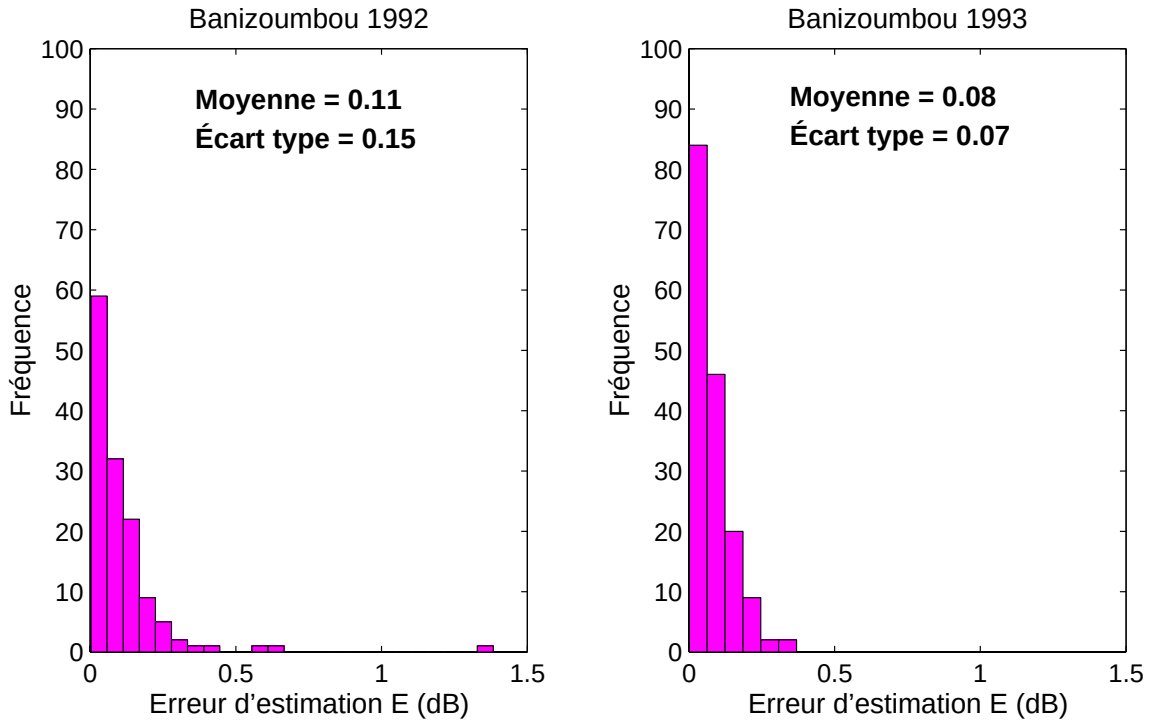


Figure 5 : Histogramme de l'erreur d'estimation, E (dB), de σ^0 à partir de l'équation 2. Les résultats sont présentés pour les années 1992 et 1993.*Frequency distributions of the error, E(dB), for estimating* σ^0 *from Equation 2. The results are given for the years 1992 and 1993.*

4.3. Contenu de la pente K déduite des mesures du diffusiomètre vent

Les mesures sur le terrain de la rétrodiffusion ou des résultats de modélisation ont clairement montré que la variation angulaire de σ^0 $\left(K = \frac{\partial \sigma^0}{\partial \theta} \right)$ est liée à la rétrodiffusion de volume, en présence de végétation ou d'un sol sec non homogène, et aussi à la rugosité du sol (Fung, 1994 ; Wagner and Scipal, 2000). Quant à l'humidité du sol, elle joue uniquement sur l'amplitude du signal sans affecter les valeurs de K (Ulaby *et al*., 1982 ; Fung, 1994).

À une échelle comparable à la résolution du diffusiomètre vent, dans peu d'études ont été analysées les relations entre K et les paramètres de surface, à savoir l'humidité du sol, la rugosité du sol et la végétation (Kenett and Li, 1989a ; Wagner and Scipal, 2000 ; Wiesmann, 1994). Alors que Wagner *et al.* (1999 a, b) et Wagner et Scipal (2000) ont analysé la variation saisonnière de K comme le résultat d'une croissance végétale, dans cet article, K est utilisé afin de suivre la variation temporelle de la rugosité. Mais, avant de développer ce point, analysons le contenu théorique de K sur la zone d'étude.

Dans un milieu où la végétation est éparse, le coefficient de rétrodiffusion est donné par (Ulaby *et al*., 1982) :

$$\sigma^0(\theta) = (1 - C_v)\sigma^0{}_{sol}(\theta) + C_v\sigma^0{}_{can}(\theta) \quad (4a)$$

où

$$\sigma^0_{sol}(\theta) = A(\theta)\exp(Dm_v) \text{ ou} \quad (4b)$$

$$\sigma^0_{sol}(dB) = A'(dB) + D'm_v \quad (4c)$$

$$\sigma^0_{can}(\theta) = \sigma^0_{veg}(\theta) + \gamma^2(\theta)\sigma^0_{sol}(\theta) \quad (4d)$$

$$D' = \frac{10D}{\ln 10} = 4,34D$$

D' [dB (% vol^{-1})] est la sensibilité du signal rétrodiffusé d'un sol nu à l'humidité volumique du sol [m_v (% vol.)] ;

$A(\theta)$ est le signal d'un sol sec et nu ; à un angle d'incidence donné, il représente la réponse de σ^0 à une variation de la rugosité du sol ;

$$A' = 10 \log A(\theta)$$

σ^0_{sol}, σ^0_{veg} et, σ^0_{can} sont, respectivement, les contributions du sol, de la végétation et de la canopée ;

$\gamma^2 = \exp(-2\tau \sec\theta)$ est le facteur de transmission de la végétation ;

C_v est le taux de couverture végétale ; il représente le pourcentage de végétation dans le champ de vue du capteur.

