

---

# Apport de la télédétection à la modélisation hydrologique

Cécile Loumagne et Michel Normand

---

L'estimation par télédétection de l'état hydrique des sols a fait l'objet de nombreuses recherches depuis plus d'une vingtaine d'années. En effet, l'état hydrique du sol est une variable clé pour les sciences étudiant notre environnement terrestre telles que la climatologie, l'hydrologie, l'agronomie ou encore la pédologie. Il représente, avec la température de surface, un paramètre essentiel traduisant l'équilibre énergétique entre les surfaces émergées du globe et l'atmosphère. L'humidité du sol influence le bilan d'énergie à l'interface sol-végétation-atmosphère en modifiant les valeurs de l'albédo et de l'émissivité de la surface, les conductivités thermiques et hydrauliques du sol ainsi que l'évaporation. En hydrologie, l'état hydrique du sol joue un rôle très important dans la genèse des écoulements, en particulier dans le partage de la pluie entre ruissellement, évaporation et infiltration.. Une prise en compte correcte des processus de surface et en particulier une bonne gestion du bilan hydrique des sols est donc indispensable en hydrologie, surtout si l'on s'intéresse à la prévision et à la gestion des risques de crues. Les organisations institutionnelles telles que les agences de l'eau sont à la recherche d'outils opérationnels qui leur permettent de suivre l'évolution spatio-temporelle du bilan hydrique, tant à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle régionale. La télédétection couplée aux modèles hydrologiques de prévision des débits sont des outils privilégiés pour répondre à ce besoin.

Ces différentes considérations ont été à l'origine d'un nouveau modèle hydrologique susceptible d'utiliser ces données satellitales non prises en compte jusqu'à présent en modélisation, soit comme

données d'entrée pour réinitialiser le réservoir représentant le sol, soit comme données de contrôle pour corriger l'état du système au cours de la prévision des débits. Les principaux résultats obtenus grâce à l'utilisation de ce modèle appliqué à la Bretagne centrale font l'objet de cet article.

Dans une première partie, nous resituons le sujet dans le contexte national et international en faisant un bref historique sur l'utilisation de la télédétection à des fins hydrologiques et sur l'intérêt de l'état hydrique du sol pour la modélisation hydrologique

Dans une deuxième partie, nous décrivons succinctement le modèle développé dénommé GRHUM construit à partir d'un modèle éprouvé, GR4J, (Nascimento et Michel, 1992, Makhoulouf, 1994), en modifiant les échanges hydriques dans le réservoir sol en vue de simuler l'état hydrique de la surface et de la couche racinaire en plus des débits à l'exutoire des bassins. Puis, nous présentons la mise au point du modèle sur le bassin versant de recherche du Coët Dan à Naizin en Bretagne, géré par le Cemagref, ainsi que sa validation sur une large sélection de bassins versants de Bretagne centrale. Le choix de cette région correspond à un projet pilote de l'Agence Spatiale Européenne dans le cadre du lancement du satellite radar ERS-1. Les résultats obtenus en matière de simulation de l'humidité du sol, sont comparés aux données recueillies au sol sur le Coët Dan ou par télédétection radar sur les bassins versants vus par le satellite ERS-1.

Enfin, nous discutons des perspectives ouvertes par ce type de modèle pour la prévision des ressources en eau superficielles des bassins versants jaugés ou non jaugés.

**Cécile Loumagne  
et Michel  
Normand**  
Cemagref  
Parc de Tourvoie  
BP 121  
92185 Antony  
Cedex

## État de l'art

### ■ *Utilisation de la télédétection pour l'estimation de l'état hydrique du sol*

Les méthodes de télédétection utilisant les informations recueillies dans le domaine optique (visible, proche infrarouge et infrarouge thermique) ont pu être appliquées à des données acquises depuis l'espace par des satellites opérationnels de la météorologie (NOAA, Meteosat) ou par des instruments à haute résolution spatiale (Landsat, Spot). Ces données permettent d'accéder, par l'intermédiaire du bilan énergétique, à l'évaporation réelle, grandeur pilotée par l'état hydrique de la couche de sol qui participe aux phénomènes d'évaporation. La méthode d'estimation de l'état hydrique du sol est fondée sur l'inversion de modèles soit bio-physiques (Taconet *et al.*, 1986, Soarès *et al.*, 1988, Sucksdorff *et al.*, 1990), soit semi-empiriques (Séguin et Itier, 1983, Vidal *et al.*, 1989), décrivant le bilan énergétique à l'interface situé entre le complexe sol-végétation et l'atmosphère. Pour un pays tempéré comme la France, le nombre d'images « NOAA » non nuageuses sur une année est très faible. La méthode d'estimation de l'état hydrique basée sur les mesures dans l'infrarouge thermique ne permet pas un suivi de l'état hydrique du sol sur l'ensemble de l'année.

Dans le domaine des micro-ondes (inférieures à 15 Ghz) insensibles à la présence d'un couvert nuageux, les expériences menées à l'aide de radars montés sur grues (Ulaby *et al.*, 1982), puis aéroports, ont permis de définir une configuration radar (fréquence, angle d'incidence, polarisation) optimum pour estimer l'état hydrique des premiers centimètres du sol. Toutefois, ces différentes études ont montré qu'il était difficile de tenir compte à l'échelle de la parcelle, de tous les paramètres de surface qui influencent la réponse radar (rugosité, couvert végétal) pour ne conserver que la dépendance en fonction de l'humidité du sol. Malgré cela, de nombreuses recherches ont montré (Dobson *et al.*, 1982, Jarry *et al.*, 1988) qu'une bonne sensibilité à l'état hydrique du sol réapparaît par intégration de l'information sur des surfaces de l'ordre du kilomètre carré. Dans ce cadre la mise au point de nouveaux capteurs actifs, les radars imageurs, comme ceux des satellites européens ERS1, ERS2, ou canadien « Radarsat », fournissent des données acquises depuis l'espace, concernant la rétrodiffusion de la surface sur l'ensemble du globe.

