

# UTILISATION DE L'OBSERVATION SPATIALE POUR L'ESTIMATION DE L'ÉTAT HYDRIQUE DES SOLS ET LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

M. NORMAND<sup>1</sup>, C. CANN<sup>2</sup>, N. CHKIR<sup>1</sup>, A.L. COGNARD<sup>1</sup>, M.C. IMBERTI<sup>3</sup>,  
C. LOUMAGNE<sup>1</sup>, C. OTTLÉ<sup>4</sup>, A. VIDAL<sup>5</sup>, D. VIDAL-MADJAR<sup>4</sup>

---

## RÉSUMÉ

L'objet de cet article est de présenter la méthodologie et les premiers résultats d'un projet d'utilisation de données de télédétection pour estimer l'état hydrique des sols en vue de l'assimilation de cette variable dans un modèle hydrologique de prévision des ressources en eau superficielles. La méthodologie consiste à déduire, à partir des données du radar d'ERS.1 et de données dans le visible et l'infrarouge thermique, l'évolution de l'état hydrique moyen de bassins versants agricoles. Pour intégrer cette variable, un modèle simulant les débits et les humidités des couches superficielle et racinaire a été mis au point en partant d'un modèle conceptuel global et d'un modèle sol/végétation/atmosphère. Les résultats présentés concernent l'étalonnage du radar d'ERS.1 en terme d'humidité de surface, effectué sur le BVRE de Naizin en Bretagne centrale. Une bonne corrélation entre les données radar et l'humidité du sol existe pendant les mois de faible couvert végétal (1992-1993). La relation obtenue sur Naizin a été extrapolée à d'autres bassins versants en Bretagne et a permis une cartographie de l'évolution de leur humidité de surface moyenne pendant l'hiver 1992. L'exploitation des données radar des mois de fort couvert végétal suppose la recherche d'une méthode de correction de l'effet dû à la végétation. Quelques résultats de l'application du modèle sur les bassins bretons sont présentés. Ils sont

---

<sup>1</sup>Cemagref, Division Hydrologie, BP 121, 92185 Antony.

<sup>2</sup>Cemagref, Division Déchets solides, 17 av. de Cucillé, 35044 Rennes.

<sup>3</sup>Geosys, Parc Technologique de Toulouse, 31526 Ramonville.

<sup>4</sup>CETP, Centre Universitaire, 10/12, Avenue de l'Europe, 78140 Velizy.

<sup>5</sup>LCT, Cemagref-Engref, Maison de la Télédétection, 34093 Montpellier cedex 5.

en moyenne satisfaisants en matière de simulation de débit. On observe aussi une assez bonne concordance entre l'état hydrique de surface simulé du bassin de Naizin et l'évolution du signal radar en 1992. Ces résultats sont prometteurs pour l'utilisation des données du radar d'ERS.1, ultérieurement couplées à des données NOAA pour le suivi de l'humidité globale du sol et son assimilation dans le modèle hydrologique.

## INTRODUCTION

La connaissance de l'état hydrique des sols et de son évolution temporelle et spatiale est une information importante dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants et de sa modélisation. Les différents processus d'écoulement et de transfert dépendent en effet, au moins en partie, du degré de saturation du bassin dont l'état hydrique des sols est un bon indicateur. L'intérêt de la prise en compte de ce type de données a déjà été montré en utilisant des mesures d'humidité du sol ponctuelles au pas-de-temps journalier dans un modèle hydrologique global (LOUMAGNE *et al.*, 1991). La télédétection offre potentiellement des moyens d'obtenir cette information à l'échelle des bassins versants soit en valeur moyenne soit de manière spatialisée : la télédétection dans le domaine des micro-ondes actives peut sous certaines conditions donner accès à l'humidité des premiers centimètres de sol (ULABY *et al.*, 1986, BENALLÈGUE *et al.*, 1994, BERNARD *et al.*, 1984). La thermographie infrarouge thermique permet d'accéder à l'évapotranspiration réelle donc à l'état hydrique de la zone racinaire dans le cas d'un couvert végétal dense (CARLSON, 1986, SOARÈS *et al.*, 1988, TACONET et VIDAL-MADJAR, 1988).

Depuis le lancement du satellite ERS.1 en 1991, il est maintenant possible d'étudier la mise au point d'une méthode d'utilisation conjointe de ces deux gammes de longueur d'onde pour le suivi de l'humidité du sol : données *tout temps* du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) d'ERS.1 et données NOAA/AVHRR.

Cette approche fait l'objet d'un projet-pilote de l'Agence Spatiale Européenne dont le but est d'abord l'estimation de l'état hydrique de petits bassins versants agricoles à l'aide de l'observation spatiale, en vue ensuite d'une assimilation de ces données dans un modèle hydrologique. Cet article concerne la partie réalisée de cette étude relative à l'interprétation des données d'ERS.1 en terme d'humidité de surface, ainsi qu'une présentation de quelques résultats du modèle hydrologique mis au point à cette occasion.

## MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DU PROJET

La méthodologie générale du projet est représentée schématiquement sur la figure 1. La méthode d'estimation de l'état hydrique du sol par télédétection, évoquée en introduction, repose sur l'inversion d'un modèle décrivant le bilan énergétique de l'interface sol/végétation/atmosphère (BEN MEHREZ *et al.*, 1992a, 1992b). Ce modèle permet de simuler la température de surface, qui peut être mesurée depuis l'espace avec les capteurs en infrarouge thermique de l'AVHRR des satellites de la série NOAA. En utilisant conjointement des mesures météorologiques classiques au sol (vent, température et humidité de l'air, pluies), on a accès ensuite à l'évapotranspiration réelle et donc à l'état hydrique de la couche racinaire en période de couvert végétal important.

Cette méthode a été testée dans le cadre de l'expérience Hapex-Mobilhy (OTTLÉ et VIDAL-MADJAR, 1994) sur le bassin de l'Adour. Les auteurs ont montré que grâce à l'humidité du sol dérivée des données spatiales on pouvait réinitialiser le réservoir de surface d'un modèle hydrologique distribué et améliorer la simulation des débits, spécialement à la reprise des écoulements en fin de période estivale.

