

ESTIMATION DE L'HUMIDITÉ DU SOL PAR RADIOMÉTRIE MICRO-ONDE ; APPLICATION À L'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION

A. CHANZY¹, T. SCHMUGGE², C. FOREST³

RÉSUMÉ

L'humidité de surface du sol, qui peut être accessible par radiométrie micro-onde, est une variable utile pour estimer l'ETR en zone semi-aride. Dans ce travail, nous analysons deux aspects qui conduisent à l'estimation de l'ETR qui sont d'une part, l'estimation de la teneur en eau de surface par radiométrie micro-onde et d'autre part, l'étude de la relation entre le rapport ETR/ETP et l'humidité de surface. Cette étude est basée sur des résultats acquis dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel. On montre qu'en utilisant un radiomètre à basse fréquence (1,4 GHz), il est possible d'obtenir des cartes d'humidité de surface très précises en négligeant l'effet de la végétation sur les mesures radiométriques. Par contre, celle-ci doit être prise en compte à 5,05 GHz. On montre, que l'inversion d'un modèle simple d'émission micro-onde permet d'accéder à des estimations satisfaisantes de l'humidité. Enfin, l'humidité de surface apparaît comme un bon descripteur des variations à court terme de l'ETR.

¹Inra, Unité de Science du sol, BP 91, 84143 Montfavet cedex, France.

²Usda, Hydrology Laboratory, Beltsville, MD 20705, USA.

³Cartel, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, J1K2R1, Canada.

INTRODUCTION

La télédétection est fréquemment considérée comme un outil important de spatialisation pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR). Parmi les paramètres de surface accessibles par télédétection, l'humidité de surface du sol (θ_s), que nous pouvons déduire d'observations effectuées dans le domaine spectral des micro-ondes (JACKSON et SCHMUGGE, 1989), est un paramètre particulièrement intéressant. Dans le cas des sols nus, la réduction de l'évaporation par rapport à la demande climatique peut être reliée à θ_s (CAMILLO et GURNEY, 1986, MAHFOUF et NOILHAN, 1991, CHANZY et BRUCKLER, 1993). Une telle démarche peut être étendue au cas des couverts partiels tels que ceux rencontrés dans les zones arides et semi arides (CHANZY et KUSTAS, 1994).

L'objectif de cet article est d'analyser les différentes étapes qui conduisent à l'estimation de l'ETR en région aride où le recouvrement du sol par la végétation est partiel. Dans un premier temps nous nous intéresserons à l'estimation de θ_s par radiométrie micro-onde. Nous nous limiterons aux basses fréquences en considérant les fréquences de 1,4 et 5,05 GHz. À 1,4 GHz, la végétation a peu d'influence sur la mesure radiométrique dont les variations sont principalement reliées à celles de θ_s . Nous pouvons donc accéder de manière directe et précise à l'estimation de la teneur en eau du sol. À 5,05 GHz l'influence de la végétation sur l'émission micro-onde devient non négligeable (WIGNERON *et al.* 1993). Cette fréquence reste néanmoins importante. En effet, du fait des problèmes de dimension des antennes et de résolution spatiale au sol, les radiomètres micro-onde embarqués sur des satellites n'ont pas de fréquences inférieures à 5 GHz. Par exemple, la plus basse fréquence du futur radiomètre micro-onde européens MIMR sera de 6 GHz. Un effort particulier sera donc consacré aux estimations de θ_s à partir des mesures effectuées à 5,05 GHz. Dans un second temps, nous analyserons les relations entre le rapport ETR/ETP établis à l'échelle de temps journalière et θ_s .

Les analyses sont réalisées sur les résultats de l'expérience Hapex-Sahel pendant laquelle des mesures de radiométrie micro-onde et d'ETR ont été faites simultanément. Concernant la radiométrie micro-onde, l'expérience présente l'originalité de rassembler deux radiomètres micro-onde aéroportés couvrant, une large gamme de fréquences allant de 1,4 GHz à 90 GHz.

MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DE LA MESURE MICRO-ONDE

L'énergie du rayonnement électromagnétique micro-onde émise par une surface, peut être représentée par sa température de brillance (T_B) qui correspond à la température d'un corps noir émettant la même énergie.

