

PERSPECTIVES OFFERTES PAR LA TELEDETECTION RADAR DANS LE DOMAINE DE L'ETAT HYDRIQUE DES SOLS

NORMAND M. ¹

RESUME

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'état hydrique des sols et pour suivre "in situ" son évolution temporelle. Cependant, ces méthodes qui donnent plus ou moins satisfaction pour des observations ponctuelles ou bien de petites parcelles, ne sont plus adaptées à l'échelle d'un bassin versant, ou d'une région, compte tenu de la variabilité spatiale du phénomène observé.

Pour résoudre ce problème, des recherches sont menées, depuis une quinzaine d'années, sur les possibilités d'utilisation de la télédétection en hyperfréquences actives (ondes radar).

Cette méthode est fondée sur l'interaction des ondes électromagnétiques (micro-ondes) avec le sol et sa surface. Les caractéristiques de rétrodiffusion d'un signal radar émis en direction du sol sont en particulier fonction de la constante diélectrique du sol qui dépend de la teneur en eau.

A la différence des autres méthodes de télédétection (visible, infra-rouge), le signal est quasi indépendant de l'état de l'atmosphère (en dessous de 15 Ghz) et la couche de sol explorée est de l'ordre de 5 à 10 cm.

Les travaux théoriques et expérimentaux réalisés ont permis de déterminer les paramètres instrumentaux optimaux, fréquence (bande C, 5 Ghz), angle d'incidence (5° à 20°), polarisation (HH), afin de minimiser l'influence de l'état de surface du sol (rugosité, sillons) et de la végétation.

Le rôle des différents facteurs influant sur le signal rétrodiffusé continue d'être étudié à partir de radars (diffusomètres, ou radars imageurs) montés sur des grues ou aéroportés, à l'échelle de parcelles ou de petits bassins versants. On donne des exemples de ces études réalisées par différentes équipes tant en France que dans d'autres pays.

Certaines d'entre elles comportent simultanément un volet végétation qui consiste à rechercher à l'aide de radars multiconfigurations, les conditions d'obtention d'informations concernant la nature et l'évolution du couvert végétal.

D'autres portent sur la réponse obtenue sur les surfaces de sols saturées, dont le

¹CEMAGREF, Division Hydrologie, BP 121,92185 ANTONY CEDEX

comportement devient spéculaire, et la possibilité de cartographier les zones saturées et leur évolution.

Tous ces travaux sont destinés à définir les algorithmes d'inversion des mesures et les caractéristiques de radars embarquables sur une plate-forme spatiale.

Quelques expériences spatiales radar ont déjà eu lieu (SIR A, SIR B de la NASA) ou vont avoir lieu. La prochaine sera d'importance avec le satellite ERS. 1 équipé d'un radar à synthèse d'ouverture (dès 1991), suivi ultérieurement par ERS.2.

L'exploitation des données spatiales devrait permettre de mieux apprécier les potentialités de cette nouvelle méthode de télédétection dans le domaine du suivi de l'état hydrique des sols à différentes échelles.

A l'échelle régionale, ces potentialités devraient être augmentées en utilisant conjointement les mesures de températures radiatives de surface issues des données en infra-rouge thermique des satellites météorologiques et les mesures d'humidité de surface par radar, afin de calculer grâce au bilan énergétique une grandeur assimilable à l'état hydrique général de la zone racinaire.

Toutefois, les systèmes radar spatiaux opérationnels ne seront disponibles qu'à l'horizon 2000 et la prochaine décennie sera consacrée à des études à caractère technologique et méthodologique, ainsi qu'à des recherches concernant l'utilisation des données (cartographie, modélisation).

I - INTRODUCTION

L'état hydrique des sols intéresse à la fois agronomes, pédologues, hydrologues, climatologues..., qui ont besoin de données concernant son évolution, par exemple dans le cadre de recherches relevant du cycle de l'eau ou bien d'études concernant des problèmes plus concrets d'aménagement.

De nombreuses méthodes ont ainsi été proposées permettant de mesurer l'humidité des sols, soit à partir d'échantillons prélevés sur le terrain, soit en opérant "in situ" en utilisant des capteurs appropriés (NORMAND M., 1970).

Parmi celles-ci figurent la méthode neutronique (GREACEN E.L., 1981), très utilisée malgré la présence d'une source radio-active, et des méthodes fondées sur les variations de certaines propriétés physiques dépendant de l'humidité, comme les propriétés thermiques pour la méthode des chocs thermiques (POUYAUD B., 1975), ou diélectriques pour les méthodes capacitatives (DEAN T.J. et al, 1987)) et par réflectométrie temporelle (TOPP G.C., 1985).

Ces méthodes, ponctuelles ou locales, plus ou moins précises, fiables, et commodes d'emploi, sont bien adaptées à l'échelle de la parcelle, mais ne le sont plus ou mal, à l'échelle du bassin versant ou de la région lorsque la variabilité spatiale de l'état hydrique prend toute son importance (VAUCLIN M., 1985).

Pour essayer de résoudre ce type de problème, des recherches se poursuivent depuis une vingtaine d'années sur les possibilités d'utiliser la télédétection pour mesurer l'état hydrique superficiel des sols, et de mettre au point des méthodes

destinées à être complémentaires des méthodes "in situ" et non à se substituer à elles dans tous les cas.

