



HAL
open science

Observation spatiale et modélisation hydrologique pour la gestion des ressources en eau

Cécile Loumagne

► **To cite this version:**

Cécile Loumagne. Observation spatiale et modélisation hydrologique pour la gestion des ressources en eau. Sciences de l'environnement. Habilitation à diriger des recherches en sciences, Université Paris Sud, Centre Scientifique d'Orsay, 2001. tel-04369362

HAL Id: tel-04369362

<https://hal.inrae.fr/tel-04369362>

Submitted on 2 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITE DE PARIS-SUD
CENTRE SCIENTIFIQUE D'ORSAY**

**DIPLOME D'HABILITATION
A DIRIGER DES RECHERCHES EN SCIENCES**

Cécile LOUMAGNE

2001

**OBSERVATION SPATIALE ET
MODELISATION HYDROLOGIQUE
POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU**

**U.R. Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques
CEMAGREF, Parc de Tourvoie, BP 44,
92163 ANTONY Cedex**

AVANT-PROPOS

Les travaux développés ces dernières années (1989- 2001) tout d'abord au CEREVE ex CERGRENE (Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement) puis au CEMAGREF (Centre de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) et enfin à l'Université de PRINCETON (Department of Civil Engineering and Environment) sont le fruit de collaborations étroites non seulement au sein des équipes d'accueil mais aussi avec les partenaires extérieurs avec qui j'ai pu mener à bien les divers projets de recherche qui font la trame de la synthèse thématique de mes travaux de recherche.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux différents membres qui composent mon jury, ils ont bien voulu consacrer de leur temps pour juger de ce travail. Certains des liens créés sont issus de longues années de collaboration :

- Tout d'abord, les orientations prises au cours de ces années s'enracinent dans ma formation initiale d'hydrologue au sein du laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique de l'Université d'ORSAY (PARIS XI) dirigé par le professeur J. Ch. FONTES puis par le professeur L. DEVER. Ils ont su partager leur enthousiasme et leur connaissance des hydrosystèmes continentaux.

- M. Ph. MASSON, professeur au sein du laboratoire de Géologie dynamique de la Terre et des Planètes et responsable du département des Sciences de la Terre et de l'Univers d'Orsay, a eu l'occasion à plusieurs reprises déjà, de faire partie de jury de thèses encadrées par le CEMAGREF et de montrer son intérêt pour l'observation satellitale.

- Mme O. TACONET a été à l'origine de nombreuses collaborations entre le CETP et le CEMAGREF et a partagé depuis plus de dix ans son expérience dans le domaine de la télédétection. Sa grande compétence dans ce domaine a été un atout majeur pour les recherches développées au CEMAGREF.

- M. F. ANCTIL, professeur à l'Université de Laval, s'est intéressé à nos recherches sur la prévision des crues et son expertise dans ce domaine va nous permettre de mettre en place de nouveaux projets.

- M. E. SERVAT de l'IRD a eu de nombreux échanges avec le CEMAGREF dans le domaine de la modélisation des débits à l'échelle d'un bassin versant. Ses travaux dans ce domaine, en complémentarité avec ceux du CEMAGREF seront l'objet de futures collaborations.

- M. M. NORMAND enfin, m'a accueillie lors de mes premières recherches en stage de DEA au sein de l'unité de recherche d'hydrologie du CEMAGREF puis m'a encadrée et soutenue pendant ma thèse. J'ai pu développer avec lui les différents projets de recherche dont on trouvera mention par la suite.

Je voudrais par ailleurs exprimer ma reconnaissance à M. G. SACHON, Directeur du département Gestion des Milieux Aquatiques du CEMAGREF, pour la confiance qu'il a

témoigné dans les orientations thématiques que j'ai développées au sein des programmes scientifiques et des axes thématiques de recherche de son département.

Enfin, nombreux sont les liens professionnels et amicaux qui ont pu se tisser lors de ces années de recherche dans les différentes équipes qui m'ont accueillie, si le cadre est ici trop court pour citer tous les noms de ceux qui ont contribué au succès des travaux de recherche présentés, qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma très sincère gratitude.

SOMMAIRE

1. TITRES ET TRAVAUX	2
1.1 CURRICULUM VITAE.....	3
1.2 PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	6
2. SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE	17
2.1 INTRODUCTION.....	18
Orientations thématiques	
Cadre des recherches	
2.2 CONTEXTE.....	21
2.2.1 Compréhension des processus au sein d'un bassin versant.....	21
2.2.2 Modélisation des comportements hydrologiques.....	23
2.2.3 Assimilation des données en hydrologie.....	24
2.2.4 Gestion de la ressource en eau	26
2.3 DEMARCHE SCIENTIFIQUE.....	29
2.4 PRINCIPAUX RESULTATS.....	32
2.4.1. Caractérisation des paramètres de surface.....	32
2.4.2. Modélisation Pluie-Débit.....	43
2.4.3. Assimilation de l'état hydrique dans un modèle hydrologique.....	52
2.4.4. Gestion de la ressource pour la prévision des débits.....	60
3. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	70
3.1 CONCLUSIONS	71
3.2 PROJETS A COURT ET MOYEN TERME	74
3.3 PROJETS A PLUS LONG TERME	81
4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SIGLES	84
5. TRAVAUX JOINTS	92
A) COMPREHENSION DES PROCESSUS	
B) MODELISATION DES COMPORTEMENTS	
C) ASSIMILATION DES DONNEES	
D) GESTION DES RESSOURCES EN EAU	

1 TITRES ET TRAVAUX

- **CURRICULUM VITAE**
- **PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS**

1.1 CURRICULUM VITAE

LOUMAGNE- JOANICOT Cécile

Princeton University
Department of Civil and Environmental Engineering
EEWR Program
Princeton, NJ 08544, USA
tel: (1) 609 258 15 51
fax: (1) 609 258 27 99 or (1) 609 258 12 70
Email: loumagne@princeton.edu

FONCTION ACTUELLE

- Chargée de recherche, 1^{ère} classe, 80%
- UR qualité et fonctionnement des systèmes aquatiques CEMAGREF, groupement d'Antony.
- Mise à disposition à l'Université de Princeton dans le département de Civil Engineering and Environmental Research, New-Jersey USA.

FORMATION

- **Thèse de doctorat Sciences de la Terre**
Université d'ORSAY, PARIS XI, 1988
- **DESS d'informatique appliquée**
Université d'ORSAY, PARIS XI 1985
- **DEA de géologie appliquée "Ressources en Eau"**
Université d'ORSAY, PARIS XI, 1984
- En auditeur libre :
DEA "Méthodes Physiques en Télédétection"
Université de JUSSIEU, PARIS VII, 1991

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

- **Visiting fellow à Princeton** (1998-2001)
(Université de Princeton, New Jersey, USA). Department of Civil Engineering and Environmental Research. EEWB Program. (Télédétection et modélisation des schémas de surface)
- **Chargée de recherche au CEMAGREF** (1991-2000..)
(Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts). UR qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques (Télédétection appliquée à l'hydrologie)
- **Ingénieur de recherche au CEREVE ex CERGRENE** (1989-1990)
(Centre d'Enseignement et de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles et de l'Environnement). Axe Hydrologie (Prévision des crues, ruissellement des zones périurbaines)

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

- **Graduate student seminar**, Princeton Univ., 1998-2001 (2 x 3h/an)
- **DEA Sc. et Tech. de l'Environnement**, PARIS XII, 1989-1997 (TP/TD 1j/an)
- **DEA Géomorph. et Dyn. des Milieux Physiques**, PARIS I, 1990 (4h)
- **ENGEES**. Formation continue 2ème cycle, STRASBOURG, 1991 (3j)

- **LCT(ENGREF/CEMAGREF)** Formation continue 3ème cycle, MONTPELLIER **1992-93** (4j)

CONTRIBUTION A LA FORMATION PAR LA RECHERCHE

DEA encadrements:

- 1 DEA (STE/ PARIS XII):

- LEONNET R.- **1990**. Prédiction de crues sur la Garonne, application d'une procédure multimodèles en temps réel. **(80%)**

- 2 DAA (ENSA/RENNES):

- FAUVEAU C. – **1991**. Modélisation de la relation Pluie- Débit et humidité du sol. Exemple des bassins versants de Naizin et de l'Orgeval. **(80%)**

- LATUILLERIE A. – **1992**. Etude à deux échelles d'un modèle simulant débit et humidité du sol. **(80%)**

- 1 DEA (Méca. et Ing/STRASBOURG) :

- DOLCINE L. – **1993**. Modélisation pluie-débit et état hydrique du sol. Application à la Bretagne. **(80%)**

- 1 Magistère (PARIS XI,VI, ENS):

- LOYS S - **1995**. Détermination de facteurs conditionnant l'écoulement par observation spatiale et mesures au sol. **(80%)**

- 2 DEA (PARIS VI):

- DOSSAL S - **1994**. Télédétection et état hydrique des sols : cartographie de l'état hydrique d'un groupe de bassins versants bretons à partir des données du satellite ERS1. Premiers résultats. **(50%)**

- BAUDEZ J.C - **1997**. Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau. **(80%)**

- 9 DEA (PARIS XI)

- CHAHIR K. - **1991**. La méthode réflectométrie en domaine temporel (TDR) pour la mesure de l'état hydrique du sol. **(50%)**

- COGNARD A.-L. - **1993**. Estimation de l'état hydrique du sol à partir des données du satellite ERS 1. Premiers résultats sur le bassin de Naizin. **(80%)**

- EMBLANCH C - **1994**. Premiers résultats de la campagne de télédétection radar Orgeval 94 pour la détermination de l'humidité de surface des sols. **(20%)**

- SURDI L. - **1995**. Influence de la pédologie et des pratiques culturales sur l'état hydrique des bassins en prévision des risques de crues. **(20%)**

- LOBLIGEIS F - **1996**. Suivi hydrologique du bassin de l'Orgeval à partir des radars spatiaux ERS1 et ERS2: vérification de la corrélation signal radar-humidité de surface des sols à partir des données acquises par satellites pendant la campagne "Orgeval 95-96". **(80%)**

- TROUDE M - **1998**. Etude de la variabilité spatiale de l'état hydrique du sol et recherche d'un indicateur global d'humidité à l'échelle d'un petit bassin versant agricole. **(20%)**

- RIFFARD M - **1999**. Caractérisation hydrologique de trois bassins versants du bassin de la Seine. Approche comparative par modélisation. **(20%)**

- TOUPOTTE L. – **2000**. Etude comparative de trois approches pour l'estimation de l'état hydrique des sols (approche ponctuelle, télédétection, modélisation) pour une utilisation en hydrologie. **(20%)**

- MORVAN X.- **2000**. Comparaison de deux approches de modélisation hydrologique l'une globale, l'autre distribuée en s'appuyant sur les données du bassin du Rhône. **(20%)**

Thèses Co-encadrement:

- Thèse (Paris XI) M. BENALLEGUE, soutenue en 1993, (20%)

Etude de la faisabilité de la mesure par radar de l'humidité et de la rugosité des sols.

- Thèse (ENPC): N. CHKIR, soutenue en 1994, (80%)

Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit.

- Thèse (PARIS XI): AL. COGNARD, soutenue en 1996, (80%)

Suivi de l'état hydrique des sols par télédétection spatiale (radar et thermographie infrarouge) et modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant

- Thèse (ENGREF): A. ZERMANI, soutenue en 1998, (20%)

Apport des SIG à la reconnaissance à moyenne échelle des facteurs d'écoulement et de transfert de nitrates.

- **Thèse (PARIS VI): A. QUESNEY, soutenue en 1999, (50%)**

Assimilation de mesures d'humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR.

Post-doctorats encadrement:

- **Post doctorat (LTHE): A. WEISSE, 1998-2001 (80%)**

Intégration de données spatiales dans des modèles hydrologiques appliquées à un grand bassin: la Seine

- **Post doctorat (ENS): D. AUBERT, 2000-2001 (80%)**

Prévision de crue dans le cadre de la gestion opérationnelle des barrages réservoirs

Participation aux jurys:

- DAA ENSA/RENNES

- DEA Hydr/PARIS XI

- DEA Méca. et Ing/STRASBOURG

- THESE ENGREF PARIS, A. ZERMANI, 1998

- THESE PARIS VI, A. QUESNEY, 1999

GROUPES DE TRAVAIL ET INSTANCES D'INF. SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE

- Membre du Comité National Français des Sciences Hydrologiques (CNFSH) (89- 200..)

- Membre du Groupe de Travail GATT et "Méthodologies, Instruments futurs" du CNES (93-98)

- Membre du Comité Scientifique du PNTS (94-98), rapporteur scientifique, chargée de faire la synthèse 94-97 des applications de la télédétection à l'hydrologie et d'étudier les perspectives pour rédiger l'appel d'offres 98 du PNTS.

- Membre du GDR Isis, PNTS (96-200...).

PROGRAMMES DE RECHERCHE ET COLLABORATIONS:

"Convention SRETIE" et "Programme CST-BVRE" soutien financier SRETIE/MRE, 1987/93

Prévision des débits et humidité du sol sur des petits bassins de recherche

Collaborations: : INRA Sciences du sol RENNES - CEMAGREF RENNES

"Projets MacHYDRO 91 et SIR.C 94" soutien financier NASA, 1991/94

Etat hydrique et rugosité des sols sur l'ORGEVAL à partir de l'observation spatiale.

Collaborations: CETP/CNRS, LCT, Université d'ARIZONA.

"Projet BRETAI" et "Projet CORMORAN" soutien financier MRE, CNRS, 1992/93

Modélisation des débits et état hydrique du sol sur un bassin versant agricole, le NAIZIN

Collaborations: INRA RENNES, BRGM, CEMAGREF RENNES

"Projet pilote ERS.1" soutien financier PNTS-CNES-ESA, 1991/94

Etat hydrique des bassins sur la BRETAGNE

Collaborations: GEOSYS, CETP/CNRS, LCT, INRA RENNES. **Coordination :** CEMAGREF

"Projet ERS1/ERS2" soutien financier PNTS-ESA, 1995/97

Application de l'observation spatiale à l'hydrologie d'un bassin versant l'Orgeval

Collaborations: CETP/CNRS, CESBIO (CNES/CNRS). **Coordination:** CEMAGREF

"Projet RADARSAT" et "Tandem ERS1/ERS2" soutien financier ADRO, ESA, 1995/97

Radar multiconfiguration et signatures multitemporelles pour le suivi des variables d'état des bassins.

Collaborations: CETP/CNRS, CESBIO, Univ. de Salford (UK), GEC-MARCONI

"Projet PNRN " soutien financier PNRN/INSU, 1994/2000

Comportement des bassins, influence de leur état initial sur les risques de crues. Prévision et prévention des risques naturels

Collaborations: CETP/CNRS, CPB/CNRS, LTHE, LCPC, ORSTOM. **Coordination:** CEMAGREF

"Projet PNRH" soutien financier PNRH/INSU, 1998/2000

Rôle de l'interface sol-végétation-atmosphère dans la modélisation pluie-débit.

Collaborations: CETP/CNRS. **Coordination:** CEMAGREF

"Projet AIMWATER" soutien financier CEO 4^e PCRD Env et Clim, 1998/2001.

Gestion des ressources en eau appliquée aux barrages réservoirs

Collaborations: CETP, Univ. de Valencia (SP), Univ de Lisboa (P), IH Wallingford (UK), IIBRBS (F), Ass.Regantes (P). **Coordination:** CEMAGREF.

1.2 PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

1- Articles dans revues scientifiques à comité de lecture

[P1] LEVIANDIER T., LOUMAGNE C. - 1986

Système conversationnel pour la documentation et l'utilisation de logiciels en hydrologie - *Hydrologie Continentale, Vol I, n°1, pp.15-24.*

[P2] LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1988

Utilisation d'indicateurs de l'état hydrique du sol dans un modèle pluie-débit. Journée "Prévision des crues". Société Hydrotechnique de FRANCE, PARIS 18/19 Nov. 1987. *La Houille Blanche n°5/6, pp. 425-432.*

[P3] LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1991

Etat hydrique du sol et prévision des débits. *Journal of Hydrology, 123, pp.1-17.*

[P4] COGNARD AL., LOUMAGNE C., NORMAND M., VIDAL-MADJAR D., OTTLE C., IMBERTI MC. - 1993

Caractérisation de l'état hydrique des sols à différentes échelles à partir des données du satellite ERS1 sur le BVRE de NAIZIN et essai de transposition aux bassins versants bretons. Journées du GFHN, novembre 1993, RENNES, Thème: Métrologie et modélisation des transferts dans les sols et les matériaux poreux. *Bulletin du GFHN n°31-32 pp.106-113*

[P5] COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OLIVIER PH., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., LOUAHALA S., VIDAL A. - 1995

Evaluation of the ERS.1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. Two-year results over the NAIZIN watershed. *Water Resource Research 31(4) pp.975-982.*

[P6] LOUMAGNE C., VIDAL J.J., FELIU C., TORTEROTOT J.P., ROCHE P.A. - 1995

Procédure de décision multimodèle pour une prévision des crues en temps réel. Application au bassin supérieur de la Garonne. *Revue des Sciences de l'Eau, 8 (1995), pp.539-561*

[P7] LOUMAGNE C., CHKIR N., NORMAND M., OTTLE 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 41 (6), pp.889-902.*

[P8] ZRIBI M., TACONET O., MASCLE S., VIDAL-MADJAR D., EMBLANCH C., LOUMAGNE C., NORMAND M., 1997.

Backscattering behaviour and numerical simulation comparison over bare soils using SIRC/XSAR and ERASME 1994 database over Orgeval. *Remote Sensing of Environment*, vol 59, pp.256-266

[P9] LOUMAGNE C., MICHEL CL., PALAGOS B, BAUDEZ JC., BARTOLI F.,1998

D'une approche globale vers une approche semi-distribuée en modélisation pluie-débit. *La Houille Blanche* n°6/99 pp. 61-68.

[P10] BAUDEZ JC., LOUMAGNE C., MICHEL CL., PALAGOS B., GOMENDY V., BARTOLI F., 1999

Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins: vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée. *Etude et Gestion des Sols*. Vol 6, 4, pp. 165-184

[P11] Le HEGARAT-MASCLE S., QUESNEY A., VIDAL-MADJAR D., TACONET O., NORMAND M., LOUMAGNE C , 2000.

Land Cover discrimination from multitemporal ERS images and multispectral Landsat images: a study case in an agricultural area in France. *Int. Journ. of Remote Sensing*, vol 21 n°3, pp. 435-456

[P12] QUESNEY A, Le HEGARAT-MASCLE S., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., WIGNERON J.P., LOUMAGNE C., NORMAND M., 2000.

Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote Sensing of Environment* Vol 72: pp. 290-303

[P13] RIFFARD M., LOUMAGNE C., WEISSE A., NORMAND M., QUESNEY A., Le HEGARAT-MASCLE S., ALEM F., 2000

Etat hydrique des bassins versants, observation spatiale et prévision de débits: "AIMWATER", un projet européen sur le bassin de la Seine. Milieux Poreux et Transferts Hydriques, *Bulletin du GFHN et des Transferts en Milieux Poreux*, n°45, (sous presse).

[P14] LOUMAGNE C., WEISSE A., NORMAND M. , RIFFARD M., QUESNEY A., LE HEGARAT-MASCLE S, ALEM F., 2001

Integration of remote sensing data into hydrological models for flood forecasting. *Remote Sensing and Hydrology 2000, IASH Red Book Publication n°267*, pp. 592-594, edited by Brubaker, Ritchie, Rango, ISBN 1-90150246-5

[P15] QUESNEY A., FRANCOIS CH, OTTLE C., LE HEGARAT S, LOUMAGNE C., NORMAND M. , 2001

Sequential assimilation of SAR/ERS data in a surface hydric model coupled to a global hydrological model with an extend Kalman filter. *Remote sensing and Hydrology 2000, IASH Red Book Publication n°267*, pp. 495-497, edited by Brubaker, Ritchie, Rango, ISBN 1-90150246-5

[P16] LOUMAGNE C., NORMAND M., RIFFARD M., WEISSE A., QUESNEY A., Le HEGARAT-MASCLE S., ALEM F., 2001

Methodology for integration of remote sensing data into hydrological models for reservoir management purposes. *Hydrological Science Journal*, 46(1), pp.89-102.

[P16b] WEISSE A., MICHEL C., AUBERT D., LOUMAGNE C., 2001.

Variational assimilation of a watershed soil moisture index in a hydrological model for flood forecasting. *SVAT transfer schemes and large scale hydrological models, IASH Red Book Publication.n°270, edited by Dolman, Pomeroy, Oki, Hall, ISBN 1-90150269-9, pp. 249-256.*

Articles dans revues techniques à comité de lecture

[P17] LOUMAGNE C., NORMAND M., 1997.

Apport de la télédétection à la modélisation hydrologique. *Ingénieries-EAT-N°9, pp.15-24*

[P18] LOUMAGNE C., KING CH.,1997.

Observation spatiale pour la biosphère continentale : Ressources en eau et caractérisation des sols. Bilan et perspectives. *Ingénieries -EAT-N°12, p.3-17*

3- Chapitres dans ouvrages de synthèse

[P19] OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., 1996.

Radar and optical remote sensing to infer evapotranspiration and soil moisture. *Chapter 15 in «Scaling up in Hydrology using Remote Sensing», Edited by J. B. Stewart, ET Engman, RA Feddes and Y. Ken, Editors John Wiley and Sons, Institute of hydrology, pp 221 - 233.*

[P20] VIDAL MADJAR D., NORMAND M., TACONET O., MASCLE S., ZRIBI M., EMBLANCH C., LOUMAGNE C., 1996.

Test of roughness and moisture algorithms using multiparameter spaceborne SAR and application to surface hydrology. *In Science results from the spaceborne imaging radar-C/X band synthetic aperture radar (SIR-C/X-SAR): D.L.Evans, J.J.Plaut Editors, JPL Publication 96-7, pp 201-214*

[P21] NORMAND M., LOUMAGNE C., COGNARD A.L., OTTLE C., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., 1996.

Observation et prise en compte de l'état hydrique du sol en hydrologie : Une étude sur des bassins versants bretons. *In Hydrologie dans les pays celtiques. INRA Editions. Paris 96, pp 135-148.*

[P22] NORMAND M., LOUMAGNE C., COGNARD A.L., OTTLE C., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., 1998

Approche conceptuelle de la modélisation pluie-débit prenant en compte l'état hydrique du sol. *Part 2 in Agriculture intensive et qualité des eaux, INRA Editions. Paris 98, pp.169-182.*

4- Mémoires DEA, DESS, THESE

LOUMAGNE C. -1984

Prédétermination du coefficient d'écoulement. Mémoire de DEA, Université Paris XI-CEMAGREF,114p + Annexes

LOUMAGNE C. -1985

Logiciel général de saisie interactive d'options de calcul de programmes scientifiques. Mémoire de DESS, Université Paris XI-CEMAGREF, 37p + Annexes

LOUMAGNE C.-1988

Prise en compte d'un état hydrique du sol dans la modélisation pluie débit. Thèse de doctorat, Université Paris XI-CEMAGREF, 200p + Annexes

5- Communications écrites à des colloques

[P23] LEVIANDIER T., LOUMAGNE C. - 1986

An interactive system for documentation and use of programs in hydrology : 2nd International Conference, interactive information and processing system for Meteorology-Oceanography and Hydrology of American Meteorological Society. MIAMI, FLORIDE, Janv. 1986, Annales pp.174-177.

[P24] LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1987

Etat hydrique du sol et connaissance des débits : Journées Hydrologiques du 16/18 octobre 1986, CEREG, STRASBOURG, thème : Crues et Inondations, Actes pp.13-28.

[P25] NORMAND M., LOUMAGNE C., GALLE S., JARRY F. - 1988

Etat hydrique du sol et hydrologie. Mesures ponctuelles et télédétection en hyperfréquences. Journées Scientifiques sur les bassins versants représentatifs et expérimentaux PARIS 18/19 Octobre 1988. Actes pp.1-12.

[P26] GALLE S., NORMAND M., LOUMAGNE C. - 1990

Soil Moisture Assessment at two different scales on a small experimental basin. Conference on Hydrological Research Basins and the Environment. WAGENINGEN - NL, sept. 24/28 sept. 1990. Annales 9 pp.

[P27] LOUAHALA S., NORMAND M., LOUMAGNE C., VIDAL-MADJAR D., CANN C., OTTLE C., OLIVIER Ph., MEROT Ph., CRAVES A., COURAULT D. - 1993

Cartographie de l'occupation du sol. Possible complémentarité SPOT/ERS. Une étude sur un paysage agricole Breton. Actes du Symposium ESA-CNES. From optics to radar. SPOT and ERS applications. PARIS, 10/13 mai 1993, pp.435-444

[P28] LOUMAGNE C., NORMAND M., VIDAL-MADJAR D., OTTLE C., LOUAHALA S., - 1993

Etat hydrique du sol : mesures ponctuelles et mesures satellitaires. Journées du GSTS : Changement d'échelle dans l'étude des milieux naturels par télédétection, STRASBOURG, 17/19 mai 1993, Actes des journées du GSTS, pp.65-71

[P29] COGNARD AL.,CHKIR N., LOUMAGNE C., NORMAND M., OTTLE C., VIDAL MADJAR D. -1994

Intégration des échanges à l'interface sol/végétation/atmosphère dans un modèle Hydrologique Pluie-Débit. Ateliers modélisation de l'atmosphère CNRM, Toulouse, 29-30/11/1994, pp.75-82

[P30] NORMAND M., CHKIR N., COGNARD AL., IMBERTI MC., LOUMAGNE C., OTTLE C., VIDAL A., VIDAL MADJAR D. -1994

Estimation of the surface soil moisture from ERS1/SAR data for hydrological modelling purposes. First ERS1 Pilot Projet. Workshop, Toledo, 22-24/6/94, ESA SP-365, pp.97-102

[P31] NORMAND M., CHKIR N., COGNARD AL.,IMBERTI MC., LOUMAGNE C., OTTLE C., VIDAL A., VIDAL MADJAR D. -1994

Utilisation de l'observation spatiale pour l'estimation de l'état hydrique des sols et la modélisation hydrologique. Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 13-14 septembre 1994, pp.399-408

[P32] COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 1995

Apports de la télédétection à la modélisation hydrologique. Séminaire "les modèles au CEMAGREF" 12-13/10/95 pp. 45-55

[P33] COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., VIDAL A. - 1995

Soil moisture and hydrological modelling using radar and optical remote sensing. A case study in Brittany. 2nd ERS Application workshop 6-8/12/95 Londres, ESA, pp. 153-160

[P34] OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., CHKIR N., COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 1995

Utilisation de données satellitaires pour la modélisation hydrologique. Colloque Franco-Allemand sur l'observation de la terre. Bonn 18-19/1/95, Actes 6pp.

[P35] LEVIANDIER T., LOUMAGNE C., NEDELEC Y., BARTOLI F., GOMENDY V. - 1995

Diversité des approches du changement d'échelle en hydrologie. Séminaire "les modèles au CEMAGREF" 12-13/10/95 pp.111-118

[P36] LEVIANDIER T., LOUMAGNE C., NEDELEC Y., BARTOLI F., GOMENDY V. - 1996

Diversité des approches du changement d'échelle en hydrologie. Colloque "Tendances nouvelles en modélisation de l'environnement" CNRS, Programme Environnement, Vie et Sociétés, 15-17/01/96 Paris, Actes du colloque pp.7-14

[P37] ZRIBI M., TACONET O., MASCLE S., VIDAL-MADJAR D., EMBLANCH C., LOUMAGNE C., NORMAND M., 1996.

Backscattering over bare soil. Measurements and simulation using SIRC/XSAR and ERASME 94 data over Orgeval. IGARSS 96, BurnhamYates Conference Center, Lincoln, Nebraska, USA, 27-31 mai 96. Proceeding pp. 1067-1068.

[P38] NORMAND M., LOUMAGNE C., COGNARD A.L., OTTLE C., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., 1996

Observation et prise en compte de l'état hydrique des sols en hydrologie : Une étude sur des bassins versants bretons. Colloque interceltique d'Hydrologie et Gestion des eaux - Bretagne 96. INSA RENNES, 8-11 juillet 96. (Les colloques n°79) pp 135-148.

[P39] LOUMAGNE C., KING CH.,1997.

Observation spatiale pour la biosphère continentale. Ressources en eau, hydrologie et caractérisation des sols. Colloque d'évaluation et de perspective du PNTS, 16-18 juin 97, Brest. Actes du colloque pp. 8-21

[P40] LE HEGARAT-MASCLE S., QUESNEY A., TACONET O., NORMAND M., LOUMAGNE C.,1997

Classifications multispectrales/multitemporelles appliquées à l'hydrologie. Colloque Instrumentation. Atelier CNRS/INSU/Meteo France, 29-30 octobre, Paris. Actes 7pg.

[P41] QUESNEY A, LE HEGARAT-MASCLE S., TACONET O., NORMAND M., LOUMAGNE C., 1998

Determination of soil moisture at watershed scale from ERS multitemporal series. CEOS SAR Workshop, Estec, 3-6 Feb, 1998, Netherlands, ESA WPP 138, pp. 79-85.

[P42] QUESNEY A, TACONET O., NORMAND M., LOUMAGNE C., LE HEGARAT-MASCLE S., 1998

Monitoring of hydrological index at watershed scale from ERS/SAR measurements and LANDSAT data during a vegetation cycle. IGARSS, Seattle, USA, July 6-10 1998, Proceedings pp.1109-1111.

[P43] QUESNEY A., WEISSE A., LE HEGARAT-MASCLE S, NORMAND M., LOUMAGNE C., 1999

Assimilation of soil moisture index into an hydrological Model. EGS, The Hague, Netherlands, 19-23 April 99, Annales Geophysicae, Vol 1, n°2, pp. 351, WRR, RS, GIS, and data assimilation.

[P44] MONTFORT M., LOUMAGNE C., NORMAND M., WEISSE A., QUESNEY A., LE HEGARAT-MASCLE S, ALEM F., 1999

Methodolgy for integration of remote sensing data into hydrological models for reservoir management purposes. AGU, 19th annual Hydrology days, Fort Collins, August 16-20, 99, Proceedings, 12pg.

[P45] LE HEGARAT-MASCLE S., ALEM F., QUESNEY A., NORMAND M., LOUMAGNE C., 2000

Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. Proceedings of EUSAR 2000, Munich, Germany, May 23-25 2000., pp.679-682

[P46] NORMAND M., LOUMAGNE C., OTTLE C., LE HEGARAT S., ALEM F., QUESNEY A., 2000

Etat hydrique des sols et hydrologie: Approche par télédétection pour la prévison des débits. Colloque PNRH 2000, Toulouse France, 16-17 Mai 2000, Actes du colloque, 6pg.

[P47] LOUMAGNE C., V. ANDREASSIAN, BARTOLI F., BAUDEZ JC., GURY M., MICHEL CL., NORMAND M., PALAGOS B., SCHOULLER E., 2000

Hétérogénéités des bassins et risques de crues. Colloque PNRH 2000, Toulouse France, 16-17 Mai 2000, Actes du colloque, 5pg.

[P48] RIFFARD M., LITTLEWOOD I., LOUMAGNE C., WEISSE A., PERRIN CH., 2000. Continuous daily rainfall-catchment wetness-streamflow simulation models for sub-catchments of the Seine basin France. ERB 2000, Monitoring and modelling catchment water quantity and quality, September 27-29, Ghent Belgium, Actes du colloque 8pg.

[P49] BARTOLI F., SCHOULLER E., BURTIN G., DOIRISSE M., BEGIN J.C., LOUMAGNE C., ANDREASSIAN V., ANSART P., 2000.

Géométries des sols et régulation des transferts: cas des sols limoneux cultivés et forestiers de Brie. 6^o Journées Nationales de l'Etude des sols, «Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols », Nancy 25-28, Avril 2000, pp. 23-28

[P50] WEISSE A., MICHEL C., LOUMAGNE C., NORMAND M., AUBERT D., 2000.

Assimilation variationnelle de mesures d'humidité de surface dans un but de prévision de crue. Ateliers modélisation CNRM, Toulouse, novembre 2000, Actes pg 31-34.

[P51] AUBERT D., WEISSE A., MICHEL C., LOUMAGNE C., NORMAND M., 2000.

Application d'un filtre de Kalman sur un modèle hydrologique pluie-débit. Assimilation de données d'humidité du sol et de débits. Ateliers modélisation CNRM, Toulouse, novembre 2000. Actes pg 115-118.

6- Communications orales et posters à des colloques ou séminaires

[C1] LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1986

Recherches concernant le rôle de l'état hydrique du sol sur la prévision des débits à l'exutoire d'un bassin versant - Journées du G.F.H.N., novembre 1986, ANGERS, Thème : Transferts hydriques, Bulletin du GFHN, juin 1986, pp.59.

[C2] NORMAND M., LOUMAGNE C., GALLE S., JARRY F., VIDAL-MADJAR D. - 1988

Etat hydrique du sol et hydrologie : études en cours sur le bassin versant de recherches expérimental de l'ORGEVAL. Journées du G.F.H.N., novembre 1988, LAUSANNE, thème : Transferts dans les sols et milieux poreux.

[C3] MICHEL C., LOUMAGNE C. - 1990

Avenir de la modélisation conceptuelle. Journées Hydrologiques du CNFGG - PARIS E.N. Mines. 15 février 1990.

[C4] LOUMAGNE C. - 1991

Télé-détection radar et état hydrique des sols. Séminaire du LCT. "La télé-détection une source d'informations géographiques", janv. 91, MONTPELLIER.

[C5] NORMAND M., COGNARD A.L., IMBERTI M.C., LOUMAGNE C., OTTLE C., VIDAL A., VIDAL-MADJAR D. - 1993

Etat hydrique des sols, télé-détection et hydrologie: Le projet ERS1 sur les bassins versants bretons. Journée d'étude GIP hydrosystème-CUB: Interêt des BVRE pour concevoir une politique de maîtrise des rejets agricoles et de gestion de l'eau. 7 octobre 1993, BREST.

[C6] OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 1993

Calage de paramétrisations de surface par une approche pluie/débits. Journées du CNRM/METEO-FRANCE, décembre 1993. 6 p.

[C7] GEOSYS-CEMAGREF-CETP, 1993. Evaluation of the ERS/SAR capacity to estimate soil moisture. 2nd ERS1 Symposium Hambourg 11-14 octobre 93- Poster.

[C8] LOUMAGNE C., COGNARD A.L., NORMAND M. - 1995

Apport de la télé-détection à la modélisation hydrologique. Workshop SAR à l'ENST- GDR 134, 6-7/11/95, poster

[C9] COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., - 1995

Use of optical and radar remote sensing for hydrological modelling of agricultural river catchments- 1^o Science conference of EGS. Atmospheric and hydrological Processes and Models at the Soil-Végétation Atmosphère interface-3-7/4/95 Hambourg- poster

[C10] COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., 1996

Use of optical thermal infrared and radar remote sensing for hydrological modelling of agricultural river catchments. EGS XXI General Assembly, the Hague, 6-10 mai 1996, poster.

[C11] LOUMAGNE C., COGNARD A.L., NORMAND M. - 1996

Utilisation de la télédétection en modélisation hydrologique. Séminaire CEMAGREF HYAN-QEAN, 11/1/96.

[C12] BAUDEZ J-C., LOUMAGNE C., MICHEL C. -1998

Déterminants hydrologiques régionaux pour la prévision et la gestion de la ressource en eau. Séminaire CEMAGREF, Evaluation de modèles, Janvier 98, Antony, Actes 5pg.

[C13] QUESNEY A., LE HEGARAT-MASCLE S, NORMAND M., LOUMAGNE C. -1998

Estimation de l'état hydrique de bassin versant à partir de données SAR-ERS multitemporelles. Workshop GDR Isis, ENSET, Paris, 5/06/98

[C14] LOUMAGNE C.-2000

Analysis Investigation and Monitoring of Water Resources for the Management of Multipurpose Reservoirs: Overview of the project. 1999-2000 EEWB Seminar. Program in Environmental Engineering and Water Resources. Princeton, 10/03/2000

[C15] LOUMAGNE C.- 2000

Démarche qualité pour un projet de recherche. Séminaire pour la qualité en recherche. Séminaire inter-organismes (CEMAGREF- INRA-CEA-AFSSA). Antony, 09/05/2000

7- Rapports de recherche

1988

[R1] "Prise en compte d'un indice de l'état hydrique dans la modélisation pluie-débit". Rapport CEMAGREF-SRETIE, 200 p.

1989

[R2] "Procédure multimodèle pour la prévision de crue". Rapport CERGRENE - SHC - 50 p + Annexes.

1990

[R3] "Etudes des appareillages et pratiques limnimériques. Juillet 90. Fiches de lecture. CERGRENE. Plan Urbain.

[R4] "Etudes des apports par ruissellement des zones mixtes urbaines et rurales. Adaptation de la méthode SOCOSE. sept.90. Rapport CERGRENE-Plan Urbain- 15 p + annexes.