Or, seule, une fréquence d'acquisition des données, journalière ou hebdomadaire, semble présenter un intérêt pour le suivi temporel fin de l'état hydrique du sol (Cognard *et al.*, 1995). Malheureusement, une telle répétitivité est pour l'instant limitée à des durées courtes de trois mois. Lorsque le satellite est programmé pour observer les glaces océaniques, les surfaces émergées concernées sont alors peu nombreuses. Dans ces conditions, les mesures spatiales ne peuvent venir qu'en appui à une modélisation hydrologique permettant le suivi en continu de l'état de saturation de bassins versants, en vue d'une application à la prévision des débits.

### ■ *Modèles hydrologiques et prise en compte de l'état hydrique*

Certains modèles hydrologiques, comme ceux basés sur les indices des pluies antérieures, ne tiennent pas compte explicitement de l'évaporation dans la relation pluie-débit et ne restituent donc pas l'évolution de l'état hydrique des sols. Des indices plus sophistiqués calculent l'évaporation réelle à l'aide de modules rudimentaires de stockage d'eau dans le sol. D'autres types de modèles prennent en compte explicitement le mouvement de l'eau dans le sol et présentent une structure proche de celle des modèles de bilan énergétique. Dans le domaine de la prévision opérationnelle des débits, les modèles sont issus d'une conceptualisation plus importante de processus très complexes qui apparaissent à l'échelle d'un bassin versant. Les modèles les plus souvent utilisés sont des modèles conceptuels pluie-débit. Ceux-ci ont largement fait leurs preuves (Nascimento et Michel, 1992), mais montrent parfois des inadéquations pour reproduire les sorties pendant certaines périodes du cycle hydrologique et notamment lors de la reprise des écoulements. Pour résoudre ces problèmes, et en vue de chercher des améliorations à la modélisation des débits, des recherches ont été menées pour étudier les possibilités d'intégrer à ce type de modèle un ou plusieurs indicateurs de l'état hydrique des bassins versants, permettant de suivre leur évolution temporelle.

L'intérêt de la prise en compte d'un tel indicateur a été montré en utilisant des mesures d'humidité du sol ponctuelles au pas de temps journalier dans un modèle hydrologique (Loumagne *et al.*, 1991, Chkir, 1994) notamment pour la simulation de débits à l'exutoire d'un petit bassin versant agri-

cole lors de la reprise des écoulements après les périodes d'étiage.

Cette approche, déjà prometteuse, n'utilise pourtant qu'un indice global de l'état de saturation du bassin versant, car elle ne tient pas compte de la variabilité spatiale de l'état hydrique du sol. L'hétérogénéité spatiale de ce paramètre rend délicate l'obtention, par des mesures *in situ*, d'une valeur moyenne d'humidité représentative d'un bassin versant et montre l'intérêt que peut représenter la télédétection dans ce type de domaine.

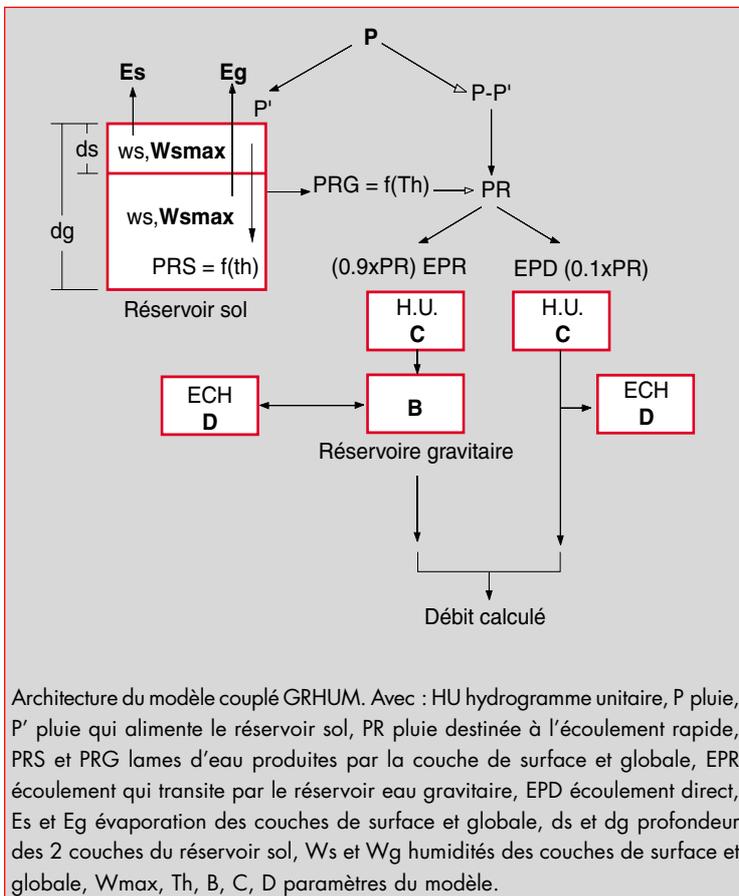
### Description du modèle hydrologique GRHUM et application

#### Structure générale du modèle

Le modèle GRHUM, présenté ci-contre et décrit de façon détaillée par ailleurs (Loumagne *et al.*, 1996), est dérivé du modèle conceptuel pluie-débit journalier GR4J (Edijatno et Michel, 1989, Nascimento et Michel, 1992), qui a été utilisé avec de bons résultats sur plus de 300 bassins versants répartis sur l'ensemble de la France (Edijatno, 1991, Makhlof, 1994). Le modèle GR4 simule les débits avec une bonne précision, mais ne permet pas de simuler l'humidité du sol et son évolution temporelle. Or, pour pouvoir intégrer dans le modèle des données concernant l'état hydrique du sol, soit pour initialiser le système, soit pour corriger son évolution au cours de la prévision, nous avons été amenés à mettre au point un nouveau modèle qui simule l'évolution de cette variable.