Des travaux ont d'abord porté sur les domaines visible (IDSO S.B. et al, 1975a) et infra-rouge (IDSO S.B. et al, 1975b). Les études réalisées en infra-rouge thermique ont montré leur grand intérêt dans l'estimation de l'évapo-transpiration, et donc indirectement de l'évolution de l'état hydrique des sols (JACKSON R.D., 1981 ; SEGUIN B., 1984).

Cependant, la couverture nuageuse limite considérablement leur utilisation pour certaines périodes et régions du globe.

Il en est autrement avec les hyperfréquences (ou micro-ondes) qui, au-dessous de 15 GHz, sont quasi-insensibles à l'état de l'atmosphère. A cet avantage primordial s'ajoutent, à ces fréquences, une indépendance vis-à-vis de l'éclairement du soleil (pour les systèmes actifs), une capacité de pénétration à travers le couvert végétal et le sol lui-même, et le rôle particulier joué par les propriétés diélectriques du sol, que l'on sait dépendre de la teneur en eau.

Aussi, depuis une quinzaine d'années les potentialités de la télédétection en hyperfréquences dans le domaine de l'état hydrique des sols ont été étudiées, à l'aide de systèmes passifs ou de systèmes actifs (ULABY F.T. et al, 1986).

La télédétection en micro-ondes passives a démontré sa capacité à mesurer l'humidité superficielle, mais le développement de cette méthode est fortement limité, avec les capteurs actuels, par des problèmes de faible résolution (plusieurs dizaines de kilomètres) à partir de plateformes spatiales (JACKSON T.J., 1989).

La télédétection par radar, qui n'a pas ce type de contrainte, a suscité de nombreux travaux à travers le monde, aux Etats-Unis (DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986) et en Europe, en particulier en France (LE TOAN T. et al 1981 ; BERNARD R. et al 1982 ; BRUCKLER L. et al 1988). Dans cet exposé, nous tenterons de faire le point sur ces recherches menées dans la perspective de systèmes spatiaux opérationnels, et sur les applications possibles de ce mode d'observation de la terre.

II - LA MESURE ET SES CONTRAINTES

II.1 - Principe de la mesure radar

Le radar émet un signal électromagnétique hyperfréquence vers une cible constituée par la surface du sol et, enregistre simultanément la puissance émise (P_e) et la puissance du signal rétrodiffusé, dans une direction privilégiée qui est la direction du signal incident. Ce signal "rétrodiffusé", par ses caractéristiques propres (fréquence, polarisation), transporte des informations acquises au moment de l'interaction des signaux incidents avec la surface du sol. La puissance reçue (P_r), dépend donc à la fois des caractéristiques de la configuration radar (fréquence, incidence, polarisation) et du pouvoir de rétrodiffusion de la surface cible étudiée. La puissance reçue P_r est reliée aux caractéristiques du radar et de la cible par "l'équation radar" :

$$Pr = \alpha Pe \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{Ge Gr}{d^4} \sigma \quad (1)$$

où λ est la longueur d'onde utilisée, α un coefficient prenant en compte les pertes de l'électronique en dehors des antennes, Ge et Gr les gains des antennes d'émission et de réception dans la direction d'observation, d la distance séparant le radar de la cible et σ la section efficace de rétrodiffusion.

Pour une configuration donnée de la mesure, la valeur du coefficient de rétrodiffusion radar (section efficace par m^2 , σ_0) est obtenue par la résolution de l'équation radar. On démontre ainsi que ce coefficient de rétrodiffusion est une variable proportionnelle au rapport des puissances reçue et émise. Cette grandeur est exprimée généralement en décibels (dB) du fait de sa grande dynamique.

C'est à partir de cette même grandeur, que l'on déduit les propriétés radioélectriques du milieu observé.

La télédétection en hyperfréquences actives consiste à établir les relations existant entre les coefficients de rétrodiffusion mesurés et des grandeurs physiques, telles que l'humidité du sol, en choisissant les configurations radar minimisant les autres facteurs (rugosité, végétation) susceptibles de perturber cette mesure, ou permettant d'en tenir compte.

Ces influences multiples intervenant dans la valeur du signal radar sont dues à la complexité des phénomènes d'interaction à la transition air-surface (réflexion, transmission, diffusion de volume), dont on peut trouver une analyse dans Ulaby et al (1986).

II.2 - Rôle de l'humidité du sol

La forte influence de l'humidité superficielle du sol sur le signal radar rétrodiffusé provient du contraste important existant entre les permittivités réelles respectives de l'eau (≈ 80), du sol sec (2 à 7), et de l'air (1), dans la gamme des hyperfréquences de l'ordre de 1 à 5 GHz, ce contraste diminuant aux fréquences plus élevées (Fig.1) (ULABY et al, 1986).

Les études théoriques et expérimentales (radars diffusomètres montés sur des grues ou aéroportés) menées par différentes équipes (DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986 ; BRUKLER L. et WITONO H., 1989) ont montré que pour une configuration radar donnée (fréquence, polarisation, angle d'incidence) et un état de surface (rugosité) de sol nu donné, la relation entre l'humidité volumique (H_v) d'une couche superficielle de sol (5 cm environ) et la section efficace de rétrodiffusion par m^2 , exprimée en dB, était sensiblement linéaire :

$$H_v = a \sigma_0 \text{ (dB)} + b \quad (2)$$

En réalité, l'épaisseur de sol concernée par la mesure radar est variable selon l'humidité.