Dans le domaine spectral des micro-ondes, nous pouvons appliquer l'approximation de Rayleigh-Jeans donnant la relation suivante :

$$T_B = \varepsilon T_s \quad (1)$$

où ε est l'émissivité de la surface émettrice et T_s sa température. L'émissivité d'un couvert végétal partiel peut être grossièrement décrite comme une fonction de θ_s , de la rugosité de surface et de la végétation qui intervient par son contenu en eau et sa structure. Dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel, la surface du sol peut être considérée comme lisse. L'estimation de θ_s à partir de T_B nécessite donc la prise en compte de l'effet de la végétation sur la mesure radiométrique. Pour cela nous utiliserons dans ce travail un modèle dérivé de la théorie du transfert radiatif. En supposant que :

- la contribution atmosphérique sur la température de brillance est négligeable ;
- la végétation se présente comme un milieu homogène et uniquement absorbant ;
- les diffusions multiples sont négligeables ;
- les températures de la végétation et du sol sont égales l'équation du transfert radiatif conduit à une forme analytique simple :

$$T_B = (1 - \Gamma_p Y^2) T_v \quad (2)$$

avec :

$$Y^2 = \exp(-2\tau/\cos\theta) \quad (3)$$

où Γ_p est la réflectivité de sol pour la polarisation p (Horizontale H ou Verticale V), Y est la transmittivité de la végétation, T_v est la température de la végétation, θ l'angle d'incidence et τ l'épaisseur optique. Celle-ci peut s'exprimer par la relation empirique suivante :

$$\tau = b W_c \quad (4)$$

où W_c est la teneur en eau massique du couvert exprimée en Kg/m² et b est un paramètre d'ajustement qui permet de prendre en compte l'effet de structure du couvert (JACKSON et SCHMUGGE, 1991). Sur des couverts partiels de sorgho, CHANZY *et al.* (1994) obtiennent des valeurs de b d'environ 0,15 et 0,4 m²/kg pour les fréquences de 1,4 et 5,05 GHz respectivement. Avec ces valeurs du paramètre b , nous avons représenté, sur les figures 1a-b, les relations T_B en fonction de θ_s pour différentes valeurs de W_c . Ces figures montrent bien qu'à 1,4 GHz la végétation n'a que peu d'influence sur T_B , tandis qu'à 5,05 GHz, la végétation doit être prise en compte pour avoir une estimation non biaisée de θ_s .

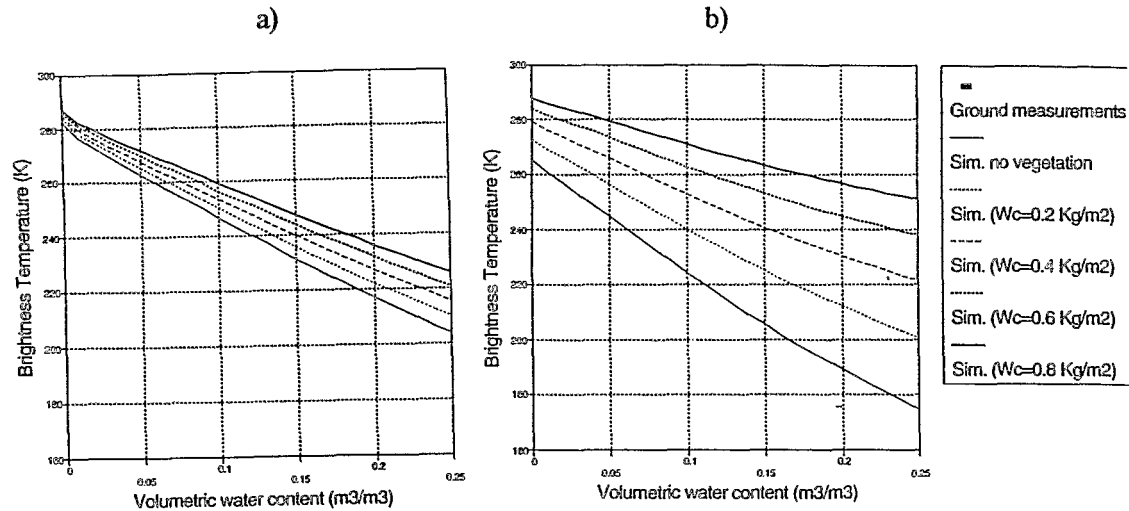


Figure 1 :

T_b en fonction de θ_z , T_b est estimé par les équations (3) à (4) en polarisation H.
 a) 1,4 GHz et 24°, b) 5,05 GHz et 45°.

