
Observation spatiale pour la biosphère continentale

Ressources en eau et caractérisation des sols –
Bilan et perspectives

Cécile Loumagne et Christine King

L'observation de la Terre depuis l'espace pour l'étude du cycle de l'eau a fait l'objet d'un développement croissant en raison de son rôle central joué dans les domaines liés aux évolutions climatiques, à la gestion des ressources hydriques ou à la prévention des risques naturels.

Les développements récents des capteurs spatiaux ont permis d'obtenir de nouvelles informations spatio-temporelles des changements d'état hydrique et de surface pouvant être utilisées pour modéliser et gérer les processus de transferts à l'interface sol-végétation-atmosphère. Les organisations institutionnelles telles que les agences de l'Eau sont à la recherche d'outils opérationnels qui leur permettent de suivre l'évolution du bilan hydrique tant à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle régionale. Couplée aux modèles hydrométéorologiques, la télédétection est un outil privilégié pour répondre à ce besoin.

Les capteurs actifs ou passifs utilisés pour des applications hydrologiques couvrent un domaine très large du spectre électromagnétique et les informations issues de ces gammes spectrales ou de leur combinaison ont permis, au cours de ces dernières années, d'identifier et d'analyser de nombreuses composantes du cycle de l'eau.

Les préoccupations des hydrologues rejoignent celles des climatologues, des physiciens de l'atmosphère mais aussi celles des pédologues, des géologues et celles des agronomes. Cependant, les échelles abordées sont généralement différentes et des rencontres entre ces domaines sont à encourager au prix d'une adaptation des objectifs de chacun. L'ob-

servation depuis l'espace offre une perspective de progression significative de la connaissance. Elle permet à la fois l'estimation des surfaces concernées par les différents écosystèmes et l'évaluation de leur fonctionnement aux échelles locale, régionale, continentale et globale. Dans ce dernier cas, les possibilités actuelles de la télédétection sont encore limitées, mais seront complétées par de nouvelles missions satellitaires en préparation.

Les principaux développements récents que nous présentons dans une première partie sont axés sur la détermination de paramètres décrivant les eaux libres de ceux gérant le cycle de l'eau ainsi que de ceux gérant la redistribution latérale et verticale des flux. Dans une seconde partie, nous présentons les différentes équipes travaillant dans ce domaine et les collaborations développées, la dernière partie étant consacrée aux perspectives envisagées pour les prochaines années dans ce domaine et les thèmes de recherche à dégager pour répondre aux besoins actuels.

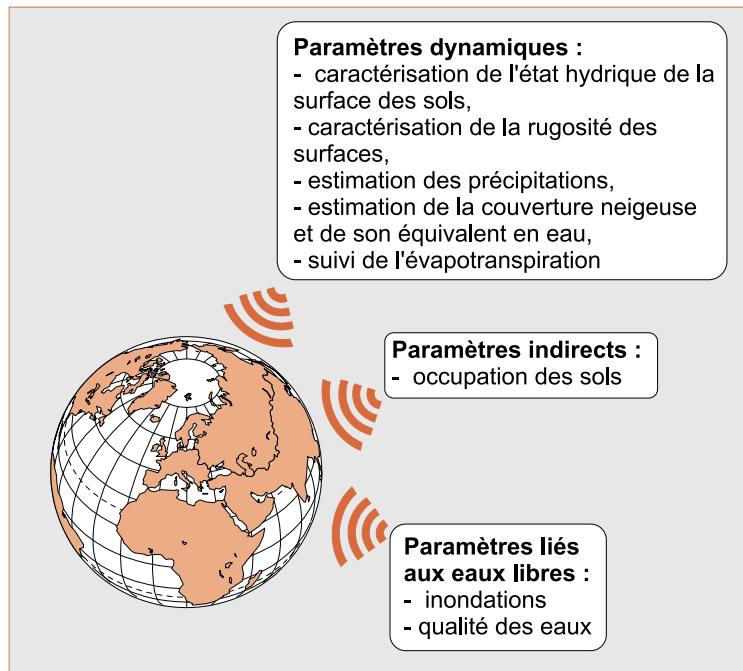
Principaux développements récents

■ Les ressources en eau (figure 1)

Les applications sont fréquemment développées selon des schémas identiques : détermination de paramètres caractéristiques, méthodes d'analyses et d'extraction d'information, enfin utilisation dans les modèles de fonctionnement.

Nous avons organisé ces développements en partant des paramètres recherchés les plus directement utilisables dans des modèles, puis en examinant

Cécile Loumagne
Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44
92163 Antony
Cedex
Christine King
BRGM
BP 6009
45060 Orléans



▲ Figure 1. – Principaux développements récents apportés par l'observation spatiale appliquée à la ressource en eau.

l'accès plus ou moins empirique à des paramètres ou des indicateurs indirects du comportement hydrique des surfaces.

Paramètres liés aux eaux libres

Les informations liées aux eaux libres semblaient les plus directement accessibles, c'est pourquoi elles n'ont fait l'objet que de peu de recherches, et les applications ont pu rapidement être prises en charge par les utilisateurs finaux. A l'heure actuelle, ces applications permettent de faire « remonter » vers l'amont des possibilités d'investigations à associer aux nouveaux capteurs ou à l'amélioration des modèles de fonctionnement, de façon à les rendre aptes à utiliser directement des paramètres issus de la télédétection.

Suivi des inondations

Le suivi des inondations s'appuie de plus en plus sur l'utilisation de l'observation satellitale et plus particulièrement pour la cartographie des inondations, sur l'évaluation des dommages, l'identification des zones à risques et la modélisation de la dynamique fluviale. Les études initiales fondées sur le domaine optique ont rapidement été supplantées par les séries temporelles d'images radar traitées dans des délais très courts. En effet, pour

la prévention du risque d'inondation et l'alerte de la population, un des premiers objectifs est de générer, dans un temps le plus court possible, une cartographie avec une première approximation des zones inondées et l'évaluation des dommages qui pourraient être encourus.

L'un des rôles les plus médiatiques joué par l'imagerie spatiale a été de favoriser la perception de l'extension des crues catastrophiques sur la base de constats *a posteriori*, comme par exemple le suivi des crues du Mississippi avec des images ERS1 (*European Radar Satellite 1*). Actuellement, la cartographie des inondations est opérationnelle et permet un suivi de l'extension des zones d'épandage des crues grâce à l'utilisation d'images multi-spectrales et multitemporelles. La combinaison d'images dans le visible avec des données radar permet de s'affranchir de la contrainte majeure liée aux données optiques qui est la couverture nuageuse, tout en fournissant des informations sur les dommages liés aux cultures et aux structures (Kannen, 1995).

Au-delà d'un constat *a posteriori*, les études actuelles s'orientent vers la recherche d'outils performants pour une meilleure gestion du risque. L'association des images satellitales avec un modèle numérique de terrain et un système d'information géographique en est un exemple. Ceci permet d'analyser, d'interpréter puis de classer les zones à risques et de fournir des cartes thématiques identifiant les zones sensibles, constituant ainsi un outil de prévention des risques.

Par ailleurs, pour comprendre la dynamique des phénomènes, connaître la contribution des différents systèmes hydrauliques, identifier le niveau du risque et le quantifier, les systèmes de surveillance en temps réel s'appuient sur des modèles hydrologiques et hydrauliques. La modélisation est le chaînon le plus délicat à mettre en place car les données nécessaires ne sont pas toujours disponibles ni suffisamment précises pour faire tourner les modèles. Une précision décimétrique est en effet indispensable pour des calculs exacts de hauteur et de volume d'eau ou pour simuler l'avancée ou le recul du front humide. Or les données satellitales et les modèles numériques de terrain manquent de précision et d'accessibilité pour être utilisés comme données d'entrée des modèles et doivent être encore utilisés conjointement avec des données conventionnelles.