L'estimation simultanée de la température de surface, et de la teneur en eau de surface à partir de mesures par radar, peut permettre de séparer la transpiration de la végétation de l'évaporation du sol, et d'améliorer les bilans hydriques dans le cas de couvert végétal partiel. Un indice de partition peut être calculé, mais il faut connaître la densité du couvert en utilisant par exemple la mesure de l'indice de végétation normalisé (canaux visibles et proches infrarouge de l'AVHRR).

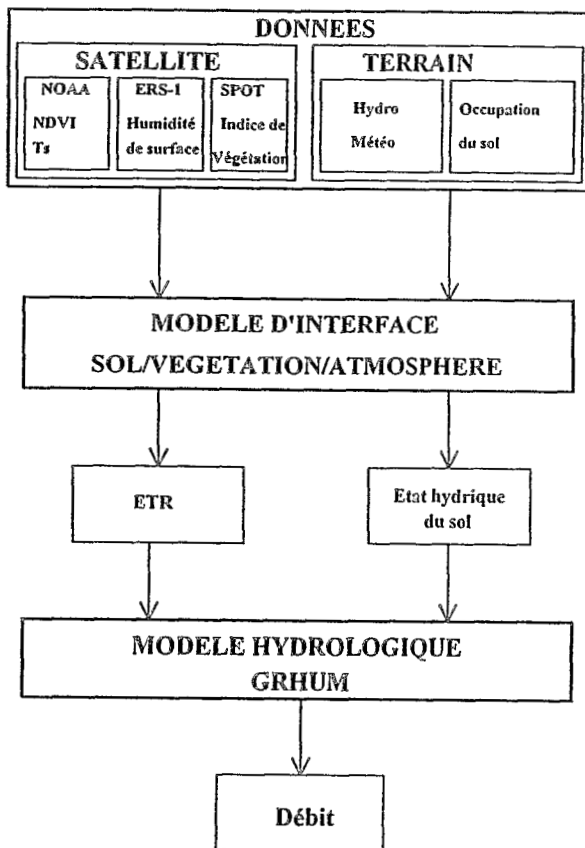
Un des premiers objectifs est donc d'étudier l'aptitude d'ERS.1 à l'estimation de l'humidité de surface, malgré des conditions d'observation radar non optimales (angle d'incidence un peu élevé en particulier).

Un second volet de l'étude est la mise au point d'un modèle hydrologique pluie-débit capable de simuler et d'assimiler les données d'état hydrique du sol obtenues par télédétection. Cette étape a été menée en parallèle avec la précédente.

Le modèle intégrant l'état hydrique du sol (GRHUM) est issu d'un modèle de base GR4J (MAKHOLOUF et MICHEL, 1992) dont seule la fonction de production a été modifiée en tenant compte des acquis de l'expérience Hapex-Mobilhy (OTTLÉ et VIDAL-MADJAR, 1994). Les caractéristiques principales du nouveau modèle couplé GRHUM (CHKIR, 1994, LOUMAGNE *et al.*, 1994) sont les suivantes : seule une partie de la pluie alimente la fonction *sol*, la partie restante étant routée à l'exutoire via la fonction de transfert. Cette partition de la pluie dépend de l'état de saturation du sol. Celui-ci est subdivisé en deux couches, superficielle et globale ou racinaire, ayant un comportement différent vis-à-vis de l'évaporation et de l'infiltration, dépendant des caractéristiques du sol et de leur état hydrique. L'évaporation intéresse surtout la couche superficielle, la transpiration des

plantes concerne la couche globale. Le contenu en eau de la couche de surface, diffuse dans la couche globale, le processus dépendant de l'humidité de la couche superficielle. Le sol dans son ensemble produit un flux d'eau qui est repris par la fonction de transfert pour contribuer à la formation des débits à l'exutoire.

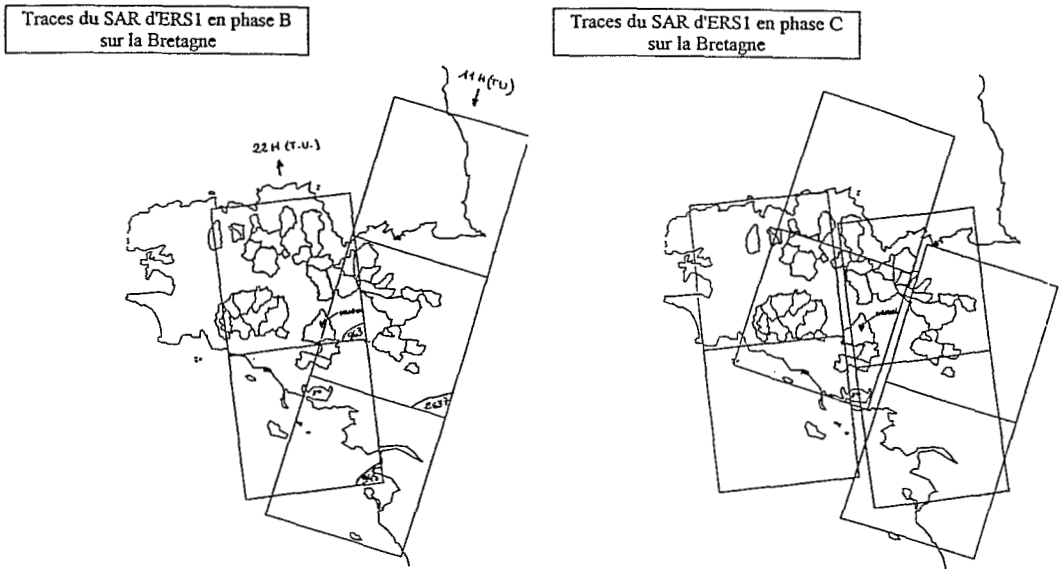
Le modèle GRHUM simule les humidités des couches superficielle et globale, et les débits. Il a été mis au point sur le bassin de l'Orgeval pour ensuite être utilisé dans le cadre du projet ERS. I. Le but recherché est de faire fonctionner le modèle en assimilation, non plus seulement à partir de données d'humidité ponctuelles, mais avec des données d'état hydrique obtenues par télédétection.



