



ELSEVIER

VIE SCIENTIFIQUE



www.elsevier.com/locate/natsci

Mesures de l'humidité des sols et du contenu en eau de la végétation par radar aéroporté ☆

Estimation of soil moisture and vegetation biomass from airborne radar data

Monique Dechambre *

Physicienne, CETP / IPSL, 10-12, avenue de l'Europe, 78140 Vélizy, France

Le contrôle des changements naturels ou anthropogéniques qui se produisent continuellement dans la biosphère a un impact majeur sur la compréhension des échanges carbone eau entre la surface terrestre et l'atmosphère, et du cycle de l'eau en général. Les techniques de télédétection spatiales permettent justement ce contrôle et en particulier, le radar, du fait de la haute résolution délivrée, de la possibilité d'observation tout temps (dans la gamme de fréquences utilisée, 1-10 GHz, les ondes électromagnétiques sont quasiment insensibles aux composants atmosphériques) et à toute heure (c'est un système actif, contrairement aux instruments optiques et il s'affranchit ainsi des variations du rayonnement solaire), de la bonne pénétration des ondes dans le couvert végétal (meilleure qu'en optique tout du moins) et de sa sensibilité à l'humidité. La restitution, à partir du signal radar, de l'humidité superficielle des sols, paramètre clé des modèles hydrologiques par exemple ou du contenu en eau de la végétation, paramètre essentiel pour l'estimation de la biomasse, est cependant un problème compliqué qui n'est pas encore totalement résolu, même si un certain nombre de méthodes sont déjà opérationnelles. De gros efforts de compréhension du signal mesuré restent encore à faire, en s'appuyant sur le

développement de modèles théoriques ou semi-empiriques de l'interaction onde-milieu. Les modèles théoriques, physiquement fondés, doivent être confrontés à des données pour être validés et les modèles semi-empiriques calés à l'aide de ces mêmes données.

Dans cette perspective de recherche, la constitution de bases de données radar acquises dans des conditions naturelles bien contrôlées est essentielle, tant pour la construction et la validation de modèles – problème direct – que pour l'estimation des paramètres géophysiques intéressant les thématiciens – problème inverse – ou pour l'assimilation de données dans des modèles de fonctionnement hydrologiques, de croissance de la végétation... Pour ce faire de petits radars aéroportés, simulateurs de radars spatiaux, sont utilisés lors de campagnes de mesure à l'échelle de la parcelle agricole ou forestière et à l'échelle du bassin versant, en complément des passages de radars spatiaux imageurs.

Les radars à ouverture de synthèse (plus connus sous le sigle SAR selon la terminologie anglaise, *Synthetic Aperture Radar*) qu'ils soient spatiaux (Ers, Radarsat, Jers) ou aéroportés, tirent parti de l'effet Doppler, créé par le mouvement relatif de son porteur par rapport aux cibles, pour produire des images possédant une haute résolution spatiale comparable à celle des systèmes optiques. La contrepartie essentielle de la performance en précision de l'imagerie se retrouve dans la lourdeur du traitement numérique, traitement long et complexe, et de la faible répétitivité des mesures dans le cas de radars spatiaux.

☆ Compte rendu du séminaire (PEVS, Zone atelier) : « Mesures aéroportées pour l'observation du sol et des paysages : la mesure *in situ* et la télédétection ».

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Monique.Dechambre@cetp.ipsl.fr (M. Dechambre).

Les radars aéroportés ou hélicoptés, de faibles dimensions en poids, volume, consommation, mais non imageurs ou encore à ouverture réelle, délivrent un signal comparable, mais uniquement le long d'un axe de vol du porteur. Leur apport est donc majeur pour des études de physique de la mesure, comme étalonneurs d'instruments spatiaux ou comme aide à leur dimensionnement (du fait de la diversité en fréquence, polarisation, incidence, résolution etc.), mais aussi, pour des études de suivi à petite et moyenne échelle des paramètres d'humidité à moindre coût et à plus grande répétitivité. Ce sont donc des instruments opérationnels qui peuvent être mis à la disposition des différentes communautés scientifiques qui veulent étudier l'apport de la télédétection dans leurs domaines de recherche. Leur mise en œuvre est relativement simple, le traitement des données est opérationnel, les mouvements quelquefois un peu complexes du porteur étant bien pris en compte.