Le modèle GRHUM (figure 1) a donc été conçu pour pouvoir assimiler c'est-à-dire intégrer, des données de télédétection en relation avec l'état hydrique des sols. Il diffère du modèle GR4J par la représentation du réservoir sol. Celui-ci est représenté actuellement par un système à deux couches permettant de simuler une humidité de surface et une humidité globale ou d'assimiler ces données issues de la télédétection lorsqu'elles sont disponibles. La couche globale correspond à la couche racinaire et inclut la couche superficielle. Les échanges entre les deux couches dépendent de leur état de saturation (Chkir, 1994).

La pluie destinée à l'écoulement dépend de l'humidité de la couche globale du sol qui gère les échanges à l'interface sol-végétation-atmosphère. La lame d'eau totale, produite par le réservoir sol, est rou-



▲ Figure 1. – Architecture du modèle couplé GRHUM.

tée jusqu'à l'exutoire par une fonction identique à celle utilisée dans le modèle GR4J: un hydrogramme unitaire gère le retard du temps de montée de la crue et un réservoir non linéaire gère l'étalement de la lame d'eau.

Dans le modèle GR4J, l'évapotranspiration journalière est calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle et de la quantité d'eau disponible dans le réservoir sol. Dans le modèle GRHUM, l'évapotranspiration est calculée pour chacune des deux couches de sol en prenant en compte, en plus, certaines caractéristiques telles que le type de sol, le type de couvert, ou le pourcentage de couverture végétale (Ottlé et Vidal-Madjar, 1994).

L'évolution annuelle du facteur de couverture végétale dépend des différents types de cultures présents sur le bassin et de leur répartition. A partir

des relevés culturaux et d'informations sur les dates de semis et de récolte, on peut construire la courbe d'évolution annuelle de ce coefficient en combinant les courbes correspondant à chaque type de couvert végétal, au prorata de leur importance sur le bassin versant. La courbe d'évolution de ce coefficient peut aussi être approchée à l'aide d'outils de télédétection tel l'indice de végétation normalisé, calculé à partir des canaux visible et proche infra-rouge de l'AVHRR des satellites « NOAA ».

### ■ Résultats obtenus avec le modèle GRHUM

Le modèle GRHUM a d'abord été mis au point et comparé avec le modèle GR4J sur le bassin versant de recherche de l'Orgeval dans la Brie (104 km<sup>2</sup>), où existent de longues séries de don-

nées de pluie, débit et humidité du sol par sonde neutronique.

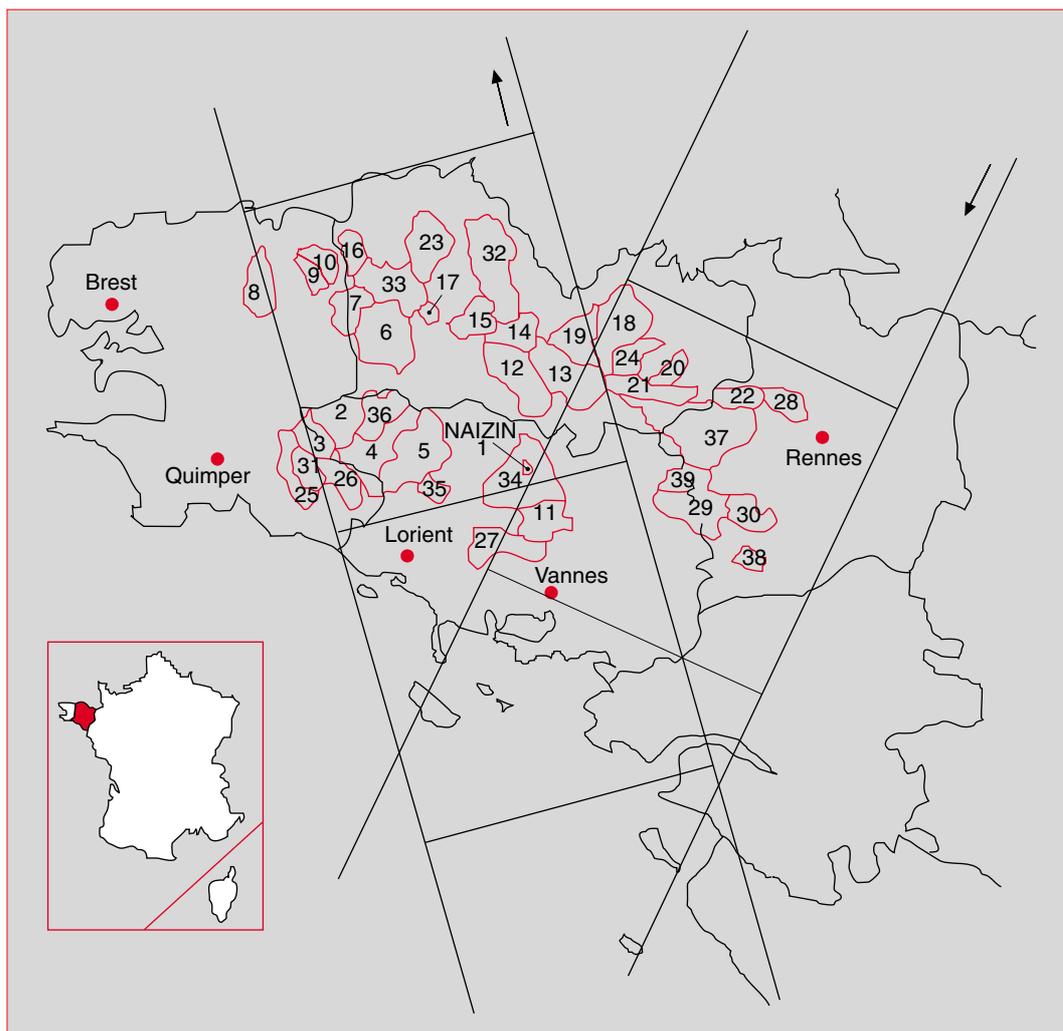
Il a ensuite été testé sur le bassin de recherche du Coët Dan en Bretagne (12 km<sup>2</sup>) et appliqué à un ensemble de bassins versants situés en Bretagne centrale.