Il a été montré (par exemple BRUKLER L. et WITONO H., 1989) que ce sont les couches proches de la surface qui ont le plus d'influence et que la profondeur de pénétration augmente (ou diminue) selon que l'humidité décroît (ou croît). L'épaisseur de 5 cm adoptée par les expérimentateurs est un bon compromis en présence de gradients d'humidité variés.

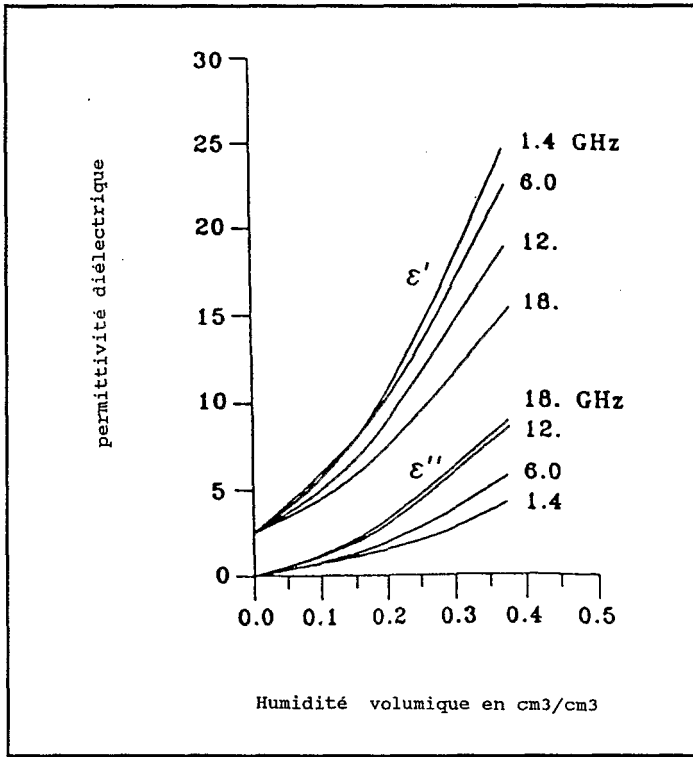


Figure 1 - Permittivité d'un sol limoneux en fonction de l'humidité volumique pour différentes fréquences (ULABY et al, 1986).

La linéarité de la relation (2) n'est plus vérifiée aux teneurs en eau proches de la saturation, pour lesquelles la sensibilité diminue. Lorsque le sol est saturé et en présence de flaques d'eau, le comportement spéculaire de la surface conduit même à une décroissance du signal rétrodiffusé (DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986 ; BRUN C. et al 1990).

Un paramètre important de la configuration radar influant sur la relation (2) est la fréquence : les fréquences faibles (1 à 8 GHz, correspondant aux bandes L, S et C) donnent de meilleures sensibilités aux variations d'humidité que les fréquences plus élevées (bande X et au-delà, soit à partir de 8 GHz environ). La sensibilité décroît également lorsque l'angle d'incidence augmente. La polarisation, si elle est la même à la réception qu'à l'émission, semble avoir par contre peu d'influence, sur sols nus tout au moins.

II.3 - Influence de l'état de surface du sol

L'influence de l'état de surface du sol (rugosité, sillons) est complexe mais ses mécanismes sont maintenant relativement bien compris. On considère généralement que ses variations affectent non la pente mais l'ordonnée à l'origine de l'équation (2) (DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986). L'influence de la rugosité aléatoire diminue lorsque la fréquence augmente, et elle est considérée comme minimale pour des angles d'incidence de l'ordre de 7° à 15°.

Par ailleurs, la présence de structures régulières (sillons, lignes de semis) provoque un phénomène de résonance qui amplifie le signal lorsque les directions d'observation leur sont quasi-perpendiculaires. Ce phénomène qui est plus important pour les faibles rugosités, décroît lorsque la fréquence augmente. Il peut rendre difficile l'interprétation d'images à haute résolution en termes d'humidité à certaines époques de l'année, mais il peut être fortement réduit par l'utilisation de polarisations croisées (DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986).

II.4 - Influence de la végétation

La végétation qui absorbe et diffuse le signal radar, introduit, dans la mesure de l'humidité du sol, un effet parasite dépendant de la quantité de matière végétale traversée. Cet effet est plus important lorsque la fréquence augmente. Au contraire, aux fréquences plus faibles, le signal pénètre plus facilement à travers la végétation pour atteindre le sol, rendant possible la mesure de l'humidité (sauf sous des couverts très épais tels que forêts).

Pour minimiser l'influence de la végétation, la fréquence doit être de l'ordre de 5 GHz (ou au-dessous), l'angle d'incidence ne doit pas dépasser 20°, et il est préférable d'utiliser une polarisation horizontale à l'émission et à la réception (HH)(DOBSON M.C. et ULABY F.T., 1986).

II.5 - Configuration optimale pour la mesure de l'humidité superficielle par radar

En choisissant judicieusement les paramètres instrumentaux, on peut minimiser les influences perturbant la mesure de l'humidité du sol et obtenir une configuration considérée comme "optimale" :

- fréquence : bande C (soit, dans la plage 4 à 8 GHz, fréquence proche de 5 GHz)
- angles d'incidence : 10° - 20°
- polarisation : HH

Les expériences réalisées avec ce type de configuration ont permis d'obtenir pour la relation (2) des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,9 sur parcelle de sol nu avec un diffusomètre installé sur grue (ULABY F.T. et al, 1986 ; BRUKLER L. et WITONO H., 1989) et de l'ordre de 0,7 à 0,9 sur un ensemble de parcelles cultivées avec un diffusomètre aéroporté, (COPPO et al, 1990 ; ULABY et al, 1986).

