

# Téledétection de l'humidité des sols. Présentation de l'expérience SMOSREX

P. de Rosnay<sup>1</sup>, Y. Kerr<sup>1</sup>, J.C. Calvet<sup>2</sup>, F. Lemaître<sup>3</sup>, M.J. Escorihuela, J.P. Wigneron<sup>4</sup>

- (1) CESBIO Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère, patricia.derosnay@cesbio.cnes.fr  
(2) CNRM Centre National de Recherche Météorologiques/Météo-France (3) ONERA Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (4) INRA Institut National de la Recherche Agronomique.

La mission satellitale SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) a pour but, sur les terres émergées, de fournir une information sur l'humidité des sols et sa dynamique à des échelles régionales et continentales (Kerr et al. 2001). L'expérience de terrain SMOSREX (Surface Monitoring Of Soil Reservoir EXperiment) est conduite dans la cadre de la préparation à SMOS. Dans la perspective d'améliorer la compréhension et la modélisation des processus d'interactions surface-atmosphère, elle consiste à utiliser simultanément : (1) la téledétection multi-spectrale (bande L, infrarouge thermique, visible et proche infrarouge) sur deux types de surface, jachère et sol nu, (2) des mesures terrain (météorologie, humidité et température du sol, biomasse, indice foliaire) et (3) des modèles de processus de surface et de transfert radiatif.

SMOSREX a commencé en janvier 2003 et doit durer au moins deux ans, jusqu'à fin 2004. L'aspect long terme de l'expérience permet de considérer une large gamme de conditions météorologiques, hydrologiques, phénologiques ainsi que leurs interactions. SMOSREX est partie intégrante du programme PIRRENE : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur la Radiométrie en Environnement Extérieur (<http://www.onecert.fr/pirrene/>). Quatre laboratoires participent à cette expérience : le CESBIO, le CNRM, l'ONERA et l'INRA Bordeaux.

Les objectifs de cette campagne de terrain sont multiples. Il s'agit (1) d'une part de développer et d'améliorer les algorithmes direct et inverse en bande L, (2) d'autre part d'étudier l'apport de la téledétection de l'humidité des sols pour la compréhension et la modélisation des processus sol-plante-atmosphère. A cet égard, SMOSREX constitue une composante des thématiques et activités de l'Observatoire Spatial de Sud-Ouest (OSSO) du CESBIO au FAUGA. Nous présentons ici les objectifs, le principe et les premiers résultats de cette expérience.

## 1 Le site expérimental du FAUGA

Le site expérimental est situé sur le complexe de l'ONERA (43°23'N, 1°17'E, altitude 188m altitude), environ 30km au sud de Toulouse. Deux surfaces, l'une en végétation naturelle (jachère), l'autre en sol nu sont considérées tant pour la téledétection multi-spectrale que pour la modélisation l'instrumentation au sol et les mesures manuelles (biomasse, indice foliaire, hauteur de végétation, caractéristiques du sol). Les conditions météorologiques sont très contrastées avec un hiver froid/humide et un été chaud/sec (Figure 1). Il en résulte un cycle annuel des caractéristiques de la végétation également très marqué comme le montre la Figure 2 pour l'année 2003.

## 2 Mesures au sol

Une station météorologique complète est installée sur le site et maintenue par le CNRM (Figure 3). Les mesures concernent les précipitations, la température à 2 mètres, les flux de surface, les rayonnements solaire et infrarouge, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, l'humidité spécifique de l'air et le dépôt de rosé. Les profils d'humidité et de température dans le sol sont caractérisés à l'aide de mesures à différentes profondeurs sur les deux parcelles de jachère et de sol nu. Pour l'humidité du sol des sondes Delta T device probe sont installées dans le sol aux profondeurs suivante : 0-5cm (x4), 10cm (x3), 20cm (x3), 30cm (x2), 40cm (x2), 50cm (x2), 60cm (x2), 70cm, 80cm, 90cm. Des mesures gravimétriques sont réalisée régulièrement pour l'ensemble de la gamme de variation d'humidité du sol. Associées aux mesures de densité de sol elle permettent d'avoir des mesures "terrain" de l'humidité volumique. Ces mesures sont utilisées pour établir la relation d'étalonnage des sondes thetaprobes sur SMOSREX, à différente profondeurs et sur les deux parcelles. Les températures sont mesurées à 1cm,