La télédétection reste, néanmoins, un outil essentiel pour affiner les résultats des modèles, améliorer leurs performances et les valider. On peut citer le programme NOAA du Cemagref comme exemple de projet récent où les hydrologues voient dans la télédétection un moyen d'acquérir des données spatialisées pour affiner la modélisation des écoulements de surface.

Qualité de l'eau

Les milieux aquatiques sont très dépendants des rejets d'origine diffuse provenant de l'agriculture intensive ou bien de rejets d'origine ponctuelle provenant des villes et des industries.

L'étude et la surveillance de la qualité de l'eau reste particulièrement difficile du fait de la nature diffuse des sources de contamination et de la variabilité spatiale des données de base qui contrôlent les phénomènes physiques étudiés : utilisation du sol, pédologie, géomorphologie, structures d'entreposage, parcelles d'épandage...

– L'utilisation de la télédétection aéroportée et satellitale à haute résolution a donné des résultats encourageants, essentiellement pour la détection des paramètres optiques de coloration et de turbidité de l'eau. Plusieurs paramètres sont accessibles avec précision comme les matières organiques et minérales en suspension associées aux sédiments, notamment en zone côtière, la concentration en chlorophylle caractérisant l'eutrophisation des retenues d'eau ou encore les sources ponctuelles de pollution.

Par contre, les paramètres tels que les nitrates, les phosphates ou la concentration en oxygène d'origine diffuse, ne peuvent être directement estimés à partir d'images satellitales. Néanmoins des relations ont pu être établies entre ces paramètres et les paramètres optiques (Dekker *et al.*, 1996).

La télédétection associée à la mesure *in situ* et à la modélisation de la qualité de l'eau fournit de précieuses informations complémentaires pour établir des cartes de concentration pour le contrôle des paramètres de qualité et la validation des modèles. Mais ces usages restent très limités. L'arrivée de capteurs à haute résolution spatiale et/ou spectrale, devrait aider à poursuivre ces recherches pour préciser les dépendances entre les paramètres optiques et les variations du milieu (granulométrie des particules, composition et type de

matière en suspension) et établir des algorithmes ayant de larges domaines de validité.

– De nombreuses recherches (Cluis *et al.*, 1993, Renault *et al.*, 1993) utilisent un Système d'Information Géographique (SIG) adapté à l'évaluation régionale et locale des pollutions diffuses en milieu agricole non seulement en tant que base de données géographiques, mais aussi pour les traitements internes qui y sont offerts et les possibilités de modélisation intégrée. Ces modèles ont généralement pour but d'identifier les zones à risques et – suite à des simulations – d'évaluer l'efficacité des différents types de solutions en fonction de l'occupation du sol ou de la caractérisation du paysage. La télédétection peut les nourrir en partie par des informations sur l'occupation du sol.

Un des problèmes majeurs rencontrés concerne l'agrégation des données selon des unités de drainage reflétant la géomorphologie des bassins versants et l'adaptation d'un module hydrologique à la structure spatiale offerte par un SIG. L'approche développée se heurte à la difficulté de la validation à l'échelle régionale et elle n'est actuellement validée que de façon ponctuelle à cause d'un manque de compréhension de la circulation des polluants. Les travaux actuels des équipes du Laboratoire commun de télédétection du Cemagref/Engref s'orientent vers l'identification et la détection; à partir d'images satellitales, de structures morphologiques pouvant jouer un rôle de frein ou d'accélérateur dans le transfert des polluants. Un travail important reste encore à faire pour en quantifier ses effets.

Paramètres dynamiques

En dehors des données qui sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques (précipitations, neige, évapotranspiration), les efforts de recherche ont surtout porté sur l'accès aux paramètres d'états de surface jouant un rôle clé dans les processus d'infiltration et de ruissellement : ce qui requiert de définir des indices robustes, transposables et de préciser leur utilisation dans les modèles existants.

Caractérisation de l'état hydrique de la surface des sols

Différentes techniques de télédétection depuis l'espace permettent d'estimer l'état hydrique de surface des sols pour des couches de sol comprises entre 0 et 10 cm en fonction de la longueur d'onde : micro-ondes et infrarouge thermique.

Dans le domaine des micro-ondes, l'émission ou la réflexion des ondes électromagnétiques à la surface du sol dépendent des propriétés diélectriques du milieu, qui sont elles-mêmes fonction de l'humidité. Deux approches permettent d'accéder à l'humidité du sol : les méthodes actives et les méthodes passives.

Nous ne présentons ici que les principaux résultats des méthodes actives, et en particulier celles utilisant le radar à ouverture synthétique car elles ont concentré l'essentiel des travaux des équipes de ces dernières années. Elles peuvent fournir une excellente résolution au sol, mais sont fortement influencées par la végétation et les propriétés géométriques de la surface du sol. Des algorithmes et des modèles permettant de corriger ces différents effets ont été développés ces dernières années. Certaines équipes utilisent la combinaison de polarisation et de visées multi-angulaires (Dubois *et al.*, 1995, King *et al.*, 1995), « d'autres moyennent » l'information au sein du bassin versant (Cognard *et al.*, 1995), d'autres encore appliquent des corrections liées aux structures des différents couverts végétaux (Lin *et al.*, 1994, Taconet *et al.*, 1996) ou bien utilisent des approches basées sur les opérations de transferts radiatifs au sein du couvert végétal (Yueh *et al.*, 1992 ; Fung *et al.*, 1992 ; Ulaby et Elachi, 1990).

D'autres travaux sont en cours actuellement, dans le cadre de l'assimilation de paramètres issus d'images radar pour la modélisation hydrologique (Gineste *et al.*, 1997). Ces recherches s'intéressent aux processus internes au bassin versant, notamment à l'extension des zones saturées comme validation ou apprentissage pour la modélisation.

A l'heure actuelle, les algorithmes ne sont pas totalement validés. Les paramètres des modèles semi-empiriques sont liés aux données sur lesquelles ils ont été ajustés et sont souvent difficiles à généraliser. Les modèles théoriques obtenus sont complexes, leur domaine de validité peut être plus limité que prévu (Rakotoarivony *et al.*, 1995) et il est délicat d'appliquer de tels modèles à des surfaces dont on ne connaît pas bien les caractéristiques en termes de rugosité et de végétation.

Aux échelles très régionales, des tentatives intéressantes ont été faites tant en actif qu'en méthodes passives. Ces dernières ne permettent pas d'obtenir depuis l'espace des résolutions inférieures à la

dizaine de km², même si les algorithmes ont été validés aussi bien sur sols nus que recouverts par la végétation dans des conditions très variées (Wigneron, 1994).

Enfin, l'utilisation de l'interférométrie est une voie prometteuse pour améliorer la résolution spatiale de ces méthodes. Cette technique doit être testée dans un premier temps grâce à des campagnes aéroportées (programme HYDROSTAR) avant d'être installée sur des plates-formes satellitaires.

Dans le domaine du visible et de l'infrarouge, les méthodes utilisées exploitent le lien qui existe entre la température de surface, l'évaporation et l'état hydrique du sol. Différentes méthodes, décrites par ailleurs dans le paragraphe « Suivi de l'évapotranspiration », ont été développées en fonction de la présence ou non de couvert végétal.