Un exemple d'étalonnage d'un radar aéroporté (1ère version du radar ERASME du CRPE) dans une configuration sensiblement optimale (5 GHz, 15°, HH), réalisé sur des parcelles cultivées (blé, maïs), est donné sur la figure 2 (JARRY et al, 1988).

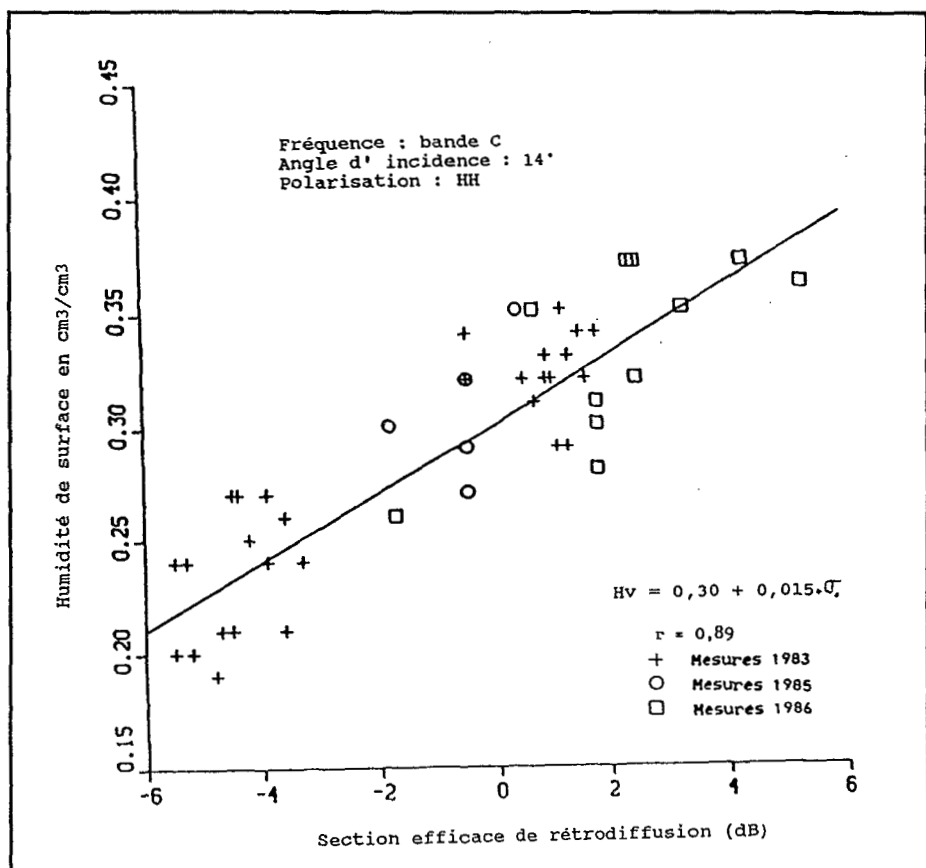


Figure 2 - Etalonnage du radar ERASME pour les expériences menées respectivement dans la Beauce en 1983 et sur Bassin de l'Orgeval en 1985 et 1986.

Un autre exemple montre la variation du coefficient de corrélation entre le signal rétrodiffusé à 5 GHz et 10 GHz (bandes C et X) et l'humidité superficielle des sols entre 15° et 40° d'incidence (figure 3). Ces résultats ont été obtenus avec la version actuelle multiconfiguration du radar ERASME (BERNARD R. et VIDAL-MADJAR D., 1989), également sur des parcelles cultivées (blé, maïs). En bande C, le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7 pour les angles inférieurs à 30° et décroît ensuite. En bande X, le signal radar rétrodiffusé est faiblement corrélé avec l'humidité du sol. Cependant, ces travaux tendent aussi à montrer la possibilité d'améliorer la détermination de l'humidité superficielle en combinant les informations obtenues au même endroit, mais avec différentes configurations (BENALLEGUE M., 1990).