Considérant les équations 4b et 4d, l'équation 4a peut se réécrire comme suit :

$$\sigma^0(\theta) = \left(1 - C_v\left(1 - \gamma^2(\theta)\right)\right) A(\theta) \exp(Dm_v) + C_v \sigma^0{}_{veg}(\theta) \quad (4e)$$

$$\sigma^0(\theta) = \exp(Dm_v) A(\theta) \left[(1 - C_v(1 - \gamma^2(\theta))) + \frac{C_v \sigma^0{}_{veg}(\theta)}{\exp(Dm_v) A(\theta)} \right] \quad (4f)$$

ou en dB : $\sigma^0(dB) = A'(dB) + D' m_v + F'(C_v)$ (4g)

où : $F'(C_v) = 10 \log F(C_v)$;

avec :

$$F(C_v) = \left(1 - C_v\left(1 - \gamma^2(\theta)\right)\right) + \frac{C_v \sigma^0_{veg}(\theta)}{\exp(Dm_v) A(\theta)} \quad (4h)$$

Des auteurs (Theis *et al*., 1982 ; Ulaby *et al*., 1986) ont montré que la sensibilité du signal d'un sol nu à l'humidité du sol, D', est approximativement constante pour tout angle d'incidence $\theta \geq 20°$. Ce résultat est aussi obtenu sur la zone d'étude avec les données du diffusiomètre vent (Magagi and Kerr, 1997). De ce fait, il résulte de l'équation 4c que la variation angulaire de la contribution du sol est gouvernée par A' (dB), qui dépend de la rugosité du sol et de l'angle d'incidence. Dans une première approximation, à 5,3 GHz, la variation de A' (dB) en fonction de θ peut être considérée comme linéaire pour des angles d'incidence $\theta \geq 15°$ (Ulaby *et al*., 1978). Prévot *et al*. (1993) proposent la linéarisation suivante de A' (dB) :

$$A'(dB) = -E_1 \theta + E_2 \quad (5a)$$

où :

E_1 est la variation angulaire du signal d'un sol nu, fonction de la rugosité (Fung, 1994 ; Ulaby *et al*., 1982) ;

E_2 est une constante de calibration.

En combinant les équations 4g et 5a, le signal mesuré par le capteur s'exprime par :

$$\sigma^0(dB) = -E_1 \theta + E_2 + D' m_v + F'(C_v) \quad (5b)$$

Considérant que D' est indépendant de l'angle d'incidence, lorsque ce dernier est supérieur à 20°, une comparaison des équations 2 et 5b nous permet d'écrire :

$$\sigma^0_0(dB) = E_2 + D' m_v + F'(C_v) \quad (5c)$$

$$K = -E_1(dB/°) + \partial F'(C_v)/\partial\theta \quad (5d)$$

À la suite d'une analyse du comportement de $F'(C_v)$ en fonction de l'humidité du sol, il ressort que, pour de faibles valeurs d'humidité, m_v, le rapport $\frac{C_v \sigma^0_{veg}(\theta)}{\exp(Dm_v) A(\theta)}$ (dans l'équation 4h) est contrôlé par l'effet de la végétation. Et, pour de fortes valeurs de m_v, le rapport $\frac{C_v \sigma^0_{veg}(\theta)}{\exp(Dm_v) A(\theta)}$ décroît, mais demeure important pour des valeurs élevées

de l'albédo de simple diffusion de la végétation. Par conséquent, $F'(C_v)$ est très peu affectée par l'humidité du sol. Tout comme pour les mesures sur le terrain de rétrodiffusion, nous en déduisons, qu'à la résolution spatiale du diffusiomètre vent, la variation angulaire de $\sigma^0_{\text{diffusiomètre}}$ (K, équation 5d) d'un sol couvert de végétation, dépend de la rugosité et de la végétation.

5. MÉTHODOLOGIE

Dans un environnement semi-aride, pour suivre la rugosité du sol à partir de la variation angulaire K, il est alors nécessaire de lui soustraire l'effet de la végétation. La méthodologie adoptée consiste d'abord à analyser les variations temporelle et angulaire de K (section 5.1), puis à proposer une courbe de tendance exprimant l'évolution temporelle de la rugosité du sol en fonction de la pente K (section 5.2).

5.1. Analyse de la variation angulaire de σ^0 issue des données du diffusiomètre vent

Sur la figure 6, La pente K, déduite de l'équation 2, est représentée en fonction de l'angle d'incidence de l'antenne du milieu pour les années 1992 et 1993. Un comportement exponentiel est observé pour K en fonction de θ. Pour les angles d'incidence $\theta < 30°$, la forte dépendance angulaire de σ^0, observée sur la figure 3, se constate à travers de fortes valeurs de $|K|$ variant entre 0,08 dB/° et 0,5 dB/°. Pour les angles d'incidence $\theta \geq 30°$, la faible dépendance angulaire de σ^0, observée sur la figure 3, se confirme par la saturation du profil exponentiel de la relation K *vs* θ et par la baisse des valeurs de $|K|$ (par rapport aux valeurs obtenues pour $\theta < 30°$). Pour $\theta \geq 30°$, la variation de K entre -0,17 dB/° et – 0,02/° traduit les modifications dans le temps des paramètres de surface. Sur la zone d'étude, celles-ci sont particulièrement importantes pendant l'hivernage (juin à septembre). Le comportement mensuel de la relation K *vs* θ est présenté sur les figures 7a et b, respectivement pour 1992 et 1993. Pour $\theta \geq 30°$, les valeurs élevées de la pente K s'observent durant les mois d'août à octobre conformément au développement de la végétation. Cependant, l'analyse de la relation K *vs* θ, effectuée à l'aide des figures 6 et 7, ne renseigne pas explicitement sur la rugosité du sol. Dans la section suivante, nous pousserons l'analyse de la relation K *vs* θ et proposerons une méthodologie d'un suivi temporel de la rugosité du sol.