DESCRIPTION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les mesures radiométriques ont été réalisées par les radiomètres Portos et PBMR, respectivement installés sur l'Arat (Avion pour la Recherche Atmosphérique et de Télédétection) et le C130 de la Nasa. Parmi les vols effectués par ces avions, 7 vols avec Portos (jours 236, 237, 239, 245, 246, 256, 261) et 5 avec le PBMR (238, 239 ; 246 ; 248 et 256) étaient plus particulièrement destinés aux analyses sur les données de radiométrie micro-onde avec des vols à basse altitude (300 à 1 000 m) pour limiter la résolution au sol. Portos est un radiomètre multifréquences (5,05, 10,65, 23,8, 36,5 et 90 GHz) et bipolarisation (H et V). Une interface mécanique permet de faire des mesures selon des angles d'incidence pouvant varier de 0 à 50°. Dans cette étude nous focaliserons sur les basses fréquences du radiomètre soit à 5,05 et à 10,65 GHz. Le PBMR est un radiomètre monofréquence fonctionnant à 1,4 GHz en polarisation H. Il est composé de 4 canaux visant à $\pm 8^\circ$ et $\pm 24^\circ$, assurant ainsi une couverture spatiale plus large le long de la trace de l'avion.

Les mesures analysées dans ce travail ont été acquises au niveau des deux super sites centraux est et ouest. Leurs couvertures étaient réalisées par plusieurs axes de vol parallèles selon une direction est ouest. Ainsi la zone cartographiée couvrait approximativement une surface de 30 x 5 km. Les caractéristiques des instruments lors des différents vols sont données dans le tableau 1. Nous remarquerons dans celui-ci que les mesures à 10,65 GHz et celles en polarisation V à 5,05 GHz sont limitées au début de la période de mesure. Nous noterons également que pour les jours 239, 246 et 256 ; des mesures ont été acquises simultanément par les deux radiomètres.

Sur le C130, des mesures de température de surface ont été réalisées par plusieurs capteurs (TIMS, NS001 et un radiothermomètre PRT5). Nous utilisons dans notre étude les données acquises par le PRT5 qui sont actuellement disponibles. Des mesures d'humidité de surface ont été réalisées au sol pendant les mesures radiométriques. Quatre sites, comprenant deux parcelles de mil et deux jachères, ont été suivis. L'humidité a été échantillonnée sur des zones de 300 m par 300 en effectuant 15 profils d'humidité par site (0-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-5, 5-10, 10-15 cm).

Tableau 1
Mesures radiométriques disponibles

Jour	Canaux radiométriques disponibles	Angle d'incidence (°)	Observations
Portos : jour 236	5,05 GHz H et V ; 10,65 GHz H et V	45	
Portos : jour 237	5,05 GHz H et V	45	
Portos : jour 239	5,05 GHz H et V ; 10,65 GHz H et V	45	
Portos : jour 245	5,05 GHz H	10 et 50	5 axes de vols répétés à 10 et 50 °
Portos : jour 246	5,05 GHz H	45	
Portos : jour 256	5,05 GHz H	20, 40, 45, et 50	mesures faites selon 1 seul axe
Portos : jour 261	5,05 GHz H	45	
PBMR (238, 239 ; 246, 248 ; 256)	1,4 GHz	8 et 24	

ESTIMATION DE L'HUMIDITÉ PAR RADIOMÉTRIE MICRO-ONDE

Pour prendre en compte les variations de la profondeur de pénétration du rayonnement micro-onde en fonction de la fréquence, nous relierons T_B à l'humidité volumique moyenne des deux premiers centimètres ($\theta_{0,2}$) à 1,4 GHz et à celle des cinq premiers millimètres ($\theta_{0,5}$) à 5,05 GHz (LAGUERRE *et al.* 1994).

RÉSULTATS OBTENUS À 1,4 GHz

Nous avons représenté sur les figures 2a-b, la relation entre T_B et $\theta_{0,2}$ établie sur les 4 sites de mesure au sol et pour les 5 journées de mesure. Ces figures montrent une relation linéaire satisfaisante sans que l'effet de la végétation soit significatif. En effet, les différents sites ne se distinguent pas au niveau du nuage de points (figure 2a) et nous n'observons pas d'évolution marquée de la relation T_B - $\theta_{0,2}$ au cours du temps (figure 2b). La droite de régression a pour équation :

$$\theta_{0,2} = 0.762 - 0.00255 \times T_B \quad (5)$$

avec un coefficient de corrélation r^2 de 0,81 et un écart type résiduel de 0,019 m³/m³. Nous pouvons maintenant cartographier l'humidité en utilisant l'équation (5) (figure 3). La cartographie de l'humidité fait bien ressortir des unités géomorphologiques tels que le plateau recouvert de brousse tigrée ou la jupe sableuse. Celle-ci s'identifie par une humidité plus faible liée à un ressuyage rapide. Ceci est confirmé par les mesures de terrain. Celles-ci montrent que la jupe sableuse est toujours la parcelle la plus sèche. Ces résultats confirment la qualité des observations acquises par le PBMR qui permettent de différencier de manière cohérente les variations d'humidité sur la zone d'étude. Pour le traitement des données Portos, nous utiliserons comme référence les estimations d'humidité du sol obtenues avec l'équation 5 et les mesures du PBMR.