Ces deux bassins sont situés dans des zones d'agriculture intensive mais ne présentent pas le même type d'occupation du sol. On peut observer sur le premier une culture prédominante de céréales d'hiver alors que sur le deuxième la culture du maïs tient une place plus importante.

### Modélisation des débits

La comparaison des modèles GRHUM et GR4J sur le bassin de l'Orgeval (Loumagne *et al.*, 1996)

Carte. – Situation des 36 bassins bretons (superficie : 12-580 km<sup>2</sup>) et traces du satellite. ▶



a montré un bon accord entre les résultats des deux modèles sur la période de calage (3 ans) et la période de contrôle (3 ans), avec une erreur de bilan plus faible pour le modèle GRHUM :

$$(EB= 100 - \sum_1^n (Q_{obs} - Q_{calc}) / \sum_1^n Q_{obs})$$

$Q_{obs}$  et  $Q_{calc}$  étant respectivement les débits observés et calculés.

En ce qui concerne le Coët Dan, la mise en route a été effectuée sur l'année 1988, les années 1989-1990 correspondent à la période de calage les années 1991-1993 à la période de contrôle.

Le tableau 1 donne les résultats obtenus avec les deux modèles en calage et en contrôle sur le bassin du Coët Dan. Pour les deux périodes, les deux modèles reproduisent les débits de manière très fidèle, ce qui correspond à des erreurs de bilan  $EB$  faibles (proches de 0%) et à des critères de Nash-Sutcliffe  $N$  très élevés, proches de 100%.

$$(N= 100 - (1 - \sum_1^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2 / \sum_1^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2))$$

Ces résultats montrent, pour les deux modèles, une bonne aptitude à simuler les débits. La robustesse du modèle GRHUM est bien confirmée par les résultats de la période de contrôle.

La validation du modèle GRHUM, ainsi que sa comparaison avec le modèle GR4J, a ensuite été entreprise sur les 36 bassins versants bretons retenus et sur six années de données pluie-débit, l'année 1988 servant à la mise en route (initialisation des réservoirs). Le tableau 2 comporte les valeurs

moyennes des critères de Nash-Sutcliffe et de l'erreur de bilan obtenus sur ces bassins en période de calage et en période de contrôle.

Pour les deux modèles, la moyenne du critère de Nash-Sutcliffe est très élevée en calage et reste de bon niveau en contrôle, avec une meilleure stabilité pour le modèle GRHUM. L'erreur de bilan n'est pas significativement différente dans les deux modèles. Elle est en moyenne très proche de zéro en période de calage et reste néanmoins très faible en période de contrôle.

A titre d'exemple, la figure 2 présente les débits observés et simulés par GRHUM au cours de périodes de contrôle sur un des 36 bassins versants étudiés.

Ces bons résultats d'ensemble démontrent la robustesse du nouveau modèle GRHUM qui, grâce à la prise en compte d'un indice de couverture végétale pour le calcul de l'évapotranspiration, semble présenter une meilleure stabilité que GR4, en période de contrôle.

#### Modélisation de l'humidité du sol

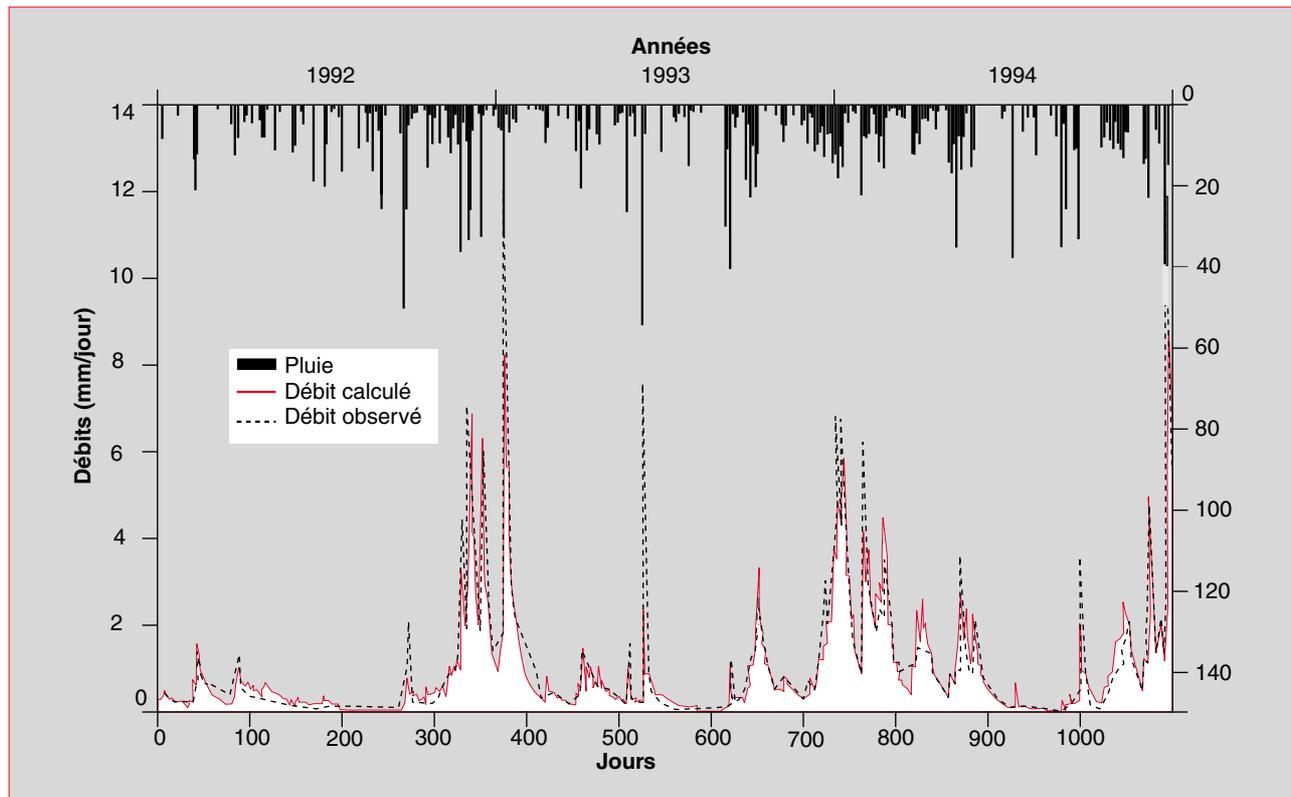
La particularité du modèle GRHUM tient au fait qu'il peut simuler non seulement les débits, mais aussi les humidités des couches superficielle et globale du sol. La validation de ce modèle peut donc se faire également sur ces variables, mais la comparaison entre valeurs calculées et valeurs mesurées est plus délicate que pour les débits (figure 3). En effet, il n'y a pas de mesure directe de l'humidité représentant l'ensemble du bassin et susceptible de fournir la courbe de référence. La