Le suivi spatio-temporel de l'état hydrique du sol depuis l'espace, à des pas de temps adaptés aux applications hydrologiques, est possible grâce à l'utilisation en synergie des différents domaines spectraux et par le biais de modèles de bilan énergétique couplés aux modèles de transferts hydriques des bassins versants (Loumagne *et al.*, 1996). Ces modèles couplés, permettant d'assimiler des données issues de la télédétection, soit comme données d'entrée pour initialiser le système, soit en cours de simulation pour corriger l'état des réservoirs et recalculer les paramètres, sont en cours de validation et doivent être testés à différentes échelles et pour différents types d'occupation du sol avant d'être généralisés.

Caractérisation de la rugosité des surfaces

Parmi les propriétés hydrodynamiques des sols (porosité et potentiel d'infiltration, présence de croûtes de dégradation et imperméabilisation des surfaces, pierrosité et propriétés mécaniques, état de saturation hydrique et engorgement, fonction dénitrifiante...), plusieurs d'entre elles ont en commun de se modifier dès les premiers centimètres, mais avec souvent un comportement saisonnier des surfaces et des volumes pédologiques.

En micro-ondes, la rugosité des surfaces liée au travail du sol est une cause majeure de variation de la rétrodiffusion. Accéder à ce paramètre réduirait à des enjeux relevant autant de la conservation des ressources en sol puisqu'une part des signes de dégradation affectent la rugosité, que du

cycle de l'eau puisque ce paramètre joue sur la répartition entre ruissellement et infiltration.

En conditions désertiques, les modèles semblent en bonne concordance avec les résultats satellitaires quant aux effets de la rugosité sur le signal (Deroin, 1997), mais en milieu agricole, le problème est compliqué par les effets directionnels de rugosité et il n'est pas étonnant qu'une configuration de mesure unique ait montré ses limites (Le Toan *et al.*, 1993 ; Champion, 1996). D'autres études sont à encourager sur l'apport respectif de radars multi-bandes et polarimétriques, qui s'avèrent très porteurs.

Il reste que pour espérer mieux interpréter le signal, il faut faire progresser les modèles physiques de rétrodiffusion, car les modèles actuels ne rendent bien compte de l'effet de rugosité que lorsque celle-ci est contenue dans leur domaine de validité (Bertuzzi *et al.*, 1992). Leur faiblesse réside à la fois dans la prise en compte incomplète des propriétés géométriques de surface et dans la faible extension de leur domaine de validité. De plus, l'application de ces modèles sur des surfaces cultivées, présentant généralement des structures périodiques (sillons) peut s'avérer décevante.

Estimation des précipitations

Cette information concerne toutes les échelles spatiales : de l'échelle locale en passant par l'échelle régionale jusqu'à l'échelle utilisée dans les modèles climatiques.

Malgré les efforts récents de ces cinq dernières années, les précisions atteintes pour évaluer le taux des précipitations et leur localisation ne sont pas encore satisfaisantes.

Les méthodes utilisant l'infrarouge thermique, basées sur le nombre et l'étendue des événements pluvieux à sommets plus froids qu'un certain seuil (Arkin, 1979), permettent seulement d'avoir une statistique des événements produits mais ne fournissent pas de valeurs instantanées, ni les localisations précises. Les mêmes remarques s'appliquent à la méthode EPSAT de l'Orstom (Carn *et al.*, 1989) introduisant un indicateur supplémentaire : la température radiative du sol. Les pas de temps d'acquisition sont difficilement compatibles avec ceux nécessaires aux données d'entrée des modèles hydrologiques. Ils permettent surtout de suivre les variations interannuelles ou inter et intra-saisonnières (photo 1).



Corel

▲ Photo 1. – Grâce aux nouveaux capteurs mis sur orbite, la classification des nuages va être améliorée. A plus long terme, on pourra déterminer les propriétés des nuages.

Les méthodes basées sur l'absorption ou la diffusion du rayonnement micro-onde (Spencer *et al.*, 1989) par les éléments nuageux précipitants sont plus proches de la mesure physique. Mais, même dans le cas de détermination correcte des valeurs instantanées, l'échantillonnage des instruments micro-ondes ne permet pas d'obtenir des valeurs moyennes significatives.

Actuellement, un effort se fait vers le développement de méthodes combinées infrarouge-micro-ondes, qui associent l'échantillonnage correct obtenu à partir des satellites géostationnaires aux déterminations plus précises des zones précipitantes et des taux de précipitations des instruments micro-ondes (Jobard et Desbois, 1994).

Les recherches pour améliorer la détermination des précipitations sont structurées autour de campagnes de validation des algorithmes micro-ondes (programme WETNET) ainsi qu'autour de campagnes destinées spécifiquement à la mesure des précipitations tropicales (programme TRMM).

Par ailleurs, à court terme, les nouveaux satellites géostationnaires disposeront davantage de canaux spectraux infrarouge, d'une plus grande répétitivité et d'une résolution spatiale plus fine. La classification des nuages en sera améliorée, ainsi que la discrimination entre nuages convectifs et nuages stratiformes associés.

A plus long terme, les recherches se tournent vers le développement d'instruments actifs du type radar

ou lidar visant plus à la détermination des propriétés des nuages qu'à la détermination des précipitations, plutôt liée à un problème d'échantillonnage qu'à un problème d'estimation correcte des valeurs instantanées.

D'autre part, il est nécessaire aussi de mieux appréhender la décomposition des champs de précipitations issus des modèles grande échelle par des méthodes stochastiques et par une modélisation mésoéchelle. L'objectif étant l'obtention d'une entrée hydrologique valable sur des surfaces significatives au niveau régional ou au niveau d'un grand bassin versant. En effet, les paramétrisations actuellement employées sont relativement grossières et ce n'est que dans l'étude des systèmes convectifs de moyenne échelle que résident les possibilités d'amélioration. La plupart des questions qui se posent au niveau des systèmes convectifs font intervenir à la fois les conditions météorologiques régionales et les conditions locales ; elles sont donc difficiles à aborder uniquement par des raisonnements à grande échelle ou par des expériences locales et la priorité est donnée, actuellement, aux études concernant les systèmes de mésoéchelle.

Estimation de la couverture neigeuse et de son équivalent en eau

L'étendue de la couverture neigeuse et son équivalent en eau sont les paramètres les plus importants à déterminer pour pouvoir évaluer et modéliser la participation de la neige dans les processus hydrologiques.

A partir de l'observation spatiale, quelques succès ont pu être obtenus pour cartographier le manteau neigeux et évaluer son stock en eau :

– de nombreuses recherches utilisent la connaissance de l'extension du manteau neigeux (photo 2) dans des modèles hydrologiques pour simuler les débits. Grâce aux capteurs dans le visible (NOAA, LANDSAT, SPOT ET GOES), des cartes de couverture neigeuse sont utilisées de façon opérationnelle par le *US National Weather Service* (Carroll et Baglio, 1989). Les différences d'estimation sont essentiellement dues à la résolution spatiale et aux variations de la couverture nuageuse.

Il semble que les prochaines améliorations de la résolution spatiale des micro-ondes passives ainsi que la résolution spectrale et spatiale des données dans le visible et le proche infrarouge devraient accroître l'applicabilité de ces données à l'hydrologie nivale.

Cependant, c'est dans le domaine de l'imagerie à ouverture de synthèse (ROS) que les applications potentielles sont les plus grandes car la résolution spatiale est plus fine, les fréquences d'acquisition peuvent être compatibles avec le suivi de l'évolution du manteau neigeux et surtout la discrimination neige-nuage est possible. Toutefois, ces applications restent encore pour la plupart à l'état de recherches méthodologiques exploratoires telles que celles développées pour la cartographie de la neige humide grâce à des études multitemporelles entre images avec et sans neige dans les laboratoires du LAMA et du LGGE du CNRS associés à l'INRS Eau du Québec ou pour la cartographie de la neige sèche à partir de la polarisation croisée (Rott, 1990).