*Figure 1 :*  
Schéma méthodologique du projet-pilote.

## CADRE DE L'ÉTUDE

Le choix de la région d'étude a été conditionné par la possibilité d'obtenir des images ERS.1 en phase B avec une répétitivité d'observation de 3 jours, fréquence intéressante pour les applications hydrologiques. C'était le cas pour la Bretagne centrale à la croisée des traces montante et descendante de ce satellite, avec la possibilité de travailler sur environ 35 bassins versants hydrologiques (figure 2). Parmi ces bassins, le bassin versant du Coët-Dan à Naizin (Morbihan), géré par le Cemagref de Rennes, joue un rôle particulier car il fait partie du réseau des Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux (BVRE) : grâce à ses équipements spéciaux, il est utilisé pour l'étalonnage du RSO d'ERS.1 et pour tester le modèle hydrologique, les autres bassins permettant ensuite de valider la méthodologie.

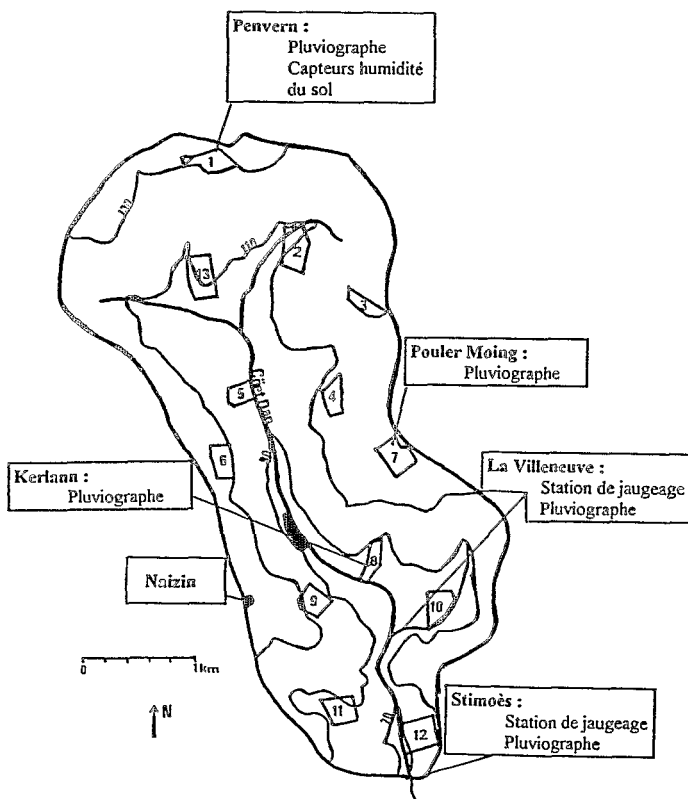


**Figure 2 :**

*Situation géographique des bassins versants et traces au sol des orbites d'ERS.1.*

Le bassin de Naizin (figure 3) correspond à la partie amont du Coët-Dan, petit affluent de l'Evel. Il s'agit d'un petit bassin agricole de forme allongée Nord-Sud (7 km de long sur 2 à 3 km de large), de 12 km<sup>2</sup> avec un relief assez peu marqué (altitude comprise entre 136 m et 65 m). Un plateau occupe la partie amont au Nord, le réseau hydrographique drainant étant plus encaissé vers l'aval. Le substratum géologique est constitué de schistes briovériens sur lesquels reposent des sols bruns acides (plateau et pentes) avec des gleys et des semi-gleys dans les bas-fonds.

Le bassin est occupé à 92 % par des cultures : blé, maïs, cultures légumières. Les prairies temporaires s'intercalent dans les rotations des cultures. Bois (2 %), bâtiments et routes (6 %), couvrent le reste du bassin. La moyenne annuelle des précipitations sur une période de 22 ans depuis 1971 est de 711 mm (écart-type 128 mm), la lame écoulée moyenne sur la même période est égale à 303 mm. (écart-type 172 mm). La moyenne annuelle de l'évapotranspiration réelle est d'environ 330 mm. Les précipitations interviennent surtout en automne et en hiver, l'été étant une période relativement sèche, conduisant au tarissement du ru.



**Figure 3 :**

*Bassin Versant Représentatif et Expérimental (BVRE) de Naizin. Situation des parcelles témoins et des stations automatiques (pluie, débit, humidité du sol).*

## **BASE DE DONNÉES**

### ***DONNÉES ERS.1***

Les images radar fournies par l'Agence Spatiale Européenne sont du type P.R.I. (Precision Image Products). Les acquisitions de données radar ont commencé le 22 janvier 1992 et se sont poursuivies jusqu'en fin mars 1994, incluant 2 cycles à 3 jours de répétitivité (phase B et D) et un cycle à 35 jours (phase C). La phase B a duré jusqu'en fin mars 1992 ; elle a été suivie de la phase C jusqu'en fin 1993. La phase D a pris place au cours des 3 premiers mois de 1994. Seules les données des phases B et C ont été jusqu'à présent traitées. Sur une partie de ces images on a extrait les coefficients de rétrodiffusion radar moyens correspondant aux bassins versants retenus (LAUR, 1992) : BVRE de Naizin et 34 autres bassins. Sur le bassin de Naizin les signaux radar ont aussi été extraits sur des parcelles témoin. Les résultats présentés ici ne concernent que les valeurs moyennes calculées sur les bassins versants dans leur ensemble.

### ***DONNÉES TERRAIN***

Des opérations vérité-terrain ont été mises en place sur le BVRE de Naizin (figure 3) pour étudier la capacité d'ERS.1 à estimer l'humidité de surface. Une station automatique de mesure d'humidité a été installée au nord du bassin sur le plateau, avec 8 sondes capacitatives placées de 10 à 90 cm de profondeur. Les mesures sont enregistrées toutes les 6 heures. Les sondes ont été étalonnées par la méthode gravimétrique. La station a été complétée en cours d'expérimentation par un dispositif de mesure d'humidité du sol TDR.