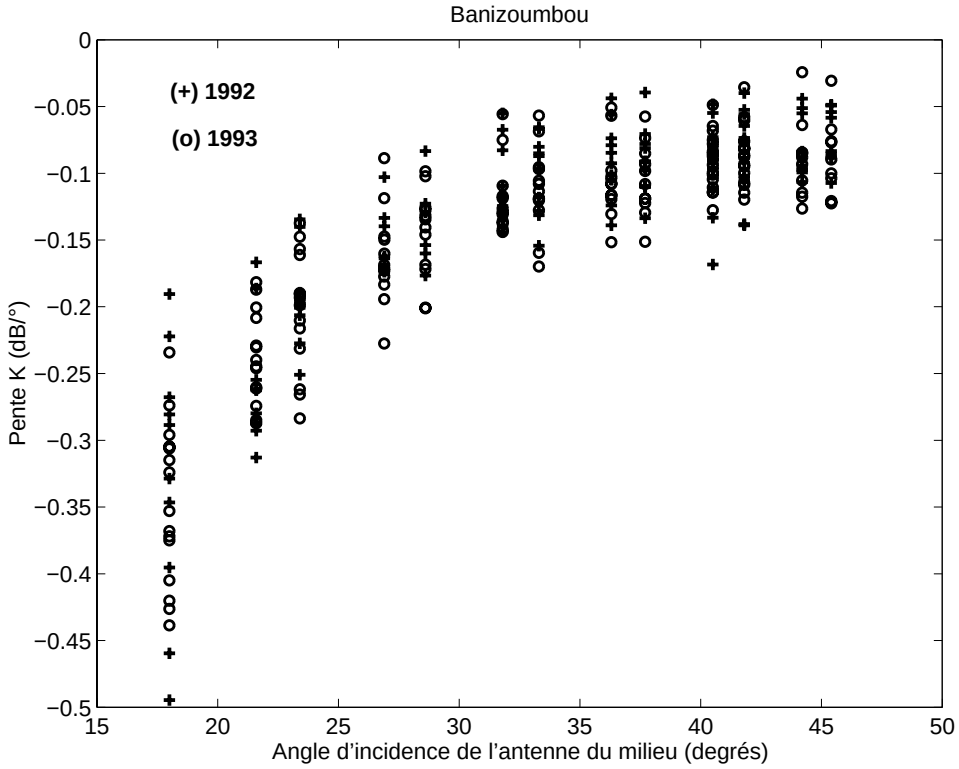


Figure 6 : Relations entre K et l'angle d'incidence, θ, de l'antenne du milieu pour les années 1992 (+) et 1993 (o). *Relationship between K and the incidence angles,* θ *, of the mid beam antenna for the years 1992 (+) and 1993 (o).*

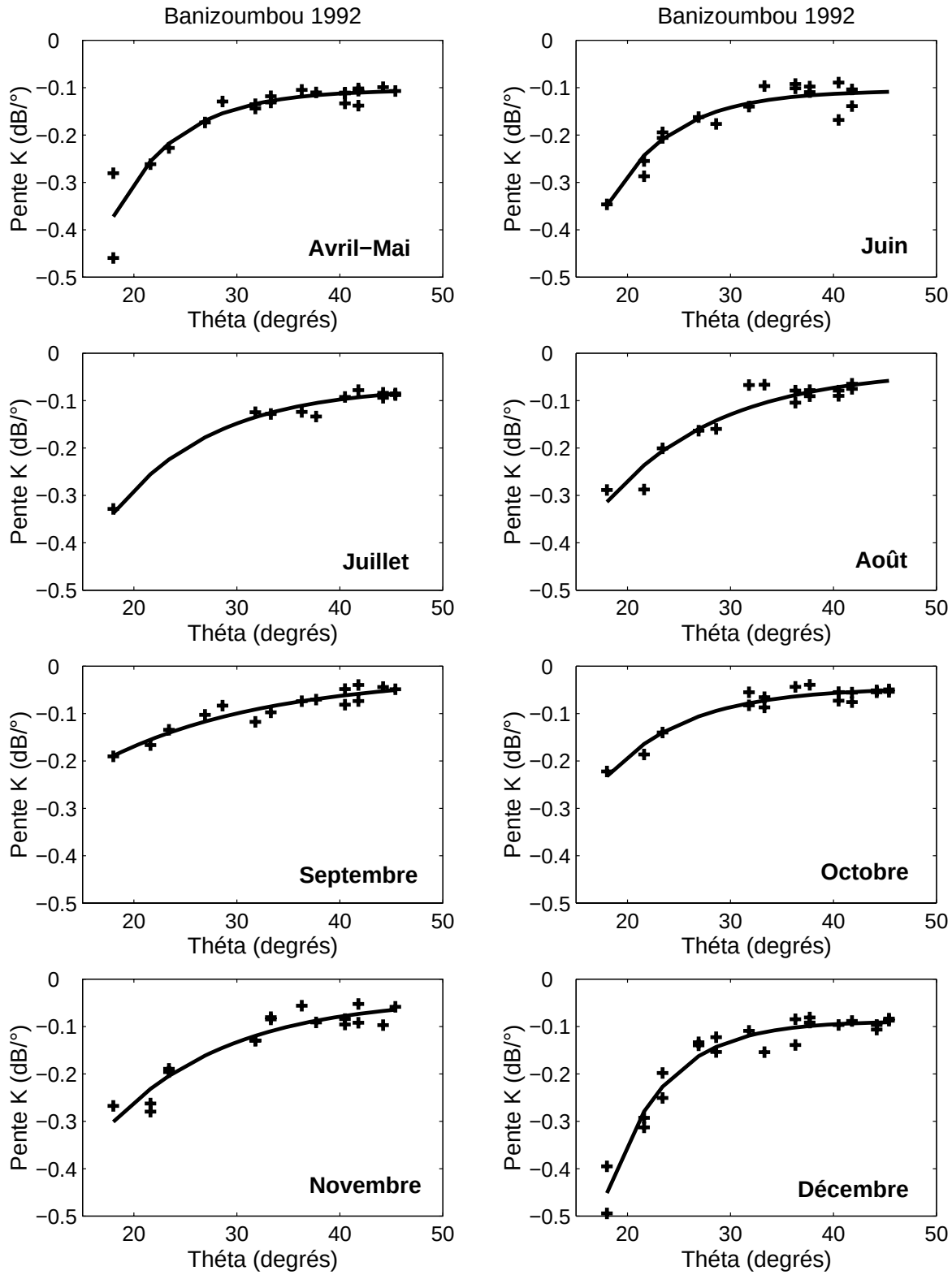

Banizoumbou 1992
Pente K (dB/°)
Théta (degrés)
Avril−Mai
Banizoumbou 1992
Juin
Juillet
Août
Septembre
Octobre
Novembre
Décembre

