



HAL
open science

Utilisation de mesures in situ d'humidité des sols pour l'évaluation des produits satellitaires micro-ondes dans le Sud-Ouest de la France = Use of in-situ soil moisture measurements to evaluate microwave remote sensing products in south-western France

C. Albergel, C. Rüdiger, J.C. Calvet, D. Carrer, N. Fritz, T. Pellarin

► **To cite this version:**

C. Albergel, C. Rüdiger, J.C. Calvet, D. Carrer, N. Fritz, et al.. Utilisation de mesures in situ d'humidité des sols pour l'évaluation des produits satellitaires micro-ondes dans le Sud-Ouest de la France = Use of in-situ soil moisture measurements to evaluate microwave remote sensing products in south-western France. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2010, 2, pp.120-126. 10.1051/lhb/2010027 . insu-00652340

HAL Id: insu-00652340

<https://insu.hal.science/insu-00652340>

Submitted on 21 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Utilisation de mesures in situ d'humidité des sols pour l'évaluation des produits satellitaires micro-ondes dans le Sud-Ouest de la France

Clément Albergel, Christoph Rüdiger, Jean-Christophe Calvet, Dominique Carrer, Nour-Ed-Dine Fritz & Thierry Pellarin

To cite this article: Clément Albergel, Christoph Rüdiger, Jean-Christophe Calvet, Dominique Carrer, Nour-Ed-Dine Fritz & Thierry Pellarin (2010) Utilisation de mesures in situ d'humidité des sols pour l'évaluation des produits satellitaires micro-ondes dans le Sud-Ouest de la France, La Houille Blanche, 96:2, 120-126, DOI: [10.1051/lhb/2010027](https://doi.org/10.1051/lhb/2010027)

To link to this article: <https://doi.org/10.1051/lhb/2010027>



© Société Hydrotechnique de France, 2010



Published online: 03 Jun 2010.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 12



View related articles [↗](#)



Citing articles: 1 View citing articles [↗](#)

Utilisation de mesures in situ d'humidité des sols pour l'évaluation des produits satellitaires micro-ondes dans le Sud-Ouest de la France

Use of in-situ soil moisture measurements to evaluate microwave remote sensing products in south-western France

CLÉMENT ALBERGEL¹, CHRISTOPH RÜDIGER^{1,2}, JEAN-CHRISTOPHE CALVET¹, DOMINIQUE CARRER¹, NOUR-ED-DINE FRITZ¹,

¹ CNRM/GAME (Météo-France, CNRS), Toulouse, France.

METEO-FRANCE/CNRM 42, Av. Coriolis 31057 TOULOUSE CEDEX 1

Tél : +33 (0)5 61 07 93 12, e-mail : clement.albergel@cnrm.meteo.fr

² Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne, Melbourne, Australia

THIERRY PELLARIN

LTHE (UMR 5564), Grenoble, France

Dans le Sud-Ouest de la France, 12 stations de mesures météorologiques du réseau RADOME (Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologique Étendu) de Météo France ont été équipées afin de réaliser des mesures continues de l'eau du sol à différentes profondeurs. Dans ce papier, des observations in situ ainsi qu'un jeu de données synthétiques couvrant la France métropolitaine sont utilisés afin de tester une méthode simple permettant de retrouver le profil de l'eau dans le sol à partir de données de surface (5 cm). La formule récursive d'un filtre exponentiel utilisant une constante de temps T est utilisée avec de bons résultats. Une unique valeur de $T = 6$ jours, estimée par comparaison avec les valeurs observées à 30 cm présente des corrélations satisfaisantes pour toutes les stations.

Dans une seconde partie, les données d'humidité du sol en surface sont utilisées afin d'évaluer les produits d'eau du sol estimés par l'instrument ASCAT (diffusiomètre en bande C) embarqué sur le satellite METOP. Ces données ont été fournies par EUMETSAT sur une période de 6 mois (avril-septembre) en 2007. Dix stations sur 12 présentent des niveaux de corrélation significatifs sur l'ensemble des données disponibles ou sur une partie d'entre elles (en fonction de la localisation). La formule récursive du filtre exponentiel, également appliquée aux séries temporelles d'humidité des sols ASCAT, présente des corrélations satisfaisantes avec une valeur de $T = 14$ jours.

A long term data acquisition effort of profile soil moisture is under way in southwestern France at 12 automated weather stations. In this paper, both those in situ measurements and a synthetic data set covering continental France are used to test a simple method to retrieve root zone soil moisture from a time series of surface soil moisture information. A recursive exponential filter using a time constant, T , is used to compute a soil water index. A unique T value equal to 6 days, estimated after comparing the retrieved soil water index with the observed values at a depth of 30 cm, presents a satisfactory correlation for all stations.

The surface soil moisture observed at 5 cm is used to evaluate the normalized surface soil moisture estimates derived from coarse resolution (25 km) active microwave data of the ASCAT C-band scatterometer instrument (onboard METOP) for a period of 6 months (April-September) in 2007. For 10 stations, significant correlation levels are found for either the whole pooled data set or for a part of them function of the localisation. The best correlation between a soil water index derived from ASCAT and the in-situ observations is obtained for a T -value of 14 days.