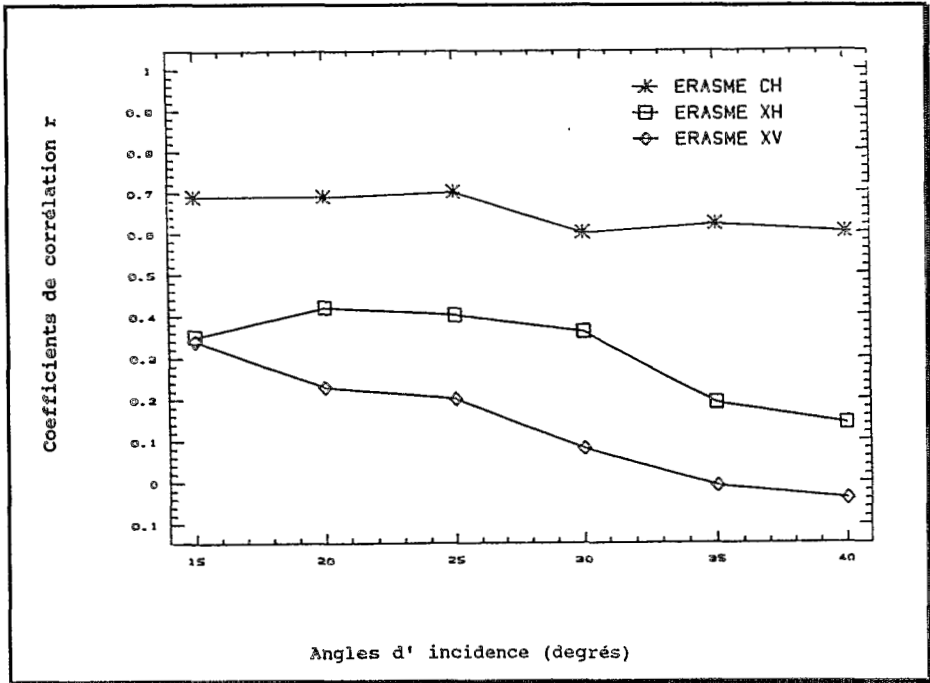


Figure 3 - Variation du coefficient de corrélation (humidité volumique - section efficace de rétrodiffusion) en fonction de la configuration radar.

III - APPLICATIONS ET PERSPECTIVES D'AVENIR

III.1 - Evolution spatio-temporelle de l'humidité superficielle

La capacité de mesurer l'humidité superficielle du sol par radar est réelle, malgré les incertitudes dues aux problèmes d'état de surface et de végétation.

Sans atteindre la précision des méthodes de mesure "in situ", les résultats obtenus sont suffisamment intéressants pour espérer pouvoir établir depuis l'espace des cartes d'état hydrique superficiel, pour suivre, et ensuite modéliser leur évolution spatio-temporelle, quelque soit le couvert nuageux, le pas de temps ne dépendant plus des conditions météorologiques mais de la fréquence de passage du satellite.

A condition d'adopter une configuration favorable, les diffusomètres aéroportés, simulateurs de radars embarquables sur plateformes spatiales, montrent déjà cette aptitude au suivi de l'humidité selon des axes de vol traversant de petits bassins versants.

Ce type de radar ayant à faible altitude une très bonne résolution (une dizaine de mètres), il est alors possible de travailler à l'échelle de la parcelle et d'observer par exemple les réponses contrastées aux événements pluvieux en présence de végétation ou de sol nu (JARRY et al, 1988). Cependant, l'intégration des données radar à une échelle plus importante devrait permettre de limiter les effets de rugosité par moyennage, comme semblent le montrer les résultats significatifs de

l'évolution de l'humidité de surface obtenus par SOARES et al (1987) dans la Beauce sur sol nu (fig. 4), ou par JARRY et al (1988), sur un bassin versant de 7 km.²

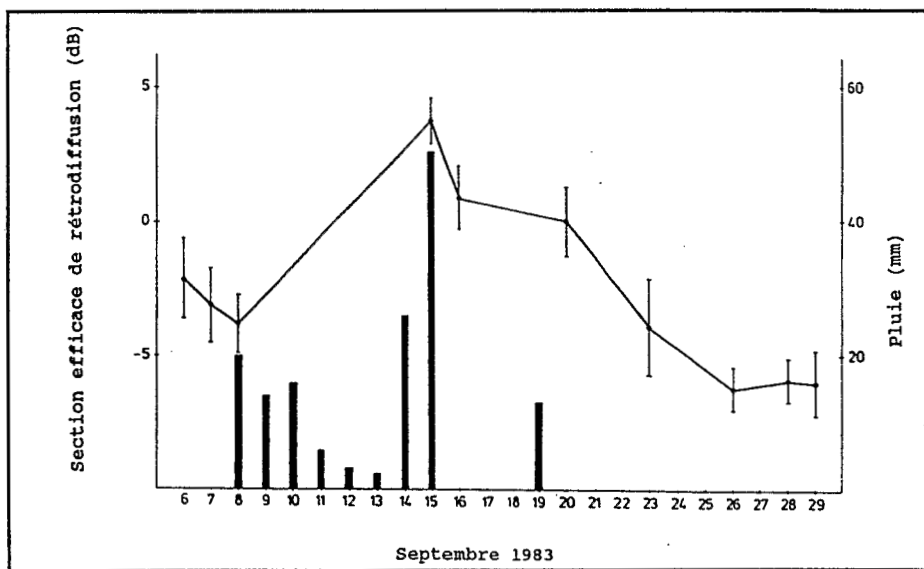


Figure 4 - Evolution du signal radar rétrodiffusé sur sol nu (moyenne et écart-type de 6 parcelles).

Les expériences aéroportées, compte tenu de leur coût et de leurs difficultés de mise en oeuvre, ne permettent cependant pas l'acquisition de longues séries de données nécessaires pour certaines applications (hydrologiques, par exemple). Elles ont néanmoins l'intérêt de préciser certaines contraintes et limites de la méthode, de tester en vraie grandeur les choix techniques adoptés, de représenter des simulations pour les futures missions satellitaires, et de vérifier la faisabilité des applications envisagées.