Par ailleurs, nous avons sélectionné 13 parcelles représentatives des différents types de cultures et de couverts végétaux présents sur le bassin, pour y effectuer des campagnes de mesures extensives (13 au total en 1992-1993). Dans ces parcelles témoin, nous avons prélevé des échantillons dans l'horizon 0-5 cm (20 à 40 dans des parcelles de 2 à 6 hectares) pour mesurer l'humidité par la méthode gravimétrique, avec en complément des mesures de densité apparente par la méthode gamma-neutronique.

Excepté pour le BVRE de Naizin, les pluies et les débits proviennent de la banque Pluvio de Météo-France et de la banque Hydro du Ministère de l'Environnement. Météo-France fournit également les données d'ETP-Penman.

## RÉSULTATS OBTENUS

### ÉTALONNAGE DU SAR/ERS.1 EN TERME D'HUMIDITÉ DE SURFACE

Les comparaisons entre les données radar et les vérités-terrains ont été faites à différentes échelles (LOUMAGNE *et al.*, 1994). Les résultats présentés ici concernent les données radar moyennées sur l'ensemble du bassin de Naizin, échelle convenant à l'approche globale du modèle hydrologique.

La figure 4 rassemble les résultats des mesures d'humidité au sol et des données radar obtenues pour la période 1992-1993 ainsi que les précipitations journalières au cours de la même période. Des dysfonctionnements sur les sondes capacitatives ont parfois entraîné des lacunes dans le suivi de l'humidité du sol.

Au cours de la phase B (cycle à 3 jours) des trois premiers mois de l'année 1992, on remarque une évolution rapide du signal radar avec un maximum correspondant à l'épisode pluvieux centré sur le 12 février. Le signal radar suit les variations d'humidité enregistrées par les sondes capacitatives. Les deux baisses brutales du signal radar observées en février peuvent s'expliquer par des fortes gelées entraînant une chute de la permittivité électrique du sol en surface (LOUMAGNE *et al.*, 1993)

Au cours de la phase C, cycle à 35 jours, les variations du signal radar semblent plus atténuées mais suivent relativement bien l'évolution de l'humidité du sol. Il est cependant patent que la décroissance de l'humidité du sol en été ne provoque pas une diminution très marquée du signal radar.

Le parallèle avec les événements pluvieux n'est plus possible car le pas-de-temps de 35 jours est inadapté. En considérant les deux années dans leur ensemble, il est possible de distinguer deux périodes.

La première correspond aux époques de faible couvert végétal (janvier à avril 1992 et novembre 1992 à avril 1993), au cours desquelles les évolutions respectives du signal radar et de l'humidité du sol paraissent en bon accord. Pendant la seconde période qui va approximativement des mois de mai à octobre, la forte densité de végétation semble avoir une influence non négligeable sur la réponse radar.

La figure 5 représente les résultats des corrélations entre les mesures radar et les teneurs en eau volumiques (sonde capacitive à 10 cm) pour chacune de ces périodes. La période de faible densité de végétation se traduit par un bon coefficient de corrélation et une bonne sensibilité du radar aux variations d'humidité. La seconde période est caractérisée par un faible coefficient de corrélation et par une forte diminution de la sensibilité.

Ces observations montrent qu'il serait nécessaire de rechercher le moyen de corriger les mesures radar de l'effet dû à la végétation en utilisant par exemple les valeurs de NDVI obtenues avec les images optiques des satellites NOAA, pour espérer avoir une amélioration du suivi de l'humidité du sol par radar tout au long de l'année.



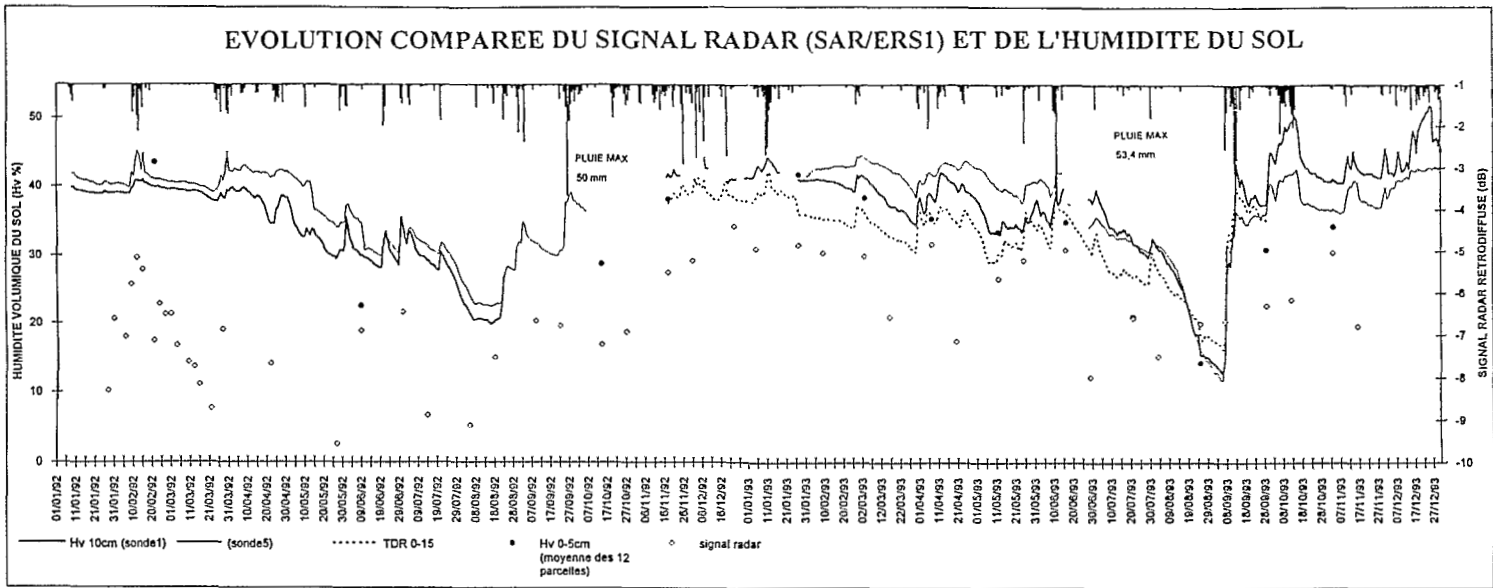
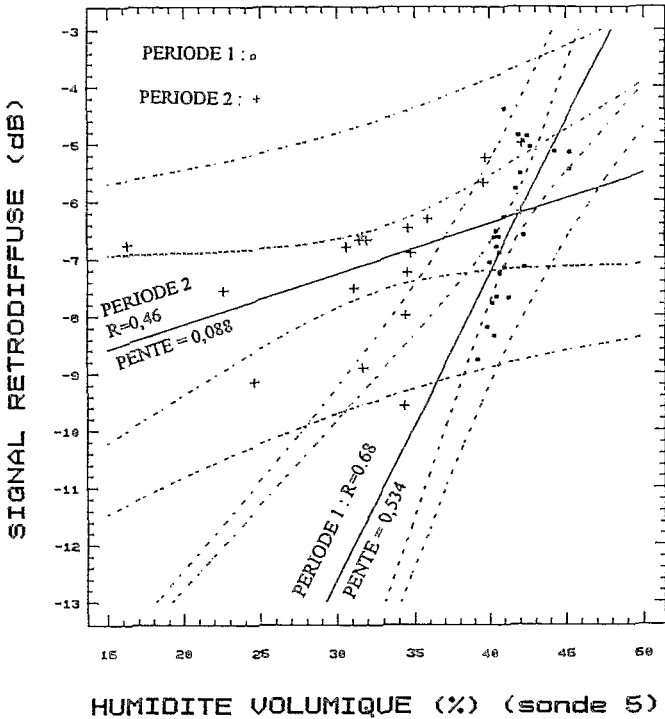