I ■ INTRODUCTION

L'utilisation des produits satellitaires micro-ondes est un moyen de cartographier le contenu en eau de la couche superficielle du sol, w_g [1]. Cependant, le paramètre impor-

tant dans les applications météorologiques à court et moyen termes comme en hydrologie des surfaces continentales est le contenu en eau du sol dans la zone racinaire, w_r . C'est en effet ce paramètre qui contrôle la transpiration des plantes. Etant donné l'existence d'un lien entre le contenu en eau de

la couche superficielle du sol et la zone racinaire au travers de processus comme la diffusion, des algorithmes d'assimilation permettent de retrouver w_2 à partir de w_g [2], [3], [4], [5]. L'estimation du profil de l'eau dans le sol à partir de données intermittentes de surface est basée sur l'assimilation de ces dernières dans les modèles de surface [4]. Pour cela, un modèle de surface avec une fine couche de surface est nécessaire afin de représenter au plus près la nature des observations satellitaires. Le filtre de Kalman, une méthode d'assimilation séquentielle optimale est couramment utilisé dans les problèmes environnementaux, pour estimer le profil de l'eau dans le sol [5]. Cependant, le manque d'informations de bonne qualité sur les paramètres des modèles à échelle globale (propriété des sols, forçages atmosphériques) ainsi que les incertitudes liées à la description physique des bilans en eau et énergie sont un inconvénient pour de telles méthodes. Le profil de l'eau dans le sol calculé dépend de la physique du modèle. Dans ce contexte, nous proposons d'évaluer la performance d'une formule simple développée par Wagner [6]. Celle-ci permet de simuler le profil de l'eau dans le sol (SWI, Soil Water Index) à partir de données intermittentes de l'humidité de surface et d'un paramètre de temps T . D'autres études ont déjà démontré la pertinence du filtre exponentiel, pour déterminer l'eau dans le sol à partir d'estimations de l'humidité de surface obtenues par les satellites européens ERS-1&2 [6], [7], [8]. Cette approche peut être testée en utilisant d'autres produits satellitaires comme celui provenant des données ASCAT sur METOP [9]. Ces résultats seront applicables à la future mission SMOS [10].

Dans ce papier, une formulation récursive du filtre exponentiel est testée sur un jeu de données in situ et synthétiques. Le jeu de données in situ est obtenu à partir des mesures d'humidité du sol du réseau de Météo-France, SMOSMANIA localisé dans le Sud Ouest de la France [11], [12] et celles du site expérimental SMOSREX [13]. Il est utilisé pour étudier la capacité de la méthode à retrouver la dynamique de l'eau dans le sol. Le jeu de données synthétiques est issu du modèle de Météo-France, SIM sur la France continentale. Il permet de mieux apprécier la performance de ce filtre. Enfin des valeurs d'humidité du sol estimées par ASCAT et distribuées par EUMETSAT sont comparées aux observations d'humidité de surface du réseau SMOSMANIA et du site SMOSREX sur une période de 6 mois (avril-septembre 2007). Le filtre exponentiel est également appliqué aux estimations d'ASCAT.

II ■ MATÉRIEL ET MÉTHODE

● II.1 DÉFINITIONS DES VARIABLES D'HUMIDITÉ DU SOL

Différentes variables d'humidité des sols sont utilisées dans cette étude :

- w_g est le contenu en eau (m^3m^{-3}) de la couche superficielle du sol, mesuré à 5 cm pour les stations du réseau SMOSMANIA, sur la couche 0-6 cm pour SMOSREX, et simulé pour une couche superficielle de quelques millimètres pour SIM. Avant d'être utilisées dans le filtre, les w_g obser-

vés ou simulés sont normalisés entre [0,1] en utilisant les valeurs maximales et minimales de chaque série.

- w_2 est le contenu en eau de la zone racinaire (m^3m^{-3}) mesuré à 30 cm (SMOSMANIA), à différentes profondeurs (SMOSREX) ou intégré tout le long du profil racinaire (SIM et SMOSREX). Ces valeurs sont également normalisées.
- Les séries SWI_m sont le résultat de la formule récursive du filtre exponentiel, elles sont sans dimension, entre [0,1]. Un SWI normalisé permet de comparer la dynamique de l'humidité de surface avec celle du profil de l'eau dans le sol. En effet, l'humidité de surface peut évoluer au-dessus de la capacité au champ et sous le point de flétrissement tandis que le profil de l'eau dans le sol est le plus souvent borné par ces deux quantités.