FIG. 1 – Cycles annuels de la précipitation (mm/j) et de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) de l'air à 2m en 2003 sur le site de l'expérience SMOSREX.

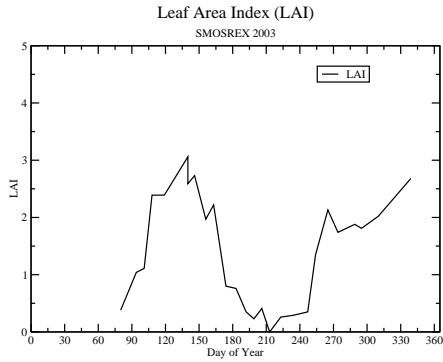
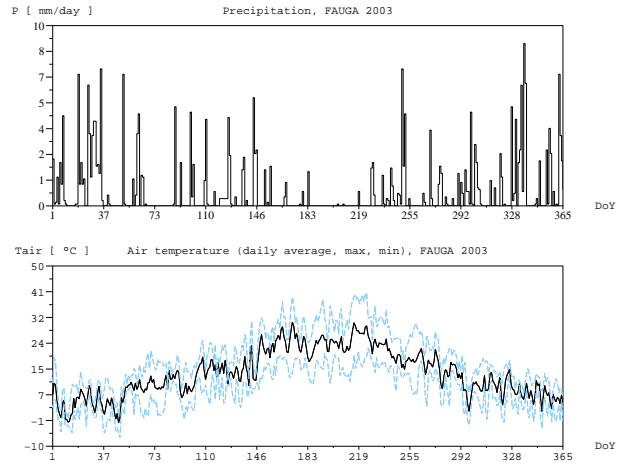


FIG. 2 – Cycle annuel du LAI (Leaf Area Index) sur la jachère du site du FAUGA en 2003. Les conditions particulièrement sèches durant le printemps et l'été 2003 accentuent l'aspect contrasté du cycle végétatif, avec ici une végétation réduite à zéro début août et deux maximum en mai et décembre. L'herbe est fauchée une fois par an, fin janvier, comme l'indiquent les faibles valeurs d'indice foliaire de début d'année.

FIG. 3 – Station météorologique installée sur le site SMOSREX au FAUGA.



5cm, 20cm 50cm et 90 cm par des sondes PT100. L'ensemble des mesures instrumentées sont acquises automatiquement en continue par des CR10x (Campbell scientifique). Les sorties moyennées au pas de temps de 30 minutes sont centralisées sur un PC d'acquisition située sur place dans un abri ("shelter") adjacent au terrain. Les données sont récupérées, par connexion modem point à point, traitées et analysées par les différents contributeurs de l'expérience. En plus de ces mesures "automatiques", des mesures manuelles sont conduites une fois par semaine pour caractériser la végétation (hauteur, biomasse, LAI) et le sol (texture, densité, rugosité). Ce dispositif s'appuie sur les compétences et l'expérience remarquables de l'équipe 4M du CNRM qui a notamment conduit une expérience similaire lors de la campagne MUREX (Calvet et al. 1999).

La végétation influence fortement la télédétection de l'humidité des sols. La Figure 4 illustre le rôle de la végétation dans le système sol-plantes-atmosphère et son influence sur les mesures radiométriques. La biomasse contribue directement au signal de par sa propre émission. Elle atténue la contribution du sol et atténue sa propre émission vers le bas réfléchi par le sol. Ces trois contributions constituent l'effet direct de la végétation sur le signal.