Pour l'estimation de l'équivalent en eau, l'étude du signal polarimétrique dans chaque fréquence est une piste très prometteuse. Pour le moment, cette information est uniquement obtenue par des capteurs utilisés pour des missions aériennes expérimentales, ce domaine reste donc toujours exploratoire.

Photo 2. – L'étendue de la couverture neigeuse et son équivalent en eau sont déterminants pour évaluer et modéliser l'apport de la neige dans les processus hydrologiques. ▶



F. Valla, Cemagref

Suivi de l'évapotranspiration

Le suivi de l'évapotranspiration permet d'évaluer l'impact des effets climatiques et anthropiques sur les écosystèmes naturels ou agricoles et d'estimer le bilan d'énergie de surface intervenant dans les échanges sol-atmosphère. La télédétection est une des seules techniques de mesure qui permet d'obtenir une telle information aux différentes échelles qui intéressent les climatologues, les atmosphériciens, les hydrologues et les agronomes.

Nous ne présentons, ici, que très rapidement les méthodes destinées aux applications hydrologiques. Ces méthodes exploitent toutes le lien qui existe entre l'évapotranspiration et la température de surface.

Les méthodes les plus simples sont des méthodes empiriques et statistiques qui sont actuellement utilisées, de façon opérationnelle, pour estimer l'évapotranspiration à l'échelle régionale. De nombreuses équipes ont établi des relations permettant d'obtenir une expression de l'évaporation journalière à partir d'une mesure instantanée de la température de surface vers le milieu de la journée (Seguin et Itier, 1983 ; André *et al.*, 1986).

D'autres méthodes utilisent une approche analytique à base physique et reposent sur l'estimation du flux de chaleur sensible exprimé en fonction de la différence entre la température de surface et la température aérodynamique. Le flux d'évaporation est alors déduit de l'équation de bilan énergétique ; (Kustas *et al.*, 1996, Sellers *et al.*, 1995). Ces méthodes semblent intéressantes pour des applications opérationnelles si l'on peut mesurer la température de surface régulièrement.

Les dernières méthodes s'appuient sur la résolution du bilan énergétique à l'aide de modèles biophysiques complexes décrivant les phénomènes de transferts hydriques et énergétiques à l'interface sol-végétation-atmosphère (Camillo *et al.*, 1983 ; Carlson *et al.*, 1981). Ce type d'approche exige l'introduction de paramètres détaillés, ce qui peut limiter son application aux régions pour lesquelles existe une importante base de données concernant les sols et la végétation. Actuellement, les recherches tendent à limiter le nombre de paramètres et à améliorer l'estimation de l'énergie disponible, notamment le rayonnement net depuis l'espace.

Les approches qui semblent être les plus prometteuses consistent à utiliser la température de surface et des indices de végétation ou bien le taux de variation de la température de surface au cours du temps, couplé à un modèle de couche limite atmosphérique (Prévot *et al.*, 1994). Les résultats obtenus sont encourageants : la différence entre l'évapotranspiration observée et calculée ne dépasse pas 20 % pour des échelles de temps allant de l'heure au jour, ce qui correspond aux incertitudes sur la mesure.

Paramètre indirect : l'occupation du sol

Fréquemment, les données satellitales sont utilisées pour spatialiser les classes d'occupation du sol comme indicateurs de ruissellement : la présence ou non de végétation pérenne ou temporaire, les classifications de type de végétation permettent alors de calculer un pourcentage d'imperméabilisation du bassin ou d'estimer le ruissellement à partir de paramètres géomorphologiques.

Un autre intérêt de la classification est de fournir des données d'entrée aux modèles physiques de diffusion du signal pour une meilleure compréhension de la relation cible/capteur. La classification facilite l'estimation des paramètres géophysiques de la surface.

Dans le domaine visible/infrarouge, il a été montré (Rango *et al.*, 1983) que le taux d'identification des différents types d'occupation du sol était de 95 % en région d'agriculture intensive et que les coûts d'obtention de ces données n'étaient que du tiers de ceux des données obtenues par les techniques conventionnelles pour des bassins supérieurs à 25 km².

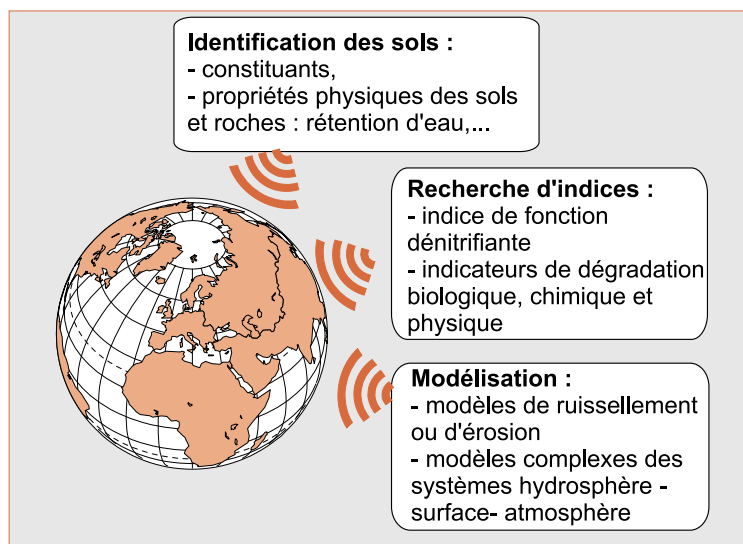
Depuis la conception de systèmes radar à ouverture synthétique permettant l'acquisition d'images à forte résolution spatiale de l'ordre de dix mètres, l'application des techniques d'hyperfréquence connaît un essor grandissant et le taux de classification des cultures devient assez performant par ces seules longueurs d'onde, notamment grâce à la nouvelle génération de radars multifréquences et multipolarisations tels que AIRSAR et SIR-C du *Jet Propulsion Laboratory*. Des études préliminaires ont montré que l'apport de ces nouveaux capteurs s'est avéré très important pour une meilleure caractérisation des interactions entre le signal et la surface étudiée (Ulaby et Elachi, 1990).

Pour les applications en hydrologie, les progrès à attendre dans le paramétrage du potentiel de ruissellement ou d'infiltration seront cependant limités, car il n'existe pas de correspondance simple avec les coefficients de ruissellement qui doivent être définis expérimentalement dans chaque contexte. Mais l'intérêt le plus fréquent porte sur l'identification des pratiques culturales, facteur saisonnier des modifications des chemins d'eau.

■ La caractérisation des sols (figure 2)

En télédétection, la fonction du sol la plus abordable est son rôle d'interface privilégiée dans le cycle de l'eau car il intervient directement sur le déterminisme de la répartition entre infiltration et ruissellement des eaux de précipitation, et plus largement dans la redistribution latérale et verticale de l'eau. Mais le sol, de par ses caractéristiques physiques de couleur et de rugosité de surface, détermine aussi l'albedo et intervient comme interface d'échanges avec l'atmosphère en assurant une part importante de la réception et de la régulation de l'énergie thermique.

Figure 2. – Principaux développements récents apportés par l'observation spatiale appliquée à la caractérisation des sols. ▼



Identification des constituants du sol

Les recherches sur la signature spectrale des sols auraient connu récemment des développements limités si paradoxalement les physiciens n'avaient pas apprécié leur influence sur les modifications des divers indices de végétation (Leprieur *et al.*, 1994), leur intérêt comme surfaces de références

pour les calages (Cosnefroy *et al.*, 1996), ou leur enjeu dans la déconvolution des signatures de réflexion bidirectionnelle (Cierniewski *et al.*, 1995).