RÉSULTATS OBTENUS À 5,05 GHz

Une relation directe entre les mesures de T_B et $\theta_{0,5}$ a été établie de manière analogue à celle représentée sur la figure 2. À 5,05 GHz et en polarisation H, nous obtenons un nuage de points très dispersés. L'effet de la croissance de la végétation pendant la période de mesure se manifeste par une augmentation générale de T_B au cours du temps à humidité du sol comparable. Le calcul de la droite de régression donne l'équation :

$$\theta_{0,5reg} = 0.615 - 0.00212 \times T_B \quad (6)$$

avec un coefficient de corrélation r^2 de 0,49. Ces résultats relativement médiocres montrent l'intérêt d'inverser un modèle d'émission micro-onde qui prend explicitement en compte la végétation. Pour mettre en œuvre cette inversion, nous avons utilisé le modèle simple décrit par les équations 2 à 4. L'estimation de l'humidité est possible par inversion du modèle si nous connaissons b , W_c , T_s et T_B . Ces deux dernières grandeurs sont cartographiées par le PRT5

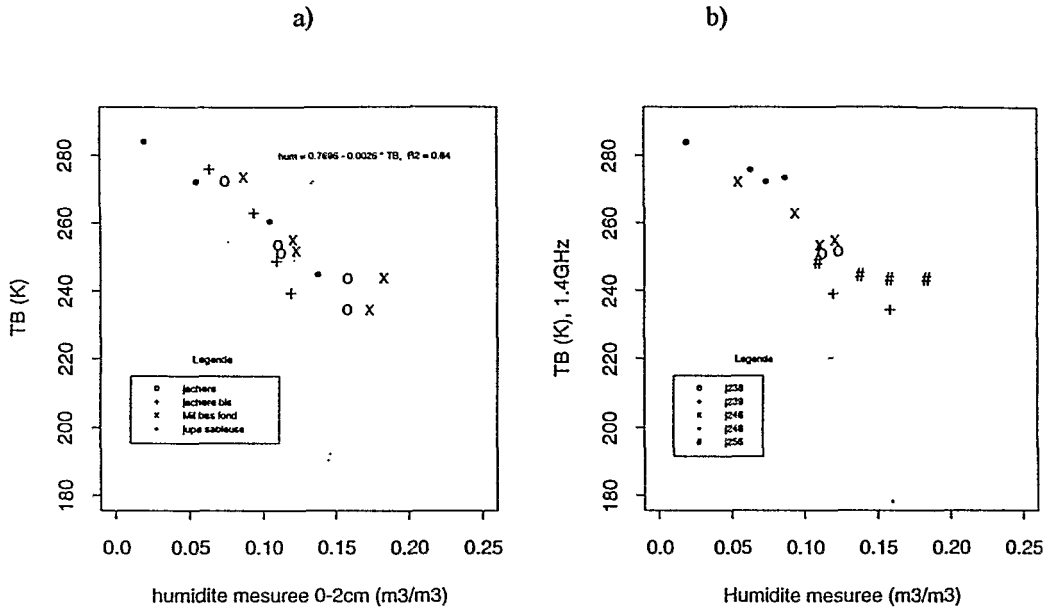


Figure 2 :
Relation entre T_b et q_s établie à 1,4 GHz. a) influence du site,
b) influence de la date de mesure.

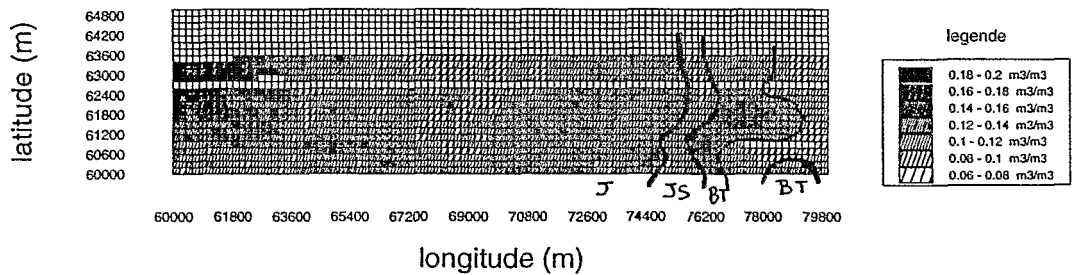


Figure 3 :
Cartographie de l'humidité de surface le jour 239 obtenue sur des pixels
de 200 m de côté à partir des mesures du PBMR. (BT = brousse Tigrée,
JS = Jupe Sableuse, J = jachère).