Dans cet esprit, la campagne européenne aéroportée AGRISCATT'88, organisée par l'Agence Spatiale Européenne, a permis d'observer sur le site français (bassin de l'Orgeval), au cours des mois de Juin et Juillet 1988 des variations d'humidité le long d'un transect de 17 km en utilisant le radar ERASME multiconfiguration, et d'étudier la variabilité spatiale du signal rétrodiffusé. La similitude existant entre la portée des semi-variogrammes et la moyenne des longueurs des parcelles traversées par l'axe de vol, semble montrer que ces parcelles présentent des comportements hydriques homogènes fonction probablement des interactions sol-couvert végétal-atmosphère (Fig.5) (NORMAND et al, 1990).

Ce type d'expérimentation a été poursuivi en 1989 sur une plus longue durée, dix mois au total, l'ensemble des données sol (humidité, rugosité, végétation) et radar constituant une base de données dont le traitement devrait aider à éclairer certains des problèmes évoqués précédemment, l'influence de la rugosité, notamment. Le problème de la végétation constitue un volet particulier de ces études, selon que l'on étudie son influence parasite sur la détermination de l'humidité ou ses propres caractéristiques en choisissant convenablement la configuration ou en profitant de la complémentarité des informations radar (PREVOT, 1988). La durée des expériences sur une grande partie d'un cycle

hydrologique pourra fournir également des éléments sur le rôle de l'état hydrique du sol dans la réponse hydrologique du bassin versant.

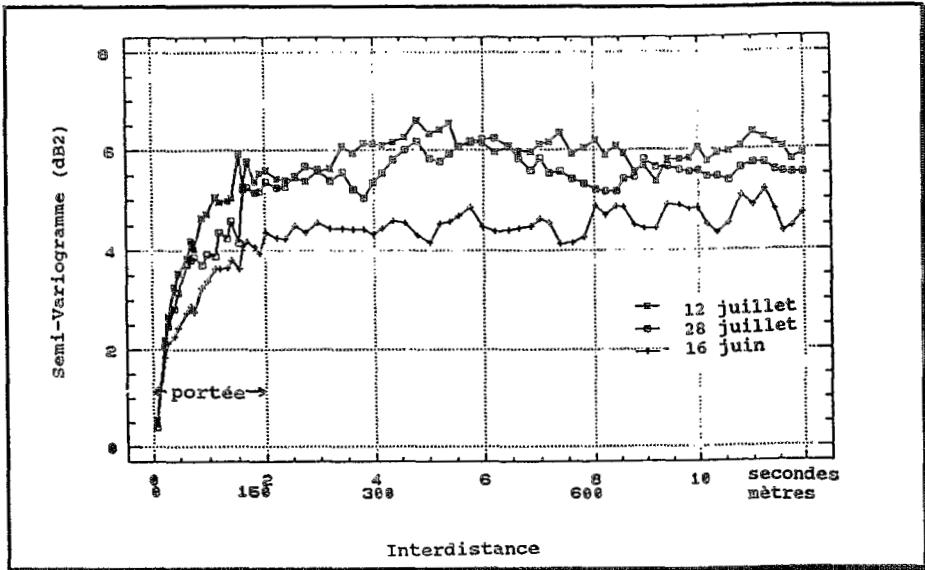


Figure 5 - Variabilité spatiale du signal rétrodiffusé le long de l'axe de vol .
AGRISCATT'88

III. 2 - Zones de sols saturés

Une autre application hydrologique possible a pu aussi être testée à l'échelle d'un petit bassin versant de Bretagne (NAIZIN) : il s'agit de la détermination des variations d'extension des zones de sols saturés en utilisant un effet de seuil consécutif à la chute du coefficient de rétrodiffusion due au comportement spéculaire de ces surfaces. Les résultats, en bon accord avec les données de terrain, sont prometteurs pour l'étude de l'influence de ces zones saturées sur le régime des crues et son utilisation dans un modèle hydrologique de prévision (BRUN et al, 1989).

III.3 - Etat hydrique régional

L'estimation de l'état hydrique du sol sur une épaisseur plus importante que celle qui est accessible à la mesure radar est souvent nécessaire dans les différentes disciplines citées en introduction, et particulièrement en hydrologie, comme les travaux de LOUMAGNE et al (1990) l'ont montré à partir d'un indicateur d'état hydrique ponctuel. Il est aussi important de pouvoir accéder à différentes échelles d'observation (GALLE et al, 1990).

Or, l'utilisation conjointe de la mesure de la température radiative de la surface, de la section efficace de rétrodiffusion radar et de données météorologiques peut permettre par inversion d'un modèle d'évolution du système sol et végétation, de calculer les flux de chaleur vers l'atmosphère ainsi qu'une grandeur assimilable à l'état hydrique du premier mètre de sol (zone racinaire) (SOARES et al, 1988).

De nombreuses études ont déjà montré dans ce domaine l'intérêt fondamental des données en infra-rouge thermique (températures de surface) obtenues par les satellites météorologiques (série NOAA) (TACONET et VIDAL-MADJAR, 1988 ; SEGUIN et ITIER, 1983 ; VIDAL et PERRIER, 1989).

Les informations concernant l'état hydrique superficiel obtenues par satellite radar devraient améliorer la restitution de l'état hydrique régional, à condition de connaître la densité de la végétation (BEN MEHREZ et al, 1990), donnée accessible depuis l'espace (indice de végétation normalisé).

La connaissance des états hydriques régionaux des sols a d'importantes applications, non seulement en hydrologie (prévision des ressources en eau, OTTLE et al, 1989), mais également en climatologie, (évolution climatique de la planète, ANDRE et al, 1990).