Durant ces dernières années, l'identification directe des constituants d'un sol a été recherchée dans les courtes longueurs d'onde, visible, PIR, MIR. Courante en spectrométrie de laboratoire, cette technique ne s'est avérée performante que dans des conditions naturelles précises, comme par exemple l'estimation de teneur en oxy-hydroxydes, en kaolinite ou en matière organique. Dans tous ces cas, l'identification s'améliore avec le nombre de bandes spectrales.

C'est pourquoi les capteurs à haute résolution spectrale, tel AVIRIS en aéroporté, représentent actuellement pour plusieurs équipes la seule voie pour approfondir cette identification de minéraux (Rowan, 1995). Les recherches actuelles portent sur les techniques de déconvolution du signal par référence à des bases de signatures spectrales constituées par radiométrie de terrain et à des modèles de mélange (Bateson *et al.*, 1996).

Si le domaine des micro-ondes a vu fortement progresser les études sur la rugosité développées ci-dessus, dans le domaine du thermique, les acquis se limitent par contre aux mesures de laboratoire et à des campagnes aéroportées réalisées en conditions désertiques. Dans ce cas, le potentiel de discrimination lithologique s'est avéré très riche, mais présente un intérêt probablement limité aux régions arides. De plus, ces propriétés pourraient permettre d'utiliser certaines surfaces comme références, soit pour améliorer les corrections atmosphériques, soit pour suivre la stabilité d'un capteur.

Par ailleurs, le comportement thermique des sols est très mal connu en milieu aride comme en conditions moins sévères, bien qu'il représente une voie importante de connaissances pour caractériser les propriétés physiques des sols et des roches, en particulier leurs capacités de rétention d'eau.

Le potentiel des hyperfréquences et de l'infrarouge thermique s'avère essentiel pour privilégier l'accès à des paramètres quantitatifs et continuellement détectables, rugosité et humidité, et renforcer la prise en compte du sol comme « acteur » dans des processus d'échanges chaleur, eau ou matières.

Recherche d'indicateurs du fonctionnement des sols

L'étude des sols par télédétection est quasiment toujours confrontée au problème de couverts partiels ou continus. Bon nombre de paramètres biophysiques des sols sont alors seulement accessibles de façon indirecte et qualitative, comme bien sûr leur rôle de support nutritif de la végétation. En plus des indicateurs du régime hydrique des sols déjà développés dans le paragraphe précédent, on peut citer :

– les indicateurs de la fonction dénitrifiante : ils peuvent être manifestes si les sols sont occupés par des prairies permanentes, ce qu'une série multitemporale SPOT peut confirmer, et situés en zone de bas-fond, ce qu'un modèle numérique de terrain (MNT) peut confirmer ;

– les indicateurs de dégradation des sols : ils peuvent être de plusieurs natures, (i) biologique, avec une baisse progressive du taux de matière organique et donc de la réflectance selon la date de défrichement ou de mise en culture intensive, (ii) chimique comme la salinisation croissante des terres dont l'irrigation a été mal gérée, et qui peut se traduire d'abord par une baisse de la vigueur des cultures voire leur abandon, puis par l'apparition d'efflorescences salines en surface (Kalra *et al.*, 1996), (iii) enfin de nature physique comme l'apparition de croûtes et de compactions superficielles sous l'effet conjugué des eaux de surface et de la déstructuration naturelle ou anthropique des horizons supérieurs (Lacaze *et al.*, 1996).

Introduction de paramètres dans les modèles de fonctionnement

L'utilisation de ces informations dans les modèles de ruissellement ou d'érosion ne se fait qu'assez lentement (Leek, 1992 ; Zhangshi Yin *et al.*, 1997), pour des raisons similaires au domaine hydrologique : les modèles existants sont encore rarement à base spatialisées, et les paramètres de surface y tiennent une place minime.

Tous ces exemples montrent le parti qui commence à être tiré du suivi des changements d'états de surface et ne peuvent être dissociés des autres recherches conduites à partir de séries temporelles pour suivre l'évolution d'un paramètre quantitatif (Seguis *et al.*, 1997).

Le potentiel de l'interférométrie différentielle n'est

qu'à peine abordé actuellement pour caractériser des changements de surface autres que les mouvements de terrain. Il n'est pour l'instant pas acquis que les changements d'états de surface, notamment hydriques ou géométriques, conservent la cohérence des surfaces et soient donc des paramètres accessibles. Mais cette technique ouvre un potentiel intéressant pour le suivi des changements d'états de surface.

Grâce aux capacités actuelles et futures des instruments de télédétection, la détection et l'inventaire de signes de fonctionnement du sol permet déjà et permettra davantage d'établir un constat et un diagnostic sur la ressource en sol et son rôle dans les processus de la biosphère. Mais le passage nécessaire à faire est l'intégration de ces informations dans des modèles de fonctionnement plus complexes du système « hydrosphère/surface/atmosphère » si l'on veut se doter d'outils de pronostic plus réalistes.

Contexte national et international

Ce n'est que récemment que sont apparues les préoccupations d'étude des échanges surface continentale-atmosphère incluant les processus hydrologiques.

• Ces recherches ont été soutenues dans le cadre de programmes internationaux tels que BAHC (*Biological Aspects of the Hydrological Cycle*) du Programme International Géosphère Biosphère ou GEWEX (*Global Energy and Water Cycle Experiment*) du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (OMM). D'autres projets ont été développés dans le cadre de programmes nationaux tels que le Programme National d'Étude de la Dynamique du Climat (PNEDC), le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) ou le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (PIR-Environnement).

• Ces différents projets ont permis de définir les procédures à mettre en œuvre et les limites pour modéliser aux différentes échelles spatiales (globale, mésoéchelle, régionale, et locale) les processus hydrologiques et leur variabilité spatio-temporelle.

Plusieurs de ces projets ont donné lieu à de grandes campagnes de mesures telles que Hapex-

1. Nous citerons pour l'humidité du sol : AMI/ERS1, ANU/ERS2, JERS-1, RADARSAT, SSM/I, pour la température de surface : AVHRR, LANDSAT TM ; pour le manteau neigeux : LANDSAT, AVHRR, SSM/I, STR/ERS1, ATSR/ERS2, RADARSAT ; pour les précipitations : GOES, SSM/I ; pour l'occupation du sol : LANDSAT, SPOT, AVHRR, ATSR/ERS2.

Mobilhy 1986, Efeda 1991, Hapex Sahel 1992, Alpillés 96-97, Naizin 92-94, Orgeval 95-97, qui ont permis de mieux définir l'intérêt et les limites des capteurs satellitaires ¹.

De nombreuses équipes de recherche se sont impliquées dans ces applications à des niveaux divers, depuis la physique de la mesure et la modélisation des processus en passant par des méthodologies spécifiques du traitement d'images.

Au niveau national, les principaux pôles de cette activité de recherche sont constitués par le CNRS-Universités (CESBIO, CETP, SERTIT, LMD, ENS, LOA, LAMA, LGGE...) pour une part, l'INRA, l'ORSTOM, le CEMAGREF, le BRGM, le CIRAD et MÉTEO-FRANCE (CNRM) pour le reste.

Si des collaborations nombreuses ont été mises en place et des regroupements en termes de méthodologie et de champs thématiques ont été soutenus par des programmes tels que le PNTS, les laboratoires et organismes de recherche orientent chacun leurs travaux dans des domaines privilégiés :

– pour les précipitations, le LMD, le LTHE, l'ORSTOM, MÉTEO-FRANCE...

– pour la couverture neigeuse, le LAMA, le LGGE, MÉTEO-FRANCE...

– pour la végétation, le CESBIO, l'INRA, le CETP, le CEMAGREF, le LCT...