La biomasse a également un effet indirect sur le signal à travers son influence sur les processus de sur-

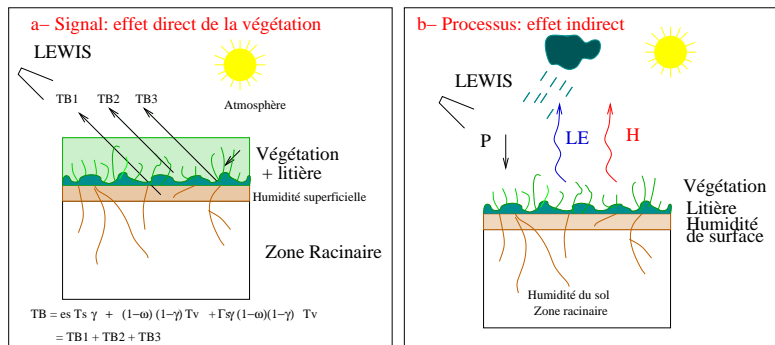


FIG. 4 – Représentation schématique du rôle de la végétation pour la télédétection micro-ondes passive basse fréquence.

face. La couverture végétale est une composante centrale des processus de surface qui interagit fortement avec l'humidité du sol et sa dynamique. D'une part le feuillage intercepte une partie des précipitations, modifiant l'apport d'eau dans le sol par les précipitations. D'autre part le fonctionnement végétal conditionne son extraction racinaire à différentes profondeurs et la distribution verticale de l'eau dans le sol. L'évapotranspiration qui en résulte conditionne la partition de l'énergie en chaleur sensible et latente. Le contenu interne de la végétation et notamment de sa litière est aussi caractérisé par de fortes variations temporelles de l'échelle journalière à annuelle et inter annuelle. Dans le cas d'une végétation naturelle, comme la jachère de SMOSREX, la litière est un réservoir important capable d'intercepter et d'absorber une quantité significative des précipitations.

L'ensemble de ces processus conditionnent la dynamique de l'humidité du sol et de la végétation et par conséquent l'émission en bande L de la surface. Un des objectifs de SMOSREX est d'identifier qualitativement et quantitativement les contributions à diverses échelles temporelles de la végétation au signal micro-onde basse fréquence.

### 3 Le radiomètre LEWIS

Le radiomètre LEWIS (L-band radiometer for Estimating Water In Soils) est installé sur le site SMOSREX. LEWIS a été conçu et construit pour l'expérience SMOSREX (Lemaître et al. 2004). Il est équipé d'une antenne de type cornet. La sensibilité de LEWIS, comprise entre 0.1 K et 0.2K, est remarquable. La largeur du lobe est de 13.5 °. Les données sont acquises par LEWIS depuis le 23 janvier 2003. Deux années au moins de mesures sont prévues. LEWIS est installé sur un portique à 13.7 mètres de hauteur (Figure 5). Un système de pointage permet d'effectuer de manière automatique des balayages des surfaces de jachère et de sol nu à différents angles d'incidence. Ces balayages ont lieu 8 fois par jours toutes les trois heures. Comme pour l'ensemble des données météorologiques et de profil de température et humidité du sol, les données sont acquises de manière automatique. Les mesures de LEWIS se font selon 4 modes :



- 1.4 GHz
- Polarisations H et V
- Résolution de 0.1-0.2 K
- 3m de long, 200kg
- Régulation thermique :  $47.20 \pm 0.02$  °C
- Pas de lobe arrière

FIG. 5 – Radiomètre LEWIS sur son portique à 13.7 m de hauteur. Sur cette photo LEWIS est en position de routine, pointant à  $40^\circ$  d'incidence sur la jachère.