[R5] "Comportement de la procédure multimodèles sur les crues de février et de mai 90 à TOULOUSE - sept.90. Rapport CERGRENE - SHC - 15 p.

1992

[R6] "Modélisation des flux de surface et des interactions terre/océan/atmosphère. 5 p. Synthèse OMM.

[R7] "Estimation de l'état hydrique de petits bassins versants agricoles à l'aide de l'observation spatiale". Rapport intermédiaire - févr. 92 - CNES - GEOSYS - CEMAGREF - CRPE - n°91/CNES/0331 - 22 p. + annexes.

[R8] "Bassin de référence pour l'étude des transferts en milieu agricole intensif". Rapport d'étape. MRT/CEMAGREF/INRA/BRGM (Bretai). Déc.92.

[R9] Ansart P., Ferry M; Loumagne C., Normand M., Rosique JL, Rosique P., 1992. Annuaire graphique de l'ORGEVAL 1991.19pp.

1993

[R10] "Estimation de l'état hydrique de petits bassins versants agricoles à l'aide de l'observation spatiale". Rapport final phase 1-Janv 93 - CNES/GEOSYS/CEMAGREF/CRPE. 35 p + annexes.

[R11] "Bassin de référence pour l'étude des transferts en milieu agricole intensif". Rapport final. MRT/CEMAGREF/INRA/BRGM (Bretai). Déc.93. 16p + Annexes.

[R12] Ansart P., Ferry M; Loumagne C., Normand M., Rosique JL, Rosique P., 1992. Annuaire graphique de l'ORGEVAL 1992. 9pp.

1994

[R13] "Estimation de l'état hydrique de petits bassins versants agricoles à l'aide de l'observation spatiale". Rapport final phase 2-Juill 94 - CNES/GEOSYS/CEMAGREF/CRPE. 75 p + annexes.

1995

[R14] "Observatoire hydrologique de Naizin en Bretagne centrale 1ers résultats ERS1 phase D" Rapport d'étape CEMAGREF HHAN, CEMAGREF, LCT, 1995

1996

[R15] "Observatoire hydrologique de Naizin en Bretagne Centrale". Rapport final phase D. Convention CNES. 37 pg + annexes. hydrologie, CEMAGREF, LCT, CETP-CNRS, 1996

[R16] Andréassian Vz, Ansart P., Faucher V., Ferry M; Loumagne C., Normand M., Rosique JL, 1996. Annuaire graphique de l'ORGEVAL 1993, 1994, 1995. 24pp.

[R17] "Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues". Comportement hydrologique des bassins versants. 1° rapport de la convention pluriannuelle PNRN94 INSU- CEMAGREF HHAN, CNRS-CPB Nancy, août 96, 4 pg.

[R18] "Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues. Appréhension de l'état du bassin par télédétection". 2° rapport de la convention pluriannuelle PNRN95 INSU- CEMAGREF HHAN, CETP-CNRS, décbr 96, 14 pg.

1997

[R19] Vidal Madjar D., Normand M., Taconet O., Mascle S., Zribi M., Emblanch C., Loumagne C., 1997. "Final report on Orgeval SIRC/XSAR 1994 experiment". Nasa-JPL Publications 20pg

[R20] Andréassian Vz., Ansart P., Faucher V., Ferry M; Loumagne C., Nedelec Y., Normand M., Rosique JL, 1997. Annuaire graphique de l'ORGEVAL 1996. 24pp.

[R21] "Suivi pluri-annuel de l'humidité sur le bassin de l'Orgeval par imagerie hyperfréquence des satellites européens ERS1-ERS2 méthodologie et application au fonctionnement hydrologique du bassin". Convention PNTS-CEMAGREF, CETP-CNRS,. Rapport final,1997, 10pg.

[R22] "Monitoring of an hydric index over an experimental watershed by use of ERS/SAR multitemporal sequency". Selected Pilot Project for ERS1/2 tandem n° A02.F115. Progress report. ESA, CETP, CEMAGREF 5pg.

1998

[R23] "Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues". Comportement hydrologique des bassins versants. 3° rapport de la convention pluriannuelle PNRN96/97 INSU- CEMAGREF HHAN, CNRS-CPB Nancy, fevr 98, 10 pg.

[R24] "Monitoring of an hydric index over an experimental watershed by use of ERS/SAR multitemporal sequency". Selected Pilot Project for ERS1/2 tandem n° A02.F115. Final report. ESA, CETP, CEMAGREF 25pg.

1999

[R25] "Amélioration de la perception du rôle de l'interface sol-vegetation-atmosphère dans la modélisation pluie-débit ". Rapport intermédiaire PNRH INSU- CEMAGREF QHAN, CNRS-CETP Velizy, juin 99, 12pg.

[R26] "Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues". Comportement hydrologique des bassins versants. Rapport intermédiaire PNRN 98 INSU- CEMAGREF HHAN, CNRS-CPB Nancy, juill 99, 20 pg.

[R27] "Analysis, investigation and monitoring of water resources for the management of multi-purpose reservoir". Contract ENV4-CT98-0740- CEMAGREF, CNRS/CETP, IH Wallingford, Univ. Valencia, Univ Independente, ARBSLP. Kick-off meeting report, 7pg + annex, 2nd meeting report, 8pg + annex, First progress report, 17pg + deliverables.

2000

[R28] "Analysis, investigation and monitoring of water resources for the management of multi-purpose reservoir". Contract ENV4-CT98-0740- CEMAGREF, CNRS/CETP, IH Wallingford, Univ. Valencia, Univ Independente, ARBSLP. 3rd meeting report, 9pg + annex, Second progress report, 39pg + deliverables.

[R29] "Analysis, investigation and monitoring of water resources for the management of multi-purpose reservoir". Contract ENV4-CT98-0740- CEMAGREF, CNRS/CETP, IH Wallingford, Univ. Valencia, Univ Independente, ARBSLP. 4th meeting report, 7pg + annex, Third progress report, 15pg+deliverables.

[R30] "Amélioration de la perception du rôle de l'interface sol-vegetation-atmosphère dans la modélisation pluie-débit ". Rapport final PNRH INSU- CEMAGREF QHAN, CNRS-CETP Velizy, juillet 2000, 10pg.

[R31] "Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues". Comportement hydrologique des bassins versants. Rapport final PNRN INSU- CEMAGREF HHAN, CNRS-CPB Nancy, juill 2000, 10 pg.

[R32] "Analysis, investigation and monitoring of water resources for the management of multi-purpose reservoir". Contract ENV4-CT98-0740- CEMAGREF, CNRS/CETP, IH Wallingford, Univ. Valencia, Univ Independente, ARBSLP. 5th meeting report, 9pg + annex, Fourth progress report, 25pg+deliverables.

2 SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

- **INTRODUCTION**
- **CONTEXTE**
- **DEMARCHE SCIENTIFIQUE**
- **RESULTATS GENERAUX**

2.1 INTRODUCTION

Les travaux de recherche traités dans cette monographie concernent tout d'abord les premières recherches effectuées au CEMAGREF au cours de ma thèse (1986-1988) en modélisation hydrologique. Ces travaux se sont ensuite poursuivis au CERGRENE en 1989-1990 dans le domaine de la prévision de crues puis à nouveau au CEMAGREF depuis 1991 dans le domaine de la télédétection appliquée à l'hydrologie. Cette activité se poursuit depuis 1998 à l'Université de PRINCETON partagée avec l'étude de la modélisation des schémas de surface dans le cadre d'une collaboration avec le CEMAGREF.

Mes compétences se sont donc développées à l'interface de plusieurs domaines de connaissances qui sont la modélisation des comportements hydrologiques, la compréhension des processus de surface, leur caractérisation par l'observation spatiale et la gestion de la ressource en eau.

Les résultats et méthodologies présentés dans ce mémoire sont le fruit de collaborations étroites non seulement au sein des différentes équipes d'accueil mais aussi avec les partenaires extérieurs avec qui j'ai pu mener à bien les divers projets de recherche qui font la trame de la synthèse thématique de mes travaux.

Orientations thématiques

Une grande partie des mes travaux de recherche ayant été menée au CEMAGREF, cela a fortement orienté ma démarche scientifique non seulement quant au choix des thématiques liées aux objectifs de l'établissement: "Contribuer au développement durable des territoires, aider à la protection et la gestion des hydrosystèmes et des milieux terrestres, prévenir les risques qui leur sont associés"[1], mais aussi quant à l'approche développée issue de la spécificité du CEMAGREF.

Cette spécificité se traduit par l'identification de problématiques nouvelles en lien étroit avec les acteurs socio-économiques, l'acquisition de nouvelles connaissances et la valorisation des résultats de la recherche fondamentale par la restitution aux services publics des résultats de ces recherches dans une optique opérationnelle.

Cette attitude sous-tend une grande proximité avec les différents acteurs sur le terrain, une démarche presque toujours pluridisciplinaire et des interactions fréquentes entre recherche et expertise.

Les orientations du département Gestion des Milieux Aquatiques auquel je suis rattachée sont centrées sur le fonctionnement des hydrosystèmes. Au cours du temps, plusieurs thématiques de recherche ont structuré les programmes de ce département. Dans leur diversité, leur objectif commun a été de "connaître, évaluer, prévoir les ressources en eau et les risques associés, ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle"[2].

Aujourd'hui, mes travaux s'inscrivent plus spécifiquement dans le thème de recherche, baptisé TRANSFEAU, englobant l'étude des apports en eau et des comportements des bassins versants (régimes et comportement) d'une part, et l'étude des écoulements et des transferts d'eau et de matière dans le réseau hydrographique d'autre part (transferts) [3] (fig n°1.1).

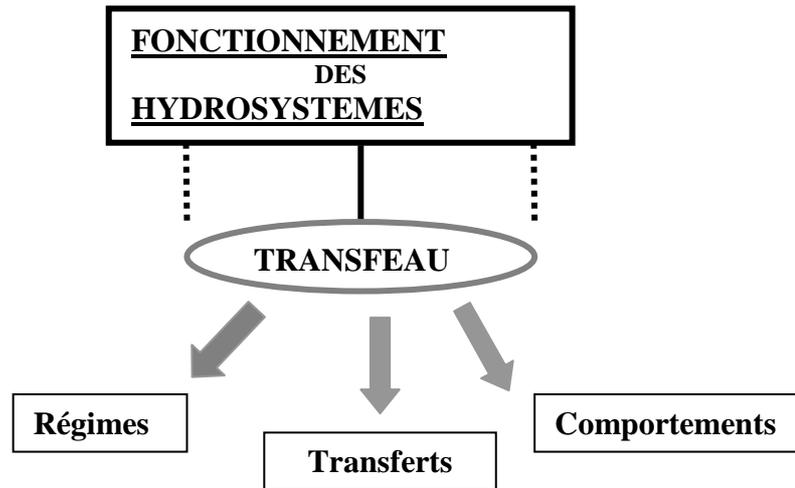


Fig.1.1: Orientations, et thèmes de recherche

Cadre des recherches

L'étude du cycle de l'eau est centrale dans le thème de recherche dans lequel s'inscrivent mes travaux. Si les applications opérationnelles de gestion de la ressource amènent surtout à des réponses à l'échelle spatiale du bassin versant de moyenne échelle (10^2 - 10^4 km²), en revanche, les besoins de compréhension ou le questionnement scientifique s'effectuent souvent à plus petite maille (parcelle, versant, petit bassin versant 10 - 10^2 km²), et parfois à plus grande maille (région, maille des modèles climatiques 10^5 - 10^7 km²).

Pour étudier la complexité des hydrosystèmes dans leur ensemble, une des démarches adoptées est celle qui permet de structurer préalablement le bassin versant à travers une organisation et une spatialisation de l'information afin de prendre en compte les phénomènes essentiels sur les zones pertinentes; la description temporelle pouvant être continue ou synthétique en termes statistiques.

Les méthodes et outils développés dans ce thème de recherche s'orientent de plus en plus vers une gestion intégrée des hydrosystèmes confrontant risques-ressources-besoins-milieux naturels et conduisant à des stratégies d'aménagement durable.

Ma démarche se situe dans une perspective de développement d'études comportementales de bassins versants, d'études d'impact des influences humaines ou encore d'études d'impact hydrologique du changement climatique [4].

Ces problématiques se sont traduites en questions scientifiques telles que :

- l'étude des ressources confrontées aux besoins dans une perspective de gestion,
- l'estimation des paramètres pertinents à l'interface sol-végétation-atmosphère par un couplage de modèles hydro-météorologiques,
- le développement de modèles caractérisant le comportement du bassin comme outil d'analyse dans le domaine de la prévision,
- l'analyse des processus à travers une structuration du bassin et une spatialisation de l'information...

Pour répondre à ces questions, une démarche scientifique a été suivie et différentes méthodologies ont été développées dans les domaines de la compréhension des processus, la

modélisation des comportements hydrologiques, l'assimilation des données et la gestion des ressources.

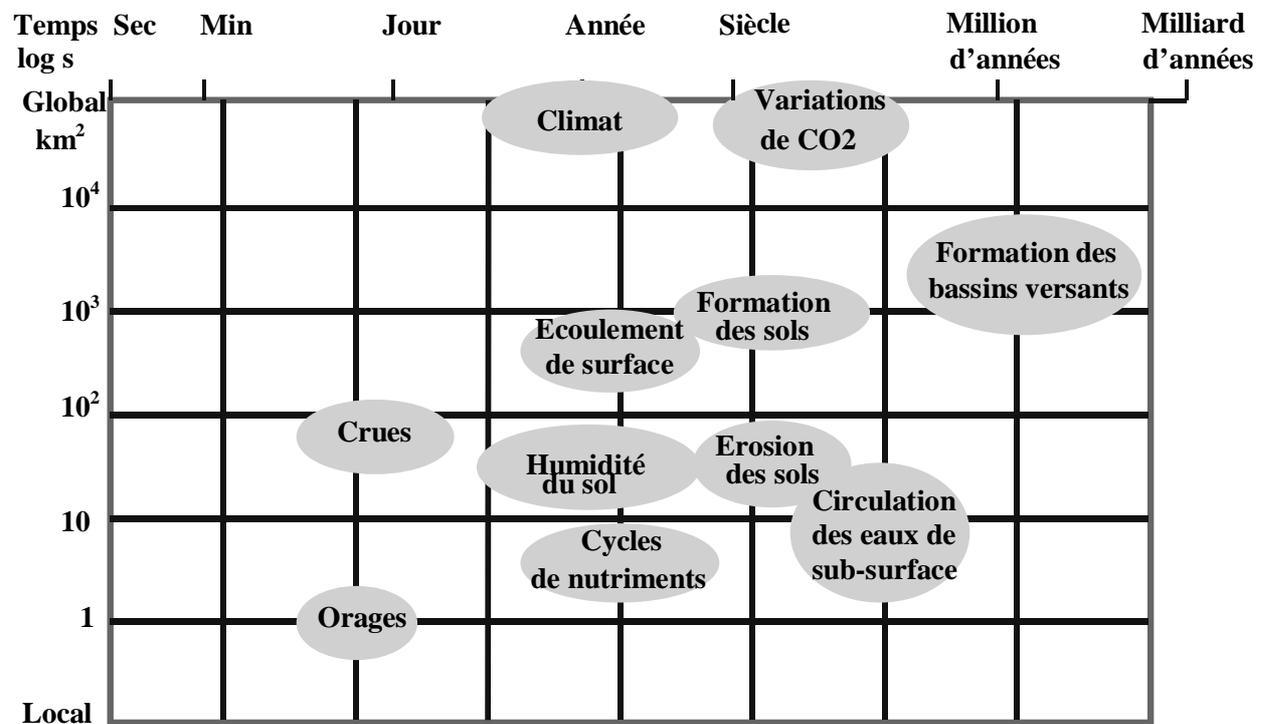
Situer mes travaux de recherche dans un contexte plus général décrivant ces différents domaines fera l'objet d'un premier chapitre. Un deuxième chapitre décrira la démarche scientifique. En lien avec la démarche scientifique, le troisième chapitre présentera les résultats obtenus dans le cadre de projets de recherche menés en collaboration avec différents partenaires ou étudiants encadrés en thèse, DEA et diplômes d'ingénieur. Différentes perspectives issues de ces résultats seront discutées dans le dernier chapitre.

2.2 CONTEXTE

Les travaux que j'ai menés entre 1986 et 2001 se trouvent à l'interface de plusieurs domaines de connaissances. Ces domaines étant chacun assez vastes, mes recherches n'ont traité qu'une partie de la problématique générale. La description succincte du contexte dans lequel ces travaux s'inscrivent est donc apparue nécessaire dans un premier temps, afin de définir sous quel angle ces domaines avaient été abordés ainsi que pour les situer les uns par rapport aux autres et montrer les liens établis au cours de ces quelques années de recherche.

2.2.1 Compréhension des processus au sein d'un bassin versant

Le premier domaine abordé est centré sur la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant rural. Le bassin versant de moyenne dimension (taille comprise entre 10^2 - 10^4 km²) est un élément clé de l'approche développée. En effet, la réponse d'un hydrosystème à des forçages météorologiques est très variable dans le temps et dans l'espace. L'étude des différents processus hydrologiques est donc fortement dépendante des échelles spatiale et temporelle de travail considérées (fig n°2.1).



(d'après S. L. Dingman, 1994)

Fig n°2.1: Echelles de temps et d'espace des processus hydrologiques

Lorsqu'on s'intéresse à l'étude des processus décrivant les échanges de flux hydriques entre la surface du globe terrestre et l'atmosphère, même si ces échanges ne concernent qu'une infime partie du volume d'eau mis en jeu, ils s'effectuent à l'échelle de la planète tout entière. Ces échanges avec l'atmosphère, par l'action combinée des précipitations et de l'évaporation recouvrent le concept classique de cycle de l'eau.

Cependant, le cycle de l'eau peut être aussi abordé non plus dans sa globalité mais plutôt à une échelle permettant de quantifier les échanges avec la surface terrestre au travers du bilan hydrologique.

A ce niveau, c'est le bassin versant qui est l'entité hydrologique privilégiée. Les différents termes du bilan hydrologique, largement décrits dans la littérature sont souvent regroupés en deux grandes catégories pour essayer de les comprendre, de les quantifier et d'explicitier le fonctionnement du bassin versant: les processus de transfert des flux jusqu'à l'exutoire et les processus de transformation des pluies en débits.

Les premiers, mieux connus, sont assez bien caractérisés par les équations d'hydraulique classique, pour les seconds, par contre, il est souvent plus difficile de transposer les lois physiques déterminées par des études fines en laboratoire, à d'autres ordres de grandeur pour lesquels elles n'ont pas été définies.