– pour l'estimation des flux de surface, le LTHE, le CETP, l'INRA, l'ORSTOM, le CESBIO...

– pour les caractéristiques hydriques et de surface du sol, le CEMAGREF, l'INRA, le BRGM, l'ORSTOM, le CEREG, le CESBIO...

Au niveau international, il est malheureusement difficile d'être exhaustif et nous ne citerons ici que quelques-uns des nombreux laboratoires de recherche qui ont collaboré à des projets avec les organismes précités :

– aux États-Unis, l'USDA et la NASA ainsi que les laboratoires de plusieurs universités (Iowa, Purdue, Kansas, Arizona) ;

– au Canada, le *National Hydrology Research Institute*, l'INRS Eau ;

– en Allemagne, l'Institut d'Hydrologie de la Ruhr ;

– en Angleterre, l'Institut d'Hydrologie de Wallinford ;

– mais aussi aux Pays-Bas et en Pologne où les équipes obtiennent des résultats importants pour l'hydrologie à partir de l'observation spatiale. Sur ce point, les collaborations étrangères restent à renforcer ou à identifier.

Malgré un certain nombre d'acquis, notamment, dans le domaine de l'estimation en eau des surfaces couvertes ou non couvertes, il reste beaucoup à faire à plusieurs niveaux et de nombreuses questions se posent encore. Nous en présentons quelques-unes, tout en essayant de les positionner par rapport aux futurs grands programmes scientifiques et aux grandes campagnes de mesures prévues ainsi qu'au lancement de nouveaux capteurs satellitaires.

Les perspectives

L'apport de la télédétection à l'hydrologie a été indéniable, notamment pour la caractérisation de l'état hydrique et des paramétrisations sol-végétation pour les modèles de bilans hydriques, ainsi que dans les domaines de l'hydrologie nivale.

Des cartographies peuvent déjà être fournies de façon quasi opérationnelle pour la détermination de l'occupation du sol et le suivi des inondations, même si des progrès sont attendus en classification grâce à la conception des futurs capteurs polarimétriques et la fusion de données multibandes. C'est pourquoi on note que parmi les premiers projets d'application en hydrologie identifiés par le nouveau programme incitatif européen – Centre d'observation de la Terre –, deux d'entre eux sont coordonnés par des acteurs du PNTS (NOAH par le Cemagref, et FLOODGEN par le BRGM).

A part ces ouvertures, l'usage des données satellitaires reste souvent très qualitatif et sous-utilisé pour les applications numériques ou quantitatives. Pour orienter les recherches, il faut tenir compte de trois facteurs : les besoins de l'aval liés à la bataille de l'eau, les possibilités actuelles de développement scientifique ou technique liées aux nouveaux capteurs, et la mobilisation des équipes de recherche.

La bataille de l'eau : la recherche et les développements à venir sur les composantes satellitaires du cycle de l'eau doivent être envisagés en synergie avec les priorités actuelles des programmes internationaux d'aide au développement d'une agri-

culture durable, car la bataille de l'eau s'annonce cruciale dès le début du troisième millénaire :

- dans les pays en voie de développement, il s'agit de mieux localiser et estimer les ressources en eau et de conserver la ressource en sols déjà mise à mal par l'agriculture intensive (salinisation, érosion) ;
- dans les pays développés : la priorité est accordée à la gestion de l'eau. Il s'agit notamment d'adapter cette gestion selon les usages de l'eau et de tirer parti au maximum des propriétés des sols en tant que filtre (quantité d'eau stockée ou dirigée vers les nappes) et épurateur (qualité des eaux).

Les priorités de recherche : il reste encore à approfondir l'interprétation des données complexes obtenues par les différents capteurs et leurs modalités d'insertion dans les modèles.

En effet, même si ces approches ont considérablement fait progresser la compréhension du signal et permis d'établir des configurations optimales pour l'accès à un paramètre donné, elles ne fournissent qu'une forme fonctionnelle de la réponse du capteur. Les paramètres sont toujours ajustés aux données expérimentales, les algorithmes sont donc difficilement généralisables à des zones où ils n'ont pas été calés.

Au-delà de ces approches semi-empiriques, des progrès sont à faire dans la modélisation théorique des interactions cibles/signal. Les travaux actuels s'orientent vers une meilleure paramétrisation des structures sol-végétation, et un développement des complémentarités entre électromagnéticiens et spécialistes de la mesure expérimentale, notamment, pour la modélisation des surfaces hétérogènes.

- L'utilisation de ces paramètres, extraits de l'information satellitale, reste encore délicate : il n'existe pas de méthodes vraiment opérationnelles d'inversion tenant compte de la rugosité, de l'influence du relief et de la végétation ; même si les résultats sont parfois interprétables par les modèles théoriques, il reste encore à identifier leur domaine de validité.
- L'étude des signatures polarimétriques permet de discriminer les états de surface et de classer les cibles ; on peut donc espérer faire des avancées significatives si l'on détermine son intérêt par rapport aux études multifréquences, multi-incidences, multipolarisations, tout en renforçant les liens entre mesures de terrain et développements de modélisation.

- Il faut rapidement tenter d'améliorer les méthodes d'assimilation dans les modèles en hydrologie : en effet les modèles globaux ou distribués, ne sont pas toujours très adaptés au couplage avec la télédétection spatiale. Les techniques d'assimilation de ces nouveaux paramètres dans les modèles hydrologiques doivent être développées et validées et il reste à démontrer l'amélioration de leurs performances pour des applications opérationnelles.

- Enfin il faut améliorer les méthodes de spatialisation des modèles : l'utilisation de la télédétection devrait prendre de l'ampleur grâce à l'accès à des données spatialisées : il faut tendre vers la mise au point de nouvelles méthodologies couplant des données au sol et des données satellitales, intégrant les changements d'échelle ou utilisant des séries temporelles concomitantes, à différents pas de temps.

Aujourd'hui, la recherche en hydrologie tend à établir des passerelles avec les climatologues et atmosphériciens pour essayer de modéliser les variations spatiales et temporelles des processus hydrologiques à des échelles qui dépassent celles du bassin versant et mettent en jeu non seulement, des interactions avec la surface, mais aussi avec l'atmosphère.

Cette recherche dépend étroitement des données disponibles et les progrès dans la compréhension des processus se feront plutôt dans le sens d'une meilleure adéquation des données que vers une sophistication des modèles, pour lesquels on ne possède pas toujours les moyens d'obtenir les paramètres descriptifs du milieu pour les valider (Engman, 1996).

Si les mesures *in situ* classiquement utilisées en hydrologie ne permettent pas de prendre en compte la grande diversité spatiale et temporelle des processus hydrologiques, la télédétection semble pouvoir appréhender l'hétérogénéité des phénomènes ainsi que les problèmes de disparité et d'interdépendance d'échelle. Sa capacité de passer de l'échelle ponctuelle à l'échelle globale, d'agréger et de désagréger les informations, peut permettre d'aborder l'hydrologie sous un autre point de vue et de venir compléter les données conventionnelles.

De nouvelles données sont accessibles en combinant les domaines spectraux et les configurations des capteurs ainsi qu'en associant cette information à de nouvelles représentations spatiales (modèles numériques de terrain, systèmes d'informations géographiques).

Actuellement, les capteurs spatiaux ne sont pas optimaux pour des applications hydrologiques car ils sont souvent dédiés à d'autres programmes d'observation de la Terre. Malgré cela, ils se révèlent souvent assez bien adaptés lorsque leurs limites d'utilisation sont connues. On peut citer pour l'estimation des précipitations : GOES, SSM/I, pour l'estimation de la couverture neigeuse : ATSR/ERS2, RADARSAT, SSM/I, SPOT, AVHRR, LANDSAT, pour la caractérisation de l'état hydrique : AMI/ERS2, JERS-1, SSM/I, RADARSAT, pour le suivi de la température de surface : AVHRR, LANDSAT TM, pour l'occupation du sol : AVHRR, LANDSAT, SPOT, ATSR/ERS2.