- Le mode routine permet d'observer de manière continue de la jachère à  $40^\circ$  d'incidence.
- Le mode balayage consiste à modifier l'angle de visée pour observer la jachère et le sol nu à des angles compris entre  $20$  et  $60^\circ$  avec un pas de  $10^\circ$ .
- Un troisième mode consiste à viser le ciel vers le nord, à  $45^\circ$  d'élévation. Ce mode permet de vérifier et d'affiner l'étalonnage du radiomètre.
- Enfin, pour éviter les dommages sur le matériel, un mode de sécurité consiste à bloquer le radiomètre au portique (vers le sol à  $0^\circ$  d'incidence) en cas de vents supérieurs à  $10\text{ms}^{-1}$ .

## 4 Luminancemètres et pyromètres

Deux luminancemètres sont installés en haut du portique. L'un indique l'éclairement solaire total, l'autre la luminance à  $40^\circ$  sur la jachère. Ils fonctionnent sur 5 bandes spectrales de fréquence (et largeur de bande) : 837 (91), 648 (53), 549 (85), 450 (40), 1640 (165) nm. Ils ont été étalonnés à l'INRA d'Avignon (A. Olivoso) pour permettre de calculer la réflectance.

Deux pyromètres KT15 sont également fixés sur le portique. Ils mesurent l'émission IR de la surface avec un angle d'incidence de  $40^\circ$  côté jachère et sol nu.

## 5 SMOSREX : résultats préliminaires et discussion

Les résultats montrés ici sont préliminaires, mais ils mettent en évidence l'apport de la télédétection pour observer les processus de surface. Etant donné leur aspect novateur, les données en Bande L sont montrées en relation avec les données de surface. Les données des luminancemètre, non montrées ici, sont utilisées pour estimer, par télédétection, l'indice de surface foliaire, et établir sa relation avec les mesures manuelles. L'utilisation de données infrarouge thermiques pour estimer la température effective du sol et de la végétation. Bien que non représentées ici ces mesures sont d'une importance majeure pour le développement de la télédétection micro-ondes passive. Cette composante multi-spectrale est en accord avec les objectifs de l'observatoire de recherche en environnement. Elle permet de caractériser l'état de surface, à travers les **indicateurs** (indice de végétation) et d'utiliser de manière optimale la télédétection en bande L pour accéder aux **variables d'état** (biomasse, humidité du sol).

La Figure 6 montre les cycles annuels mesurés par LEWIS du rapport de polarisation en bande L, ainsi que le contenu en eau de la surface sur la jachère et le sol nu. Le rapport de polarisation s'exprime comme étant  $PR = (TBv - TBh)/(TBv + TBh)$ . Il est indépendant de la température de surface et directement lié aux émissivités de surface. Les valeurs du rapport de polarisation sont relatives au contenu en eau des différents éléments de la surface. Pour des raisons fondamentales d'interactions entre l'onde électromagnétique et le milieu, la contribution du sol à l'interface sol-végétation est une diffusion de surface alors que l'émission de la strate de végétation est caractérisée par une diffusion de volume. Il en résulte que la dynamique leurs contributions respectives sont opposées pour une même variation de contenu en eau.

Sur le sol nu le cycle annuel du rapport de polarisation est étroitement lié au cycle annuel de l'humidité de surface. Sur la surface enherbée le signal est plus complexe. Il inclut les contributions dynamiques du contenu en eau du sol et de la végétation. Du jour 60 au jour 120 (mars-avril) la croissance de la

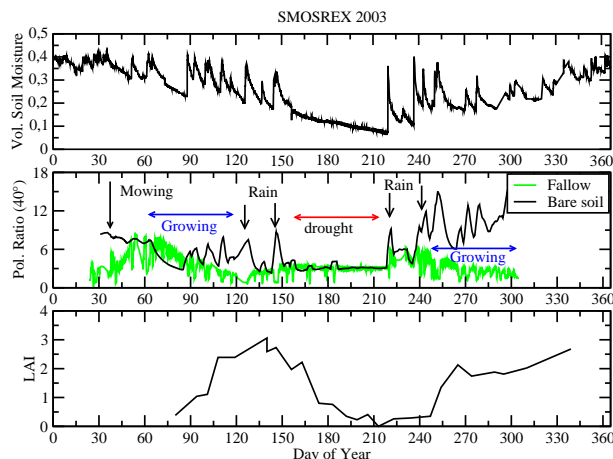


FIG. 6 – Cycles annuels de l’humidité du sol, du rapport de polarisation à  $40^\circ$  et de l’indice de surface foliaire.