Figure 4 :  
Évolution du signal radar rétrodiffusé moyen (ERS.1) sur le BVRE de Naizin et résultats des mesures d'humidité du sol pour les années 1992-1993.



**Figure 5 :**

*Corrélation entre les données radar (signal rétrodiffusé moyen sur le BVRE de Naizin) et les mesures d'humidité du sol (sonde capacitive à 10 cm de profondeur).  
Période 1 : novembre à avril ; période 2 : mai à octobre (1992-1993).*

### **CARTOGRAPHIE DE L'ÉTAT HYDRIQUE DE SURFACE DES BASSINS VERSANTS BRETONS**

Compte tenu des résultats précédents, la cartographie de l'état hydrique de surface des bassins versants situés sur la trace du satellite ERS. 1 n'est envisageable dans un premier temps que pour la période de faible densité de végétation. La figure 6 donne des exemples des résultats obtenus sur 34 bassins versants en utilisant la relation d'étalonnage de cette période obtenue sur le bassin de Naizin et en faisant l'hypothèse qu'elle est transposable aux autres bassins versants situés dans la même région. Pour chaque passage du satellite les signaux radar moyens sur chaque bassin ont donc été transformés en teneur en eau superficielle.

Des cartes d'humidité de surface ont été réalisées à l'aide d'un système d'information géographique pour 21 dates sur une période allant de fin janvier à fin mars 1992 ; les trois cartes présentées, figure 6, correspondent d'abord à un maximum d'humidité le 12 février dû à un épisode pluvieux, suivi d'un

ressuyage du sol (2 mars) pour atteindre le minimum observé sur cette période le 22 mars. Compte tenu de la méthode adoptée et des incertitudes qui lui sont attachées, il est difficile de vérifier, sans équipement spécifique au sol comme sur le bassin de Naizin, les valeurs absolues des teneurs en eau calculées. Certaines caractéristiques propres des bassins (relief, occupation du sol, ...) peuvent aussi influencer sur la valeur du signal radar retrodiffusé.

Par contre, la représentation des variations d'état hydrique superficiel qui n'utilise que la pente de la droite d'étalonnage permet de réduire notablement ce problème.

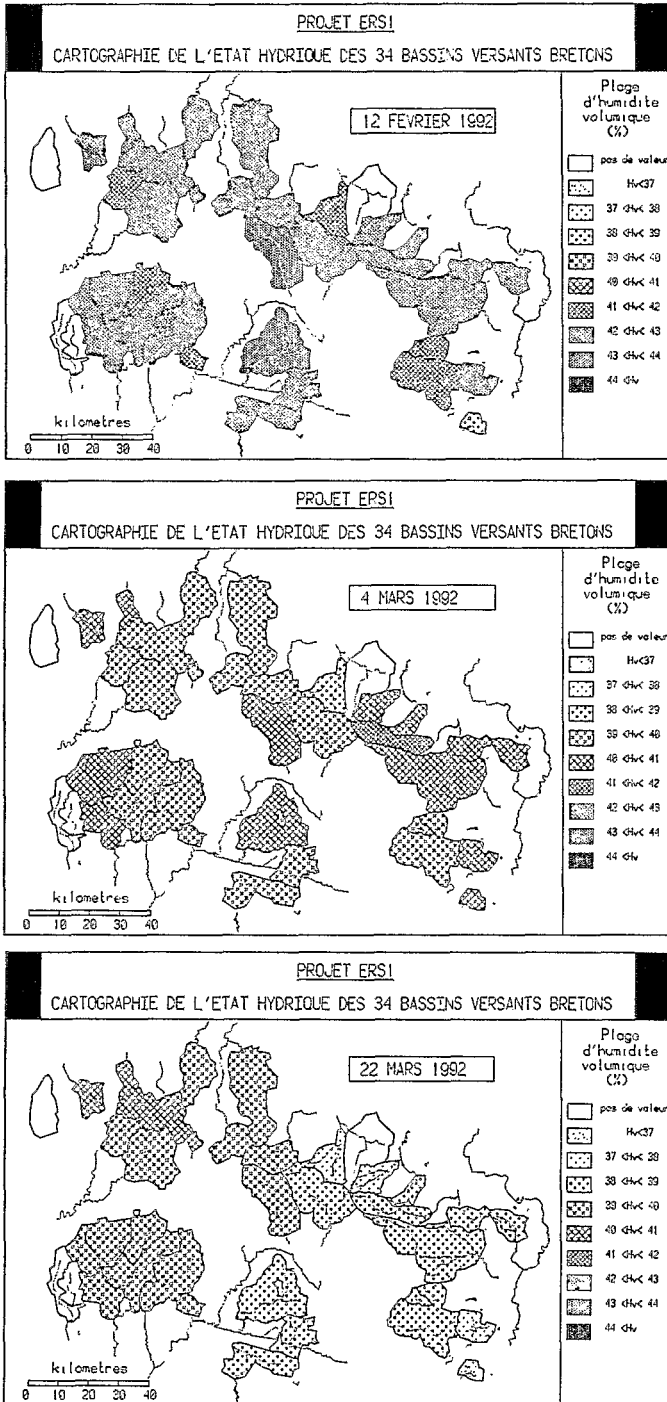
La figure 7 présente les variations d'état hydrique superficiel des bassins versants en partant d'une date de référence, le 31 janvier 1992, située avant l'épisode pluvieux enregistré sur le bassin de Naizin. Cette figure donne 3 exemples de ces variations qui font apparaître d'abord une augmentation des teneurs en eau, le 12 février, plus sensible sur certains bassins de la moitié ouest. Ensuite, le 4 mars, le ressuyage est quasi général, et le 22 mars il est plus marqué dans la partie est des bassins.