Dans ce papier, on exposera les grandes lignes qui permettent de mettre en œuvre et de restituer le paramètre radar classique, la section efficace radar, son lien avec l'humidité, et on donnera des exemples d'analyse et conclusions d'études.

Le signal radar

L'instrument

Un radar est un système actif permettant :

- de détecter des cibles ou des obstacles ;
- d'estimer certains paramètres de ces cibles (distance, vitesse, caractéristiques radioélectriques ou de surface etc.), puisque l'information apportée par un radar d'observation de la Terre concerne la réflectivité électromagnétique du sol et caractérise l'interaction physique entre l'onde et la surface.

Le principe général de fonctionnement consiste à émettre une onde électromagnétique (système actif) et à recevoir les échos renvoyés (réfléchis ou diffusés) par les cibles étudiées. De nombreux ouvrages de base permettent de se familiariser avec cet instrument (Carpentier, 1990).

À titre d'exemple, citons les radars hélicoptés conçus et réalisés au CETP, dédiés à l'étude des surfaces continentales et qui sont les seuls instruments de ce type disponibles en France :

- Erasme, de type FM-CW, à haute résolution (les signaux radars sont obtenus avec une résolution en distance radiale de 1 m), bi-fréquence (5,35 et 9,65 GHz), bipolarisation (HH - VV) à incidence multiple et en visée vers l'avant (ce qui permet de voir une même surface sous différents angles d'incidence) ;

- René, radar polarimètre (HH-VV-VH et HV et information de phase) de même type que Erasme, fonctionnant à 9,65 GHz (il existe une version à 3,2 GHz), à visée latérale.

Ces deux radars ont participé à de nombreuses campagnes de mesures organisées et/ou financées par l'ASE, (Agence spatiale européenne), le CNES, le PNTS (Programme national de télédétection spatiale).

Le traitement du signal radar

La direction des échos renvoyés par la cible (sol nu, sol cultivé, forêt etc.) dépend essentiellement de l'état de surface, caractérisé par sa rugosité. Le radar reçoit uniquement les échos renvoyés dans la direction d'arrivée qui constituent le signal rétro-diffusé. L'intensité de ces échos dépend fortement de l'humidité dans les premiers centimètres du sol, m_s , du contenu en eau de la végétation m_v et de la rugosité.

- La rugosité : elle caractérise l'état de surface et se définit à l'aide de la fonction d'autocorrélation d'un profil de hauteurs et de deux paramètres, l'écart type des hauteurs σ_h et la longueur de corrélation l , dont les dimensions sont comparées avec la longueur d'onde du signal pour définir la nature plus ou moins lisse du sol ;
- L'humidité superficielle m_s ou le contenu en eau m_v : le radar est sensible à la permittivité du ou des matériaux constituant la cible. La permittivité ou constante diélectrique décrit la plus ou moins grande faculté du matériau à stocker de l'énergie ou encore sa qualité de conducteur. Cette quantité dépend également de la fréquence et de la température.

Le signal radar, décrit par l'équation radar qui donne la puissance reçue par le radar en fonction de la puissance émise, est traité, en tenant compte des mouvements du porteurs (mesurés à l'aide d'une centrale à inertie) et des caractéristiques d'antennes, pour restituer le paramètre classique de la télédétection radar, appelé section efficace radar σ^0 qui caractérise la fraction de puissance émise qui est rétrodiffusée par la cible. Il dépend donc des paramètres du système utilisé, la fréquence f , la polarisation p et l'angle de visée θ et de l'humidité du sol m_s ou de la végétation m_v ou des deux et de la rugosité (σ_h , l). Lorsque l'on cherche à restituer une humidité, la rugosité est un paramètre perturbateur de la mesure qu'il faut éliminer ; en revanche, lorsque l'on cherche les effets de la rugosité sur le signal, il faut s'affranchir des effets de l'humidité sur le signal. Malheureusement les effets de ces deux paramètres sur la mesure radar sont couplés !