végétation, illustrée par la courbe d’évolution du LAI, est associée à une augmentation de son contenu intégré en eau. Dans le même temps le sol subit une période de dessèchement progressif saisonnier. Ces deux phénomènes, antagonistes quant à la dynamique du contenu en eau qui en résulte, sont liés aux processus d’interaction sol-plantes-atmosphère d’échelle saisonnière. Ils conduisent tous deux à une décroissance du rapport de polarisation. Le signal micro-onde passif, **multi-angulaire** et à 2 polarisations permet non seulement de suivre leur dynamique temporelle, mais également de déconvoluer ces deux contributions (Wigneron et al. 2004). **Ceci constitue l’un des objectifs majeur de SMOSREX, dans le cadre de l’OSSO : accéder à une information sur la dynamique des processus d’interactions sol-plantes-atmosphère.** En période estivale, les conditions très sèches sont associées à une végétation complètement sèche et des contenus en eau du sol très faibles sur les deux parcelles. Ceci explique que le rapport de polarisation soit identique sur sol nu et jachère. En fin d’été, le redémarrage de la croissance de la végétation est en phase avec une augmentation saisonnière du contenu en eau du sol. Contrairement aux processus observés en mars-avril, sols et végétation contribuent à augmenter chacun leur contenu en eau. Ces processus sont cette fois ci antagonistes de par leur contribution au signal micro-ondes passives. Il en résulte un signal complexe en début d’automne, où le rapport de polarisation indique une légère décroissance, signe que la dynamique de la jachère, domine le signal micro-onde par rapport au sol sous-jacent. C’est l’aspect multi-angulaire de la mesure qui permet de déconvoluer les émissions du sol et de la végétation. La Figure 6 illustre donc le contenu en information élevé du signal micro-ondes et son potentiel pour observer des processus d’échelle saisonnières.

A l’échelle de la journée, le Figure 7 montre que le cycle diurne du rapport de polarisation est antiphase sur sol nu et végétation. Cela traduit un cycle diurne cohérent du contenu en eau du sol et de la végétation, bien que la végétation présente un cycle plus marqué. Les mesures manuelles de biomasse effectuées pendant cette période, le 20 et 21 mai, permettent de souligner l’importance du rôle de la litière dans ce cycle.

## 6 Conclusion

Cet article présente brièvement l’expérience de terrain SMOSREX dans le cadre de de l’Observatoire Spatial de Sud-Ouest (OSSO) du CESBIO au FAUGA. Ses objectifs scientifiques et ses premiers résultats sont montrés. SMOSREX confirme le potentiel considérable de la télédétection passives bande L pour la compréhension et la modélisation des processus de surface. Le signal micro-ondes passif basse fréquence multi-angulaire permet d’observer et de déconvoluer les dynamiques temporelles du contenu en eau de surface du sol et de la végétation, et par la même d’informer sur les processus d’interaction sol-végétation-atmosphère, de l’échelle journalière à saisonnière et annuelle. Contrairement aux expériences