Modèle \ Critère	GRHUM		GR4J	
	Calage 89-90	Contrôle 91-93	Calage 89-90	Contrôle 91-93
$N$	93 %	82 %	94 %	82 %
$EB$	-3 %	-2 %	-6 %	-10 %

◀ Tableau 1. – Comparaison des modèles GRHUM et GR4J sur le bassin versant du Coët Dan.

Critères moyens sur 36 BV	GRHUM		GR4J	
	Calage 89-90	Contrôle 91-93	Calage 89-90	Contrôle 91-93
$N$	90 %	83 %	91 %	74,5 %
$EB$	0,5 %	5 %	2 %	5,5 %

◀ Tableau 2. – Comparaison des modèles GRHUM et GR4J sur 36 bassins versants bretons.



▲ Figure 2. – Evolution comparée des débits observés et simulés par GRHUM sur le bassin du Coët Dan.

comparaison a tout de même été tentée en utilisant des chroniques de mesures ponctuelles d'humidité par sonde à neutrons ou sondes capacitives. Une deuxième possibilité est d'utiliser des données obtenues par télédétection radar, qui peuvent être, sous certaines conditions, considérées comme représentatives des variations d'humidité du sol en surface (Cognard *et al.*, 1995).

– *Comparaison entre humidités simulées et mesures ponctuelles*

La première méthode, utilisant des mesures d'humidité par sonde neutronique, avait été utilisée sur le bassin de l'Orgeval avec des résultats satisfaisants (Loumagne *et al.*, 1996). En effet, les coefficients de corrélation obtenus pour les humidités journalières calculées par GRHUM et mesurées sur une période de six ans sont très élevés : 0,82 pour la couche de surface, 0,96 pour la couche racinaire.

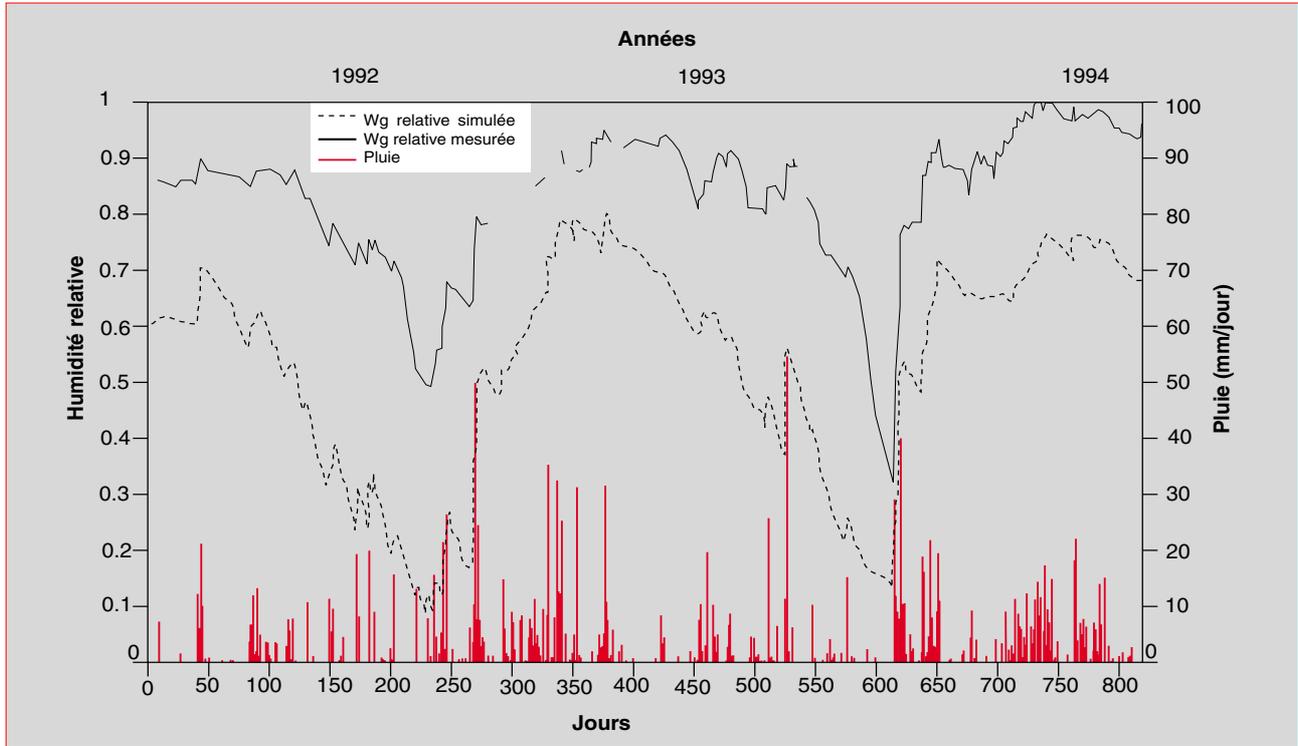
Dans le cas du bassin du Coët Dan, où l'on dispose d'un site de mesure de l'humidité du sol par sondes capacitives depuis 1992 (Cognard *et al.*,