La complexité des processus en jeu dans la transformation des pluies en débit a donc suscité depuis longtemps de nombreux travaux qui ont montré le rôle déterminant joué par l'interface sol-végétation-atmosphère ainsi que par son état initial pour déterminer le devenir de l'eau précipitée et sa partition entre évaporation, infiltration ou ruissellement (Kirby, 1978, Wetzel et al, 1996).

Les flux hydriques concernés par cette interface ne contribuent que modestement au flux hydrique total de l'atmosphère. En milieu continental, ils en contrôlent cependant de nombreux aspects par leur réponse à court terme aux forçages climatiques.

L'étude des processus à l'interface sol-végétation-atmosphère constitue donc un domaine privilégié de recherche non seulement pour les hydrologues mais aussi pour les atmosphériciens ou climatologues (Rowntree et Bolton, 1983, Viterbo 1996). Si les ordres de grandeur abordés sont généralement différents, la compréhension des processus au sein du bassin versant est souvent une étape nécessaire avant d'intégrer les flux hydriques dans des modèles globaux de circulation générale (Wood et al, 1992).

L'intérêt de telles recherches a été renforcé par le développement croissant des capteurs spatiaux, actifs ou passifs, permettant d'obtenir de nouvelles informations spatio-temporelles pouvant être utilisées pour modéliser et gérer les processus surface. Ces capteurs, ont permis d'identifier et d'analyser de nombreuses composantes du cycle de l'eau à travers la détermination de paramètres caractéristiques du comportement hydrique des surfaces tels que l'état hydrique, la rugosité ou l'occupation du sol à deux échelles d'observation: l'échelle ponctuelle et l'échelle du bassin.

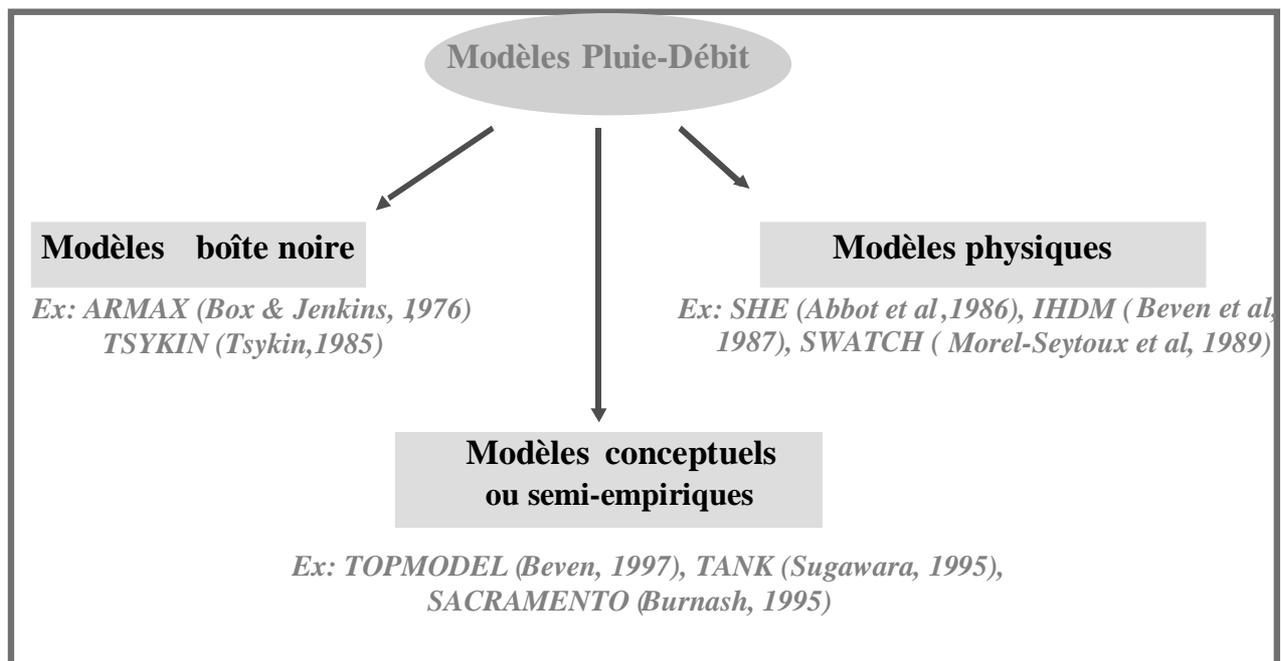
C'est donc la compréhension des processus de surface dans la transformation des pluies en débits et leur caractérisation au niveau d'un bassin versant qui ont été les axes majeurs des travaux que j'ai développés ces dernières années. Leur intégration dans des modèles de comportement pour une amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant est ensuite venue logiquement compléter la démarche entreprise.

2.2.2 Modélisation des comportements hydrologiques

Le deuxième domaine abordé est celui de la modélisation hydrologique comme suite logique à la compréhension des processus de surface car permettant de simuler le comportement d'un hydrosystème et de tirer toute conséquence de l'exploitation de ses résultats.

De nombreux travaux ont porté sur l'étude des comportements hydrologiques par le biais d'outils de modélisation qui tout en intégrant des facteurs complexes du cycle de l'eau, décrivent le fonctionnement du bassin versant par une représentation plus ou moins simplifiée de la réalité. Dans la littérature on trouve un grand nombre de modèles hydrologiques que l'on peut classer selon la description de leurs relations internes (modèle empirique, conceptuel ou physique), la nature de leurs variables et paramètres (modèle déterministe ou stochastique), l'unité spatiale modélisée (modèle global ou distribué) ou la nature des processus décrits (modèle cinétique ou dynamique) (Roche, 1988, Singh, 1995, Ambroise, 1998).

En gestion de la ressource hydrologique, ce sont les modèles pluie-débit qui sont les mieux adaptés à des bassins versants de moyenne échelle (Perrin *et al*, 2000). Si l'on se base sur la nature des relations utilisées on peut classer ces modèles en trois catégories différentes (fig n°2.2) allant de modèles purement mathématiques à des modèles physiques complexes [R/28].



(R/28], 2000)

Fig. n°2.2 : Classification des modèles Pluie-Débit

- Les modèles de type boîte noire sont basés sur la description des liens mathématiques entre les entrées et les sorties du modèle.

Ce type de modèle ne prend pas en compte le comportement du bassin versant qui est considéré comme une seule entité globale. La fiabilité de leurs résultats est parfois remise en cause car ils peuvent difficilement simuler correctement la non-linéarité des transformations pluie-débit. Des exemples de ce type de modèle sont des modèles régressifs tels que le modèle de TSYKIN (Tsykin, 1985) ou auto-régressifs tels que les modèles ARMAX (Box et Jenkins, 1976).

- Les modèles de type conceptuel ont une structure constituée de réservoirs interconnectés. Ceux-ci prennent en compte de manière plus ou moins explicite le comportement physique du bassin. La variabilité spatio-temporelle et la complexité des phénomènes rencontrés sont souvent décrits de manière très simplifiée; ils sont cependant largement utilisés dans un contexte opérationnel car ils fournissent de résultats fiables et robustes. Des exemples de ce type de modèles sont les modèles SACRAMENTO (Burnash, 1995), TANK (Sugawara, 1995) ou TOPMODEL (Beven, 1997).

- Les modèles dits physiques sont fondés sur l'utilisation d'équations « théoriques » pour décrire les différents processus physiques observés au sein du bassin telles que par exemple l'équation de Richards pour le mouvement de l'eau dans la zone non saturée ou encore l'équation de Saint Venant pour la simulation des flux dans les cours d'eau. Ces modèles utilisent des entrées spatialement distribuées afin de prendre en compte la variabilité des caractéristiques du milieu simulé. Cependant, de par la complexité et le nombre élevé de données nécessaires en entrée du modèle, ils restent inadaptés à une utilisation dans un contexte opérationnel. Ils sont par contre très utiles à la compréhension fine des différents processus descriptifs du cycle hydrologique. Des exemples de tels modèles sont les modèles SHE (Abbot et al, 1986), IHDM (Beven et al, 1987) ou SWATC (Morel-Seytoux et al, 1989).

Lors des différents travaux que j'ai développés dans ce domaine, l'application qui en a été faite dans un contexte opérationnel m'a amenée à travailler essentiellement avec des modèles de type conceptuel faciles à mettre en œuvre et peu demandeurs en données d'entrée.

Ces modèles, n'ont en général qu'une seule sortie les débits et, de ce fait, ils ne sont pas toujours bien adaptés à l'étude fine des autres processus hydrologiques tels que l'infiltration ou la recharge des aquifères. Cependant, ils ont montré (Loague et Freeze 1985, Michaud et Soroshian 1994, Refsgaard, 1996) qu'ils pouvaient fournir des résultats en terme de modélisation des débits aussi satisfaisants que des modèles physiques plus complexes utilisés dans un contexte opérationnel.

Ces dernières décennies, des avancées significatives ont été faites pour améliorer la fiabilité de la modélisation des relations pluie-débit concernant notamment les problèmes d'optimisation de la fonction objectif, de surparamétrisation des modèles, de redondance ou de sensibilité des paramètres. Malgré cela, les hydrologues et les utilisateurs des modèles conceptuels sont toujours conscients du grand nombre de limites rencontrées dans leur utilisation opérationnelle comme par exemple dans un contexte de prévision de crue.

Il semble donc que les modèles dits conceptuels, aient atteint une limite dans les possibilités d'amélioration de leurs résultats qui ne peut être franchie qu'en intégrant un nouveau type d'information, complémentaire à l'information obtenue à partir des données hydrométéorologiques classiques. C'est cette constatation qui a été à l'origine des différents travaux que j'ai entrepris dans le domaine de la modélisation et en a constitué l'idée directrice.

2.2.3 Assimilation des données en hydrologie

Ce domaine de recherche, actuellement considéré en climatologie et météorologie comme présentant le plus grand potentiel d'amélioration des connaissances sur notre environnement (Cohn,1997, Daley, 1997), a été abordé au cours de mes travaux par le biais de l'amélioration de la qualité des prévisions de crues en hydrologie.

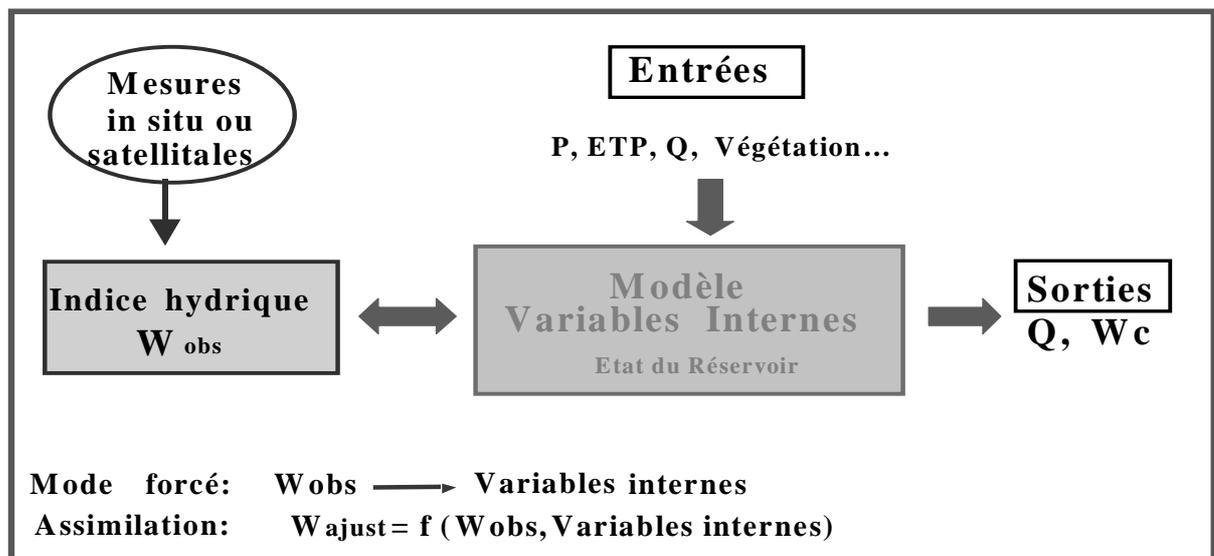
L'assimilation définie comme étant l'utilisation simultanée de l'information contenue dans un modèle et dans un ensemble de données externes a suscité de nombreux travaux dans le domaine de la prévision de crues où ce sont essentiellement des méthodes d'assimilation de débits qui ont été développées.

Les travaux publiés concernant l'assimilation d'autres types données tels que les flux de surface sont beaucoup moins nombreux et plus récents. Ils ont surtout porté sur l'assimilation d'observations de l'humidité du sol pour contrôler l'évolution de cette variable dans des schémas modélisant les flux de surface sans couplage avec des modèles hydrologiques de prévision (Entekhabi et al 1994, Houser et al, 1998, Galantowicz et al 1999).

La démarche proposée dans nos travaux est d'utiliser les techniques d'assimilation de débits couplées à l'assimilation d'une information supplémentaire sur l'état hydrique du sol afin d'étudier son influence sur la qualité des prévisions des crues.

Le processus d'assimilation permet d'établir un lien entre l'information externe, la variable observée, et les variables internes calculées par le modèle :

- Si l'on fait confiance entièrement à la valeur prise par la variable observée, celle-ci peut venir directement remplacer les variables internes calculées par le modèle, c'est ce qu'on appelle le mode forcé.
- Si l'on ne fait entièrement confiance ni dans la variable observée ni dans les variables calculées par le modèle, alors on établit une relation pondérant la confiance accordée à chacune des informations, c'est ce que l'on appelle l'assimilation.



[R29], 2000

Fig n°2.3: Méthodologie d'assimilation de l'état hydrique par mise à jour des variables internes (W_{ajust})

Dans notre démarche, l'information externe est l'état hydrique du sol, soit mesuré in situ soit dérivé de l'observation satellitale; cette information étant utilisée en assimilation pour la mise à jour des variables internes calculées par le modèle afin d'améliorer la prévision des débits à l'exutoire du bassin (fig n°2.3).

O'Connel et Clarke (1981) et plus récemment Refsgaard (1997) ont recensé différentes méthodologies d'assimilation en hydrologie. Elles se différencient par le type d'ajustement effectué au cours de la prévision :

Les ajustements affectent soit les entrées, les sorties, les états internes, soit les paramètres du modèle en fonction des hypothèses faites sur l'origine des erreurs entre observation et simulation. Les deux premières méthodes (ajustement des entrées et sorties) sont plutôt adaptées à des modèles linéaires, et les secondes (ajustement des états et des paramètres) à des modèles non linéaires tels que les modèles conceptuels.

Conjointement à ces méthodes, deux types d'algorithmes ont été développés pour réajuster le modèle à partir des observations : *l'approche variationnelle* qui réajuste le modèle en optimisant les conditions initiales sur une période rétroactive précédant la prévision et *l'approche séquentielle* qui réajuste le modèle seulement lorsqu'une observation est

disponible, les nouvelles estimations fournissent alors les nouvelles conditions initiales du modèle. Ces travaux, objets de deux post-doctorats que j'encadre, sont aussi le fruit d'une collaboration étroite avec le CNRS/CETP.

La démarche proposée dans le domaine de l'assimilation de données s'appuie sur la mise en œuvre de méthodes et d'algorithmes adaptés à la modélisation conceptuelle intégrant une observation externe supplémentaire par rapport au débit, seule observation exploitée jusqu'à présent en hydrologie pour la mise à jour du système modélisé. Cette nouvelle information, l'état hydrique du sol, est utilisée pour le réajustement des variables internes du modèle afin d'améliorer la prévision des débits à l'exutoire du bassin versant.

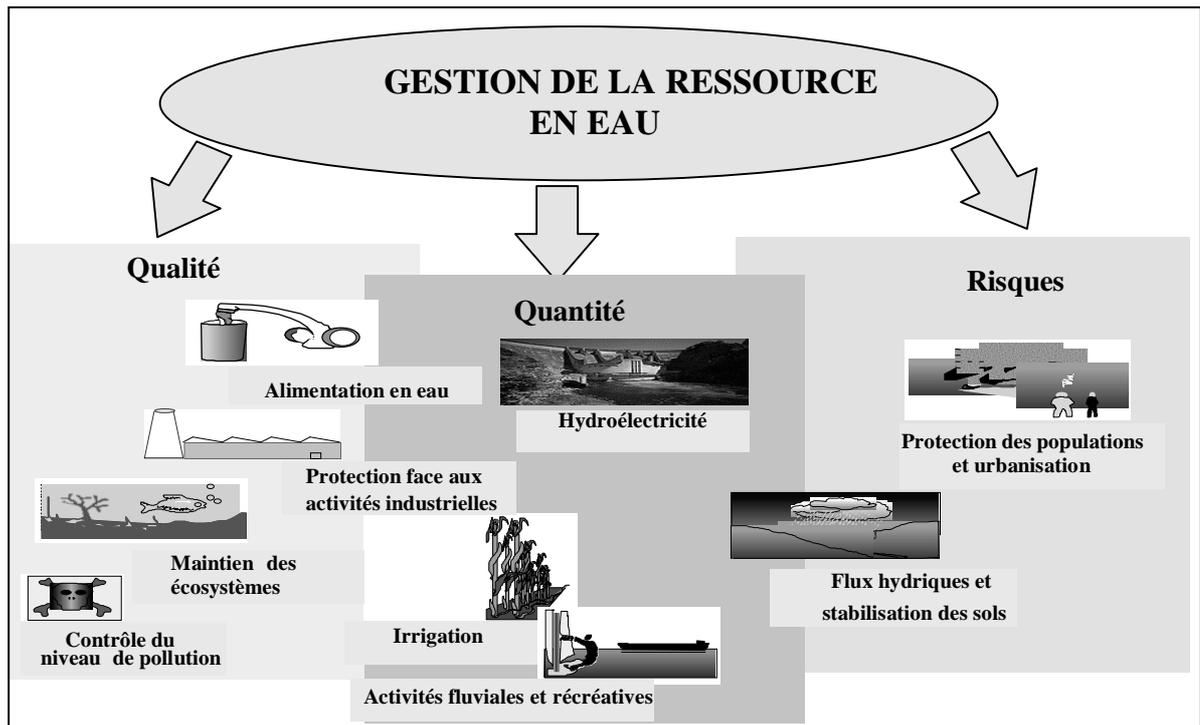
2.2.4 Gestion de la ressource en eau

Menés dans le contexte de recherche appliquée du Cemagref, les travaux que j'ai pu développer concernant aussi bien la compréhension des processus, la modélisation des comportements ou l'assimilation de données ont toujours eu comme objectif final de répondre à l'un des multiples aspects de la gestion de la ressource en eau.