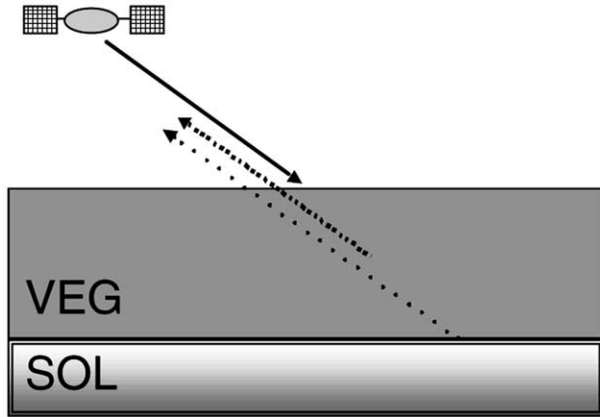


Figure 1 Contribution des deux milieux à la rétrodiffusion des ondes.

Les mesures d'humidité des sols par radar aéroporté

La quantité dont on dispose pour restituer l'humidité, ou encore pour assimiler des données de télédétection dans des modèles sans inversion préalable, est donc la section efficace radar qui dépend de multiples paramètres, système ou radioélectrique ou géométrique :

$$\sigma^0 = \sigma^0(f, p, \theta, m_s, m_v, \sigma_h, l) \quad (1)$$

Cette section efficace représente la réponse d'un radar qui émet un rayonnement électromagnétique dans une direction donnée, dans un intervalle de temps très court, et qui reçoit un signal de la cible « illuminée » par le radar. La réponse dépend d'un grand nombre de paramètres de la cible et du milieu traversé qui sont décrits ici.

De plus σ^0 mesuré par le radar représente, dans le cas général, la contribution du sol σ^0_{sol} et de la végétation σ^0_{veg} si elle existe, à la diffusion des ondes (Fig. 1).

On écrit la section efficace radar totale comme la somme de deux termes, en s'appuyant sur un modèle de transfert radiatif au 1^{er} ordre. La théorie du transfert radiatif se réfère au transport de l'énergie à travers un milieu, en général aléatoire, et contenant des particules. La prise en compte des contributions du sol et de la végétation se fait en sommant des puissances, et non pas des champs électromagnétiques :

$$\sigma^0 = \sigma^0_{veg} + (\sigma^0_{sol}) att_{veg} \quad (2)$$

où att_{veg} représente l'atténuation de l'onde au passage à travers la couche de végétation.

Cas de sols nus

La dépendance entre le signal radar exprimé en décibels (dB) et l'humidité superficielle des sols est

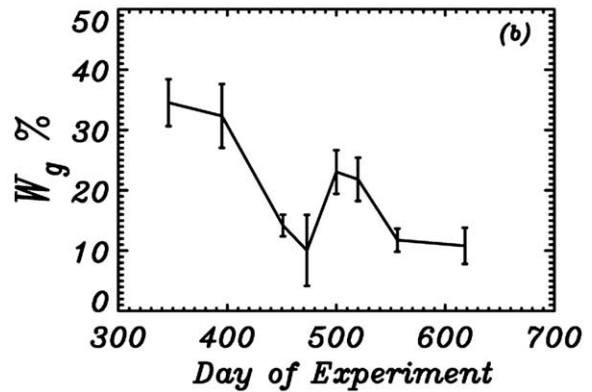
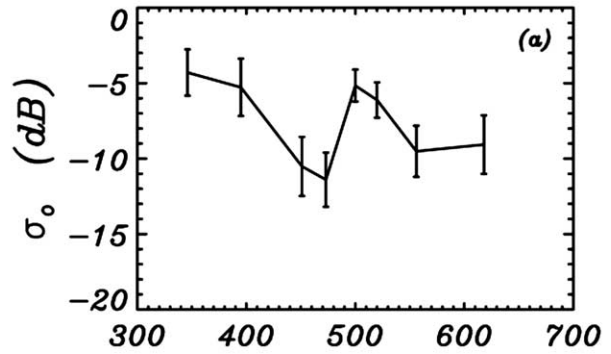


Figure 2 Coïncidence entre le signal radar obtenu sur des champs de blé pendant un cycle complet de végétation et l'humidité du sol mesurée par méthode gravimétrique (projet Alpilles-ReSeDA).