1995), on constate toujours une très bonne aptitude du modèle GRHUM à suivre les variations de l'état hydrique du sol, surtout en ce qui concerne la couche globale (figure 3). La corrélation entre humidités simulées et humidités mesurées est très élevée pour la couche globale, avec un coefficient de corrélation de 0,95 pour la période 92-93. Elle est un peu moins bonne pour la couche de surface (0,60).

Ces résultats peuvent exprimer le fait que la variabilité spatiale de l'humidité du sol sur le bassin est marquée davantage sur la couche la plus proche de la surface, rendant la mesure ponctuelle moins représentative du comportement global donné par le modèle.

La comparaison avec des mesures d'humidité au sol n'a pu être étendue aux autres bassins, ceux-ci ne comportant pas de dispositifs de mesure de l'humidité du sol *in situ*.

– *Comparaison entre humidités simulées et signal radar (figures 4 et 5)*



▲ Figure 3. – Evolution comparée de l'humidité du sol simulée par GRHUM (couche globale) et mesurée au sol sur le bassin du Coët Dan.

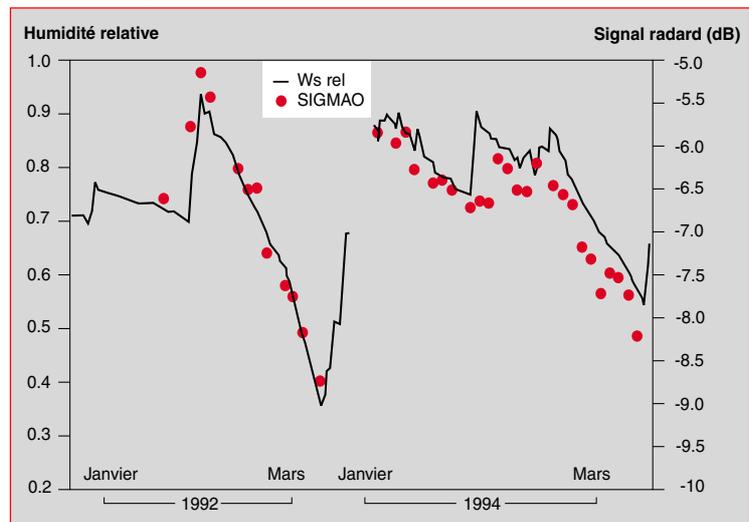
On a comparé sur le bassin du Coët Dan, l'évolution du signal radar intégré sur l'ensemble du bassin, pour les années 1992, 1993 et début 1994, avec les humidités du sol simulées par le modèle sur cette période.

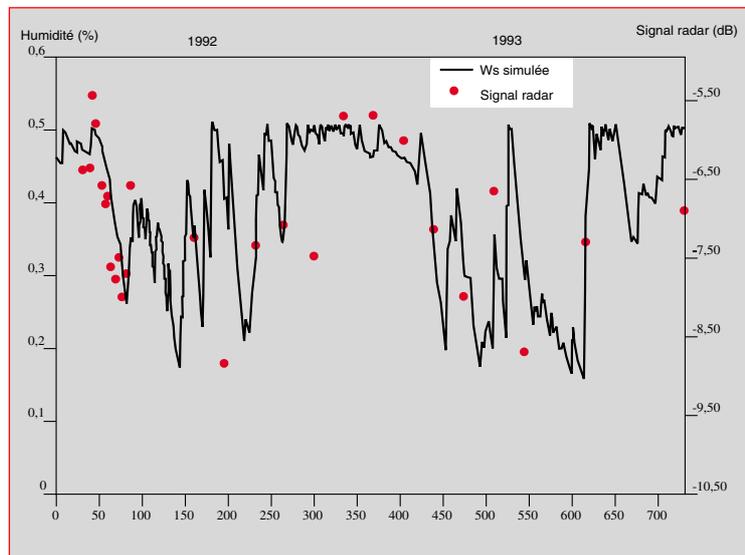
En l'absence de corrections des effets dus à la végétation qui perturbent la mesure de l'humidité du sol par radar à certaines périodes de l'année, nous avons fait porter la comparaison essentiellement sur les données correspondant aux périodes hivernales de faible végétation. En effet, à cette période, la sensibilité du radar aux variations d'humidité du sol a été mise en évidence : les effets de rugosité, qui dominent alors à l'échelle des parcelles, se compensent lorsque la taille de l'unité spatiale observée est supérieure au kilomètre carré.

La figure 4 montre, pour les deux périodes où l'on dispose de nombreuses données ERS-1 (hivers 1992 et 1994), que les valeurs prises par le signal radar sont très proches de la courbe de l'humidité de surface simulée par le modèle, le coeffi-

cient de corrélation entre le signal radar rétrodiffusé sur l'ensemble du bassin versant et la teneur en eau simulée atteint 0,88.