Ce domaine peut être divisé en trois champs d'application majeurs (fig n°2.4):

- Evaluation quantitative des eaux de surface et des aquifères.
- Evaluation qualitative des eaux de surface et des aquifères
- Evaluation des risques naturels liés aux ressources en eau

Ces trois champs d'applications sont étudiés dans le cadre d'un thème de recherche du département Gestion des Milieux Aquatiques, baptisé TRANSFEAU, par le biais des trois axes: régimes, comportements et transferts hydriques ou de solutés abordant chacun plus spécifiquement l'évaluation de la quantité, de la qualité ou du risque lié à la ressource en eau. La présentation qui est faite dans ce mémoire développe essentiellement les transferts hydriques, les transferts de solutés n'ayant pas été traités au cours de mes travaux.



(d'après S. L. Dingman, 1994)

Fig n°2.4: Domaines d'application de la gestion de la ressource en eau

- L'évaluation quantitative des eaux de surface et des aquifères fait l'objet principalement de deux types d'applications qui se trouvent souvent confrontées dans l'étude du bilan ressources /besoins. Dans la première catégorie, on trouve les *différents usages* de l'eau liés à la demande sociale. Dans cette catégorie, l'alimentation en eau potable se différencie fortement de l'usage industriel et de l'irrigation par ses interactions fortes avec l'évaluation de sa qualité. Dans la deuxième catégorie, on trouve toutes les études sur *la caractérisation de la ressource* avec évaluation des apports, des régimes et de la disponibilité en eau à partir de modèles hydrologiques de synthèse ou de modèles de bilans.

- L'évaluation qualitative des eaux de surface et des aquifères recouvre l'étude des éléments (solides ou gazeux) dissous, des matières en suspension, des ions, des microorganismes, et de la température du système aquatique considéré. L'action anthropique jouant un rôle majeur sur la qualité, deux types de pollution sont alors considérés, les pollutions d'origine ponctuelles accidentelles ou non provenant des rejets de sites industriels ou zones urbanisées et les pollutions d'origine diffuse provenant majoritairement des zones agricoles mais aussi du ruissellement en zone urbanisée.

- Les risques liés à la ressource en eau, soit naturels soit associés à des actions anthropiques, concernent l'eau sous toutes ses formes pouvant être source de danger pour les personnes et les biens. La magnitude et la fréquence de la plupart de ces aléas sont déterminés par les conditions météorologiques, géologiques ou topographiques sans oublier les effets anthropiques.

Au sein du thème de recherche TRANSFEAU, les principaux travaux qui ont été développés ont porté essentiellement sur les inondations liées aux crues dont les effets restent toujours

parmi les plus destructeurs en France. Deux approches complémentaires sont suivies pour aborder cette problématique :

- Dans la première, la prédétermination du risque (évaluation en magnitude et fréquence) est une première étape avant de mettre en place des aménagements et des équipements bien conçus destinés à la réduction des risques encourus par les personnes et les biens.
- Dans la prévention du risque, la démarche s'appuie sur des études de vulnérabilité déterminées à partir des dommages causés par les inondations mais surtout sur des outils de prévision et d'alerte à la population. Dans ces deux approches, la modélisation joue un rôle clé dans la démarche scientifique ainsi que dans l'élaboration d'outils d'aide à la décision.

Mes travaux ont abordé le domaine de la gestion de la ressource sous l'angle de la prévention du risque à travers les outils de prévision des débits. Des exemples sont présentés dans le cadre de la gestion de barrages réservoirs, dans le cadre de mise en place d'outils d'aide à la décision destinée à la prévision de crues ou dans l'amélioration des outils de prévision hydrologique : [P2], [P3], [P6], [P13], [P14], [P16], [P29], [P33], [P36], [P44], [P46], [P47], [P50], [P52]...

La présentation brève du contexte a permis de délimiter dans les différents domaines les sujets abordés au cours de mes recherches. La plupart de ces sujets sont résumés ci-dessous :

◆ ***Dans le domaine de la compréhension des processus :***

- Caractérisation des paramètres de surface et plus spécifiquement de l'état hydrique du sol comme variable clé du cycle hydrologique.
- Evaluation et étude des variations d'une telle variable grâce à l'observation satellitale.
- Etude du comportement hydrologique d'un bassin versant rural à deux échelles d'observation: l'échelle ponctuelle et l'échelle du bassin.

◆ ***Dans le domaine de la modélisation des comportements :***

- Etude des transformations pluie-débit au sein du bassin versant.
- Prise en compte de l'état hydrique des sols dans la modélisation des transformations pluie-débit.
- Modélisation des flux à l'interface sol-végétation-atmosphère.
- Couplage d'un modèle de surface à un modèle conceptuel pluie-débit.
- Comparaison des approches globales et distribuées pour la modélisation des débits.

◆ ***Dans le domaine de l'assimilation de données :***

- Mise en œuvre de procédures d'assimilation dans des modèles hydrologiques.
- Intégration de l'état hydrique pour la mise à jour des états internes du système modélisé.
- Comparaison des méthodes d'assimilation avec et sans prise en compte de l'état hydrique.

◆ ***Dans le domaine de la gestion de la ressource :***

- Amélioration des prévisions de crue dans un système d'aide à la décision.
- Amélioration des outils de prévision utilisés.
- Gestion des barrages réservoirs.

Les liens qui ont pu être établis entre ces différents domaines ainsi que la démarche scientifique suivie au cours de mes travaux de recherche sont présentés dans le prochain chapitre.

2.3 DEMARCHE SCIENTIFIQUE

La question essentielle qui est au cœur de mes différents travaux de recherche est celle de la connaissance du cycle de l'eau et sa quantification par l'étude de la relation entre l'eau qui tombe et celle qui s'écoule à l'exutoire d'un bassin versant.

La démarche scientifique suivie s'est insérée dans un contexte scientifique qui a été décrit dans le chapitre précédent. Elle s'est aussi développée autour d'objets et d'outils de recherche ainsi que de méthodes adaptées aux domaines d'application abordés (fig n°3.1).

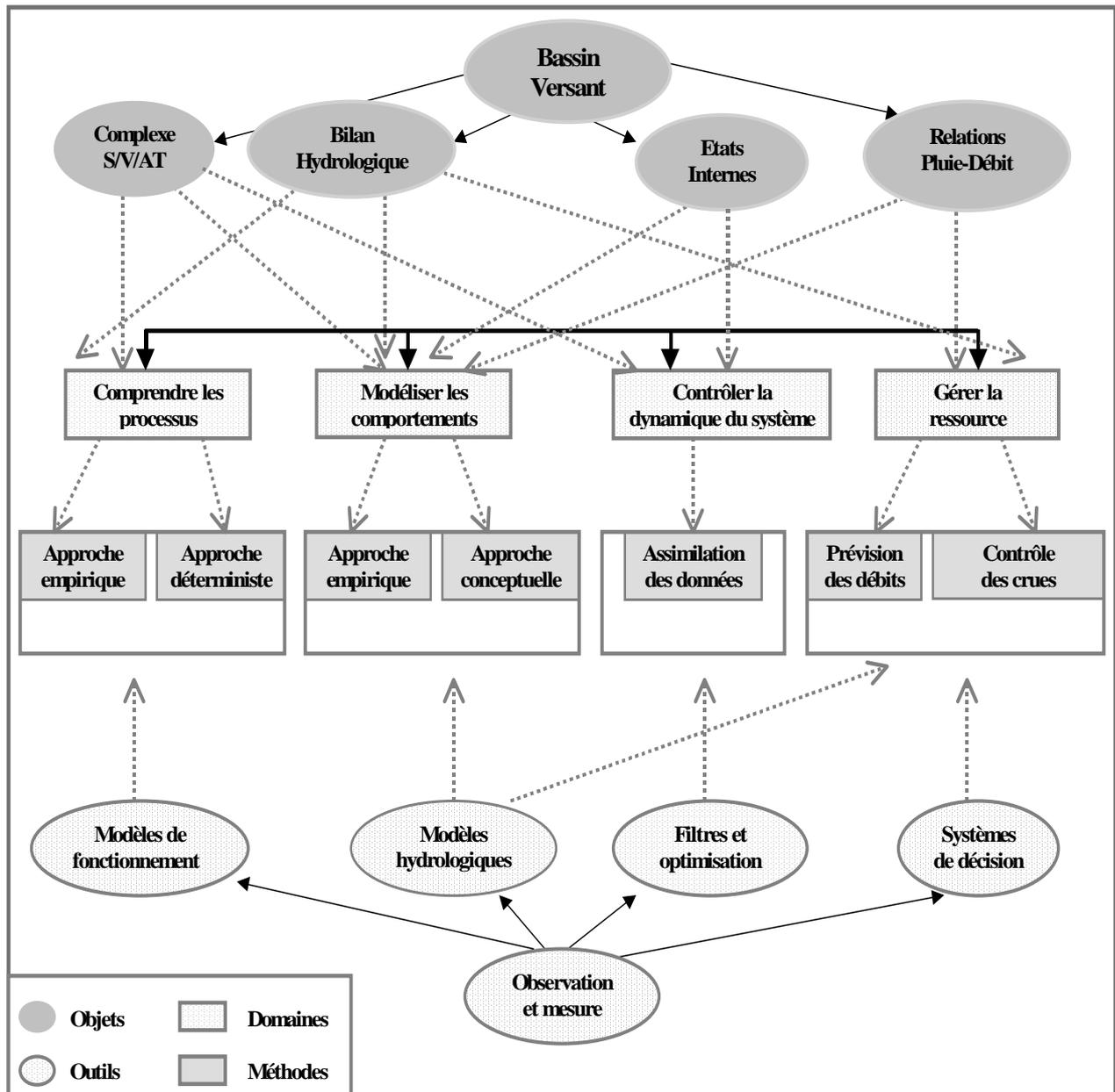


Fig n°3.1: Relations entre objets, outils, domaines et méthodes de la démarche scientifique suivie.

Positionnement

La démarche suivie a été marquée par une forte pluridisciplinarité et par des interactions nombreuses entre recherche et application.

Ces deux spécificités ont fortement conditionné les "objets" sur lesquels ont porté la recherche, les outils et méthodes utilisées.

Objets de recherche

Le ***bassin versant*** est l'unité fonctionnelle de base sur lequel les principes de conservation de masse et d'énergie s'appliquent. C'est donc lui qui a été le principal objet de mes recherches pour répondre aux objectifs de gestion de la ressource.

L'analyse des processus hydrologiques et leur évaluation au sein du bassin versant s'est appuyée sur le concept de ***bilan hydrologique*** dont le principe est simple et adapté aux objectifs d'application opérationnelle.

Parmi les processus conduisant à l'établissement du bilan hydrologique, ce sont les processus de ***transformation de la pluie en débit***, encore mal élucidés qui ont fait l'objet de mes travaux et, plus particulièrement, le rôle déterminant du ***complexe sol-végétation-atmosphère*** comme nous l'avons vu au chapitre 2.2.1.

Lorsqu'il s'agit de modéliser ces transformations pluie-débit dans un modèle de comportement hydrologique de bassin versant, ce sont les ***états internes*** du système modélisé qui traduisent la dynamique des processus simulés. Ce sont donc eux qu'il faut pouvoir contrôler pour améliorer les sorties du modèle.

Méthodes et outils de recherche

Les outils de base sont l'***observation*** et la ***mesure*** soit *in situ*, soit à l'aide de techniques spatiales. Ils nous ont permis de mettre en œuvre et de valider les méthodes destinées aux différentes applications développées.

Dans nos recherches, nous avons utilisé des ***modèles de fonctionnement*** pour caractériser les processus de surface, ces modèles venant étayer soit une ***approche empirique*** fondée sur l'observation et l'analyse statistique des états de surface, soit une ***approche plus déterministe*** essayant de relier les causes aux effets comme dans le modèle de correction de la diffusion du signal radar par une couverture végétale.

Le comportement du bassin versant a été modélisé par des ***modèles hydrologiques*** à partir d'une ***approche semi-empirique***, et à partir d'une représentation ***conceptuelle*** simplifiée du cycle de l'eau et des différents termes du bilan hydrologique.

L'***assimilation des données*** pour le contrôle des états internes du système modélisé s'est appuyée sur les techniques de ***filtrage*** et d'***optimisation*** des paramètres présentés dans le chapitre 2.2.3.

En gestion de la ressource, les méthodes utilisées destinées à la ***prévision des débits*** et au ***contrôle des crues*** sont basées sur des ***modèles hydrologiques*** de prévision et des ***systèmes de décision*** en temps réel (chapitre 2.2.4).

Domaines d'application

Les domaines d'application abordés pourraient s'inscrire dans une démarche linéaire allant de la compréhension des processus à la modélisation des comportements hydrologiques puis au contrôle de la dynamique du système modélisé et enfin à la gestion de la ressource en eau. Ma démarche s'est cependant construite par itérations successives en revenant régulièrement aux différents domaines d'application:

- Dans le domaine de la **compréhension des processus**, les travaux développés ont porté sur l'étude du rôle majeur joué par l'état hydrique du sol dans la formation des écoulements à l'exutoire d'un bassin versant. Un autre point important a été l'étude des potentialités de la télédétection pour suivre l'évolution de cette variable tout au long du cycle hydrologique à l'échelle du bassin versant.

- Dans le domaine de la **modélisation des comportements**, les travaux de recherche ont porté sur la modélisation des flux à l'interface sol-végétation-atmosphère et le couplage de schémas de surface à un modèle hydrologique conceptuel.

- Dans le domaine du **contrôle de la dynamique des systèmes** modélisés, les recherches ont eu comme objectif la mise en œuvre de procédures d'assimilation de l'état hydrique du sol dans un modèle hydrologique et l'étude de leur intérêt pour la prévision des crues.

- Dans le domaine de la **gestion de la ressource**, les premiers travaux ont eu comme objectif d'améliorer la prévision des débits à l'exutoire d'un bassin, en temps différé tout d'abord puis en temps réel avec intégration dans un système de décision. L'amélioration des outils de prévision s'est faite en parallèle et a abouti au contrôle du risque de crues dans un contexte de gestion des barrages réservoirs.

La démarche suivie s'applique aux problèmes de gestion de la ressource en eau pour la prévision des crues et la gestion des réservoirs. Elle s'appuie sur une compréhension améliorée des flux de surface dans un modèle pluie débit. Ce modèle, couplé avec un schéma de surface a permis l'assimilation de données d'état hydrique du sol pour un meilleur contrôle de la dynamique du système hydrologique.

2.4 PRINCIPAUX RESULTATS

Les principaux résultats sont présentés au travers des quatre domaines dont le contexte à été décrit brièvement dans le premier chapitre de ce mémoire.

Dans chaque domaine quelques articles ont été sélectionnés présentant les principales démarches suivies et décrivant les méthodes ou les algorithmes utilisés. Ces articles sont présentés intégralement dans le chapitre des travaux joints et sont cités en référence dans le texte, en caractères gras.

La synthèse des résultats ne décrit donc pas en détail les méthodes et calculs mais essaie de mettre en lumière les points les plus marquants établis au cours des travaux de recherche dans le domaine étudié. Ces points sont illustrés par des résultats complémentaires qui n'apparaissent pas dans les articles sélectionnés mais qui viennent les étayer.

2.4.1 Caractérisation des processus de surface

Sur des bassins ruraux, les conditions initiales de la surface sont prépondérantes pour le comportement hydrologique de l'entité considérée.

Les conditions initiales concernent principalement l'état de surface de son sol, dont la variabilité spatio-temporelle dépend des conditions météorologiques, des caractéristiques géologiques et pédologiques du bassin, du couvert végétal ainsi que de la géométrie de sa surface.

Parmi ces nombreux paramètres intervenant dans les processus de surface, l'état hydrique est considéré comme une variable majeure du cycle de l'eau car c'est la résultante des transferts se produisant à l'interface sol/végétation/atmosphère [P39].

Sa caractérisation à l'échelle du bassin, les conditions dont il dépend, l'étude de son évolution et son estimation quantitative ont donc fait l'objet de nombreux projets de recherche au cours de mes travaux.

Conjointement à ces recherches, des études ont été menées sur l'influence des paramètres liés à la détermination de cette variable par télédétection spatiale comme la rugosité de la surface du sol ou le couvert végétal grâce à des modèles de fonctionnement du signal radar.

La caractérisation de l'état hydrique a également donné lieu à l'évaluation de son intérêt pour l'étude du comportement hydrologique d'un bassin rural à deux échelles d'observation: *l'échelle ponctuelle* et *l'échelle du bassin*.

- ***Estimation des paramètres de surface à l'échelle d'un bassin.***
Publications/Communications : [P4], [P5], [P8], [P11], [P12], [P18], [P19], [P20], [P21], [P22], [P27], [P30], [P34], [P37], [P38], [P40], [P41], [P42], [P45], [P46], [C4], [C7], [C9], [C10], [C13], [C14], [R6], [R19], R[21], R[22], [R24], [R25]

Une grande partie des résultats qui sont présentés ici ont bénéficié d'une collaboration étroite avec le CETP/CNRS au travers des travaux de recherche de L. Rakotoarivony (1995, CETP), S. Le Hégarat-Masclé (1996, CETP), M. Zribi (1998, CETP), ainsi que pour le co-encadrement des DEA de PARIS XI, PARIS VI ou des thèses de M. Bénallègue (1993, CEMAGREF), A.L. Cognard (1996, CEMAGREF), A. Quesney (1999, CEMAGREF/CETP).

Ces DEA ou thèses ont eu comme support de nombreux projets de recherche¹ dont l'objectif principal a été de déterminer la faisabilité d'accéder à l'estimation des paramètres de surface à

¹ Projets MacHYDRO 91 et SIR-C 94 soutenus par la NASA et le PNTS en collaboration avec le CETP, le LCT et l'université d'Arizona, les projets ERS1 et ERS1/ERS2 soutenus par l'ESA, le CNES et le PNTS, en collaboration avec l'INRA, le CETP, GEOSYS, et le CESBIO/CNRS, ainsi que le projet PNRH soutenu par l'Insu, en collaboration avec le CETP.

partir de l'observation spatiale, de caractériser les configurations optimales des capteurs pour différents états de surface du sol et de couvert végétal ainsi que d'évaluer l'intérêt de telles estimations à l'échelle spatiale du bassin versant.