Le mode de représentation utilisé sur les figures 6 et 7 permet une visualisation des variations spatio-temporelles d'état hydrique superficiel qui pourront ultérieurement être complétées et recoupées avec d'autres informations pouvant être cartographiées.

### **EXEMPLES DE RÉSULTATS DU MODÈLE HYDROLOGIQUE**

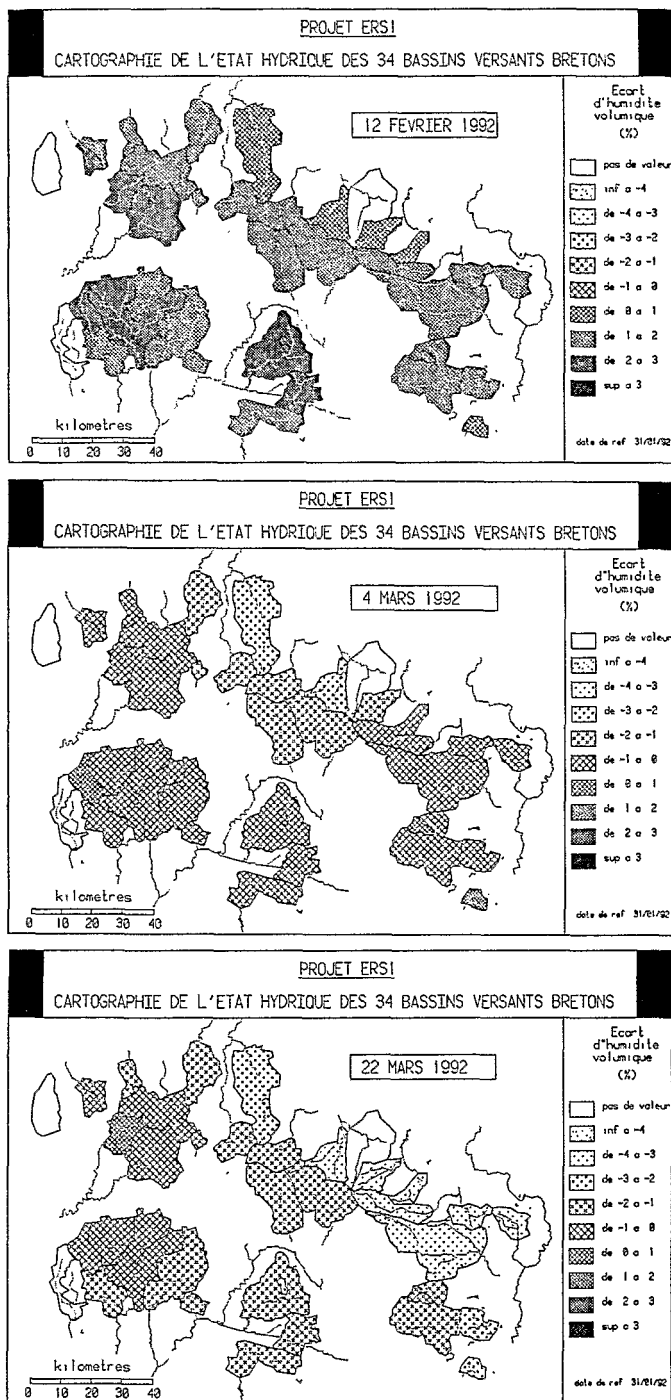
Le modèle hydrologique GRHUM (CHKIR, 1994), dont le principe a été rapidement décrit plus haut, a été testé sur le BVRE de Naizin. Il nécessite le calage de 6 paramètres dont 3 pour la fonction de production (humidités maximales des deux couches de sol et paramètre de la relation de Thomas pour le calcul des productions des deux couches du réservoir sol) et 3 pour la fonction de transfert, identique à celle du modèle de base GR4J. Pour la période de calage (1991-1992), on obtient un critère de Nash, qui évalue la capacité du modèle à reproduire les crues, de 89,3 % et une erreur de bilan en eau, qui mesure la différence entre les débits simulés et estimés intégrés sur la période de référence, de -0,5 %. Ces bons résultats sont cependant à nuancer par ceux de la période de contrôle (1989-1990) où ces critères passent respectivement à 76,3 % et -28,8 %.

Le modèle hydrologique a également été testé sur les autres bassins versants bretons faisant l'objet de cette étude. Le critère de Nash est en moyenne de 90,3 % pour la période de calage, avec une erreur de bilan de -1,1 %. Comme pour le bassin de Naizin, ces très bons résultats se dégradent sensiblement pour la période de contrôle, où le critère de Nash est en moyenne de 66,5 % et l'erreur de bilan de -3,4 %.