Figure 7a

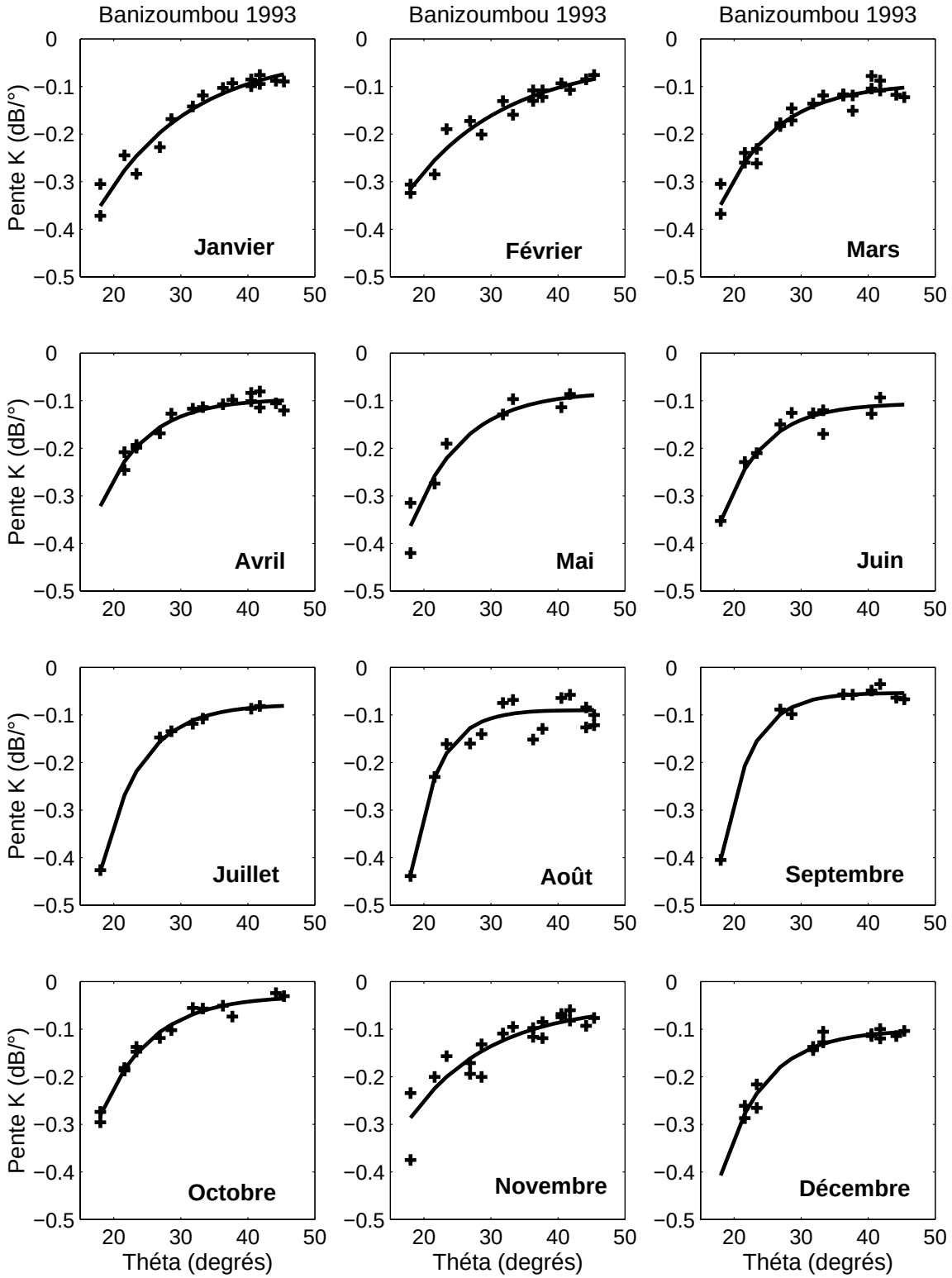


Figure 7b

Figures 7 a et b : Profils mensuels obtenus de la relation entre K et l'angle d'incidence, θ, de l'antenne du milieu. a) résultats obtenus en 1992 ; b) résultats obtenus en 1993. *Monthly behavior of the relationship between K and the incidence angles,* θ, *of the mid beam antenna. a) results obtained in 1992 ; b) results obtained in 1993.*

5.2. Détermination de l'évolution temporelle de la rugosité du sol à partir de la variation angulaire K

À un angle d'incidence θ donné, la figure 6 montre un étalement des valeurs de K, surtout pour les $\theta < 30°$. Sur les figures 7a et 7b, la représentation des données sur une base mensuelle réduit cette dispersion tout en maintenant la distribution des données sur l'ensemble de l'intervalle angulaire [18°, 56°]. De ce fait, notre méthodologie sera basée sur l'allure des courbes présentées sur ces figures. Une hypothèse de départ est d'exprimer chacune des courbes par la relation empirique :

$$K_{sim} = -x_m + y_m \exp(-z_m \theta) \qquad (6a)$$

Les coefficients x_m, y_m et z_m résultent d'un processus de minimisation non linéaire de l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs de K provenant du diffusiomètre (équation 2) et K_{sim} (équation 6a). Pour chaque régression mensuelle d'avril 1992 à décembre 1993, le tableau 1 donne les valeurs de x_m, y_m et z_m ainsi que le coefficient de corrélation, R, et l'erreur d'estimation. Le coefficient x_m décroît avec l'évolution de la végétation. Par contre, l'interprétation des coefficients y_m et z_m n'est pas facile surtout pour l'année 1993 où, pour certains mois, des données de K manquent dans l'intervalle angulaire 21°-29° (figure 7b). Il y a une grande différence entre les valeurs de y_m et de z_m obtenues en 1992 et 1993, particulièrement pour les mois de juillet à septembre (tableau 1). Nous l'attribuons à une forte différence dans la distribution des données (symboles + sur les figures 7a et b) qui influe sur les valeurs des coefficients y_m et z_m liés à la dynamique de la courbe K_{sim} (équation 6a).

Sur les figures 7a et b, la courbe pleine représente K_{sim} (équation 6a). La bonne concordance avec les données (symboles +) confirme les valeurs du coefficient de corrélation, R, et de l'erreur d'estimation figurant sur le tableau 1.