A cette dimension, les méthodes basées sur la télédétection apparaissent bien adaptées car elles offrent la possibilité de caractériser instantanément des zones étendues [P18], [C4]. Pour cela deux principaux domaines spectraux ont été utilisés, l'infrarouge thermique et les micro-ondes actives:

- Dans le domaine de l'infrarouge thermique l'estimation de l'état hydrique du sol est fondée sur l'estimation de l'évapotranspiration et l'analyse du bilan d'énergie à la surface sol-végétation-atmosphère par inversion de modèles semi-empiriques (Séguin et Itier, 1983, Vidal et al, 1989) ou bio-physiques (Taconet et al, 1986, Soarès et al, 1988).
- Dans le domaine des micro-ondes actives ou hyperfréquences, l'estimation de l'état hydrique est dans ce cas relié à la rétrodiffusion du signal radar par le biais de la constante diélectrique du sol soit en utilisant une modélisation de la rétrodiffusion du signal radar soit une relation empirique (Ulaby et al, 1986, Dobson et al, 1982, Fung et al, 1992).

Nos travaux, ont essentiellement eu pour objet le domaine des micro-ondes actives pour l'estimation et le suivi périodique de l'état hydrique superficiel d'un bassin versant. Cependant, l'infrarouge thermique a été aussi utilisé en synergie avec les micro-ondes actives pour la détermination de l'occupation du sol et l'estimation de l'état hydrique de la couche racinaire.

Dans les premiers travaux [P8], [P20], [P37], [P40], ce sont les potentialités des diffusomètres micro-ondes puis des radar à synthèse d'ouverture (SAR) qui ont été évaluées, tout d'abord grâce à de nombreuses campagnes effectuées avec des radars aéroportés simulateurs des futurs radars spatiaux (AGRISCAT 88, MacHYDRO 91, SIRC et ERASME 94), puis avec les radars spatiaux des satellites européens ERS1, ERS2 lancés à partir de 1992.

Ces travaux ont montré les limites de sensibilité d'une telle mesure et ont permis de définir une méthodologie optimale pour obtenir un indicateur de l'état de surface du sol.

Les capteurs SAR multi-configuration du système SIRC/XSAR (bandes de fréquence L, C, X, polarisations horizontale, verticale et croisée, angles d'incidence entre 44° et 57°) et du diffusomètre ERASME (bandes de fréquence C, X, polarisations horizontale et croisée, angles d'incidence entre 44° et 57°) utilisés sur le bassin de l'Orgeval ont montré [P8], [P20], [P37] sur 70 parcelles agricoles :

- les effets de la couverture végétale et de la rugosité de surface sur le signal radar rétrodiffusé caractérisé non seulement par le contenu en eau du sol mais aussi par la géométrie de la surface du sol, la biomasse et la géométrie de la végétation (Bénallègue, 1993).
- les potentialités respectives des bandes L et C ou de la fusion des bandes de fréquence pour discriminer différents types de couvert végétal (forêt, blé, semis, labours) à partir des algorithmes de classifications non supervisés et supervisés [P20], [R19].
- l'évaluation pour les données SAR des problèmes liés à la rugosité de la surface du sol et sa description par la caractérisation de paramètres statistiques (Benallegue et al, 1994, Rakotoarivony et al, 1996), [P8].

Les données multiconfiguration (angles d'incidence, fréquences et polarisations multiples) ont permis dans de nombreux cas, de séparer les différentes composantes du signal rétrodiffusé (Schumullius and Evans, 1997). Cela nécessite cependant l'acquisition de plusieurs images SAR concomitantes, ce qui ne peut être obtenu actuellement avec un seul satellite.

Toutefois, les résultats obtenus avec les radars aéroportés multiconfiguration ont été une étape préliminaire à la meilleure prise en compte des effets de la végétation et de la rugosité sur le signal radar satellitaire au niveau du bassin versant.

Plusieurs travaux [P4], [P5], [P11], [P12], [P27], [P41], [P42], [P45], [C7], [C14], [R21], [R22], [R24], [R25] fondés sur les données satellitaires ERS1/ERS2 (bande C, incidence 23°, polarisation VV) ont permis de montrer les points suivants:

- la rugosité des surfaces, deuxième cause majeure de variation de la rétrodiffusion après l'humidité, est liée au travail du sol et suit donc un comportement saisonnier.

Deux échelles de rugosité influencent le signal radar, la rugosité liée aux mottes et celle liée aux sillons.

Sous couvert de blé l'effet de la rugosité liée aux mottes peut être considéré comme isotropique et constant pendant toute la période végétative (Taconet et al, 1996).

Sur une période où la rugosité à cette échelle est constante, et si l'on considère la rugosité liée aux sillons, pour un angle de visée du radar perpendiculaire, parallèle ou en diagonale, il a été montré [P12], [R25] que le bruit introduit par les différences de rugosité est filtré par la moyenne spatiale prenant en compte la distribution d'orientation des sillons.

Au niveau du bassin et pour un cycle agricole complet, la relation signal radar/état hydrique du sol n'est pas affectée par l'effet rugosité en valeurs relatives, seule l'origine de la relation traduit un effet moyen de la rugosité en valeur absolue d'un bassin à un autre.

- la sensibilité des relations signal radar/humidité fortement dépendante du type de couvert végétal au niveau de la parcelle, l'est moins lorsque le signal est moyenné sur l'ensemble du bassin où il existe des corrélations positives signal/humidité excepté pendant la période de couvert végétal dense [P5], [R21], [R22].

La sensibilité de ces relations augmente lorsque l'on moyenne uniquement le signal sur les parcelles de blé, considérées comme cibles sensibles pour l'inversion du signal radar en termes d'humidité du sol. Ceci est dû à la présence sur le bassin de zones tampon (la forêt par exemple) sur lesquelles le signal est indépendant de l'humidité du sol par la présence d'une épaisse couverture végétale.

La contribution de la végétation sur la réponse radar globale varie au cours du cycle agricole : lors du cycle de croissance du blé par exemple, la contribution de la végétation due à l'augmentation de la rétrodiffusion radar par les feuilles et les tiges et à l'atténuation du signal radar à travers la couverture végétale augmente aux dépens de celle du sol jusqu'au mois de juin pour diminuer après. L'estimation de ces contributions respectives par un modèle de transfert radiatif de premier ordre fournit les valeurs de correction à appliquer à la réponse radar mesurée afin de retrouver le signal rétrodiffusé par le sol nu [P12], [P41].

Pendant les périodes de l'année où la végétation est trop dense, la sensibilité du radar à la variation de la permittivité électrique du sol n'est plus significative. Elle est inférieure à la résolution radar minimum (1dB) déterminée par la prise en compte des différentes sources d'erreur affectant la mesure.

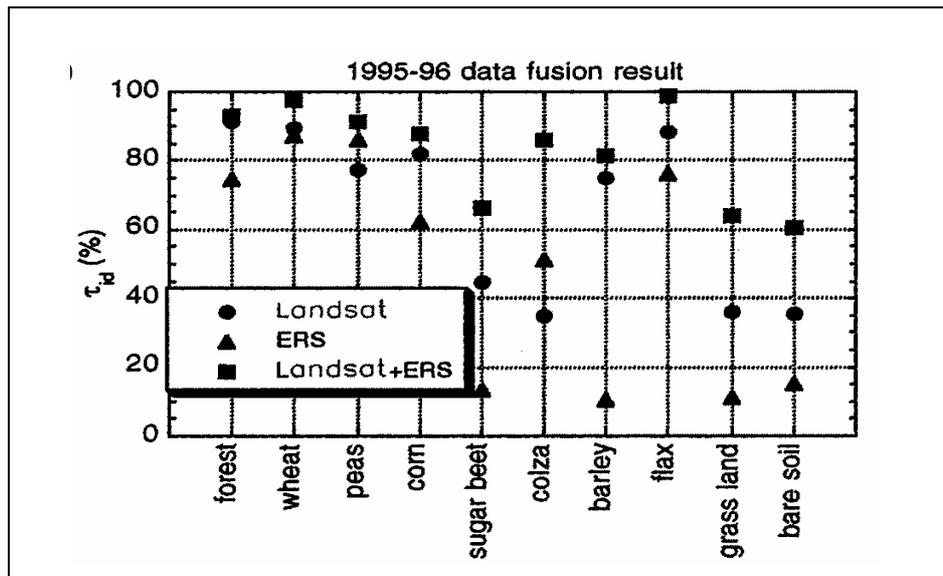
Une estimation fiable de l'humidité n'est alors possible qu'en dehors de ces périodes où l'atténuation du signal à travers la végétation est devenue trop forte [P42], [P45].

- la détermination de l'occupation du sol est une étape préalable à l'obtention d'une information sur l'état hydrique du sol [P27] et permet l'identification de cibles sensibles au

signal radar sur lesquelles il est possible de corriger les effets de la végétation et négliger en mesures relatives les effets de rugosité.

Pour déterminer la carte des différentes cultures les classifications mono-source multi-temporelles ERS/SAR [P41] ou multi-spectrales Landsat/TM [P40], conduisent à de bons résultats.

Cependant, les classifications multi-sources (ERS/Landsat) à partir d'un algorithme de fusion basé sur la théorie des croyances de Dempster-Shafer (Le Hégarat-Masclé, 1996), [R25], donnent des taux d'identification supérieurs. Ceci est particulièrement visible pour les cultures minoritaires telles que les betteraves, le colza ou l'orge [P11] (fig n°4.1).



(Le Hégarat-Masclé et al, 2000)

Fig n°4.1: Comparaison du taux d'identification τ_{id} obtenu avec la classification monosource Landsat ou ERS ou à partir de la fusion de données Landsat et ERS.

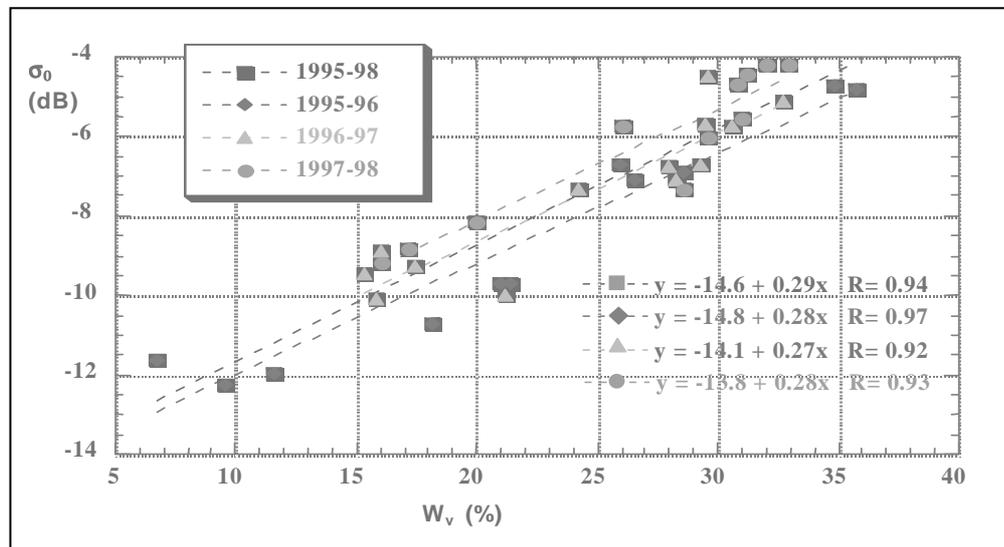
Avec la classification multi-source non supervisée toutes les cultures ont été identifiées sur 80% du bassin de l'Orgeval tandis qu'avec les classifications mono-source les cultures n'ont pu être identifiées que sur 40% du bassin.

Suite aux travaux sur la caractérisation des effets des paramètres de surface tels que la rugosité ou le couvert végétal, l'estimation d'un indicateur de l'état hydrique du bassin versant a été fondée sur la recherche et l'identification empirique de cibles sensibles, pour lesquelles le signal radar rétrodiffusé dépend fortement de l'humidité du sol [P12], [P30], [P34], [P42], [P45], [P46], [C13] [C14].

L'effet de la rugosité est filtré par la moyenne spatiale des mesures sur le plus grand nombre de cibles possibles. Un indice d'humidité global du bassin est alors estimé par une relation linéaire étalonnée expérimentalement ajustant le signal radar moyenné sur ces cultures, corrigé de l'atténuation due à la végétation et les humidités volumiques de sol mesurées sur le terrain.

Actuellement, les corrections de l'effet végétation sont limitées au signal acquis sur le blé, seul type de couvert pour lequel le modèle de transfert radiatif utilisé pour modéliser la végétation a été validé. Cette méthode appelée méthode multi-sélective permet d'étendre la période temporelle d'inversion du signal radar ainsi que le pourcentage des surfaces caractérisées.

Sur l'Orgeval, la bonne sensibilité du signal radar à l'humidité superficielle du sol, conduit durant toute l'année agricole, excepté les mois de mai et juin, à une précision dans l'inversion de l'humidité égale à $\pm 4\%$ [P12]. L'origine de la pente liée à l'effet moyen de la rugosité, varie légèrement d'une année sur l'autre. C'est effet est peu significatif (1db), on peut cependant s'en affranchir en inversant l'humidité du sol sur un cycle agricole complet (3 ans sur l'Orgeval) (fig n°4.2).



([R25], 1999)

Fig n°4.2: Relation entre le signal radar σ_0 (dB) et l'humidité mesurée W_v (%) pour trois années consécutives et sur un cycle agricole complet

L'état hydrique du sol a été également estimé à partir de mesures en infrarouge thermique [P19], [P21], [P22], [P30], [P34], [P38], [P46], [R25]. En effet, l'infrarouge thermique donne la possibilité d'accéder à l'évapotranspiration réelle à partir des mesures de température de surface du sol (Ottlé *et al*, 1989), [R6]. Pour les journées où la température de surface est disponible (sans couverture nuageuse), la détermination de l'état hydrique du sol est alors réalisée par résolution, à pas de temps fin, de l'équation du bilan énergétique à l'interface sol-végétation-atmosphère et par comparaison des températures simulées et mesurées.

L'état hydrique du sol des couches superficielles et profondes peut être alors déterminé lorsqu'il atteint des valeurs faibles impliquant une limitation des processus d'évaporation. Cette méthode appliquée à des zones de cultures homogènes présentant un stress hydrique marqué a permis d'obtenir des résultats satisfaisants dans la région Adour-Garonne (Ottlé *et al*, 1994), [P19].

Cette technique qui a comme limitation la présence d'un couvert nuageux, peut être utilisée en synergie avec les hyperfréquences actives afin d'estimer conjointement l'humidité de la surface du sol et celle de la couche racinaire et permettre d'approcher de manière globale l'état hydrique d'un bassin versant [P46], [R25]. Sur le bassin breton du Coët-Dan, les données du satellite NOAA et ERS (Cognard, 1996) ont été utilisées en complémentarité mais seul l'état hydrique de surface a pu être déterminé par cette approche, les caractéristiques climatiques et l'occupation du sol de la région bretonne ne montrant pas de stress hydrique marqué pour les couches profondes, l'état hydrique de cette couche n'a pas pu être déterminé [P21], [P22], [C9], [C10].

Paramètres de surface et modèles de fonctionnement. **Publications/Communications** : [P8], [P12], [P19], [P20], [P33], [P34], [P37], [P42],[C9], [C10], [R25], [R29], [R30]

L'utilisation des modèles de fonctionnement a permis de caractériser les paramètres de surface à partir de l'observation spatiale ainsi que de définir la méthodologie optimale pour obtenir un indicateur de l'état de surface du sol au niveau du bassin. Ces modèles de fonctionnement ont permis de fixer les limites et les domaines de validité des mesures et d'étayer le caractère empirique des approches développées.

Les résultats qui sont présentés ici s'appuient sur les travaux de recherche des thèses de M. Bénallègue (1993, CEMAGREF), L. Rakotoarivony (1995, CETP), A.L. Cognard (1996, CEMAGREF), M. Zribi (1998, CETP), A. Quesney (1999, CEMAGREF/CETP) menés au sein de projets de recherche tels que les projets SIR-C 94, ERS1 et ERS1/ERS2, RADARSAT ou PNRH, en collaboration étroite avec le CETP.

- L'influence de la rugosité du sol nu sur le signal radar a été étudiée à partir de simulations avec des modèles électromagnétiques de rétrodiffusion du signal (L. Rakotoarivony, 1995, M. Zribi, 1998, A. Quesney, 1999).

L'estimation des potentialités des modèles de rétrodiffusion théorique IEM (Fung et al, 1992), ou semi-empirique (Oh et al, 1994) à reproduire la rugosité de différents types de surface agricoles a été établie pour 70 parcelles de rugosité classées en trois catégories : semis à surfaces lisses, semis à surface motteuses, et labours [P8],[P20].

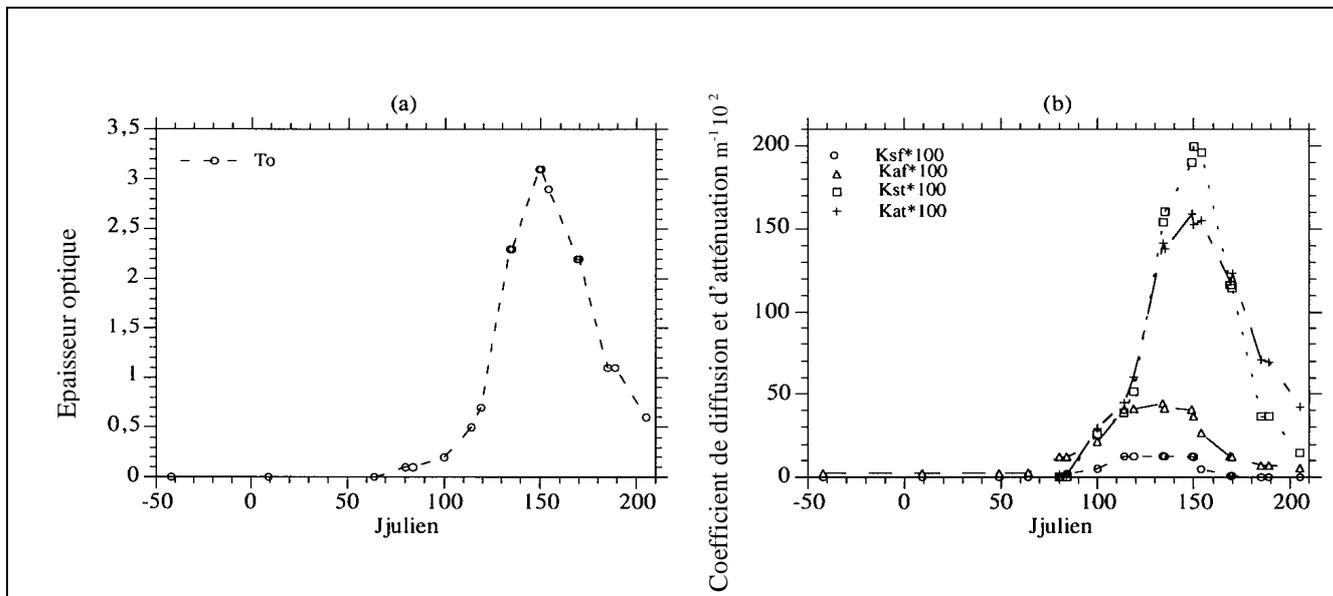
Les résultats ont montré les limites de validité des modèles pour chaque classe de rugosité et pour chaque bande de fréquence de mesure L, C, X à différents angles d'incidence [P37] :

Les simulations du modèle théorique IEM pour les faibles rugosités montrent que celles-ci rentrent dans le domaine de validité du modèle. Par contre pour les fortes rugosités, les simulations ne montrent plus de sensibilité aux variations d'angle d'incidence.