Figure 4. – Evolution comparée du signal radar et de l'humidité superficielle simulée par GRHUM sur le bassin du Coët Dan. ▼





▲ Figure 5. – Evolution comparée du signal radar et de l'humidité superficielle simulée par GRHUM sur le bassin du Gouet.

Sur les autres bassins versants sélectionnés pour la validation du modèle GRHUM, la comparaison entre l'humidité superficielle simulée par le modèle avec le signal radar intégré sur chaque bassin a été faite pour la période 1992-1993, et début 1994 pour certains. La figure 5 présente un exemple de cette comparaison pour le bassin du Gouet. Il existe une bonne concordance entre les deux courbes pour les périodes d'hiver où les mesures par radar ne sont que peu perturbées par la végétation. Des résultats équivalents sont obtenus sur les autres bassins. Ainsi, l'évolution de l'état hydrique du sol au cours d'un événement pluvieux a pu être suivie à un pas de temps de trois jours sur l'ensemble des quarante bassins se situant sous la trace du satellite ERS1.

L'ensemble de ces résultats de comparaison des humidités du sol simulées par le modèle GRHUM avec les mesures ponctuelles enregistrées au sol sur le bassin du Coët Dan, ou avec des mesures effectuées par télédétection radar sur le bassin du Coët Dan et les autres bassins sélectionnés, constitue le second volet de la validation du modèle. Malgré les difficultés de ce type d'exercice, il apparaît que les données du radar satellitaire sont suffisamment proches des valeurs d'humidité simulées pour que l'on puisse envisager de les intégrer au modèle par un processus d'assimilation. Cette procédure permettra d'utiliser les données satellitaires non seulement comme variables de contrôle du modèle, mais aussi comme données d'entrée afin de réinitialiser

l'état du système en vue d'améliorer la prévision des débits.

## Conclusions

L'élaboration d'un modèle pluie-débit prenant en compte l'état hydrique du sol a permis, tout en gardant la structure simple du modèle conceptuel existant, de simuler non seulement les débits, mais aussi les humidités du sol (couches superficielle et globale). Les résultats obtenus ont été tout à fait satisfaisants, en se référant à des données d'humidité obtenues *in situ* sur des bassins versants de recherche (Orgeval et Coët Dan). Il a par ailleurs été montré (Cognard *et al.*, 1995) que sur ces périodes le radar du satellite ERS-1 permet bien d'accéder à un indice d'état hydrique des sols à l'échelle du bassin versant. Les comparaisons des simulations de l'humidité du sol avec les observations du radar du satellite ERS-1 prises à l'échelle globale des bassins, s'avèrent intéressantes principalement sur les périodes de faible couvert végétal, en raison de l'influence de la végétation sur la rétrodiffusion du signal radar à la surface du sol. La sensibilité du radar aux variations de teneur en eau du sol se dégrade à mesure que la couverture végétale se développe, les effets de la végétation devenant prédominants. La seule manière de remédier à ce problème serait de réaliser, à l'échelle du bassin versant, une extraction du signal radar supervisée par l'occupation du sol, en ne retenant le signal que sur les parcelles de céréales d'hiver, couverture pour laquelle le radar continue à détecter l'état hydrique sous-jacent. Cela impliquerait l'utilisation d'un algorithme de classification de l'occupation du sol à partir de données satellitaires qui pourraient être les données radar elles-mêmes, utilisées en synergie avec des données acquises par d'autres instruments de télédétection.

Le modèle GRHUM a permis également l'utilisation de données en infra-rouge thermique du satellite NOAA (Cognard, 1996) qui donne la possibilité d'accéder à l'évapotranspiration réelle à partir des mesures de températures de surface du sol. Pour les journées où la température de surface est disponible, la détermination de l'état hydrique du sol est alors réalisée par résolution, à un pas de temps fin, de l'équation du bilan énergétique à l'interface sol-végétation atmosphère et par comparaison des températures simulées et mesurées. Ce calcul nécessite la connaissance des don-

nées climatiques et une description détaillée de la couverture végétale. L'état hydrique du sol peut alors être déterminé lorsqu'il atteint des valeurs faibles impliquant une limitation des processus d'évaporation. Les résultats obtenus sur le bassin de Naizin sont liés aux caractéristiques climatiques et à l'occupation du sol de notre site d'étude. Ils montrent que seul l'état hydrique de surface a pu être déterminé par cette approche. Dans le cadre d'autres recherches (Ottlé *et al.*, 1994) la méthode d'inversion de l'humidité du sol à partir des données infrarouge thermique a donné des résultats plus satisfaisants, en particulier lorsqu'elle a été appliquée à des zones de cultures plus homogènes présentant un stress hydrique marqué en été.

Ces résultats montrent la complémentarité des données radar et infra-rouge thermique. En effet, l'état hydrique de surface ne peut être estimé par radar que pendant les périodes de faible couvert végétal, alors que la seconde méthode, basée sur la thermographie infrarouge a permis l'estimation de cette grandeur en période estivale.

Les bons résultats obtenus avec le modèle GRHUM pour la modélisation des débits et des humidités permettent d'envisager son utilisation non seulement pour améliorer la prévision des débits sur les bassins versants jaugés en contrôlant l'évolution du système grâce aux données satellitales, mais aussi pour des bassins où l'on ne disposerait que peu ou pas de données hydrométriques et où l'on pourrait initialiser l'état du système à partir de l'information issue de la télédétection.