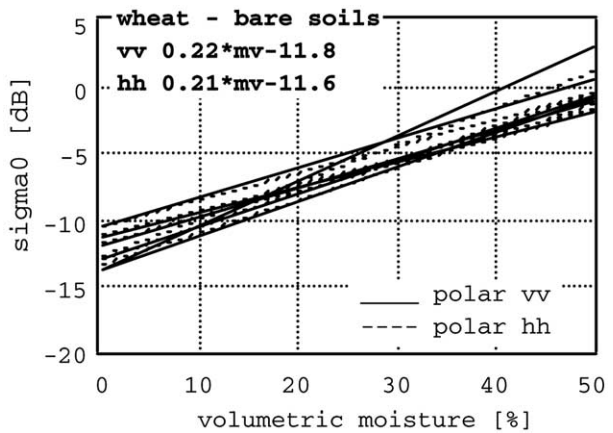


Figure 3 Relation entre le signal radar et de l'humidité du sol pour des champs de blé (projet Alpilles-ReSeDA).

forte (Fig. 2) et linéaire (Fig. 3) (la pénétration de l'onde dans le sol dépend de la longueur d'onde utilisée, elle est typiquement de l'ordre de quelques centimètres dans la gamme de fréquence utilisée en télédétection). On utilise pour inverser le

signal radar un modèle semi-empirique de la forme :

$$\sigma_{sol}^0 = a m_s + b \quad (3)$$

a et b sont obtenus par régression linéaire à l'aide des données radar.

La Fig. 3 représente la relation entre le signal radar (dB) mesuré à différentes dates et l'humidité du sol aux mêmes dates pour différentes parcelles de sol nu (expérience Alpilles-ReSeDA [Agronomie, 2002]). Les pentes des droites sont les mêmes pour chaque parcelles, l'ordonnée à l'origine varie et représente l'effet de la rugosité sur le signal.

Cas des sols cultivés

Dans ce cas, il faut estimer la contribution de la végétation sous forme de diffusion de volume de l'onde et d'atténuation de l'onde au passage à travers la végétation.

Pour cela on utilise un modèle de rétrodiffusion pour estimer σ_{veg}^0 , fondé sur l'approche transfert radiatif. Ce modèle complexe, non inversible, utilise de nombreux paramètres d'entrée caractéristiques de la végétation (hauteur, LAI, contenu en eau etc.), et donc assez difficile à mettre en œuvre.

On estime l'atténuation subie par l'onde à partir de la relation semi-empirique :

$$Att_{veg} = \exp(-cm_v) \quad (4)$$

Cette méthode ne s'applique qu'à des couverts peu denses, dans le cas où l'onde peut pénétrer suffisamment dans le couvert pour atteindre le sol. Dans le cas contraire (période de développement maximum de la végétation), le sol est entièrement masqué par la végétation, l'onde n'atteint pas le sol.

L'étude de la végétation par radar aéroporté

L'estimation de la contribution de la végétation au signal rétrodiffusé proposée au paragraphe précédent permet de soustraire les effets de la végétation sur le signal lorsque l'on étudie le sol. Dans le cas de l'étude et du suivi de la végétation, on veut estimer la biomasse, par exemple, à partir de la mesure de cette contribution.

Plusieurs modèles de diffusion des ondes par la végétation, toujours fondés sur la théorie du transfert radiatif, ont été développés dans lesquels la

végétation est décrite comme un milieu aléatoire discret, contenant des diffuseurs de taille, orientation et forme variables, distribués suivant des couches horizontales. Ces modèles permettent de simuler le coefficient radar en fonction des caractéristiques du système et l'atténuation. S'ils ont le mérite d'exister et de servir de référence, ils sont difficiles à utiliser et à inverser. Le modèle semi-empirique du paragraphe précédent, dit modèle « en gouttes d'eau », est alors utilisé pour inverser le signal, c'est un modèle à trois paramètres. Appliqué à des surfaces cultivées en blé, il donne des résultats satisfaisants, comme on peut le voir (Fig. 4) et (Fig. 5), mais il est mis en défaut pour des cultures du type maïs ou tournesol.

En ce qui concerne l'estimation de la biomasse des forêts, milieu qui tire avantage de la technique radar tout temps, les résultats montrent une dépendance évidente entre signal radar et biomasse. Cependant, cette capacité est limitée à des biomasses inférieures à 300 t ha^{-1} , ce qui représente une valeur faible. Des radars émettant à des fréquences plus basses commencent à être étudiés pour repousser les limites de cette saturation, liée à la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu.