Le modèle semi-empirique Oh, montre qu'il est capable de reproduire correctement la réponse du radar sur des surfaces rugueuses mais sous-estime systématiquement les réponses pour des surfaces lisses.

L'étude [P12] des simulations fournies par les modèles de rétrodiffusion a montré que l'effet de la rugosité à l'échelle des sillons est plus important pour les angles de visées perpendiculaires aux sillons que pour les angles de visées parallèles. Dans ce cas seule la rugosité à l'échelle des mottes qui se stabilise en début d'hiver pour les champs de blé, influence la rétrodiffusion du radar. Ces travaux préliminaires fondés sur l'utilisation de modèles de rétrodiffusion sont venus étayer les hypothèses utilisées au niveau du bassin.

- La contribution de la végétation sur le signal radar a pu être estimée, par l'utilisation d'un modèle de diffusion micro-ondes par une couverture végétale (Karam et al, 1992) en collaboration avec J.P Wigneron de l'INRA d'Avignon (Quesney, 1999).



(Quesney, 1999)

Fig n° 4.3: a : Epaisseur optique du blé (sans dimension) au cours de l'année (0 = 1° janvier)
b : Coefficient de diffusion (ks) et d'atténuation (kt) des feuilles (f) et tiges (t) de blé

Ce modèle fait appel à la théorie du transfert radiatif à travers un couvert en considérant deux effets : l'affaiblissement du signal à travers la végétation et la diffusion du signal par les différents éléments constituant la couverture végétale (feuilles, tiges, principalement).

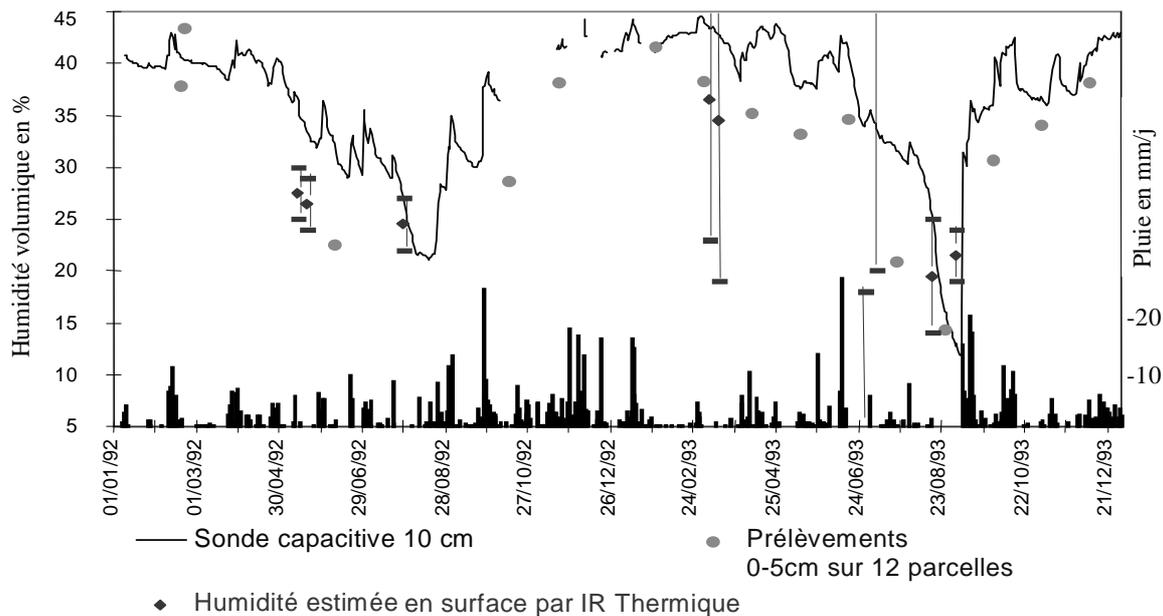
Ce modèle a été validé au cas du blé (Quesney, 1999). L'atténuation du signal croît avec l'épaisseur optique de la couverture végétale, déterminée majoritairement par le coefficient d'extinction des tiges et leur fort coefficient de diffusion [P12] (fig n°4.3).

L'estimation des contributions respectives de la végétation a permis de fournir les valeurs de correction à appliquer à la réponse radar mesurée afin de retrouver le signal rétrodiffusé par le sol nu [P12], [P42].

- L'estimation de l'état hydrique du sol à partir de la température de brillance mesurée dans l'infrarouge thermique a été faite par inversion d'un modèle de type Transfert-Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT) (A.L. Cognard, 1996), développé au CETP (Taconet et al, 1986, Ben Mehrez et al, 1992). Dans ce modèle, les flux de surface, la température et le contenu en eau du sol sont estimés en résolvant simultanément l'équation du bilan énergétique au sol et au-dessus du couvert végétal. La partition des flux d'énergie incidents entre le sol et la végétation est fonction d'une fraction de la couverture végétale calculée sur l'ensemble du bassin versant et variant au cours de l'année.

Utilisé dans le sens direct, le modèle permet de calculer les flux de surface connaissant les paramètres sol-végétation. Utilisé en sens inverse, le modèle permet de retrouver l'humidité du sol des couches racinaire et superficielle connaissant le forçage atmosphérique, la température de surface et les paramètres sol-végétation.

Les travaux menés dans ce domaine [P19], [P33], [P34], [C9], [C10] ont permis de déterminer les limites de la méthode d'estimation et d'imaginer des solutions à une approche en synergie avec la méthode empirique développée dans le domaine des hyperfréquences.



(Cognard,1996)

Fig n°4.4: Comparaison de l’humidité estimée par IRT et des humidités mesurées ponctuellement et sur l’ensemble du bassin du Coët-Dan

Il a été montré que l’estimation de l’état hydrique dépend des conditions d’inversion et notamment de la végétation [R25]:

Sur sols nus, seule l’humidité de surface peut être déterminée, car la température de surface est essentiellement sensible à l’évaporation du sol directement reliée au contenu en eau de la couche de surface et quasiment indépendante de la couche racinaire.

Inversement, dans le cas de couverts denses, seule l’humidité de la couche racinaire peut être déterminée, la température de surface étant essentiellement sensible à l’évaporation de la végétation [P19].

Sous couverts partiels l’estimation des humidités de la couche de surface et racinaire ne peut être faite qu’en fixant l’une ou l’autre des variables à inverser [R29], [R30], [C9]. Par ailleurs, l’imprécision inhérente aux données en entrée du modèle, comme par exemple la température de brillance ou les paramètres de végétation, entraîne une imprécision importante sur les températures simulées et donc par la suite sur les valeurs d’humidité inversées [P34], [C10].

Ainsi seuls les cas de forte sensibilité de la température de surface à l’état hydrique du sol permettent de conduire à des estimations des humidités satisfaisantes (fig n°4.4).

- **De l’échelle ponctuelle à l’échelle d’un bassin versant.** Publications/Communications: [P2], [P3], [P4], [P5], [P12], [P13], [P17], [P24], [P25], [P26], [P28], [P30], [P33], [P35], [P36], [P38], [P42], [P45], [C1], [C2], [C5], [R1], [R14], [R15]

Selon l’échelle d’observation, des différences de comportement hydrologique peuvent apparaître. L’étude de ces différences est désignée par le terme de changement d’échelle. Ce concept apparaît souvent à travers des études de régionalisation, de variations spatiales, de comparaison de bassins ou bien, comme c’est le cas ici, dans l’étude de l’intégration de mesures de différentes dimensions dans un modèle de comportement.

Il existe de nombreuses façons d'aborder ce problème selon le niveau de connaissance des processus et du milieu étudiés: par agrégation ou désagrégation des phénomènes ou bien en appliquant le principe de similarité des paramètres [P35], [P36].

L'approche qui a été utilisée ici, est plutôt une approche exploratoire permettant de suivre en parallèle l'évolution temporelle du comportement hydrologique à deux échelles d'observation, de comparer ces observations puis d'évaluer si l'influence d'une variable telle que l'état hydrique du sol sur le comportement hydrologique reste prépondérante lorsque l'on passe de l'observation ponctuelle à l'observation du bassin versant dans son ensemble.

L'observation spatiale a montré, comme nous l'avons vu précédemment, une bonne capacité à caractériser l'état hydrique du sol au niveau du bassin. Il existe cependant de nombreuses méthodes *in situ* qui permettent d'obtenir aussi une estimation fiable de cette variable en un point du bassin (Robinson, 1993, [P2], [P4]). Malgré le caractère ponctuel d'une telle donnée marquée par une forte variabilité spatiale, l'intérêt de cette estimation *in situ* a été évalué pour l'étude du comportement hydrologique du bassin ([P3], [P24]) et comparé à son estimation à partir des mesures spatiales.

L'approche ponctuelle a bénéficié des travaux effectués au cours de ma thèse (Loumagne, 1988) et l'approche spatiale a fait l'objet de deux thèses (AL. Cognard, 1996, A. Quesney, 1999) et nombreux DEA (PARIS XI, PARIS VII...) encadrés au sein de plusieurs projets nationaux ou internationaux².

Dans l'approche ponctuelle, ce sont des données d'humidité du sol mesurées en un point du bassin avec une sonde neutronique au pas de temps journalier qui ont été utilisées [P2].

Cette recherche a eu comme cadre le bassin expérimental de l'Orgeval où de longues séries de mesures de pluies, débits et humidités du sol *in situ* étaient disponibles.

L'approche ponctuelle s'est tout d'abord basée sur une étude statistique préliminaire comprenant plus de 200 événements pluie-débits.

Cette approche a montré le bon pouvoir explicatif de l'état hydrique (80% de la variance expliquée) sur la fonction de rendement et l'amélioration apportée par l'introduction de cette variable dans l'estimation des débits (88% de la variance expliquée). La supériorité de l'état hydrique du sol sur des indices classiques tels que le débit de base ou les indices des pluies antérieures a pu être clairement mise en évidence (gain de 30% sur la variance expliquée) [P24], [P25], [C1].

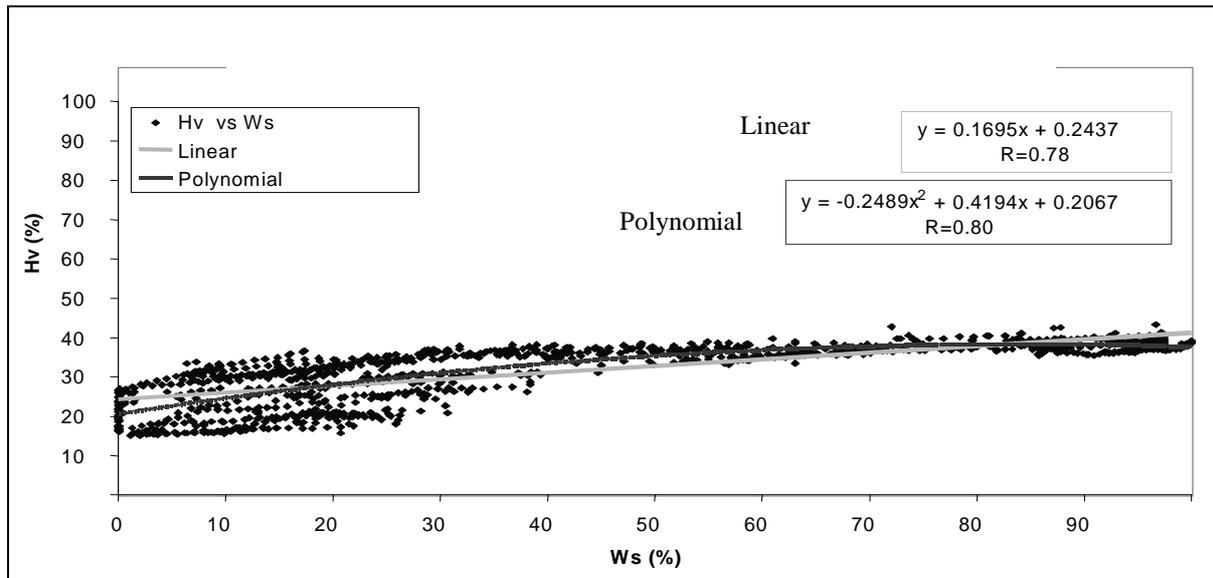
Dans un deuxième temps, cette démonstration a été basée sur la comparaison, grâce à un modèle pluie-débit très simple issu de la famille des modèles GR (cf §2.4.2), de l'approche classique calculant à l'aide de méthodes indirectes l'état du réservoir sol, et de l'approche proposée remplaçant ces calculs par des mesures ponctuelles de l'état hydrique du sol [P2], [P3], [C2], [R1].

La comparaison a mis en évidence aussi bien en simulation qu'en prévision avec un traitement des erreurs de type ARIMA (Roche et Torterotot, 1988), la supériorité de l'approche proposée. Grâce au recours aux données d'humidité du sol, cette nouvelle approche apportait une nette amélioration des débits (en simulation, gain de 37% sur la performance du modèle), notamment lors de la reprise des écoulements après une longue période d'étiage [P3].

² A la suite des projets ERS1 soutenus par l'ESA, le PNTS et le CNES ont financé un projet intitulé « Observatoire hydrologique de Naizin en Bretagne Centrale » en collaboration avec le CETP/CNRS, le LCT ENGREF/Cemagref de Montpellier et l'INRA de Rennes. Plus récemment, l'approche spatiale a été reprise dans le projet Tandem ERS1/ERS2 de l'ESA, et dans le projet soutenu par le PNRH « Amélioration de la perception de la perception du rôle de l'interface sol-végétation-atmosphère dans la modélisation pluie-débit ».

Il est apparu dans le cas de l'Orgeval, qu'à travers l'utilisation d'un modèle global simple de simulation des débits à l'exutoire d'un bassin, l'humidité ponctuelle était fortement liée à l'état interne du système modélisé et donc pouvait être considérée comme représentative d'un indice temporel de l'état de saturation de l'ensemble du bassin étudié.

Dans des travaux de recherche ultérieurs [P4], [P25], [P26], [P28], [P33], [C5], [R14], [R15] avec un modèle conceptuel un peu plus complexe modélisant les évolutions de l'humidité du sol des couches superficielle et profonde (le modèle GRHUM cf §2.4.2), l'utilisation des mesures ponctuelles a permis de mettre en évidence des relations significatives entre état interne simulé et état hydrique observé.



([R29], 1999)

Fig n°4.5: Corrélation entre l'humidité de surface W_s , simulée par le modèle GRHUM et l'humidité mesurée ponctuellement H_v entre 0-15cm.

Ces relations ont pu être établies également sur d'autres bassins versants que le bassin de l'Orgeval: les bassins bretons, les bassins du Mont-Lozère, deux sous-bassins de la Seine, le Serein et le Grand Morin. Les comparaisons entre mesures ponctuelles et humidités simulées ont montré dans chacun des cas, des résultats tout à fait satisfaisants avec de forts coefficients de corrélation comme par exemple celui de la figure 4.5 qui montre la corrélation trouvée entre l'humidité de surface simulée et l'humidité de surface mesurée de façon ponctuelle sur une période de 4 ans sur un des sous-bassins de la Seine ($R=0.80$).

Il faut noter cependant que les couches de surface ont montré généralement une moins bonne aptitude à suivre les variations annuelles de l'état hydrique du sol que les couches de sol plus profondes [P17], [R15].

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

Les données ponctuelles n'apportent dans ces cas là qu'une information sur les variations temporelles de l'état hydrique du bassin.

Même si l'approche utilisant un indice ponctuel global de l'état de saturation du bassin versant s'est révélée prometteuse pour l'étude du comportement hydrologique d'un bassin, le souci d'obtenir un indicateur intégrant les variations spatio-temporelles de l'état hydrique du sol, a motivé le développement de l'approche spatialisée :

L'approche spatialisée s'est basée sur les possibilités offertes par la télédétection pour accéder à une information concernant l'état de saturation de l'ensemble d'un bassin versant à partir des données provenant des satellites européens ERS1 et ERS2³.

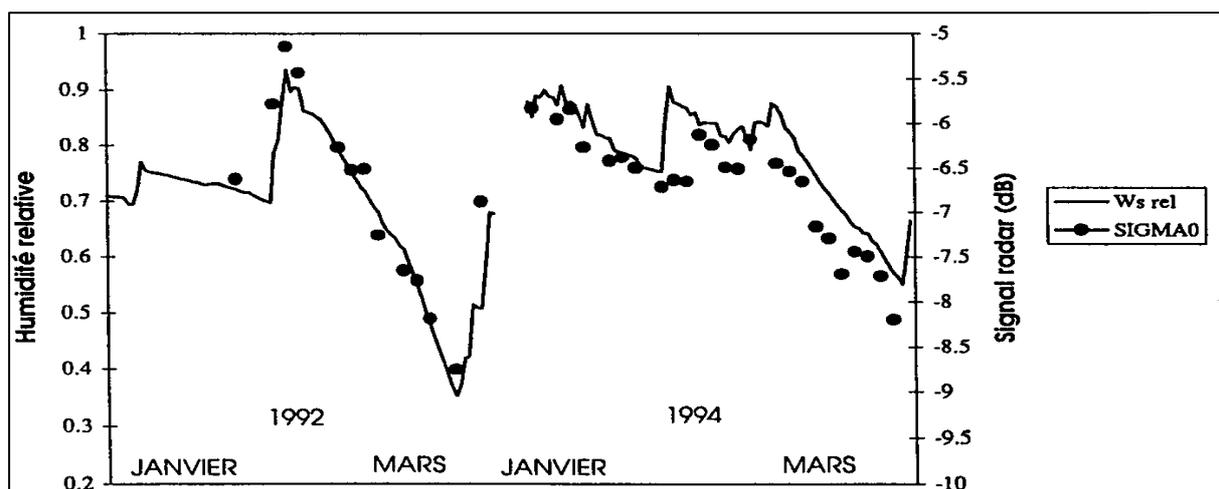
A l'échelle de la parcelle, les relations entre le signal radar et l'humidité de surface mesurée dépendent très fortement du couvert végétal et de la rugosité du sol et très peu de son état hydrique [P5]. Ce n'est qu'en intégrant l'information spatiale sur des surfaces de l'ordre de quelques kilomètres carrés que l'on obtient des relations positives entre le signal radar moyen à l'échelle du bassin et l'humidité de surface mesurée lors de campagnes extensives sur l'ensemble du bassin (R=0.8).