● II.2 DONNÉES D'HUMIDITÉ DU SOL

II.2.1 In situ : le réseau SMOSMANIA et le site SMOSREX

L'objectif principal de SMOSMANIA (Soil Moisture Observing System-Meteorological Automatic Network Integrated Application) est la validation des estimations satellitaires de l'eau dans le sol. Les autres objectifs sont : (i) la validation des produits opérationnels 'eau du sol' de Météo-France, notamment du modèle hydrométéorologique SIM [14], (ii) la validation des nouvelles versions du modèle de surface de Météo-France (SURFEX). Il sert également, (iii) de vérification sur le terrain des futures missions aéroportées de calibration et validation (Cal/Val) dans le cadre des missions SMOS. Les mesures sont disponibles en temps réel, ce qui permet de suivre la qualité des mesures. SMOSMANIA utilise les stations du réseau RADOME (Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques étendu) de Météo-France. La température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et les précipitations sont également mesurées. 12 stations du réseau RADOME ont été choisies dans le Sud Ouest de la France de manière à représenter un transect allant de la mer Méditerranée à l'Océan Atlantique (*Figure 1*). A l'exception d'une station (MTM), toutes sont situées dans des lieux relativement plats. La distance moyenne entre deux stations est d'environ 45 km. Sur chaque station, 4 sondes ont été installées horizontalement, à différentes profondeurs, 5, 10, 20 et 30 cm. Les sondes sont des ThetaProbe ML2 de Delta-T Devices [15] et une acquisition est réalisée toutes les 12 minutes depuis janvier 2007. Des mesures gravimétriques ont été réalisées pour calibrer les sondes et convertir le signal des ThetaProbe (Volt) en m^3m^{-3} . 48 courbes de calibration ont ainsi été réalisées. Les valeurs de w_g (5 cm), normalisées entre [0,1], servent à estimer les valeurs de l'eau dans le sol SWI_m par la suite comparées aux observations à 30 cm elles aussi normalisées entre [0,1].

Le site de SMOSREX (Surface Monitoring of the Soil reservoir Experiment) situé à l'ONERA (Fauga-Mauzac) au sud de Toulouse est également utilisé dans cette étude. Il comporte des mesures de l'humidité du sol à différentes profondeurs (0-6 cm, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 cm) avec une acquisition semi-horaire depuis janvier 2001. L'objectif principal de ce site de mesure est l'amélioration

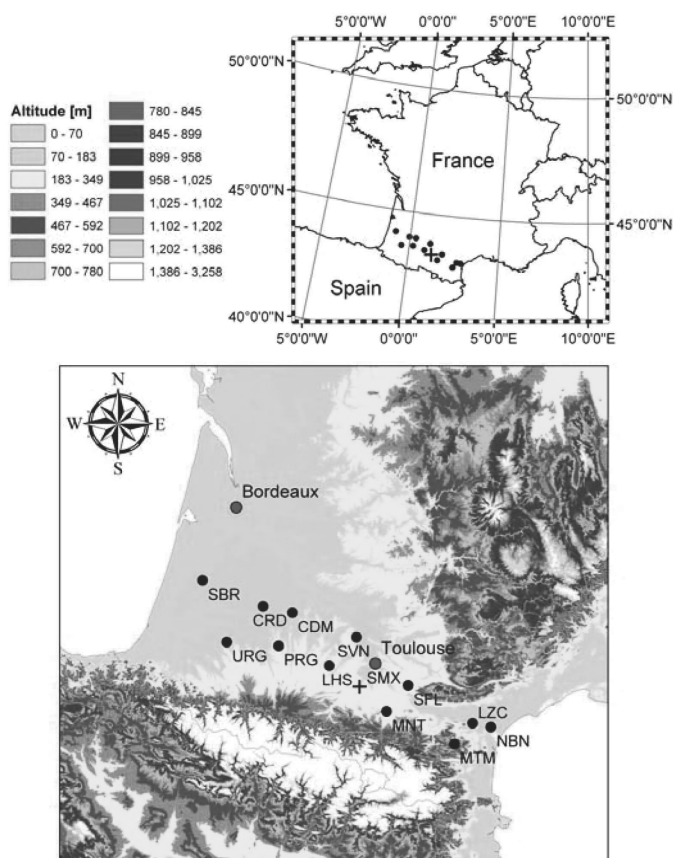


Figure 1 : Localisation du réseau de mesure SMOSMANIA et du site expérimental SMOSREX dans le Sud Ouest de la France

de la modélisation de l'émission micro-onde des surfaces en bande L. Deux parcelles, l'une sur un sol nu et l'autre en jachère sont observées par le radiomètre LEWIS (bande L) situé sur un portique à 15 mètres au-dessus du sol. Les mesures de teneur en eau réalisées à différentes profondeurs permettent de calculer le profil de l'eau du sol dans la zone racinaire. Les valeurs de w_g (0-6 cm), normalisées entre [0,1], servent à tester des méthodes permettant de simuler le profil de l'eau dans le sol SWI_m . Il est comparé aux observations aux différentes profondeurs, elles aussi normalisées entre [0,1].