**Figure 6 :**

*Cartographie de l'état hydrique de surface moyen des bassins versants bretons calculé à partir des données radar et de la relation d'étalonnage obtenue sur le BVRE de Naizin (période 1) pour trois dates de février, mars 1992.*



**Figure 7 :**

*Cartographie des variations d'état hydrique de surface moyen des bassins versants bretons, obtenues par radar, en prenant comme origine les mesures du 31 janvier 1992, et pour les mêmes dates que la figure 6.*

La figure 8 donne des exemples de résultats du modèle obtenus sur le bassin de Naizin pour l'année 1992. Les débits simulés sont très proches des débits mesurés (figure 8a) et les humidités de surface simulées, en valeur relative, sont comparées aux signaux radar moyens obtenus sur le bassin (figure 8b). On note que la comparaison est relativement satisfaisante, particulièrement pour les mois de faible couverture végétale, résultat confirmé par un coefficient de corrélation global de 0,7, et supérieur à 0,8 en excluant les points d'été. Ces résultats sont encourageants quant à la possibilité ultérieure d'utiliser les mesures radar dans un modèle de prévision hydrologique.

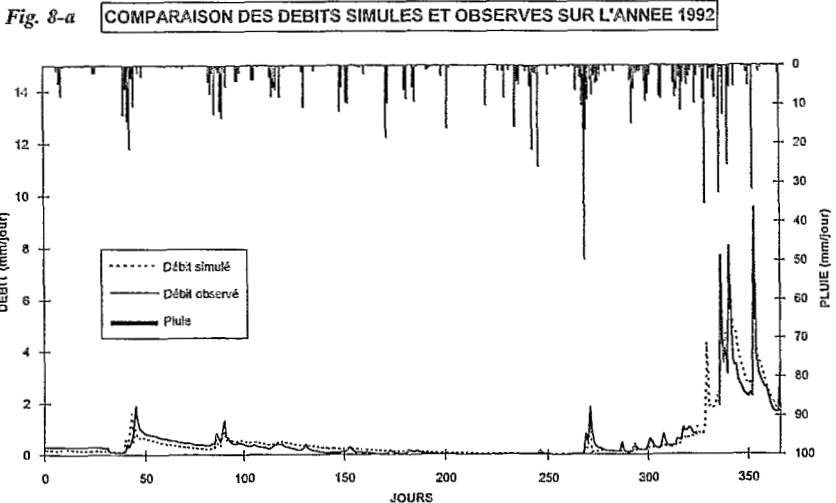
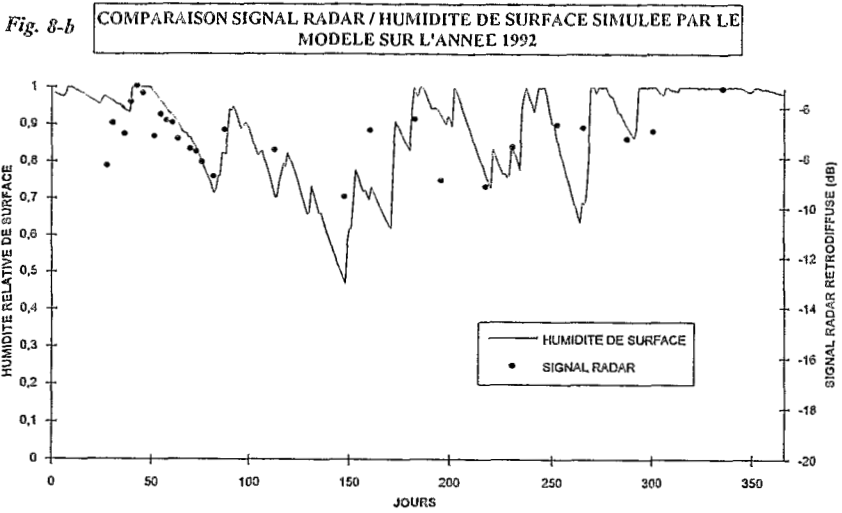


Figure 8 :

Débits observés et simulés par le modèle GRHUM (8a), humidité de surface simulée par GRHUM et données radar ERS.1 (8b) sur le BVRE de Naizin en 1992.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés ici constituent la première étape d'un projet-pilote pour évaluer la capacité du radar d'ERS.1 à estimer l'état hydrique de petits bassins versants agricoles en vue de son intégration dans un modèle hydrologique de prévision.

Les données recueillies au cours des années 1992 et 1993 ont montré qu'à l'échelle d'un petit bassin versant, les évolutions du signal radar moyen et de l'humidité du sol mesurée automatiquement en un point du bassin sont en bon accord au cours des périodes de faible végétation. Au cours des mois de fort couvert végétal (fin de printemps et été) le signal radar, tout en réagissant aux pluies, ne suit pas le dessèchement du sol observé *in situ*. Si l'hypothèse d'une influence de la végétation sur le signal radar est confirmée, on peut envisager une méthode de correction utilisant les valeurs du NDVI obtenues par ailleurs.

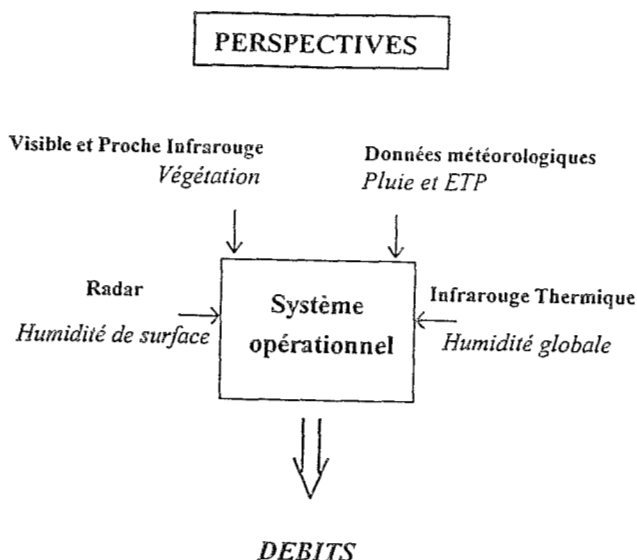
L'étalonnage réalisé au cours des périodes de faible végétation a été appliqué aux autres bassins versants de la région d'étude pour effectuer la cartographie de leur état hydrique de surface à l'aide d'un système d'information géographique.