III.4 - Radars aéroportés et satellisés

Différents pays conduisent des expériences aéroportées analogues à celles décrites ci-dessus. Citons les PAYS-BAS, avec le diffusomètre multiconfiguration DUTSCAT et plusieurs pays qui ont construit des radars imageurs à ouverture synthétique (ROS ou SAR) : la FRANCE avec le VARAN du CNES, l'ALLEMAGNE, le DANEMARK, le CANADA, et les ETATS-UNIS (NASA/JPL) qui organisent en 1991 des campagnes aéroportées sur des sites européens (dont la FRANCE). Ces instruments préfigurent les futurs radars spatiaux des années à venir. Dans le domaine civil, il existe peu d'exemples d'observations de la Terre par radar depuis l'espace, et seulement pour des durées courtes (3 mois pour SEASAT en 1978, de l'ordre de la semaine pour SIR-A et SIR-B avec la navette spatiale de la NASA en 1981 et 1984).

A partir de 1991, plusieurs lancements sont prévus :

- ALMAZ, satellite soviétique en avril 1991 (bande S) ;
- ERS.1 de l'Agence Spatiale Européenne en mai 1991 (bande C), qui sera suivi ultérieurement de ERS.2 identique au premier ;
- J.ERS.1 (JAPON) en 1992 (bande L) ;
- RADARSAT (CANADA) en 1994 (bande C).

La NASA lancera de nouveau une navette équipée d'un radar à synthèse d'ouverture dans le cadre de l'expérience SIR C/X-SAR (en 1993 et 1994).

Des projets plus lointains existent, comme le projet EOS (Earth Observing System) satellite complet d'observation de la Terre à des fins climatiques et de gestion des ressources renouvelables, ainsi que le projet du CNES du radar spatial 2000 dont les différents domaines d'application sont étudiés tant dans le domaine maritime que des terres émergées, par un groupe de travail (GARS) mis en place par cet organisme.

Ces derniers instruments devraient donner aux différents utilisateurs les moyens de mettre en oeuvre de façon opérationnelle des méthodes testées d'abord par les moyens aéroportés, puis par les satellites lancés préalablement, dont la vocation est surtout océanographique.

IV - CONCLUSION

La télédétection en hyperfréquences actives a montré, au travers des nombreuses recherches déjà réalisées, l'intérêt qu'elle présente dans le domaine de l'état hydrique des sols, parmi d'autres applications non traitées dans cette note.

La définition des paramètres instrumentaux a été étudiée avec soin pour minimiser l'influence des autres facteurs perturbant la mesure (état de surface du sol et végétation principalement), mais il reste encore des progrès à faire dans la recherche de la meilleure précision possible selon l'échelle de mesure.

Parallèlement au lancement, à partir de 1991, de satellites équipés de radars à ouverture synthétique, les études au moyen de radars aéroportés se poursuivront pour aider à l'interprétation des images obtenues depuis l'espace.

Il faut souligner la complémentarité des divers apports possibles de la télédétection et de la modélisation pour accéder à la connaissance de l'état hydrique régional. Les applications de ce type de donnée n'ont pas été évoquées ici de manière exhaustive, et semblent ressortir essentiellement des domaines hydrologique et climatologique.

Mais il reste, avant le lancement de systèmes d'observation complets vers les années 2000, à améliorer les outils permettant d'utiliser les données et les modèles capables de les intégrer.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier l'équipe du Département Observation de la Terre du Centre de Recherches en Physique de l'Environnement dirigée par Daniel VIDAL-MADJAR, ainsi que Sylvie GALLE, Hydrologue à l'ORSTOM, Laurent PREVOT du Département Bioclimatologie de l'INRA, et tous les collègues et stagiaires du CEMAGREF qui ont contribué aux expérimentations radar aéroportées ou à la préparation de cette note.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRE J.C., BESSEMOULIN P., GOUTORBE J.P., NOILHAN J. - 1990 Interactions entre climat, processus de surface continentale, cycle de l'eau et variations d'humidité des sols. *La Météorologie*, n°33, pp.10-19.
- BENALLEGUE M. - 1990 Télédétection radar et humidité superficielle du sol. Premiers résultats de la campagne "AGRISCATT'88" sur le bassin de l'ORGEVAL. Mémoire de DEA Ressources en Eau. Université PARIS-SUD, CEMAGREF, 133p.
- BEN MEHREZ M., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., VALENCOGNE C. - 1990 Estimation of canopy resistance during HAPEX-MOBILHY experiment. *Soumis à Agric. For.Meteor.*
- BERNARD R., MARTIN P., THONY J.L., VAUCLIN M., VIDAL-MADJAR D. - 1982 C-band radar for determining surface soil moisture. *Remote Sens. Environ.*, 12, pp.189-200.
- BERNARD R., VIDAL-MADJAR D. - 1989 L'observation de la Terre par radar. *L'Echo des Recherches*, n°136, pp. 3-14.
- BRUCKLER L., WITONO H., STENGEL P. - 1988 Near surface soil moisture estimation from microwave measurements. *Remote Sens. Environ.* 26, pp. 101-121.
- BRUCKLER L., WITONO H. - 1989 Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil-atmosphere water transport modeling. 2. Estimating soil water balance. *Wat. Resour. Res.* 25, n°12, pp.2437-2447.
- BRUN C., BERNARD R., VIDAL-MADJAR D., GASCUEL-ODOUX C., MEROT P., DUCHESNE J., NICOLAS H. - 1990 Mapping saturated areas with a helicopter-borne C-band scatterometer. *Wat. Resour. Res.* vol.26, n°5, pp.945-955.
- COPPO P., FERRAZZOLI P., PALOSCIA S., PAMPALONI, SCHIAVON G., SOLIMINI D. - 1990 Sensitivity of active and passive microwave sensors to soil moisture of vegetated fields. In "Remote Sensing Science for the Nineties, IGARSS'90" WASHINGTON, D.C., vol.III, pp.1851-1854.
- DEAN T.J., BELL J.P., BATY A.J.B - 1987 Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. *J. of Hydrology*, vol 93, pp.67-90.
- DOBSON M.C., ULABY F.T. - 1986 Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing*, vol.24, n°1, pp.23-36.
- GALLE S., NORMAND M., LOUMAGNE C. - 1990 Soil moisture assessment at two different scales on a small experimental basin. "Hydrological research basins and the environment, International Conference, WAGENINGEN, NL, Sept. 10p.