II.2.2 Données synthétiques : le modèle SIM

Dans cette étude, le modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) est utilisé pour calculer, sur la France métropolitaine ; w_g et w_2 , sur la période allant du 1^{er} août 2002 au 31 août 2004. SAFRAN fournit les principaux paramètres de forçage atmosphérique et le schéma de surface ISBA permet de modéliser la dynamique de l'eau dans le sol suivant l'approche 'force-restore' [16]. MODCOU, est un modèle hydrogéologique non utilisé dans ce travail. w_g est utilisé avec la formule récursive du filtre exponentiel afin de dériver dans le temps et l'espace les valeurs de SWI_m . Ces dernières sont ensuite comparées aux valeurs w_2 de référence normalisées entre [0,1].

II.2.3 Données satellite : ASCAT

Instrument de télédétection actif sur le satellite METOP, ASCAT (diffusiomètre avancé) est un capteur capable de transmettre un signal radar et de mesurer l'énergie retournée. L'onde radar émise est de bande C (5,255 GHz) dans la lignée des instruments hyperfréquences actifs (AMI) embarqués avec succès sur les satellites ERS-1&2 de l'ESA. L'objectif principal de la mission est de dériver des vecteurs de vent sur la surface des océans. Cependant, sur continent, ASCAT est capable d'apporter une information sur le contenu en eau de la couche superficielle. La variable mesurée est le coefficient de rétrodiffusion radar de la surface terrestre. ASCAT n'est que très peu affecté par l'atmosphère et la couverture nuageuse. ASCAT est composé de trois paires d'antennes qui balayent des bandes de 500 km de large, situées à 350 km sur chaque côté de la trace au sol du satellite METOP. Trois mesures (appelées triplet de σ^0) du coefficient de rétrodiffusion sont obtenues sur une grille régulière de 50 km re-échantillonnée à 25 km. Les mesures sont réalisées selon 3 azimuts différents, 45°, 90° et 135°. Le comportement temporel et spatial du diffusiomètre est affecté par l'occupation du sol et la phénologie de la végétation. Wagner et al [17] utilisent des séries temporelles pour minimiser l'impact de la végétation sur l'estimation du contenu en eau de la

couche superficielle. Ils proposent de normaliser le coefficient de rétrodiffusion radar extrapolé à un angle de 40° , $\sigma^0(40)$ en utilisant les valeurs minimales et maximales observées pour estimer w_2 . Elles sont respectivement notées $\sigma_{dry}^0(40)$ et $\sigma_{wet}^0(40)$, ces valeurs sont dérivées de séries temporelles longues de plusieurs années obtenues par les satellites européens ERS-1&2 (août 1991 à mai 2007, [9]). Les coordonnées des mesures ASCAT (latitude, longitude) sont comparées à celles des stations et toutes les valeurs ASCAT dans un rayon de 7 km sont conservées. Chaque fois, les corrélations, biais et erreurs quadratiques moyennes (rmse) sont calculés. Le test statistique de Kendall (et la « p-value » associée), atteste du niveau de signification des corrélations. Afin d'éviter les problèmes liés aux effets saisonniers, les anomalies mensuelles (centrées-réduites) sont également étudiées. L'écart à la moyenne est calculé dans des fenêtres glissantes de 5 semaines (si au moins 5 observations sont disponibles), ensuite la différence est normalisée en utilisant l'écart type.

● II.3 LE FILTRE EXPONENTIEL

En faisant l'hypothèse qu'une série temporelle d'humidités de surface estimée par satellite permet d'obtenir une indication sur les tendances, à l'assèchement ou à l'humidification du profil de l'eau dans le sol, le problème peut être traité sous la forme d'un modèle hydrologique simple à 2 couches. La première représente la couche superficielle du sol, w_g , observée par le satellite et la seconde, w_2 , un réservoir en dessous. Un filtre exponentiel de la forme $\exp(-t/T)$ permet alors d'estimer w_2 à partir de w_g . T étant une durée caractéristique exprimée en jours et perçue comme un paramètre de substitution. T prend en compte les différents processus affectant la dynamique temporelle de l'humidité du sol (épaisseur de sol, propriétés hydrauliques des sols, évaporation, transpiration, ruissellement et horizons de sol différents... [6]).

Le filtre utilise en entrée des valeurs $w_g(t_i)$ d'humidité de surface estimées à partir du satellite au temps t_i . Il s'agit d'une humidité relative entre [0,1] [6]. Dans ce travail, elles sont remplacées par les observations de surface in-situ. Une formule récursive du filtre exponentiel est utilisée [12]. Cette équation utilise un gain K qui varie entre [0,1]. Dans le cas où un temps important (relatif au pas de temps du filtre) est constaté entre 2 observations, K tend vers 1. La nouvelle estimation prend alors la valeur de l'observation. Pour initialiser le filtre, on prend $K = 1$ et $SWI_m = w_g(t_1)$. La forme récursive du filtre exponentiel est plus simple à mettre en œuvre et moins coûteuse en temps de calcul.

Dans cette étude, une observation par jour de w_g , à 06:00 heure TU, est utilisée. Les séries de w_g sont normalisées entre [0,1] dans la formule récursive du filtre. Le produit du filtre est une série temporelle, SWI_m , une valeur également comprise entre [0,1] qui est alors comparée aux observations d'humidité du sol à 30 cm (SMOSMANIA), à différentes profondeurs (SMOSREX) et intégrée le long du profil racinaire (SIM). Le critère statistique de Nash-Sutcliffe [18], N , permet de déterminer la valeur optimale du paramètre T .