installé sur le C130 et Portos. La détermination et la cartographie de b et W_c est beaucoup plus délicate. En effet les mesures au sol sur la caractérisation du contenu en eau de la végétation sont très peu nombreuses et souvent limitées à quelques espèces végétales. Pour cartographier les paramètres de végétation, nous nous sommes appuyés sur une expérience effectuée à Avignon en milieu contrôlé sur des couverts partiels de sorgho (HABOUDANE *et al.* 1994). En début de campagne, soient les jours 236, 237 et 239, W_c a été calculé en utilisant l'écart entre les T_B mesurés en polarisation V et H (ΔT_{Bpol}) à 5,05 GHz. Pour les jours 245 et 256 nous avons utilisé les variations angulaires de T_B en polarisation H (ΔT_{Bang}). Les relations utilisées sont les suivantes :

Estimations basées sur ΔT_{Bpol} .

$$PDVm = (\Delta T_{Bpol}) * T_{BV}^{1.2} \quad (7)$$

$$W_c = 1,5458 * \exp(-0.000109 * PDVm) \quad (8)$$

Estimations basées sur (ΔT_{Bang}) :

$$10-50^\circ \rightarrow W_c = 1,043 - 0,0486 \Delta T_{Bang} + 0,000576 * \Delta T_{Bang}^2 \quad (9)$$

$$20-40^\circ \rightarrow W_c = 1,5458 - 0,0637 \Delta T_{Bang} + 0,0009 * \Delta T_{Bang}^2 \quad (10)$$

Pour étudier la cohérence entre ces relations, nous avons représenté sur la figure 4 l'évolution de W_c pour quelques parcelles correspondant à des type de recouvrement végétal différents (surface cultivée, brousse tigrée, jachère). Les résultats reproduisent bien une croissance de la végétation au cours du temps qui serait conforme à son évolution au cours de la saison des pluies. Toutefois, les valeurs obtenues à partir des variations angulaires de T_B induit une surestimation de W_c en comparaison avec les quelques mesures faites au sol. Par contre, l'ordre de grandeur des estimations de W_c au début de la période de mesure (jour 236, 237 et 239) est tout à fait conforme aux mesures de terrain. Nous noterons que pour le jour le plus sec (237), nous avons une augmentation sur toutes les parcelles de l'estimation de W_c .

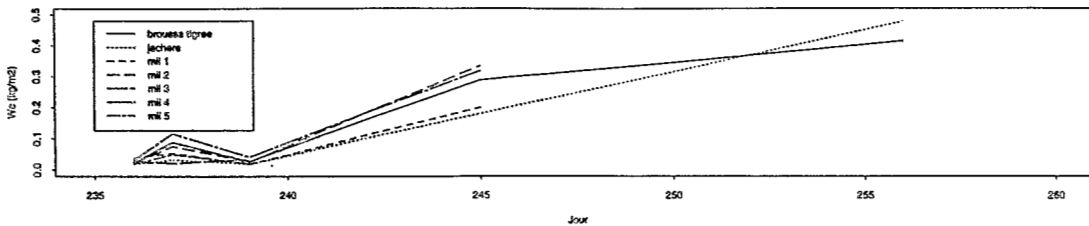


Figure 4 :

Évolution du contenu en eau de la végétation estimé à partir des mesures Portos à 5,05 GHz, par les équations 7 à 10.

Ceci montre la difficulté d'établir un indice de végétation à partir des données de radiométrie micro-onde, insensible aux variations de l'humidité du sol. Dans la suite, nous utiliserons les cartes des jours 239, 245 et 256 pour effectuer les comparaisons entre les humidités estimées par les deux radiomètres. En ce qui concerne le paramètre de végétation b (Eq 4) ; nous prenons la valeur de $0,4 \text{ m}^2/\text{Kg}$ qui est une valeur médiane parmi celles trouvées par JACKSON et SCHMUGGE (1991) sur un grand nombre de jeux de données. De plus, cette valeur semble s'appliquer de manière satisfaisante aux couverts partiels étudiés sur le site d'Avignon (HABOUDANE *et al.*, 1994).