Pour déterminer une expression de la variation angulaire de σ^0 qui dépend uniquement de la rugosité du sol, nous analysons l'équation 6a en fonction de l'angle d'incidence θ. Et, tenant compte du processus de rétrodiffusion prédominant, les coefficients x_m, y_m et z_m sont reliés aux modifications temporelles de la végétation et de la rugosité du sol. Considérant le profil de la relation entre K et θ (figures 6 et 7), l'équation 6a est analysée dans deux intervalles angulaires : $\theta < 30°$ et $\theta \geq 30°$.

Pour le premier intervalle angulaire ($\theta < 30°$), la pente K présente une forte dynamique contrôlée principalement par y_m et z_m. En plus, dans les zones semi-arides, pour des angles $\theta < 30°$, la végétation atténue beaucoup plus le signal provenant du sol qu'elle ne contribue au signal total mesuré par le diffusiomètre. La figure 8 l'illustre clairement en montrant l'évolution temporelle des mesures du diffusiomètre et celle des simulations de la contribution du sol (σ^0_{sol}) et de la végétation ($\sigma^0_{végétation}$) en 1992. En effet, pour $\theta < 30°$, en raison de la faible contribution de la végétation par rapport à celle provenant du sol, la végétation affecte très légèrement la variation angulaire de σ^0. Par conséquent, pour $\theta < 30°$ et en zone semi-aride, K aussi bien que les coefficients y_m et z_m qui contrôlent la dynamique de K_{sim} (équation 6a), dépendent fortement de la rugosité du sol. Sur le tableau 1, les modifications observées dans les coefficients y_m et z_m résultent alors des variations temporelles de la rugosité, attribuées aux événements pluvieux.

Pour le deuxième intervalle angulaire ($\theta \geq 30°$), la pente K tend vers $-x_m$, la valeur de saturation étant calculée à partir des figures 7a et b. Or, dans cet intervalle angulaire, σ^0 dépend fortement de la rugosité et de la végétation. Il en est de même pour K qui, pour $\theta \geq 30°$, peut s'exprimer par :

$$K \approx -x_m = f(\text{rugosité}, \text{végétation}) \qquad (6b)$$

Sur le tableau 1, x_m suit la croissance de la végétation. En effet, une baisse de x_m traduit une augmentation de la contribution de la végétation qui, en retour, réduit la magnitude de la variation angulaire de σ^0.

Sur un sol nu homogène, l'équation 6b montre que x_m dépend uniquement de la rugosité. Pour parvenir au suivi de la rugosité à partir des valeurs de K, les coefficients x_m obtenus dans les conditions de sols nus sans aucun apport de la végétation sont sélectionnés et maintenus constants pour chacune des années 1992 et 1993. Ils correspondent aux valeurs des mois d'avril et de mai en 1992 ainsi que de mars en 1993. Ces valeurs de x_m sont utilisées conjointement avec les valeurs mensuelles de y_m et z_m dans l'équation 6a pour déterminer l'évolution temporelle de K_{sol}, la variation angulaire résultant uniquement d'une variation de rugosité :

$$K_{sol} = -x_{sol} + y_m \exp(-z_m \theta) \qquad (6c)$$

où :

x_{sol} est la valeur de x_m dans les conditions de sol nu (avril et mai en 1992 et mars en 1993).

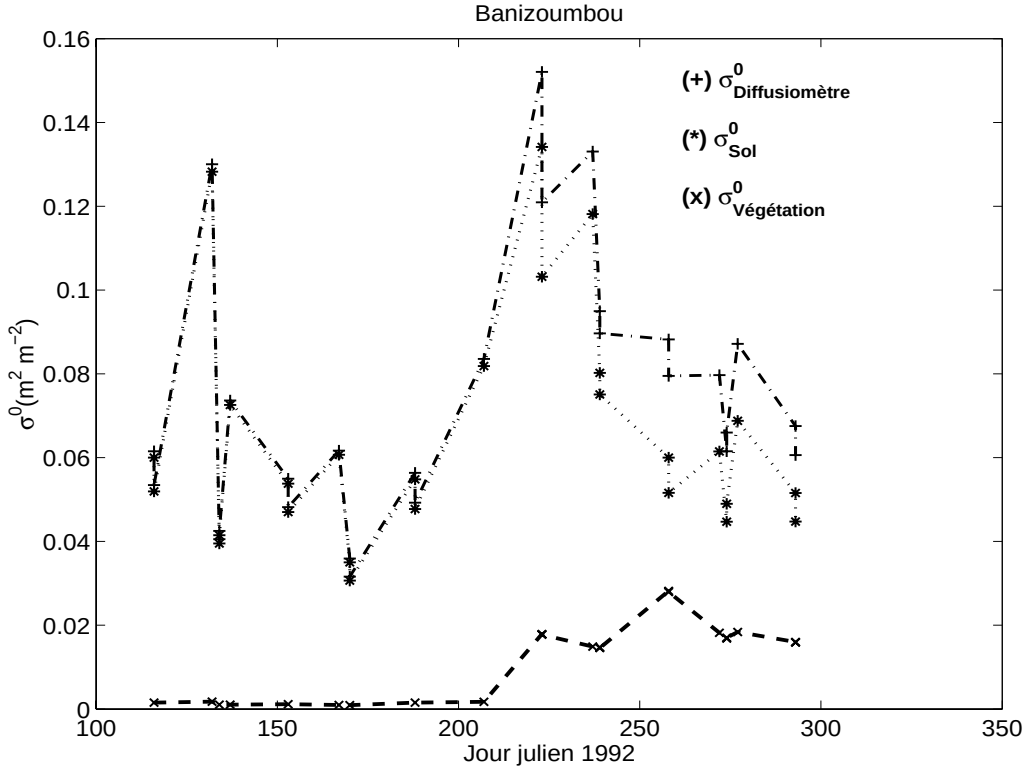
Le raisonnement exposé revient à suivre qualitativement l'évolution temporelle de la rugosité du sol à partir d'une valeur de référence de la pente K aux fortes incidences ($-x_{sol}$), dégagée de toute influence de la végétation.