III ■ RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

● III.1 EXPLOITATION DES DONNÉES IN-SITU

Pour la majorité des stations SMOSMANIA, le SWI_m présente de bonnes corrélations avec le w_2 à 30 cm. 7 stations ont des valeurs de N supérieures à 0.7 (SFL, MNT, SVN, LHS, CDM, PRG, URG), 2 des valeurs correctes (NBN, CRD) le résultat pour la station LZC est mauvais ($N = 0.38$) et deux stations (MTM, SBR) présentent des valeurs négatives de N . Les valeurs de rmse représentent l'erreur relative sur la dynamique de l'humidité du sol. Étant donné que la dynamique moyenne des observations à 30 cm est de $0.19 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ et que le rmse moyen est de 0.163, l'erreur de l'estimation du profil de l'eau dans le sol par la formule récursive du filtre exponentiel est de $0.031 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Les valeurs de T optimisées varient entre 1 et 23 jours avec une moyenne de 6 jours. Afin de tester la sensibilité de ce paramètre, les statistiques ont également été calculées entre les w_2 à 30 cm et les SWI_m calculés avec un unique T de 6 jours. La majorité des sites conservent une valeur élevée de N , ce qui suggère une faible sensibilité du paramètre T . Les résultats sur le site SMOSREX sont similaires à ceux des stations du réseau SMOSMANIA, on retrouve une bonne corrélation entre SWI_m et w_2 à 30 cm sur la période 2001-2007, $r = 0.96$, $rmse = 0.12$, $biais = 0.03$ et $N = 0.86$ enfin, le T optimal est égal à 6 jours. L'avantage de ce site est la possibilité de travailler avec des mesures plus profondes. Ainsi SWI_m est comparé aux w_g à 30 cm mais aussi 40, 50, 60, 70, 90 cm. Une comparaison de la série temporelle de w_g à celle des w_2 et des SWI_m met en évidence l'action du filtre. La *Figure 2* représente (haut), les séries temporelles d'humidité observées aux différentes profondeurs sur la période 2001-2007, (bas) les SWI_m correspondant aux différentes profondeurs. Les observations w_g sont également représentées.

La *Figure 2* montre que l'utilisation d'un filtre exponentiel représente correctement la dynamique temporelle de l'eau dans le sol. On note en effet un décalage temporel entre les différents SWI_m qui s'accroît avec la profondeur considérée. Il est également intéressant de noter que le T optimal augmente avec la profondeur, passant graduellement de 6, 11, 21, 25, 41 puis à 46 jours (pour respectivement, 30, 40, 50, 60, 70, 90 cm). Un résultat similaire est obtenu avec les stations SMOSMANIA et les simulations de SIM. Le *tableau 1* présente les corrélations entre w_g et les différents w_2 mais aussi entre les SWI_m et les observations aux différentes profondeurs. On constate une nette diminution de la corrélation directe entre les observations à partir de 60 cm tandis que les comparaisons entre les SWI_m et les w_2 restent satisfaisantes.

● III.2 EXPLOITATION DES DONNÉES SYNTHÉTIQUES

Les w_g et w_2 des 9892 pixels de la base de données SIM sur la France métropolitaine (8 km de résolution) permettent de calculer autant de SWI_m . Pour chaque pixel, le critère de Nash-Sutcliffe est calculé avec un T optimal, un T