Pour les jours 239 et 246 ; nous avons établi une grille couvrant la zone d'étude présentant des cellules carrées de 500 m de côté. Pour chaque cellule, nous calculons les moyennes des valeurs mesurées de T_B , de W_c et de T_s dont la localisation du centre de la surface de mesure se situe dans la cellule de grille. Nous inversons ensuite le modèle d'émission donné par les équations 2 à 4 pour estimer au niveau de chacune des cellules de grille $\theta_{0,5}$. Pour le jour 256, nous avons suivi une démarche analogue en reconstituant les valeurs de T_B , de W_c et de T_s tous les 200 m le long du seul axe de mesure commun aux deux instruments.

Les résultats sont représentés sur les figures 5 à 7. Sur la figure 5, les nuages de points reliant les estimations de l'humidité de surface acquises à partir des deux radiomètres s'individualisent nettement en fonction des journées. De plus, au sein de chaque journée, les variations spatiales d'humidité du sol estimées par la relation 6 ; sont sous-estimées. Par contre, lorsque nous inversons le modèle d'émission (figure 6, équations 2 à 4), nous obtenons une meilleure continuité dans les nuages de points traduisant une meilleure prise en compte de l'influence croissante de la végétation au cours de la saison des pluies. Nous notons néanmoins que les estimations d'humidité du sol acquises par inversion des données radiométriques à 5,05 GHz sont en général inférieures aux valeurs de référence (humidité PBMR). Ceci pourrait s'expliquer en partie par une profondeur de pénétration plus importante à 1,4 GHz mais aussi par la non prise en compte de la rugosité du sol, une mauvaise description de la végétation (b , W_c) et/ou une mauvaise estimation de la relation, entre constante diélectrique et humidité du sol. Les résultats obtenus à 5,05 GHz par inversion d'un modèle d'émission micro-onde simple restent toutefois encourageants, d'autant plus qu'aucun calage sur les données expérimentales n'a été fait au cours de cette démarche. Son intérêt est confirmé par les résultats obtenus le jour 256 (figure 7).

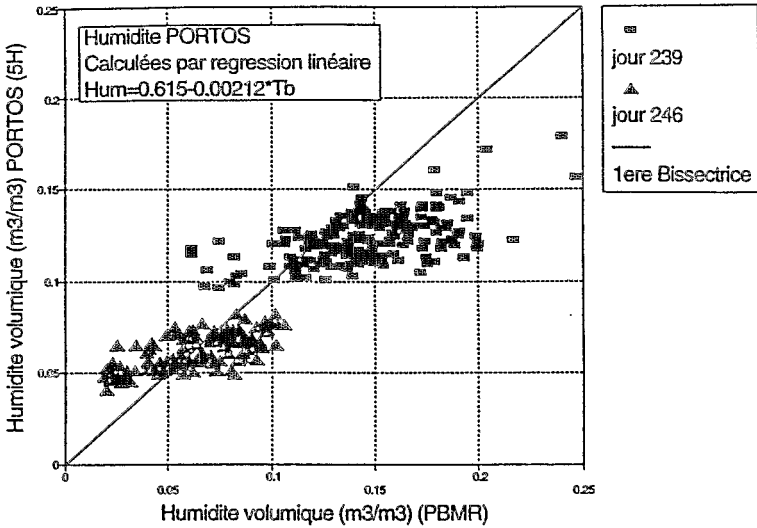


Figure 5 :

Comparaison des estimations de l'humidité de surface à partir des radiomètres Portos et PBMR. Les humidités sont estimées dans les deux cas par régression linéaire.

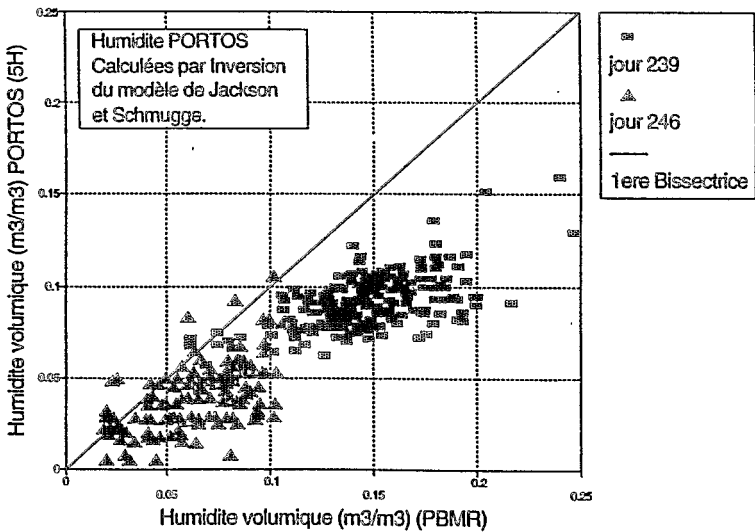


Figure 6 :

Comparaison des estimations de l'humidité de surface à partir des radiomètres Portos et PBMR. Les humidités estimées avec Portos sont calculées en inversant le modèle d'émission micro-onde (Éq. 2 à 4).