Cette approche permet de bien visualiser les variations d'humidité de surface intervenant au cours de la période considérée, limitée aux trois mois du cycle à trois jours de répétitivité.

En parallèle, le modèle hydrologique (GRHUM) mis au point pour la prise en compte de l'état hydrique du sol a commencé à être appliqué au bassin témoin de Naizin et aux autres bassins bretons retenus. Il donne des résultats satisfaisants en matière de simulation de débits et permet de simuler les états hydriques des couches superficielles et racinaires du sol. L'état hydrique de surface simulé par le modèle est bien corrélé avec les mesures radar sur le bassin de Naizin, surtout si on exclut les trois mois de forte densité de végétation.

Les prochaines étapes à réaliser sont l'exploitation des données ERS.1 et vérité-terrain du cycle à trois jours des trois premiers mois de 1994, l'étude d'une méthode de correction de l'effet de la végétation, la cartographie de l'état hydrique superficiel sur l'ensemble de la période d'étude, le suivi de l'état hydrique de la zone racinaire à partir des données infrarouges thermique, et l'assimilation de ces deux variables dans le modèle hydrologique.

Les résultats obtenus dans le domaine du suivi de l'état hydrique de surface et avec le modèle hydrologique sont dès à présent prometteurs. Ils répondent au moins en partie aux espoirs mis dans la télédétection radar depuis l'espace (NORMAND, 1991). Les perspectives envisagées sont représentées par le schéma (figure 9) d'un futur système opérationnel utilisant divers types de données de télédétection pour les intégrer dans un modèle de prévision des débits de bassins jaugés ou non jaugés pouvant relever de climats différents.



**Figure 9 :**  
Schéma d'un système opérationnel de prévision de débit utilisant les données de télédétection.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a reçu le soutien de l'Agence Spatiale Européenne qui a fourni les images ERS.1, du Centre National d'Études Spatiales et du Programme National de Télédétection Spatiale qui ont assuré en partie son financement. Nous remercions nos collègues du Cemagref de Rennes qui gèrent le BVRE de Naizin, ainsi que P. Ansart et tous les autres collègues et stagiaires du Cemagref qui ont contribué aux opérations vérité-terrain, ou, comme S. Dossal, à la réalisation des cartes d'état hydrique sur un système d'information géographique.



**BIBLIOGRAPHIE**

- BENALLÈGUE M., NORMAND M., GALLE S., DECHAMBRE M., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., PRÉVOT L., 1994. Soil moisture assessment at a basin scale using active microwave remote sensing : the Agriscatt 88 airborne campaign on the Orgeval watershed, *Int. J. Remote Sensing*, 15,3,645-656.
- BEN MEHREZ M., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., SUCKSDORFF Y., 1992. Calibration of fluxes model over bare soil during Hapex/Mobilhy experiment, *Agric. For. Meteor.*, 58(3/4) 257-283.
- BEN MEHREZ M., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., VALENCOGNE C., 1992. Estimation of canopy stomatal resistance during Hapex/Mobilhy experiment, *Agric. For. Meteor.*, 58(3/4) 285-313.
- BERNARD R., MARTIN Ph., THONY J.L., VAUCLIN M., CHAPOTON A., WATTRELOT F., LEBRUN A., 1984. Comparison of three *in situ* surface soil moisture measurements and application to C-band scatterometer calibration, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-22 (4), 388-394.
- CARLSON T.N., 1986. Regional scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia. *Remote Sensing, Rev.*, vol.1, 197-247.
- CHKIR N., 1994. Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, « Sciences et Techniques de l'Environnement », 327 p.
- LAUR H., 1992. Derivation of backscattering coefficient  $\sigma_0$  in ERS.1/SAR. PRI Products, Doc. ESA, n°1, 16 p.
- LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M., 1991. État hydrique du sol et prévision des débits : *J. Hydrol.* 123, 1-17.
- LOUMAGNE C., CHKIR N., NORMAND M., OTTLÉ C., VIDAL-MADJAR D., 1994. Development of a conceptual rainfall/runoff model accounting for real soil hydric state. Part 1 : introduction of the soil/vegetation/atmosphere continuum in the hydrological model. Soumis à *Journal of hydrology*.

- LOUMAGNE C., NORMAND M., OLIVIER Ph., OTTLÉ C., VIDAL-MADJAR D., LOUAHALA S., 1993. Evaluation of ERS.1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. First 1992 results over the Naizin. Soumis à Remote Sensing of Environment.
- MAKHLOUF Z., MICHEL C., 1992. Relation entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques d'un bassin versant breton. 8<sup>ème</sup> journées hydrologiques de l'Orstom, Montpellier (à paraître).
- NORMAND M., 1991. Perspectives offertes par la télédétection radar dans le domaine de l'état hydrique des sols. 2<sup>ème</sup> journées de télédétection, Orstom, Bondy 4-6 Décembre 1990, 191-201.
- OTTLÉ C., VIDAL-MADJAR D., 1994. Assimilation of humidity inversed from infrared remote sensing in a hydrological model over the Hapex/Mobilhy region. *J. of Hydrology*, 158 : 241-264.
- SOARÈS J. V., BERNARD R., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., WEILL A., 1988. Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *J. of Hydrology*, 99 : 282-296.
- TACONET O., VIDAL-MADJAR D., 1988. Application of fluxes algorithm to a field campaign over a vegetated area, Remote Sens. Environ., 26, (3), 227-239.
- ULABY F. T., MOORE R. K., FUNG A. K., 1986. *Microwaves Remote Sensing*, 3 volumes 2162 pp., Artech house, Inc.