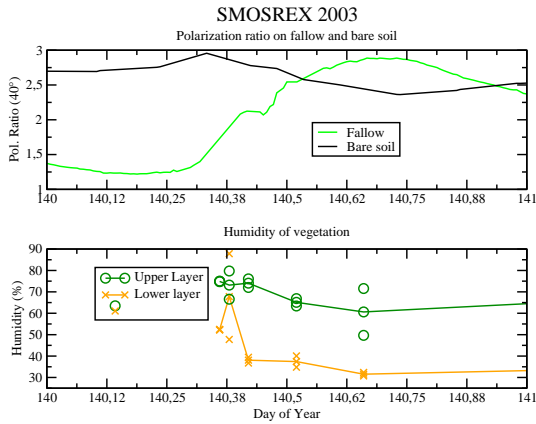


FIG. 7 – Cycles diurnes du rapport de polarisation et du contenu en eau des différents réservoirs de la végétation. Alors que la biomasse a un contenu en eau compris entre 50 et 80 %, la gamme de variation de contenu en eau de la végétation morte, la litière, est nettement plus importante, de 30 à 90%, avec un cycle diurne moyen plus marqué.

de télédétection micro-ondes passives qui ont eu lieu par le passé (Wigneron 1993; Schneeberger et al. 2003), la considération d’une végétation naturelle, en jachère, permet de caractériser les effets de la litière sur le signal. Ces effets encore très mal connus et modélisés sont montrés ici comme cruciaux tant pour la télédétection que pour les processus. Les résultats obtenus lors de SMOSREX seront élargis à d’autres types de couverts par l’expérience BRAY’04 conduite sur la forêt des landes à partir de juin 2004 pour une durée de six mois (Wigneron PNTS 2004).

L’expérience SMOSREX, prévue pour 2 ans au minimum, permet d’observer ces processus sur une large gamme de conditions hydro-climatiques. L’année 2003 a déjà permis de se placer dans des conditions extrêmement diversifiées : humides en début et fin d’année, gel à plusieurs reprises et sécheresse dramatique pendant l’été. Deux jours de neige ont également été enregistrés fin février 2004.

L’aspect novateur de cette expérience, ouvre de nouvelles perspectives en modélisation et inversion micro-onde passive basse fréquence et constitue un excellent terrain pour la préparation à la mission SMOS.

## Références

- Calvet, J. C., P. Bessemoulin, J. Noilhan, C. Berne, I. Braud, D. Courault, N. Fritz, E. Gonzalez-Sosa, J. Goutorbe, R. Haverkamp, G. Jaubert, L. Kergoat, G. Lachaud, J. Laurent, P. Mordelet, A. Olioso, P. Peris, J. Roujean, J. Thony, C. Tosca, M. Vauclin, and D. Vignes, 1999 : MUREX : a land-surface field experiment to study the annual cycle of the energy and water budgets. *Ann. Geophys.*, **17**, 838–854.
- Kerr, Y., P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J.-M. Martinuzzi, J. Font, and M. Berger, 2001 : Soil moisture retrieval from space : The soil moisture and ocean salinity (smos) mission. *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing*, **39** (8), 1729–1735.
- Lemaître, F., J. Poussière, Y. Kerr, R. Durbe, P. de Rosnay, and J. Calvet, 2004 : Design and test of the ground based l-band radiometer for estimating water in soils (lewis). *IEEE Trans. Geos. Remot. Sens.*, p. in press.
- Schneeberger, K., C. Stamm, C. Mätzler, H. Flüher, E. Lehmann, and J. Willneff, 2003 : Multifrequency ground based and in-situ measurements of soil moisture at high temporal resolution. *In Proceedings of SPIE vol. 4879, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV*, edited by Manfred Owe, Guido D’Urso, Leonidas Toullos, pp. 174–183.
- Wigneron, J., 1993 : *Modélisation de l’émission micro-onde d’un couvert végétal- Mise en relation de la mesure hyperfréquence passive avec les échanges énergétiques et hydriques d’une culture de soja*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse,.
- Wigneron, J., J. Calvet, P. de Rosnay, Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M. Escorihuela, and A. Krus-zewski, 2004 : Soil Moisture Retrievals from Bi-Angular L-band Passive Microwave Observations. *IEEE Trans. Geos. Remot. Sens.*, p. soumis.