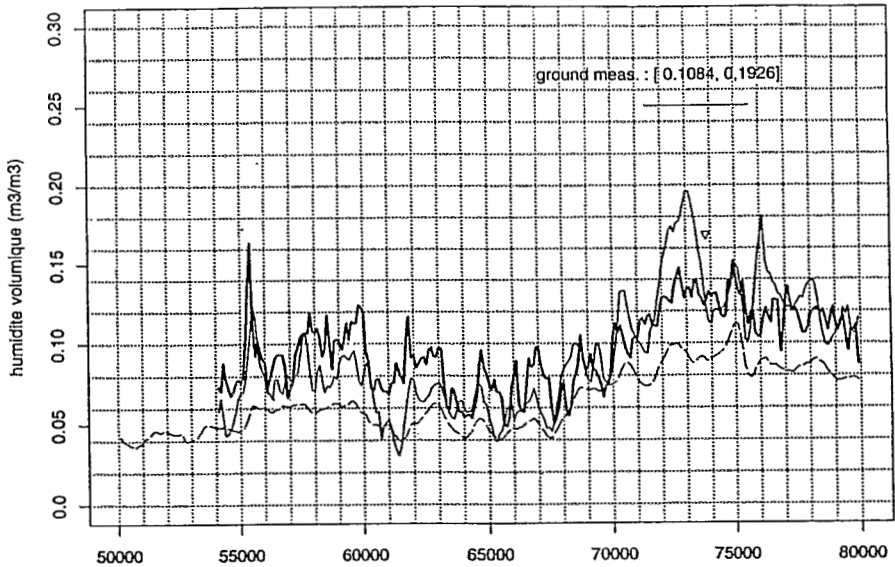


Figure 7 :

Comparaison des profils d'humidité de surface obtenues le jour 256 à partir des radiomètres Portos et PBMR. L'humidité estimée par le PBMR est donnée en trait gras, celle obtenue par inversion du modèle d'émission avec les données Portos est donnée en trait continu fin et celle obtenue par régression linéaire (Éq. 6) est donnée par le trait discontinu. Le triangle correspond aux mesures au sol.

ESTIMATION DE L'ETR

Dans cette analyse les flux sont intégrés sur la journée, tandis que θ_{0-2} est mesurée quotidiennement en milieu de journée. Les mesures représentées sur la figure 8 ont été acquises sur une jachère à *Guiera* partiellement dégradée. Nous constatons que l'humidité du sol un bon descripteur du rapport ETR/ETP, celui-ci varie sur une gamme comprise entre 0,9 et 0,6. Les valeurs du rapport ETR/ETP obtenues en condition de sol sec sont plus élevées que celles acquises sur sol nu pour des humidité du sol similaires (0,1 environ, CHANZY et BRUCKLER, 1993). Ceci est dû à la contribution de la végétation à l'ETR par le biais de la transpiration. Les observations portées sur la figure 8 ont été recueillies sur des périodes de temps relativement courtes (< 20 jours) et ceci au cours de la saison humide. Dans ces conditions expérimentales, la transpiration aurait suivi la demande climatique, tandis que l'évaporation directe du sol aurait été très sensible au dessèchement rapide du sol. Nous pouvons imaginer qu'en cas de stress hydrique, la transpiration des plantes pourrait devenir limitante ce qui conduirait à une baisse du rapport ETR/ETP pour de faibles humidités. La cinétique d'apparition d'un stress hydrique de la végétation est cependant beaucoup plus lente que celle de la limitation de l'évaporation liée au dessèchement de la surface.