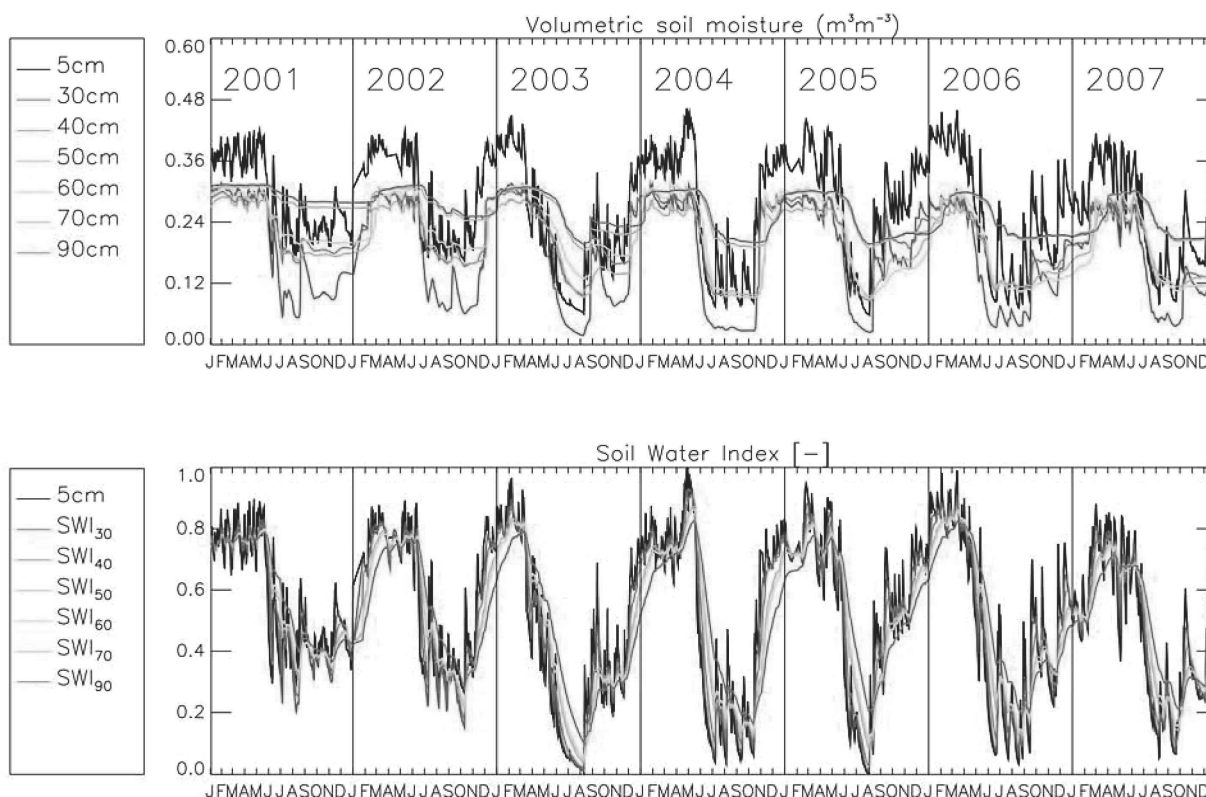


Figure 2 : Confrontation des humidités du sol aux différentes profondeurs pour le site de SMOSREX (haut), confrontation des SWIm aux différentes profondeurs (bas)

Tableau I : Corrélation entre différentes variables caractérisant l'humidité du sol sur le site SMOSREX :

(i) w_g et les différents w_2 , (ii) les différents SWI_m et w_2 en fonction de la profondeur

Profondeur (cm)	Corrélation	
	w_2	SWI_m
30	0,917	0,957
40	0,886	0,949
50	0,811	0,945
60	0,731	0,883
70	0,596	0,880
90	0,517	0,832

médian (15 jours) et un T égal à 0. La figure 3 montre à l'échelle de la France, la performance du filtre calculé avec ce T = médian par rapport à un T = 0, (comparaison directe entre w_2 et w_g). Cette figure représente la probabilité de densité des valeurs de Nash selon les 3 configurations précédemment évoquées. On voit nettement que l'utilisation du filtre permet de déplacer l'histogramme de densité vers des valeurs plus proches de 1. On retrouve également le peu de sensibilité du paramètre T ; en effet les histogrammes représentant un T optimal ou une valeur médiane de T sont très proches.

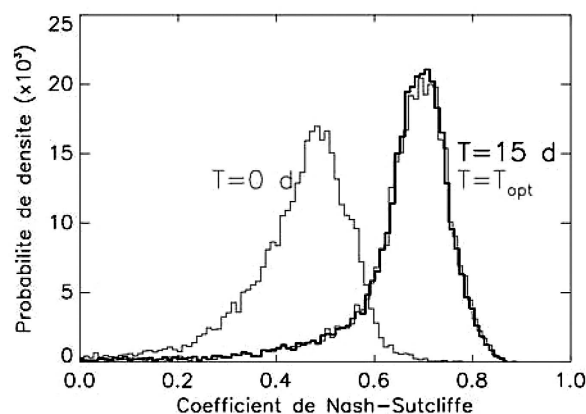


Figure 3 : probabilité de densité des valeurs de Nash sur les 9892 pixels de la base de données synthétique avec, (i) T = 0, (ii) T = 15, (iii) T = T optimal, d'après Albergel et al.[12]

III.3 EXPLOITATION DES DONNÉES SATELLITAIRES : ASCAT

Les estimations d'humidité superficielle du sol issues des observations ASCAT ont été comparées aux observations in-situ du réseau présenté précédemment. On utilise des w_g normalisés entre [0,1]. Les statistiques sont calculées à la