L'amélioration des résolutions spatiales pour LANDSAT, SPOT et pour les capteurs dans le domaine des micro-ondes passives ainsi que la continuité des satellites NOAA, GOES, METEOSAT, laissent espérer un accroissement d'informations issues de la télédétection. Par ailleurs, de nouvelles possibilités pour des applications hydrologiques voient le jour grâce à la préparation de nouveaux capteurs avec de meilleures résolutions spatiales et avec des bandes spectrales mieux adaptées, notamment dans le domaine des micro-ondes où l'on peut s'attendre à des résultats opérationnels dans un futur proche.

Certains capteurs programmés sont encore en projet, d'autres, sont déjà en cours de test et prochainement installés sur des plate-formes satellitaires telles que EOS².

La mobilisation des équipes de recherche par des dispositifs expérimentaux

De nouvelles campagnes intensives de mesures seront lancées et d'autres sont poursuivies afin de mieux comprendre la mesure et constituer des bases de données ciblées pour valider les modèles développés couplant l'information extraite des données satellitaires et celle des données conventionnelles. Ces campagnes s'inscrivent dans des zones test et s'appuient sur des sites ateliers pour répondre à des problèmes spécifiques de l'hydrologie liés à des conditions climatiques particulières. Nous pouvons citer ici quelques unes des grandes campagnes en cours de programmation ou qui seront lancées prochainement :

Le programme GCIP concerne l'étude du couplage des processus hydrologiques et atmosphériques à l'échelle d'un très grand bassin, celui du Mississippi.

L'expérience tropicale LAMBADA, sur l'Amazonie, concerne l'étude des systèmes convectifs au dessus de la forêt équatoriale et les bilans de surface.

Le programme BALTEX se préoccupe des bilans d'énergie et hydrologiques dans la région de la mer Baltique et étudie le couplage des processus sol, atmosphère, mer, glace.

Le programme GAME étudie les bilans pour différents climats à l'est du continent eurasiatique, le programme MAGS s'intéresse à ce qui se passe sur l'Arctique canadien et le programme NOPEX étudie les échanges hydrométéorologiques entre les forêts, les cultures et les lacs dans la région de la forêt boréale scandinave.

La campagne SALSA à la frontière USA-Mexique doit déboucher sur une modélisation hydrologique au niveau du bassin versant à l'intérieur d'une région montagneuse.

En France, l'expérience de télédétection Alpilles-Reseda contient également un volet hydrologique significatif même si le site n'est pas tout à fait approprié puis qu'il ne constitue pas un bassin versant fermé. Par contre, la communauté hydrologique française s'est dotée d'un réseau de Bassins Versants de REcherches (BVRE) et travaille à un plan de développement de ces observatoires hydrologiques où le spatial prend bien sa place et permette son utilisation simple par les gestionnaires de bassin.

Les progrès futurs dépendent donc beaucoup de la mise à disposition de données adaptées au développement et à la validation des modèles de simulation des processus à l'interface sol-atmosphère. La télédétection peut jouer un rôle clé pour fournir les données nécessaires à l'élargissement du champ de connaissances dans les domaines où les méthodes conventionnelles ne peuvent pas apporter rapidement de réponse satisfaisante. □

2. Pour l'estimation des précipitations, nous mentionnerons la mission TRMM avec SSM/I, VISSR, AMSU, et GOMS, pour la couverture neigeuse, ICESTAR avec MODIS et SSM/I, pour l'état hydrique, HYDROSTAR, pour la température de surface, OCTS/GLI, MVIRI/SEVIRI, MODIS, GOMS, pour l'occupation du sol, ASTER, POLDER, AATSR, MODIS, OCTS/GLI, et pour la surveillance du bilan radiatif, le programme SCARAB, les instruments CERES qui devraient assurer leur part de surveillance.

Résumé

L'observation spatiale pour la biosphère continentale a fait l'objet d'un développement croissant en raison des possibilités qu'offre cette technique dans la gestion des ressources hydriques et la caractérisation des sols. Nous présentons dans cet article, les principaux développements récents axés sur la détermination de paramètres décrivant les eaux libres et ceux gérant le cycle de l'eau ainsi que ceux gérant la redistribution latérale et verticale des flux. Puis nous présentons le contexte national et international au travers des grands programmes internationaux et des différentes équipes de recherche travaillant dans ce domaine. Enfin, nous discutons des perspectives envisagées pour les prochaines années et des thèmes de recherche à dégager pour répondre aux besoins actuels.

Abstract

Space observation of the continental biosphere has been the object of a growing development since this technique offers large possibilities in the fields of water management and soil characterization. In this article, we will present the most recent developments oriented towards the determination of parameters which describe free waters and which manage the water cycle, as well as of parameters which manage the lateral and vertical flow redistribution. We will then present the national and international context through large international programs and through the various research teams that work in this field. Finally, we will discuss the perspectives foreseen for the coming years, and the research topics necessary to meet the current requirements.

Bibliographie

- ANDRE, J.C., GOUTORBE, J.P., PERRIER, A., 1986. HAPEX-MOBILHY : A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale. *Bull. Am. Met. Soc.*, 67 : 138-144.
- ARKIN, P.A., 1979. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulation during GATE over the B-Scale array, *Mon. Wea. Rev.*, 107 : 1382-1387.
- BATESON, A., CURITSS, B., 1996. A method for Manual Endmember Selection and spectral unmixing. *Remote Sens. of Environment*, 55:229-243.
- BERTUZZI, P., CHANZY, A., VIDAL-MADJAR, D., AUTRET, M., 1992. The use of microwave backscatter for retrieving soil moisture over bare soil, *Int. J. Remote Sensing*, vol 13 (n°14), p. 2653-2668.
- CAMILLO, P.J., GURNEY, R.J. SCHMUGGE, T.J., 1983. A soil and atmospheric boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies. *Wat. Resour. Res.* 19: 371-380.
- CARLSON, T.N., DODD, J.K., BENJAMIN, S.G., COOPER, J.N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertial. *J. Appl. Met.*, 20:67-87.
- CARN, M., LAHUEC, J.P., DAGORNE, D, GUILLOT, B, 1989. *Rainfall estimation using TIR Meteosat imagery : importance of the soil surface maximum radiative temperature in satellite derived rainfall assessments over Western Sahel*. Proceeding of the 4th conference on satellite meteorology and oceanology, San Diego, p. 126-129.
- CARROLL, T., BAGLIO, J., 1989. *Techniques for near real-time snow cover mapping using AVHRR satellite data*. Poster paper at 57th Westner Snow Conference, NOAA/NWS, Minneapolis, USA.
- CHAMPION, I., FAIVRE, R., 1996. The field row direction relative to the radar azimuth considering apparent surface roughness for smooth bare soils. *Int. J. remote sensing*, 16:3305-3331.
- CIERNIEWSKI, J, VERBRUGGHE, M., JACQUEMOUD, S., BARRET, F, HANOCQ, J., 1995. Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance incorporating specular effects. *Int. J Remote Sensing*, 17,18:3691-3704.
- CLUIS D., QUENTIN E., 1993. Un système d'information géographique adapté à l'évaluation de la pollution agricole diffuse, *IAHS*, n° 211, p. 355-361.