La mise au point d'un modèle prenant en compte l'état hydrique des sols et les résultats obtenus sur la Bretagne avec des données recueillies au sol et par télédétection représente une étape dans les recherches d'amélioration des méthodes de prévision des ressources en eau superficielle s'appuyant sur une approche à base conceptuelle, les prochaines étapes concernent la mise au point de la procédure d'assimilation et l'application de la méthodologie à l'échelle régionale. □

### Résumé

Différentes recherches ont été menées sur le rôle de l'état hydrique des sols sur la réponse hydrologique des bassins versants. La connaissance de cette variable et de son évolution dans le temps représente une information de premier ordre qui peut être intégrée dans les modèles hydrologiques de prévision. Il est possible d'accéder à cette information par des observations faites par télédétection depuis l'espace. Cet article présente les résultats de recherches effectuées en Bretagne centrale avec les données du satellite ERS-1. La comparaison des mesures au sol avec les données radar concomitantes montre qu'à l'échelle du bassin versant, il existe une étroite corrélation entre les valeurs moyennes du signal radar et les mesures d'humidité du sol pendant la période de faible densité de végétation. Les premiers résultats obtenus avec un modèle simulant les débits à l'exutoire des bassins versants et l'humidité du sol sont présentés. On remarque une bonne concordance des résultats avec les mesures. On discute des possibilités d'assimilation des données de télédétection dans le modèle hydrologique pour aboutir à une méthodologie opérationnelle de prévision de débits.

### Abstract

Different studies have shown how the soil moisture state influences the behaviour of the basin rainfall-runoff relationship. After being assimilated in hydrological models, this variable may improve outflow forecasting methods on agricultural river basin. Now, several surface parameters, like soil moisture, which allow to follow the soil water budget, may be inferred from space remote sensing. The present paper reports on an investigation in central Brittany (France) using radar and optical remotely sensed data. Ground truth data have been compared with ERS-1/SAR data at the basin scale. The results confirm the capability of monitoring surface soil moisture during the periods of low vegetation density with the spaceborne ERS-1/SAR. The second aspect of the project is the development of an hydrological model taking into account soil and vegetation cover to simulate soil moisture and outflows. The results of the simulation are generally in good agreement with the measurements, the assimilation of combined remote sensed data in the model is in progress in order to validate the methodology. The possibility of application of this methodology in operational hydrology is discussed.

## Bibliographie

- BERNARD, R., SOARÈS J.-V., VIDAL-MADJAR, D., 1986. Differential bare field drainage properties from airborne microwave observation, *Water Res. Res.* 22(6), p. 869-875.
- 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'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris (France)*, « Sciences et Techniques de l'Environnement », Cemagref, mars 1994, 327 p.
- COGNARD, A.-L., 1996. Suivi de l'état hydrique des sols par télédétection spatiale (radar, infrarouge thermique) et modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant, *Thèse de l'Université Paris XI, Orsay*, Cemagref décembre 96, 150 p.+ Annexes.
- COGNARD, A.-L., LOUMAGNE, C., NORMAND, M., OLIVIER, Ph., OTTLÉ, C., VIDAL-MADJAR, D., LOUAHALA, S., 1995. Evaluation of the ERS.1/SAR capacity to estimate surface soil moisture, First 1992 results over the Naizin watershed, *Water Res. Res.*, vol.(31)4, p. 975-982.
- DEARDORFF, J.-W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, vol.83(4), p. 1889-1903.
- DOBSON, M.-C., ULABY, F., MOEZZI, S., 1982. Assessment of radar resolution for soil moisture estimation from simulated satellite imagery, Remote Sensing Lab. Techn, *Report 551-2*, University of Kansas Center for Research, Lawrence Kansas.
- EDIJATNO, MICHEL, C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, *La Houille Blanche*, n°2, p. 113-121.
- 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, *Hyd Continent.*, vol. 3, n°2, p. 75-87.
- LOUMAGNE, C., NORMAND, M., MICHEL, C., 1991. Etat hydrique du sol et prévision des débits, *J. of Hydrology*, vol.123, p. 1-17.
- LOUMAGNE, C., CHKIR, N., NORMAND, M., OTTLÉ, C., VIDAL-MADJAR, D., 1996. Introduction of the soil-vegetation-atmosphere continuum in a rainfall-runoff model for remote sensing data assimilation, *Hydrological Science Journal*, vol.41(6), p. 889-902.
- MAKHLOUF, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres, *Thèse de Doctorat*, Université Paris-Sud, Cemagref, 227 p.
- NASCIMENTO, N., MICHEL, C., 1992. Assessment of modelling uncertainties and measurement errors in hydrology, *4th European J. Scientist Course*, France 9-12, April 92.
- OTTLÉ, C., VIDAL-MADJAR, D., 1994. Assimilation of humidity inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX/MOBILHY region, *J. of Hydrology*, vol.158, p. 241-264.
- SÉGUIN, B., ITIER, B., 1983. Using midday surface temperatures to estimate daily evapotranspiration from satellite thermal infra red data, *Int J. Remote Sensing*, vol.4 n°2, p. 371-383.
- SOARÈS, J.-V., BERNARD, R., TACONET, O., VIDAL-MADJAR, D., WEILL, A., 1988. Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements, *J. of Hydrology*, vol.99, p. 281-296.
- SUCKSDORFF, Y., OTTLÉ C., 1990. Application of satellite remote sensing to estimate areal evapotranspiration over a watershed, *Journ. of Hydrol.*, vol.121, p. 321-333.
- TACONET, O., CARLSON, T., BERNARD, R., VIDAL-MADJAR, D., 1986. Evaluation of a surface/vegetation parametrization using satellite measurements of surface temperature, *J. Climate Appl. Meteor.*, vol 25, p. 1752-1767.
- ULABY, F.-T., KOUYATE, F., FUNG, A., 1982. A backscatter model for a randomly perturbed periodic surface, *IEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 20, n° 4, p. 518-528.
- VIDAL, A., PERRIER, A., 1989. Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite infrared data, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 10, n°8, p. 1327-1337.