- GREACEN E.L. - 1981 Soil water assessment by the neutron method. CSIRO, AUSTRALIA, 140 p.
- IDSO S.B., JACKSON R.D., REGINATO R.J., KIMBALL B.A., NAKAYAMA F.S. - 1975a The dependance of soil albedo on soil water content. *J. Appl. Met.*, 14, pp.109-113.
- IDSO S.B., SCHMUGGE T.J., JACKSON R.D., REGINATO R.J. - 1975b The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of soil water status. *J. Geophys. Res.*, 80, pp.3044-3049.
- JACKSON R.D., IDSO S.B., REGINATO R.J., PINTER P. - 1981 Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Wat. Resour. Res.*, 17, pp.1133-1138.
- JACKSON T.J., SCHMUGGE T.J. - 1989 Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research. *IEEE. Trans. Geos. Remote Sensing*, vol.27, n°2, 225-235.
- JARRY F., NORMAND M., BERNARD R., VIDAL-MADJAR D. - 1988 Observation de la réponse de surfaces agricoles aux pluies par télédétection en hyperfréquence active aéroportée. *Hydrol. Continent.* vol 3, n°2, pp.75-87.
- LE TOAN T., PAUSADER M., FLOUZAT G., FLUHR A. - 1981 Soil moisture content and microwave backscatter in the 1.5-9 GHz region. *Intern. Geos. Remote Sensing Symposium, AGU, WASHINGTON, D.C.*
- LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1991 Etat hydrique du sol et prévision des débits. *J. of Hydrology*, 123, pp.1-17.
- NORMAND M. - 1970 La mesure de l'humidité du sol. Application aux problèmes d'hydraulique agricole. *Bulletin Technique du Génie Rural*, n°103, 233p.
- NORMAND M., GALLE S., DECHAMBRE M., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., PREVOT L. - 1990 Applicability of the active microwave remote sensing method in water resources : The AGRISCATT'88 airborne campaign on the ORGEVAL watershed. In "Proceedings International Symposium Remote Sensing and Water Resources, ENSCHEDE, N.L., August 1990, pp.903-912.
- OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., GIRARD G. - 1989 Remote Sensing applications to Hydrological modeling. *J. of Hydrology*, 105, pp.369-384.
- POUYAUD B. - 1975 La mesure de l'humidité du sol par chocs thermiques. *Cah. ORSTOM, Série Hydrologie*, vol XII, n°4, pp.259-284
- PREVOT L. - 1990 Interactions des hyperfréquences avec les couverts végétaux. In "Télédétection Spatiale : Aspects physiques et modélisation". CEPADUES-Editions, TOULOUSE, pp.753-789.

- SEGUIN B., ITIER B. - 1983 Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Remote Sensing*, 4, n°2, pp.371-383.
- SEGUIN B. - 1984 Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'infra-rouge thermique. In "Proceedings of the 2nd Colloquium on Spectral Signatures in Remote Sensing", INRA, PARIS, n°23, pp.427-447.
- SOARES J.V., BERNARD R., VIDAL-MADJAR D. - 1987 Spatial and temporal behaviour of a large agricultural area as observed from airborne C-band scatterometer and thermal infrared radiometer. *Int. J. Remote Sensing*, 8, n°7, pp.981-996.
- SOARES J.V., BERNARD R., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., WEILL A. - 1988 Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *J. of Hydrol.* 99, pp. 281-296.
- TACONET O., VIDAL-MADJAR D. - 1998 Application of a flux algorithm to a field satellite campaign over vegetated area. *Remote Sens. Environ.* 26, n°3, pp.227-239.
- TOPP G.C., DAVIS J.L. - 1985 Time domain reflectometry and its application to irrigation scheduling. *Advances in irrigation*, vol 3, pp. 107-127.
- ULABY F.T., MOORE R.K., FUNG A. - 1986 Microwave remote sensing. Active and passive, 3 vol. Artech House Ed. 2162p.
- VAUCLIN M. - 1985 L'humidité des sols en hydrologie : intérêt et limitation de la télédétection. In "Hydrological application of remote sensing and remote data transmission". IAHS Publication n°145, pp.511-527.
- VIDAL A., PERRIER A. - 1989 Analysis of a simplified relation to estimate daily evapotranspiration from satellite IR data. *Int. J. Remote Sensing*, 10, n°8, pp. 1327-1337.