fois pour l'ensemble des estimations ASCAT mais aussi en fonction de leur localisation par rapport à la station considérée (nord/sud/est/ouest). Suivant les recommandations de Wagner et al. [6], [19]), seules les valeurs des orbites descendantes sont conservées. La majorité des stations présente des taux de corrélations significatifs. Pour 3 d'entre elles (SFL, LZC et NBN), des p-value supérieurs à 0.05 indiquent que les corrélations ne sont pas significatives. La rugosité due aux zones de reliefs ou encore la proximité avec la mer peut expliquer ces scores. En effet, NBN est à seulement 15 km de la mer et en raison de la résolution des produits ASCAT (50 km ré-échantillonné à 25 km), l'estimation de l'eau du sol est perturbée. A un degré moindre LZC est aussi affecté par ce problème et uniquement les estimations d'ASCAT situées à l'ouest de la station présentent des corrélations significatives. Pour la station de SFL, le sud et l'est présentent des zones de reliefs et seules les valeurs ASCAT au nord de la station conduisent à des résultats significatifs. Pour les différentes configurations présentant des corrélations significatives, aucun biais systématique n'est observé. Les corrélations varient de 0.283 à 0.806 avec une moyenne de 0.583 et une déviation standard de 0.137. Les biais varient entre -0.288 et 0.252 avec une moyenne de -0.005. Enfin les rmse varient entre 0.182 et 0.376 avec une moyenne de 0.255. Comme précédemment, avec une dynamique moyenne de $0.24 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ sur les w_g du réseau SMOSMANIA, une estimation moyenne de l'erreur sur les produits eau du sol ASCAT est environ de $0.06 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ce qui est consistant avec les résultats établis par Pellarin et al. [8] sur le Sud Ouest de la France avec les produits ERS-SCAT. Un problème rencontré lors des comparaisons est celui de l'épaisseur de la couche de surface considérée. Les observations w_g sont mesurées à 5 cm tandis que les micro-ondes en bande C ne observent une profondeur comprise entre 0.5 et 2 cm, et cela peut conduire à surestimer l'erreur [20]. La figure 5 présente les séries temporelles d'anomalies pour 3 stations pour lesquelles l'accord entre ASCAT et données in-situ est bon.

Les données ASCAT sont également utilisées pour retrouver le profil de l'eau dans le sol au travers de la formule

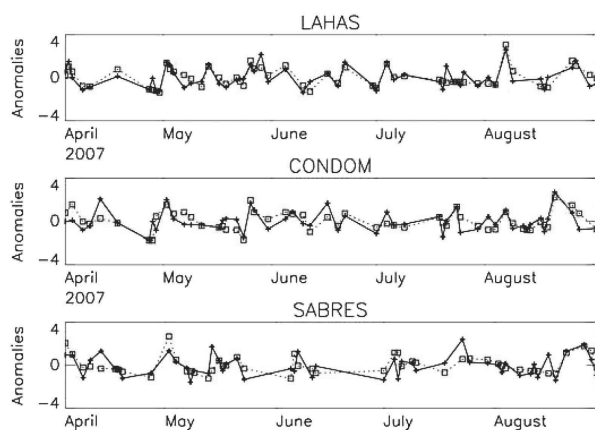


Figure 4 : Comparaison des anomalies ASCAT (trait plein + croix noir) et in-situ (pointillé + carré bleu), d'après Albergel et al., [20]

récursive du filtre exponentiel. Une valeur optimale de T égale à 14 jours est obtenue. Un T plus important que pour les stations de mesures in-situ était attendu étant donné qu'ASCAT représente une humidité dans les tout premiers cm du sol [20].

IV ■ CONCLUSIONS

Cette étude a permis de mettre en évidence différents éléments. Un premier d'ordre technique, l'utilisation d'une formule récursive du filtre exponentiel, qui permet de diminuer le temps de calcul. Il élimine le besoin de conserver et de ré-utiliser les séries temporelles d'humidité du sol antérieures, les hypothèses proposées par Wagner [6] sur le nombre d'observations nécessaires au fonctionnement du filtre ne sont plus impératives. Pour calculer une nouvelle valeur de SWI_m , il suffit de disposer d'une nouvelle observation et de l'intervalle de temps depuis la précédente (ainsi que du gain K et du SWI_m précédents). Cette étude permet aussi de mettre en valeur les points suivants, (i) la valeur du paramètre T optimal augmente avec la profondeur, (ii) ce paramètre est relativement peu sensible et une valeur moyenne de $T = 6$ jours a permis d'estimer l'humidité du sol à 30 cm à partir des valeurs mesurées à 5 cm, pour toutes les stations. Cette méthode qui est fondée uniquement sur les observations de surface présente un grand intérêt dans des régions où aucune autre donnée que celle des satellites n'est disponible.

Concernant la comparaison des w_g avec les estimations ASCAT, 11 stations sur les 13 utilisées présentent des niveaux significatifs de corrélation (moyenne de 0.556). Les mesures in-situ observées à 5 cm sont comparées à des estimations satellitaires en bande C sensibles à l'humidité du sol sur une profondeur allant de 0.5 à 2 cm. Cette différence est susceptible d'accroître la différence entre les deux estimations. On ne note cependant pas un meilleur résultat sur le site de SMOSREX où l'observation in-situ est intégrée de 0 à 6 cm. La proximité de la mer semble perturber le signal satellite et les stations trop proches ne présentent pas de corrélations significatives. De la même manière, le relief semble perturber le signal. Enfin, une valeur de T plus grande que précédemment (14 au lieu de 6 jours) est utilisée pour retrouver le profil de l'eau dans le sol à 30 cm à partir des données satellitaires. Les bonnes corrélations entre les mesures in-situ et satellitaires montrent qu'il est utile de développer les réseaux de mesure de l'humidité du sol afin de pouvoir valider les produits satellitaires dans différents biomes et climats.