Tableau 1 : Valeurs des coefficients, x_m, y_m et, z_m de la relation entre la pente K et l'angle d'incidence θ (équation 6a). Elles sont obtenues à partir des données du diffusiomètre vent acquises en 1992 et 1993 sur le Super Site Est de l'expérience Hapex-Sahel.
Coefficients, x_m, y_m et, z_m *of the relationships between the slope K and the incidence angle* θ *(Equation 6a). The results are derived from the ERS-1 WSC measurements acquired over the East Super Site of the Hapex-Sahel experiment, in 1992 and 1993.*

Mois	x_m **(10^{-2})**		y_m **(10^{-2})**		z_m **(10^{-2})**		**Coefficient de corrélation R**		**Erreur d'estimation (10^{-2}) dB/°**	
	1992	**1993**	**1992**	**1993**	**1992**	**1993**	**1992**	**1993**	**1992**	**1993**
Janvier	-	3,29	-	-121	-	7,43	-	0,94	-	2,12
Février	-	4,43	-	-95	-	6,96	-	0,94	-	1,79
Mars	-	9,32	-	-223	-	12,03	-	0,89	-	1,89
Avril	10,46	9,56	-467	-333	15,92	14,95	0,82	0,87	3,05	1,32
Mai	10,46	8,01	-467	-291	15,92	12,94	0,82	0,89	3,05	3,10
Juin	10,59	10,54	-425	-461	15,90	16,23	0,85	0,82	2,40	1,88
Juillet	6,92	7,74	-168	-732	10,19	16,88	0,92	0,85	1,16	0,47
Août	3,44	8,94	-141	-298	8,99	24,76	0,90	0,70	2,35	2,90
Septembre	2,03	5,34	-52	-221	6,27	23,02	0,92	0,79	1,41	1,05
Octobre	4,53	2,91	-180	-278	12,59	13,34	0,86	0,90	1,34	1,16
Novembre	3,94	4,86	-122	-106	8,57	8,33	0,90	0,86	2,42	3,16
Décembre	8,83	10,16	-899	-483	17,83	15,33	0,82	0,89	2,51	1,36

6. RÉSULTATS

L'évolution temporelle de σ^0 (dB), mesurée par le diffusiomètre ainsi que de $K(dB/°)$ et $K_{sol}(dB/°)$ pour des angles $\theta \geq 30°$, est présentée sur la figure 9. En accord avec Wagner et Scipal (2000), un déphasage est observé entre l'évolution temporelle de K et celle de σ^0. La raison est que σ^0 réagit à la teneur en eau du sol et de la végétation, alors que K dépend fortement de la rétrodifffusion de volume de la végétation, laquelle croît avec la biomasse. En effet, à l'annexe A, les mesures sur le terrain du LAI (*leaf area index*) et de la biomasse (kg/ha) collectées durant l'expérience Hapex-Sahel présentent un maximum après le jour julien 260 (17 septembre 1992), qui coïncide avec le pic de K en 1992. Sur la figure 9, la courbe pleine est la courbe de tendance du profil temporel de K_{sol} (symboles « o »). Cette courbe reflète un comportement non constant de la rugosité du sol au cours d'une année. Sa baisse durant la saison des pluies est principalement attribuée au lissage du sol par la pluie, conformément à l'évolution cyclique de la rugosité en milieu Sahélien (Casenave et Valentin, 1989). Par contre, les résultats de Woodhouse et Hoekman (2000a), obtenus sur le Super Site Ouest (figure 1) de l'expérience Hapex-Sahel ont montré une très légère augmentation de la pente de l'écart type des hauteurs de rugosité (*rms slope*) en août, lors du maximum de précipitation. Comme nous manquons de mesures de rugosité continues dans le temps, il est difficile de trancher entre nos résultats et ceux obtenus en août par Woodhouse et Hoekman (2000a).



Tiré de Magagi and Kerr (1997)

Figure 8 : Évolutions temporelles des données du diffusiomètre vent (+), de la contribution du sol (*) et de celle de la végétation (x). Les données sont exprimées en unité normale ($m^2.m^{-2}$), dans l'intervalle angulaire 18°-29°. *Temporal evolutions of the windscatterometer measurements (+), together with the respective contributions of soil (*) and vegetation (x) , expressed in normal unit ($m^2.m^{-2}$), within the 18°-29° angular range.*