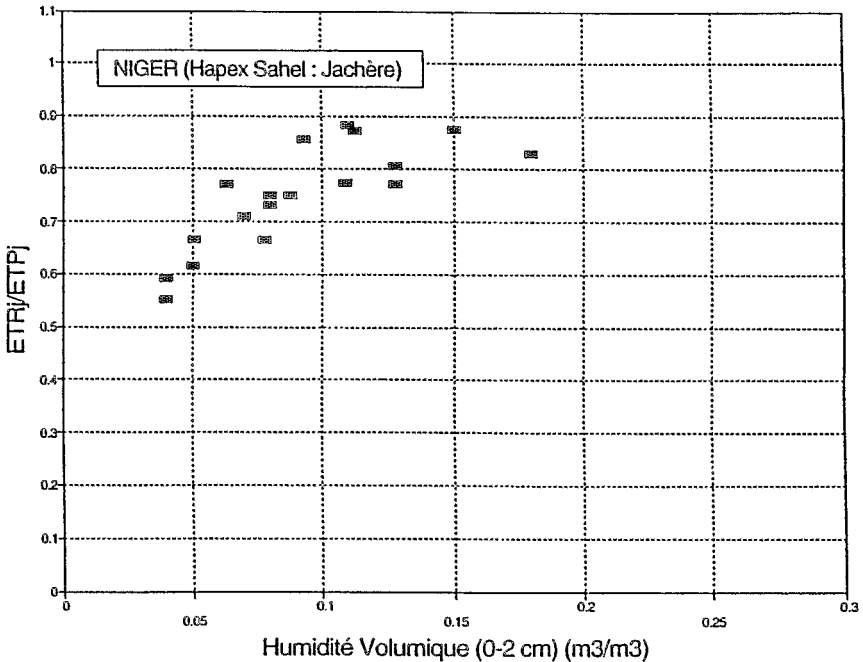


Figure 8 :

Relation obtenue expérimentalement entre le rapport journalier ETR/ETP et l'humidité de surface observée en milieu de journée sur une jachère.

CONCLUSIONS

Cette étude montre l'intérêt d'un canal de mesure micro-onde à basse fréquence (1,4 GHz) pour cartographier l'humidité de surface. Sur des surfaces semi-arides il est possible de négliger l'influence de l'humidité et d'utiliser une relation $T_B = f(\theta_{0-2})$ unique pour cartographier l'humidité de surface du sol sur une zone de 30 x 5 km. Pour cartographier l'humidité de surface du sol avec un radiomètre à 5,05 GHz, il est nécessaire de prendre en compte la végétation. Les premiers résultats obtenus en inversant un modèle simple d'émission d'un sol recouvert de végétation semble prometteur. Toutefois, des analyses complémentaires doivent être effectuées pour mieux comprendre les biais constatés sur θ_0 . Une meilleure caractérisation de la végétation semblerait souhaitable pour progresser sur ce point. Enfin, l'humidité de surface est, dans le cas des couverts partiels, un bon indicateur des variations à court terme du rapport ETR/ETP. Il reste néanmoins à préciser le domaine de validité d'une relation telle que celle de la figure 8 que ce soit dans le temps et dans l'espace.

BIBLIOGRAPHIE

- CAMILLO P.J., GURNEY R., 1986. A resistance parameter for bare-soil Evaporation models, *Soil Science.*, 104(2) : 95-105.
- CHANZY A., BRUCKLER L., 1993. Significance of soil surface moisture with respect to bare soil evaporation, *Water Resour. Res.*, 29(4), 1113-1125.
- CHANZY A., KUSTAS W., 1994. Evapotranspiration monitoring over land surface using microwave radiometry, (accepté pour « Passive microwave remote sensing research related to land-atmosphere interactions »).
- CHANZY A., HABOUDANE D., WIGNERON J.P., CALVET J.C., GROSJEAN O., 1994, Radiométrie micro-onde sur divers types de couverts végétaux : influence de l'humidité du sol. Colloque International ISPRS. Mesures physiques et signatures en télédétection, Val d'Isère (FRA), 1994/01/17-21, 505-512.
- HABOUDANE D., CHANZY A., BONN F., WIGNERON J.P., CALVET J.C., 1994. Radiométrie micro-onde dans le cas des couverts végétaux partiels : estimation des teneurs en eau du sol et de la végétation, soumis au journal Canadien de Télédétection.
- JACKSON, T.J., SCHMUGGE, T.J., 1989. Passive microwave remote sensing for soil moisture : some supporting research, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 27(2), 225-235.
- JACKSON T.J., SCHMUGGE T.J., 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote sens. of environ.*, 36 : 203-212.
- LAGUERRE L., SURESH R., CHANZY A., KERR Y., WIGNERON JP., CALVET JC., 1994, Modélisation physique de l'émission micro-onde des sols nus : comparaison modèles expériences. Colloque International ISPRS. Mesures physiques et signatures en télédétection, Val d'Isère (FRA), 1994/01/17-21, 527-534.

- MAHFOUF J.F., NOILHAN J., 1991. Comparative study of various formulations of evaporation from bare soil using in-situ data. *J. of Applied Meteorol.* 30(9) : 1354-1365.
- WIGNERON J.P., KERR Y., CHANZY A., JIN Y.Q., 1993, Inversion of surface parameters from passive microwave measurements over a soybean field, *Remote sensing of environ.* 46 : 1-25.