V ■ REMERCIEMENTS

Le développement du réseau SMOSMANIA a été cofinancé par Météo-France, le CNES, et l'ESA. Le travail de C. Albergel et de C. Rüdiger au CNRM est cofinancé par le CNES. Le projet SMOSREX est cofinancé par le Programme National de Télédétection Spatiale et par le Programme Terre-Océan-Surfaces Continentales-Atmosphère

(CNES), ainsi que par les participant à l'expérience : CES-BIO (CNES, CNRS, IRD, UPS), CNRM/GAME (Météo-France, CNRS), INRA, et ONERA, le tout dans le cadre du programme de préparation à la mission spatiale SMOS.

VI ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] T.J. SCHMUGGE (1983) — Remote Sensing of Soil Moisture : Recent Advances. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **GE21** 145-146
- [2] D. ENTEKHABI, H. NAKAMURA, E.G. NJOKU (1994) — Solving the Inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multifrequency remotely sensed observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* **32(2)** 438-448
- [3] P.R. HOUSER, W.J. SHUTTLEWORTH, J.S. FAMIGLIETTI, H.V. GUPTA, K.H. ET AL. SYED (1998) — Integration of Soil Moisture Remote Sensing and Hydrologic Modelling Using Data Assimilation. *Water Resour. Res.* **34(12)** 3405-3420
- [4] J.P. WALKER, G.R. WILLGOOSE, J.D. KALMA (2001) — One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface measurements : A simplified soil moisture model and field application. *Journal of Hydrometeorology.* **2** 356-373
- [5] J.P. WALKER, G.R. WILLGOOSE, J.D. KALMA (2001) — One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations : a comparison of retrieval algorithms. *Advanced in Water Resources.* **24, 6** 631-650
- [6] W. WAGNER, G. LEMOINE, H. ROTT (1999) — A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sens. Environ.* **70** 191-207
- [7] A. CEBALLOS, K. SCIPAL, W. WAGNER, J. MARTINEZ-FERNANDEZ (2005) — Validation of ERS scatterometer derived soil moisture data in the central part of the Duero Basin, Spain. *Hydrol. Process.* **19** 1549-1566
- [8] T. PELLARIN, J.-C. CALVET, W. WAGNER (2006) — Evaluation of ERS scatterometer soil moisture products over a half-degree region in southwestern France. doi10.1029/2006GL027231. *Geophysical Research Letters.* **33, L17401**
- [9] Z. BARTALIS, S. HASENAUER, V. NAEIMI, W. WAGNER (2007) — WARP-NRT 2.0 Reference Manual. *ASCAT Soil Moisture Report Series, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria.* **14** 26
- [10] Y. KERR (2007) — Soil moisture from space : Where are we ?. *Hydrogeology Journal.* **15(1)** 117-120
- [11] J.-C. CALVET, N. FRITZ, F. FROISSARD, D. SUQUIA, A. PETITPA, B. PIGUET (2007) — *In situ soil moisture observations for the CALVAL of SMOS : the SMOSMANIA network International G.*
- [12] C. ALBERGEL, C. RÜDIGER, T. PELLARIN, J.-C., ET AL. CALVET (2008) — From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter : an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **12** 1323-1337
- [13] P. DE ROSNAY, J.-C. CALVET, Y. KERR, J.-P. WIGNERON, F. ET AL. LEMAITRE (2006) — SMOSREX : A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing. *Remote Sens. Environ.* **102** 377-389
- [14] F. HABETS, A. BOONE, J.-L. CHAMPEAUX, P. ETCHEVERS, L. ET AL. FRANCHISTEGUY (2008) — The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France doi 10.1029/2007JD008548. *J. Geophys. Res.* **113, D06113**
- [15] I. WHITE, J. H. KNIGHT, S. J. ZEGELIN, G. C. TOPP (1994) — Comments on "Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content", edited by : Whalley, W. R., Response. *Eur. J. Soil. Sci.* **45, 503** 510
- [16] J. NOILHAN, S. PLANTON (1989) — A simple parameterisation of Land Surface Processes for meteorological model. *Mon. Weather Rev.* **117** 356-549
- [17] W. WAGNER, G. LEMOINE, M. BORGEAUD, H. ROTT (1999) — A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. *Geosci. Remote Sens.* **37(2)** 938-948
- [18] J. NASH, J. SUTCLIFFE (1970) — River flow forecasting through conceptual models, part II - a discussion and principles. *Journal of Hydrology.* **10** 282-290
- [19] W. WAGNER, V. NAEIMI, K. SCIPAL, R.D. JEU, J. MARTINEZ-FERNANDEZ (2007) — Soil moisture from operational meteorological satellites. *Hydrogeol. J.* **15** 121-131
- [20] C. ALBERGEL, C. RÜDIGER, D. CARRER, J.-C. CALVET, N. FRITZ, V. NAEIMI, Z. BARTALIS, S. HASENAUER (2009) — An evaluation of ASCAT surface soil moisture products with in-situ observations in southwestern France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13** 115-124