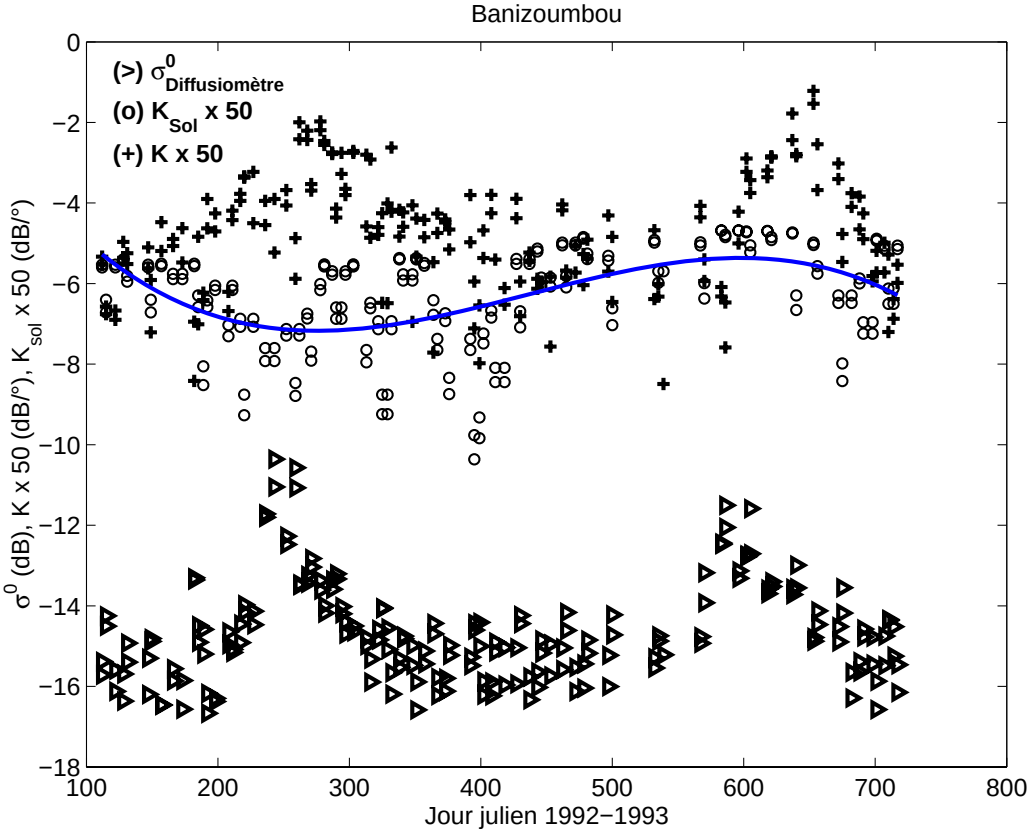


Figure 9 : Évolutions temporelles des données du diffusiomètre vent (▷), des pentes K (+) et K_{sol} (o) pour des angles d'incidence de l'antenne du milieu supérieurs à 29°. *Temporal evolutions of the windscatterometer measurements (▷), the slopes K (+) and* K_{soil} *(o) for the incidence angles of the mid beam antenna higher than 29°.*

7. DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans cet article, nous présentons une méthode simple permettant de suivre l'évolution temporelle de la rugosité du sol. À partir d'observations multiangulaires, la variation angulaire de σ^0 (*i-e* K) est calculée pour chaque point de mesure du diffusiomètre vent. Tenant compte du processus de rétrodiffusion prédominant (surface ou volume) dans le signal mesuré par le diffusiomètre et du profil exponentiel de la relation K *vs* θ, l'évolution temporelle de la rugosité du sol est exprimée à travers une courbe de tendance (équation 6c) qui est fonction de la pente K. Malgré sa simplicité, l'approche présentée conduit à des résultats en accord avec ceux présentés dans les travaux antérieurs. Sa principale limitation est qu'elle est basée sur la disponibilité de données de rétrodiffusion dans une plage angulaire assez large (18°-49°) et ce, de préférence, pour une courte période. À défaut, les données du diffusiomètre sont regroupées par pas de temps mensuel. Les résultats obtenus révèlent une évolution de la rugosité du sol dans le temps. Leur intérêt est qu'ils montrent que, dans la zone d'étude, la rugosité ne peut être considérée comme une constante que sur certaines périodes. De ce fait, avant d'appliquer un algorithme d'inversion de l'humidité du sol, l'approche développée dans cet article peut servir d'outil permettant de déterminer les périodes où la rugosité est stable. Elle contribuerait à améliorer l'estimation de l'humidité du sol, en raison de l'effet perturbateur de la rugosité sur la relation entre σ^0 et l'humidité du sol.

Remerciements

Les auteurs souhaiteraient remercier l'équipe HSIS (Hapex-Sahel Information System) pour l'organisation de la base de données Hapex et aussi tous ceux qui ont participé à la collecte des données de biomasse et de LAI (annexe A) sur le terrain. Nous remercions également l'ESA pour nous avoir fourni les données du diffusiomètre vent d'ERS-1.

Références

Abdel-Messeh, M. and Quegan, S. (2000) Variability in ERS scatterometer measurements over land. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, n° 4, p. 1767- 1776.

Casenave, A. et Valentin, C. (1989) Les états de surface de la zone Sahélienne - Influence sur l'infiltration. Éditions de l'ORSTOM, collection Didactiques, Paris, 229 p.

ESA (European Space Agency) (1993) ERS-1 USER Handbook. ESA Publication Division, Noorwijk (Pays-Bas), SP-1148, revision 1, 129 p.

Frison, P.-L. and Mougin, E. (1996) Use of ERS-1 Wind scatterometer data over land surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, n° 2, p. 550- 560.

Frison, P.-L., Mougin, E. and Hiernaux, P. (1998) Observation and interpretation of seasonal ERS-1 wind scatterometer data over northern Sahel (Mali). Remote Sensing of Environment, n° 63, p. 233-242.

Fung, A.K. (1994) Microwave Scattering and Emission Models and their Applications. Artech House, Norwood (MA), 573 p.

http://satftp.soest.hawaii.edu/space/hawaii/vfts/kilauea/radar_ex/page2.html

Jarlan, L., Mazzega, P. and Mougin, E. (2002) Retrieval of land surface parameters in the Sahel from ERS wind scatterometer data : A "brute force'' method. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, n° 9, p. 2056-2062.

Kennett, R.G. and Li, F.K. (1989a) Seasat Over-Land Scatterometer Data, Part I : Global Overview of the Ku-Band Backscatter Coefficient. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n° 5, p. 592- 605.

Kennett, R.G. and Li, F.K. (1989b) Seasat Over-Land Scatterometer Data, Part II : Selection of extended area land-target sites for the calibration of spaceborne scatterometers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 27, n° 6, p. 779-788.

Kerr, Y.H. and Magagi, R.D. (1994) Use of ERS-1 wind scatterometer data over land surface : Arid and Semi-arid Lands. P. 383-388, *in* Proceedings of the Second ERS-1 Symposium : Space at the Service of Our Environment. Hamburg, 11-14 October 1993, European Space Agency, Noordwijk, ESA SP-361, 1360 p.

Kerr, Y.H., Makhmara, H., Meunier, J.C. and Valero, T. (1996) Hapex-Sahel Information System ; CD-ROM 3 : Ground data vol. 4. MPO, Media-France, Toulouse (France).

Magagi, R.D. and Kerr, Y.H. (1997) Retrieval of soil moisture and vegetation characteristics by use of ERS-1 windscatterometer over arid and semi-arid areas. Journal of Hydrology, vol. 188-189, p. 361-384

Magagi, R.D. and Kerr, Y.H. (2001) Estimating surface soil moisture and soil roughness over semi-arid areas from the use of the co-polarisation ratio. Remote Sensing of Environment, vol. 75,pp. 432-445.

Prévot, L., Dechambre, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Normand, M. and Galle, S. (1993) Estimating the characteristics of vegetation canopies with airborne radar measurements. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 15, p. 2803-2818.

Prince, S.D, Kerr, Y.H., Goutorbe, J.P., Lebel, T., Tinga, A., Bessemoulin, P., Brouwer, J., Dolman, A. J., Engman, E.T., Gash, J.H.C., Hoepffner, M., Kabat, P., Monteny, B., Said, F., Sellers, P. and Wallace, J.S. (1995) Geographical, biological and remote sensing aspects of the Hydrological Atmospheric Pilot EXperiment in the Sahel (HAPEX-Sahel). Remote Sensing of Environment, n° 51, p. 215-234.