- COGNARD, LOUMAGNE, C., NORMAND, M., OLIVIER, Ph., OTTLE, C., VIDAL-MADJAR, D., LOUAHALA, S., VIDAL, A., 1995. Evaluation of the ERS1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. Two years results over the Naizin watershed - *Wat. Resour. Res.*, 31:975-982.
- COSNEFROY, LEROY, M., BRIOTTET, X., 1996. Selection and Characterization of saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical sensors, *Remote Sensing of Environment*, 58:101-114.
- DEROIN, J.P., COMPANY, A., SIMONIN, A., 1997. An empirical model for interpreting the relationship between backscattering and arid surface roughness as seen with the SAR. *Photo.Eng. & Rem. Sensing*, 63, 1:86-92.
- DEKKER, A.G., ZAMUROVIC, Z., HOOGENBOOM, H.J., PETERS, S.W., 1996. Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements. *Hydrological sciences Journal*, 41(4):531-547.
- DUBOIS, P.C., VAN ZYL, ENGMAN, T., 1995. Measuring soil moisture with imaging radars, *IEEE Trans.Geosci. Remote Sens.*, 33:915-926.
- ENGMAN, E.T., 1996. Remote sensing applications to hydrology : future impact. *Hydrological Sc. Journal*, 41(4):637-647.
- FUNG, A.K., LIZ, CHENKS, 1992. Backscattering from randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans. On Geosci and Remote Sens.*, vol 30 (2):356-369.
- GINESTE, P, PUECH, C., MEROT, P. Radar remote sensing of the source areas from the Coet-Dan catchment, *Hydrol. Process*, A paraître.
- JOBARD, I., DESBOIS, M., 1994. Satellite estimation of the tropical precipitation using the Meteosat and SSM/I data, *Atmospheric Research*, 34:285-298.
- KALRA, N.K., JOSH, D.C., 1996. Potentiality of Landsat , SPOT and ERS satellite imagery for recognition of salt affected soils in Indian Arid zone. *Int.J. Remote Rensing* 17,15:3001-3014.
- KANNEN, A., 1995. *Use of SAR data for flood monitoring and mapping in Germany*. First ERS thematic working group meeting on flood monitoring, Frascati 26-27 June, p. 100-110.
- Proceedings of the symposium on Machine processing of remotely sensed data, Purdue University, p. 41-51.
- KING, C., LE BISSONNAIS, Y., TACONET, O., BENKHADRA, H., TUTIEL, R., RAKOTOARIVONY, L., BENALLEGUE, M., VIDAL-MADJAR, D., 1995. *Soil roughness assessment at a watershed scale using active microwave remote sensing : interest for assessing ride of runoff and erosion*. Symposium CNES/IEEE, Toulouse, France, p. 10-13 October 1995, 338-347.
- KUSTAS, W.P., DAUGHTRY, C.S.T., 1996. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and forest Meteo*, vol. 49, p. 205-224.
- LACAZE, B., CASELLES, V., COLL, C., HILL, J., HOFF, C., DE JONG, S., *et al.*, 1996. Demon : integrated approaches to desertification mapping and monitoring in the mediteranean basin. *EUR* 16448.165p.
- LEEK, R., 1992. *Using remote sensing for terrestrial monitoring and prediction of sediments yield to rivers*. Thesis. Univ. Oslo. Nijos.
- LEPRIEUR, C., VERSTRAETE, M., PINTY, B., 1994. Evaluation of the performance of various vegetatio indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote sensing reviews*, 10:265-284.
- LE TOAN, T., SMACCHIA, P., SOUIRYS, J.C., BEAUDOIN, A., MERDAS, M., WOODING, M., LICHTENEGGER, J., 1993. *On retrieval of soil moisture from ERS-1 SAR data*. Second ERS-1 symposium proceedings, Hambourg.
- LIN, D., WOOD, E., SAATCHI, S, BEVEN, K, 1994. Soil moisture estimation over grass covered areas using AIRSAR, *Int. J. Remote Sens.*, 15:2323-2343.
- LOUMAGNE, C., CHKIR, N., NORMAND, M., OTTLE, C., VIDAL-MADJAR, D., 1996. Introduction of the soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall/runoffmodel. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6):889-902.

- PREVOT, L., BRUNET, K.T., PAW, U, SEGUIN, B., 1994. *Canopy modelling for estimating sensible heat flux from thermal infrared measurements*. In : Proc. Workshop on Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation in Conjunction with other sensors. La Londe les Maures, France, p. 17-26.
- RAKOTOARIVONY, L., TACONET, O., KING, C., BENALLÈGUE, M., LE BISSONNAIS, Y., BENKHADRA, H., VIDAL-MADJAR, D., 1995. *Radar backscattering over bare soils contributing to runoff: modelisation and comparison with multifrequency (S,C,X) radar measurement*. Symposium international « Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres », CNES-IEEE, p. 364-375.
- RANGO, A., FELDMAN, A., GEORGE, T., RAYAN, R., 1983. Effective use of Landsat data in hydrologic models. *Water Resources Bulletin*, 19(2):165-174.
- RENAULT, D., VEDEL, S., DELACOURT, A., VINE, P., 1993. *Coupling GIS and solute transfert model: regional nitrogen percolation under irrigation in the south-east France*, Congrès AM/FM, Strasbourg, p. 309-313.
- ROTT, H., 1990. *Snow and landice in the climate system : research problems and possibilities of remote sensing*. *Remote sensing and the Earth's environment*. Proceeding of summer School, Austria, ESA, SP-301, p. 61-75.
- ROWAN, L., BOWERS, T., CROWLEY, J., ANTON-PACHECO, *et al.*, 1995. Analysis of AVIRIS data of the Iron Hill, Carbonatite-Alkalic Igneous Complex. *Economic geology*, 90:1966-1982.
- SEGUIN, B., ITIER, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Remote Sens.*, 4:371-383.
- SÉGUIS, L., PUECH, C., 1997. Méthode de détermination des invariants radiométriques adaptée au paysage semi-aride de l'Afrique de l'Ouest. *Int. J. of Remote Sensing* 18/2:255-271.
- SELLERS, P.J., MEESON, B.W., HALL, F.G., ASRAR, G., MURPHY, R.E., SCHIFFER, R.A., BRETHERTON, F.P., DICKINSON, R.E., ELLINGSON, R.G., FIELD, C.B., HUENNRICH, K.F., JUSTICE, C.O., MELACK, J.M., ROULET, N.T., SCHIMMEL, D.S. TRY, P.D., 1995. Remote sensing of the land surface for studies of global change : Models - Algorithms - experiments. *Remote Sens. Environ.*, 51:1-17.
- SPENCER, R.W., GOODMAN, H.M., HOOD, R.E., 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I : identification and characteristics of the scattering signal. *J. Atmos. Ocean Techn.* 6:254-273.
- TACONET, O., VIDAL-MADJAR, D., EMBLANCH, Ch., NORMAND, M., 1996. Taking into account vegetation effects to estimate soil moisture from C. Band radar measurements - *Remote sens. Environ.*, vol. 56, p. 52-56.
- ULABY, F.T., ELACHI, C., 1990. *Radar polarimetry for Geosciences Applications*, Eds. Artech House, Inc.
- WIGNERON, J.P., CHANZY, A., CALVET, J.C., BRUGUIER, N., 1994. A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields. *Rem.Sensing Environment*, 51(3):331-341.
- YUEH, SH, KONG, J.A., JAO, J.K., SHIN, RT, LE TOAN, T., 1992. Branching model for vegetation IEEE Trans. *Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, n° 2:390-401.
- ZHANGSHI YIN, LEE WILLIAMS, 1997. Obtaining spatial & temporal vegetation data from Landsat MSS & AVHRR/NOAA satellite images for a hydrological model. *Photo. Eng. & Remote Sensing*, 63, 1:69-77.