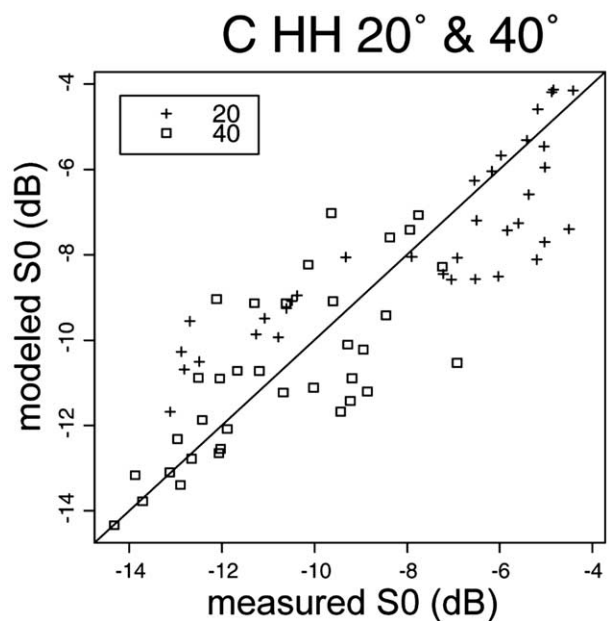


Figure 4 Ajustement du modèle de nuage sur les données Erasme : valeurs modélisées versus mesures. Données acquises à 20 degrés : + , à 40 degrés : (a) C-HH, (b) C-VV, (c) X-HH, (d) X-VV. La ligne solide est la ligne 1 : 1.

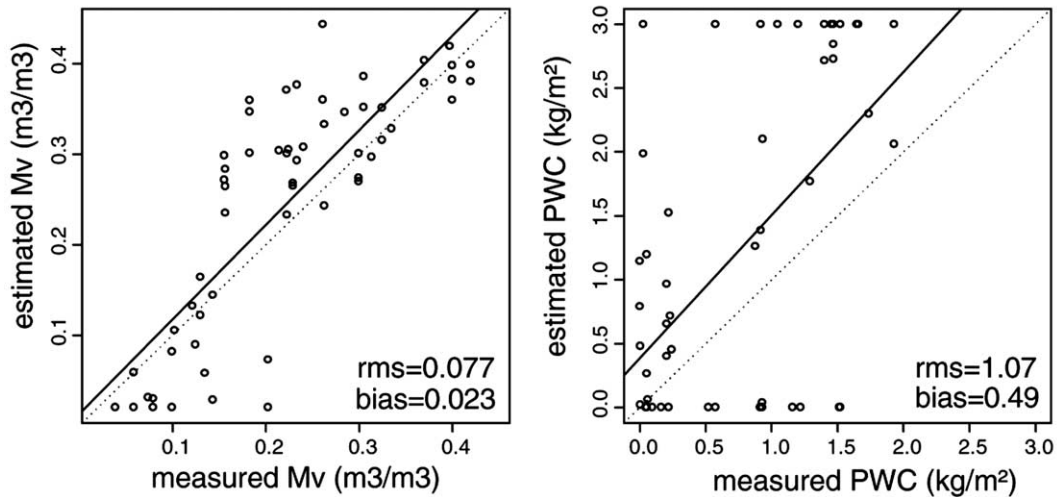


Figure 5 Résultats de l'inversion à partir du C-20 degrés HH et X-40 degrés HH des données du radar Erasme (meilleur couple pour l'estimation de m_v l'humidité de la végétation et du contenu en eau). La ligne solide correspond à la régression, la ligne discontinue à la droite 1 : 1.

Conclusion

S'il reste encore des efforts à faire dans l'interprétation des échos radar obtenus sur les surfaces continentales, notamment pour modéliser le signal électromagnétique diffusé et pour décrire les milieux observés, la technique radar aéroportée est bien maîtrisée et tire partie des avantages de la diversité de configurations. Ces instruments sont opérationnels et par leur facilité de mise en œuvre sont de bons instruments de recherche, tant pour

la physique de la mesure que pour le suivi à petite échelle de l'évolution de ressources renouvelables.

Références

- September-october 2002; special issue of *agronomie*: Multi-sensor and multi-temporal sensing observations to characterize canopy functioning. The ReSeDA projects. *Agronomie* 22 (6), 525-696.
- Carpentier, M., 1990. *Radars, bases modernes*. 6^e Éd. Masson, Paris.

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®