Theis, S.W., McFarland, M.J., Rosenthal, W.D. and Jones, C.L. (1982) Microwave remote sensing of soil moisture ; vol. 1 : Final report. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, NASA CR-166822, 131 p.

Ulaby, F.T., Batlivala, P.P. and Dobson, M.C. (1978) Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture : Part I-Bare Soil. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE 16, n° 4, p. 286-295.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K. (1982) Microwave Remote Sensing. Artech House, Dedham (MA), vol. 2, 1064 p.

Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K. (1986) Microwave Remote Sensing. Artech House, Dedham (MA), vol. 3, 2162 p.

Wagner, W. and Scipal, K. (2000) Large scale soil moisture mapping in western Africa using the ERS scatterometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, n° 4, p. 1777-1782.

Wagner, W., Noll, J., Borgeaud, M. and Rott, H. (1999a) Monitoring soil moisture over the Canadian prairies with the ERS-1 Scatterometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, n° 1, p. 206-216.

Wagner, W., Lemoine, G., Borgeaud, M. and Rott, H. (1999b) A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, n° 2, p. 938-948.

Wiesmann, A. (1994) Remote sensing of land surfaces with the ERS-1 windscatterometer. Diploma Thesis, Institute of Applied Physics, Université de Berne, Berne, 84 p.

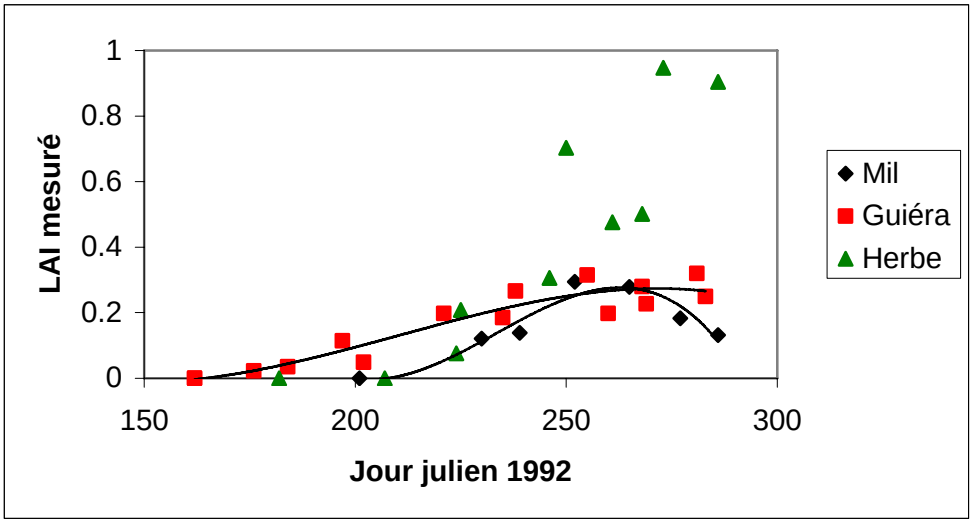
Woodhouse, I.H. and Hoekman, D.H. (2000a) Determining land-surface parameters from the ERS Windscatterometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, n° 1, p. 126-140.

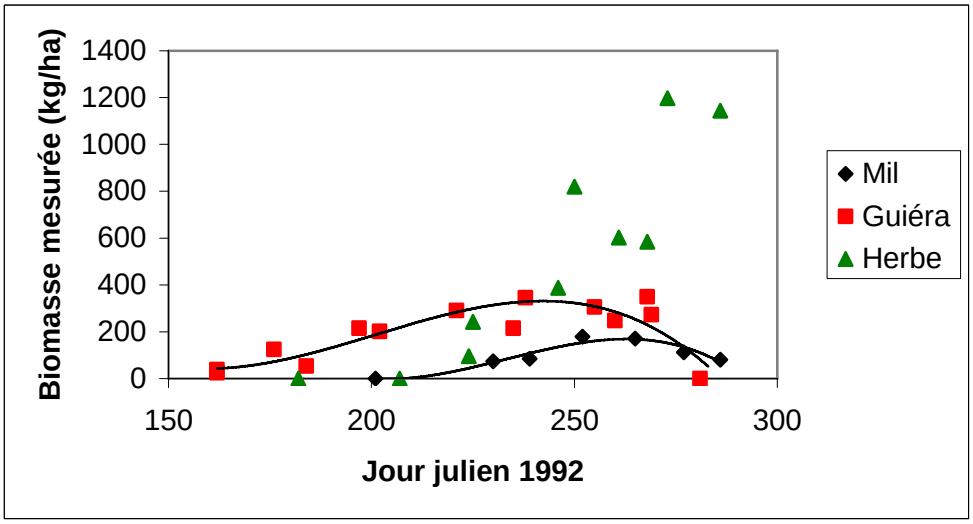
Woodhouse, I.H. and Hoekman, D.H. (2000b) A model-based determination of soil moisture trends in Spain with the ERS-Scatterometer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, n° 4, p. 1783-1793.

Zribi, M., Le Hégarat-Mascle, S., Ottlé, C., Kammoun, B. and Guérin, C. (2003a) Surface soil moisture from the synergistic use of the (multi-incidence and multi-resolution) active microwave ERS Windscatterometer and SAR data. Remote Sensing of Environment, n° 86, p. 30-41.

Zribi, M., Le Hégarat-Mascle, S., Taconet, O., Ciarletti, V. and Vidal-Madjar, D. (2003b) Derivation of wild vegetation cover density in semi-arid regions : ERS/SAR evaluation. International Journal of Remote Sensing, vol. 24, n° 6, p.1 335-1352.

Annexe A :





Paramètres biophysiques de la végétation mesurés par S.D. Prince, N.P. Hanan et A. Begue sur le site Hapex-Sahel (Kerr *et al.*, 1996). Pour la guiéra et le mil, seule la biomasse foliaire est considérée. *Vegetation biophysical parameters measured by S. D. Prince, N. P. Hanan, and A. Begue over Hapex Sahel area (Kerr et al. 1994). For the Guiera and the Millet, the leaf biomass is only considered*