De plus, à l'échelle du bassin, les résultats obtenus aussi bien sur les bassins bretons ([P4], [P30], [P33], [P38]), que sur les sous-bassins de la Seine ([P12], [P13], [P42], [P45]) ont montré qu'il existe une étroite corrélation entre les valeurs moyennes du signal radar et l'humidité superficielle du bassin simulée par le modèle.

Dans chacun des cas, on a pu comparer l'évolution du signal radar intégré sur l'ensemble du bassin avec les humidités du sol simulées par le modèle ainsi qu'avec l'humidité volumique du sol mesurée sur différentes parcelles test représentatives du bassin.

La figure 4.6 montre, sur le bassin breton du Coët-Dan et pour les périodes où l'on dispose de nombreuses données ERS, que les valeurs prises par le signal radar sont très proches de l'évolution de l'humidité de surface simulée par le modèle, le coefficient de corrélation entre signal radar rétrodiffusé sur l'ensemble du bassin versant et l'humidité simulée atteint 0,88.

L'accès à l'humidité superficielle du sol à partir des observations radar intégrées sur l'ensemble du bassin versant se sont avérées intéressantes principalement pendant les périodes où le couvert végétal n'est pas trop dense en raison de l'influence de la végétation sur la rétrodiffusion du signal radar à la surface du sol. Ces périodes où le signal radar reste sensible à la constante diélectrique du sol peuvent être étendues à presque toute l'année hydrologique grâce à l'application de la méthode multisélective décrite dans le premier paragraphe de ce chapitre.



(Normand et al, 1998)

Fig n°4.6: Evolution comparée du signal radar et de l'humidité superficielle simulée par GRHUM sur le bassin du Coët-Dan.

³ Projets financés par l'agence spatiale européenne (ESA), et soutenus également par le CNES et le PNTS.

L'utilisation en complémentarité des données radar et des données infrarouge thermique du satellite NOAA afin de déterminer l'état hydrique des couches de sol superficielles et racinaires sur le bassin breton du Coët-Dan (Cognard, 1996), n'a permis d'estimer que l'état hydrique de surface ceci étant dû aux caractéristiques climatiques et à l'occupation du sol de la région bretonne.

Compte tenu des limites des techniques de mesure en infrarouge thermique et en hyperfréquences, il est apparu que ce sont principalement les données radar avec une fréquence d'acquisition au moins hebdomadaire qui permettent d'accéder, pour un couvert partiel, au suivi des variations de l'état hydrique superficiel du sol à un pas de temps fin compatible avec l'étude du comportement hydrologique du bassin. Dans ces cas là, l'information spatialisée issue des données radar permet de reproduire les variations spatio-temporelles de l'état hydrique superficiel d'un bassin de façon plus satisfaisante que les mesures ponctuelles [P33]. L'approfondissement de l'étude sa variabilité spatiale à plusieurs échelles d'observation doit se poursuivre dans un nouveau projet⁴.

Une fréquence d'acquisition hebdomadaire a été pour l'instant limitée à des courtes périodes de trois mois. Ce n'est qu'avec le lancement du satellite ENVISAT qu'il sera possible d'accéder à une information spatialisée avec une répétitivité accrue ce qui nous laisse envisager de nouvelles potentialités pour le suivi de l'état hydrique à pas de temps fin sur des régions étendues.

Dans les conditions actuelles d'acquisition, les mesures spatiales ne peuvent venir qu'en appui à la modélisation hydrologique pour le réajustement des états internes du modèle en cours de prévision comme nous le présenterons dans le chapitre 2.4.3.

Les mesures ponctuelles d'humidité peuvent être alors utilisées comme référence pour établir des relations de passage entre observation ponctuelle et à l'échelle du bassin. Elles permettent également d'établir les premières relations entre les états internes du système et l'humidité observée afin d'introduire les équations de contraintes dans les procédures d'assimilation (chapitre 2.4.3).

⁴ Projet Eos soutenu par la NASA développé dans le groupe EEWR de l'université de Princeton en collaboration avec l'université de Washington et Maryland.

2.4.2 Modélisation Pluie-Débit

Les travaux menés dans ce domaine sont marqués par un contexte d'applications opérationnelles dans la gestion de la ressource en eau et par l'échelle spatiale où sont recherchées les réponses: le bassin versant de superficie comprise entre 10^2 et 10^4 km².

Ce sont les modèles conceptuels Pluie-Débit qui se sont avérés être les modèles les mieux adaptés à cette approche (Perrin et Michel, 2000). Mes recherches ont donc porté sur ce type de modèles afin d'en rechercher les améliorations possibles en termes de simulation et prévision des débits.

En effet, malgré leurs bonnes performances en simulation des débits et leur robustesse lorsqu'ils sont appliqués dans des conditions hydrologiques et climatologiques très diverses (Michaud et Sorooshian, 1994; Ambroise *et al.*, 1995), ces modèles montrent parfois des difficultés à simuler le comportement des bassins versants notamment lors de la reprise des écoulements après une longue période d'étiage.

Bien que des progrès aient été réalisés dans la modélisation des processus hydrologiques au cours des dernières décennies, les modèles conceptuels semblent avoir atteint aujourd'hui une limite d'efficacité qui ne pourra être franchie qu'en intégrant de nouvelles données représentatives de l'état initial du bassin versant.

C'est sur cette idée que se sont développés mes travaux dont les principaux résultats sont présentés dans ce chapitre avec tout d'abord le choix du modèle de base utilisé et son couplage avec un schéma de surface ainsi que la démonstration de l'intérêt d'une telle démarche pour la modélisation des débits et des humidités du sol et enfin la comparaison des approches globales et distribuées en vue d'une meilleure prise en compte de l'état hydrique du sol.

- **Choix du modèle de base utilisé.** Publications/Communications: [P13], [P14], [P16], [P44], [P48], [R6], [R27], [R28]

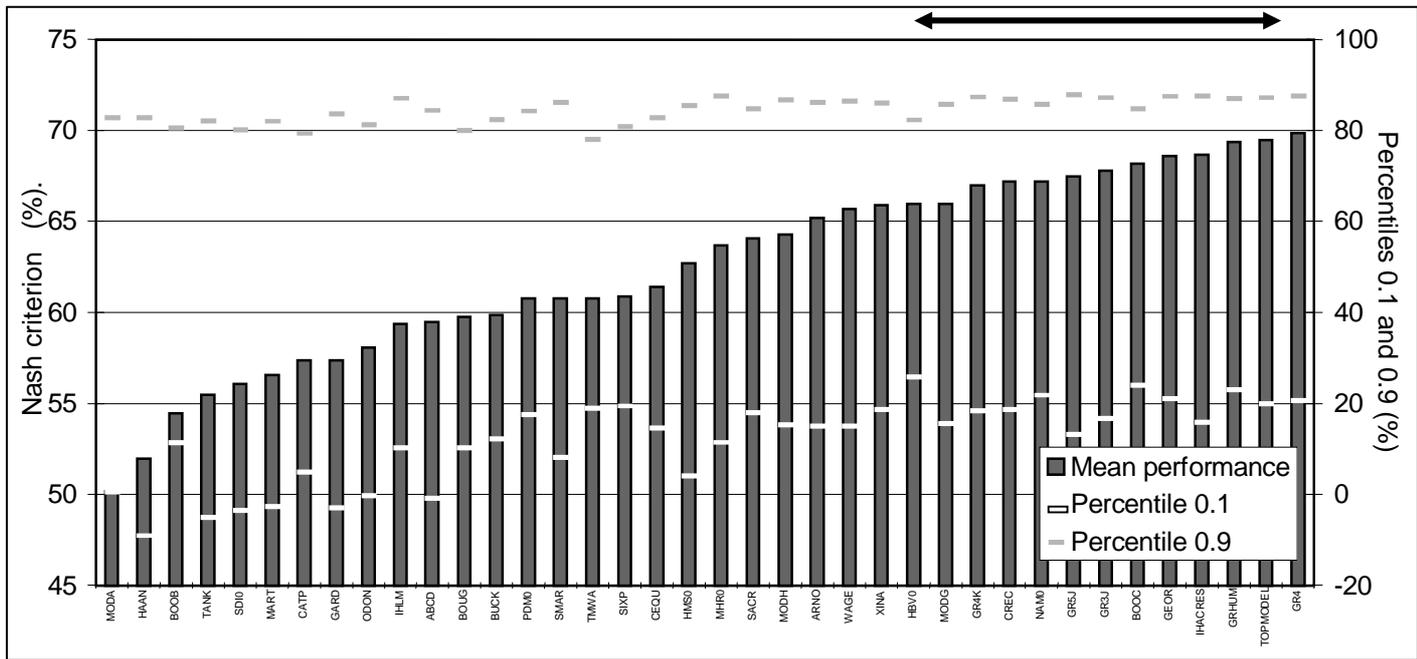
Ce travail de recherche s'insère dans le projet européen Aimwater⁵. Les principaux résultats ont fait l'objet des premiers rapports scientifiques d'avancement du projet [R27], [R28] et ont bénéficié pour partie des travaux effectués dans le cadre de la thèse de Ch.Perrin (2000) encadrée par Cl. Michel au CEMAGREF et de mémoires de DEA de PARIS XI.

Parmi les différents modèles conceptuels existants, le choix du modèle GR4 (Edijatno *et al.* 1999) comme structure de base s'est fondé sur le fait que non seulement ce modèle avait une structure simple pouvant intégrer une information pertinente en vue d'améliorer la simulation des débits à l'exutoire du bassin mais aussi sur le fait qu'il avait montré sa bonne performance et sa robustesse en comparaison avec un grand nombre de modèles bien connus et utilisés de par le monde (Perrin, 2000, [P13], [P16]).

Cette comparaison a été réalisée à partir de 38 structures de modèles conceptuels sur un échantillon de 430 bassins versants répartis à travers le monde. Tous les modèles ont utilisé la même série de données (pluie, débit, évapotranspiration potentielle) au pas de temps journalier et la même technique d'optimisation des paramètres, fondée sur une méthode de gradient: la méthode "pas à pas" (Michel, 1989). Les modèles ont été testés sur 1 294

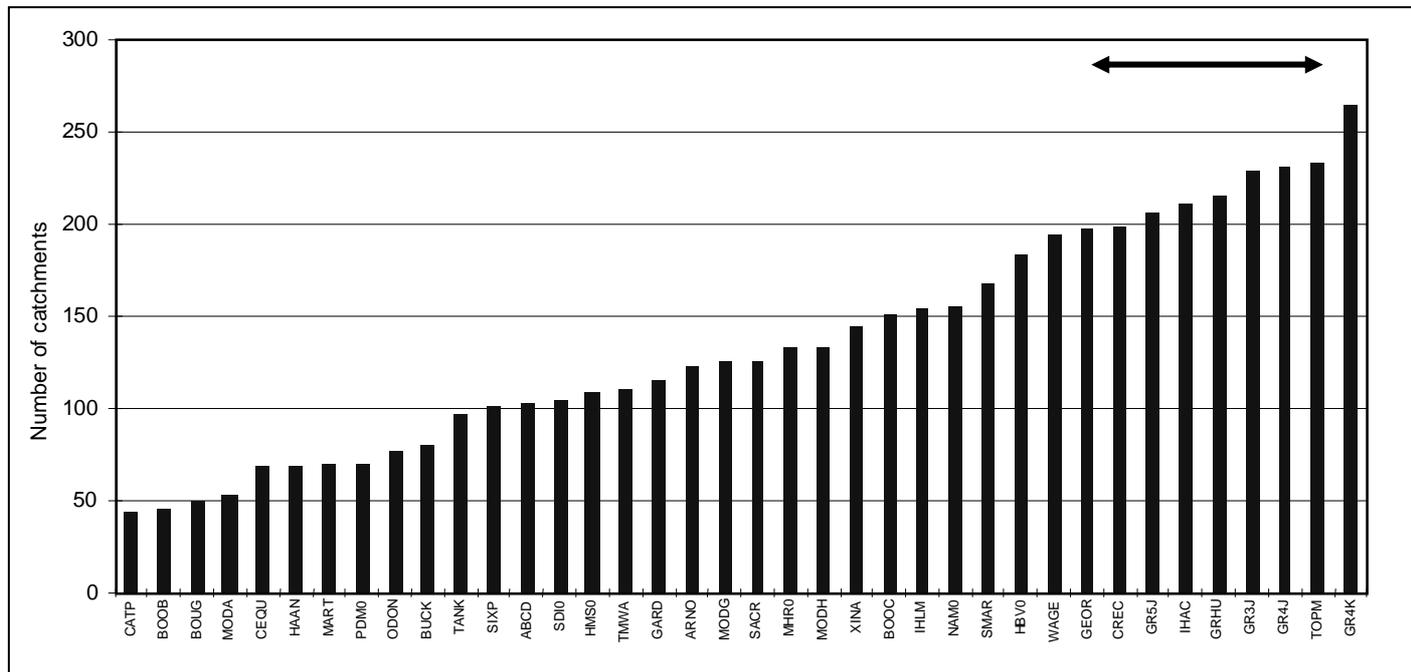
⁵ « Analysis, Investigation and Monitoring of Water Resources for the Management of Multi-purpose Reservoirs » collaborations: Institut d'hydrologie de Wallingford (Nerc/IH), universités de Lisbonne (Pt) et de Valence (Sp), CETP/CNRS, et deux gestionnaires de barrages l'IIBRBS (Fr) et l'ARBSLP (Pt).

périodes de calage et 3 204 périodes de validation (contrôle) de 3 à 6 années calendaires. La fiabilité accordée aux différents modèles est donnée par les deux figures ci-après.



(R[28], 2000)

Fig n°4.7: Résultats en simulation des 38 structures appliquées aux 430 bassins



(R[28],2000)

Fig n°4.8: Classement des performances moyennes par bassin suivant le critère de Nash

Cinq critères numériques ont été choisis pour évaluer la performance de ces modèles en calage et en validation (contrôle): le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) calculé sur les débits, les racines carrées des débits, ou les logarithmes des débits, le critère de bilan et le critère de l'erreur absolue moyenne des débits observés et calculés.

La figure 4.7 présente les performances obtenues suivant le critère de Nash en validation pour l'ensemble des modèles appliqués aux 430 bassins. C'est en validation, les paramètres étant fixés, que les performances sont les plus révélatrices des valeurs respectives de chaque modèle.

La figure 4.8 présente le classement des performances des modèles par bassins. Elle montre le nombre de fois où le modèle a été classé le premier car ayant obtenu le meilleur critère de Nash pour le bassin considéré.

Parmi les structures de modèles testées, une dizaine d'entre elles (CREC (Cormary *et al.*, 1973), NAM (Nielsen *et al.*, 1973), BOOC (Bonvoisin, Boorman, 1992) GEOR (Georgakakos, *et al.*, 1996), IHACRES (Littlewood *et al.*, 1997), TOPMODEL (Beven, 1997) et GR (Edijatno et Michel, 1989, Edijatno *et al.*, 1999)) fournissent les résultats les plus satisfaisants avec des critères de Nash supérieurs à 65% en validation, réussissant à s'adapter à un large éventail de conditions hydrologiques (fig n°4.7).

Les différences apparaissent surtout sur les bassins pour lesquels la relation pluie-débit est difficile à simuler. Sur ces bassins, certains modèles ont plus tendance que d'autres à être défaillants, ce qui nuit à leur caractère d'universalité. Parmi les structures les plus fiables classées premières sur la figure n°4.8, on trouve celles des modèles GR, TOPMODEL et IHACRES.

En analysant les résultats de cette comparaison [P14], [P44], [P48], il apparaît donc que dans un contexte opérationnel basé sur la seule simulation des débits, des modèles très simples tels que les modèles IHACRES ou GR donnent des résultats aussi satisfaisants que des modèles connus relativement complexes tels que le modèle TOPMODEL.

Ceci indique aussi que dans un grand nombre de circonstances quelques paramètres suffisent à modéliser correctement les débits à l'exutoire d'un bassin et qu'un degré de complexité plus élevé n'améliore pas forcément la performance des modèles du point de vue de la simulation des débits.

L'intégration d'une information complémentaire non prise en compte jusqu'ici en modélisation peut par contre répondre de façon plus satisfaisante à la recherche d'améliorations possibles en simulation des débits.

C'est donc cette option qui a été développée dans le couplage d'une structure de base robuste et performante avec un schéma de surface permettant d'intégrer un nouveau type d'information concernant le transfert des flux vers l'atmosphère dont la trace la plus évidente est celle laissée par l'humidité qui en résulte pour les sols [R6].

Nos travaux ont donc porté sur l'intégration de données observées d'humidité du sol en supplément des données conventionnelles de pluie et de débit.

- **Le modèle couplé.** Publications/Communications: [P7], [P17], [P21] [P22], [P29], [P30], [P31], [P32], [P33], [P34], [P38], [C3], [C6], [C7], [C8], [C11], [R7], [R8], [R10], [R11], [R13], [R27], [R28],

Ce travail de recherche a bénéficié des travaux effectués au cours de la thèse de N. Chkir, 1994 et de plusieurs DEA qui se sont intégrés dans différents projets nationaux et européens⁶. L'objectif de prise en compte des flux de surface pour la modélisation du comportement des bassins en vue d'améliorer la simulation des débits, a donné lieu à la mise au point d'un nouveau modèle conceptuel, GRHUM, susceptible d'intégrer un indicateur de l'état hydrique

⁶ Projet pilote soutenu par l'ESA et le CNES « Estimation de l'état hydrique de petits bassins versants agricoles à l'aide de l'observation spatiale » en collaboration avec GEOSYS, le CETP/CNRS et le LCT ENGREF/CEMAGREF de Montpellier. Projet Bretoi « Bassin de référence pour l'étude des transferts en milieu agricole intensif » soutenu par le MNRT, en collaboration avec l'INRA de Rennes, et le BRGM.

du sol (Chkir, 1994; [P7]). Issu de la famille des modèles conceptuels GR du CEMAGREF (Edijatno et Michel, 1989, Edijatno *et al*, 1999), il simule, au pas de temps journalier, les débits et les humidités des couches de sol superficielle et racinaire.

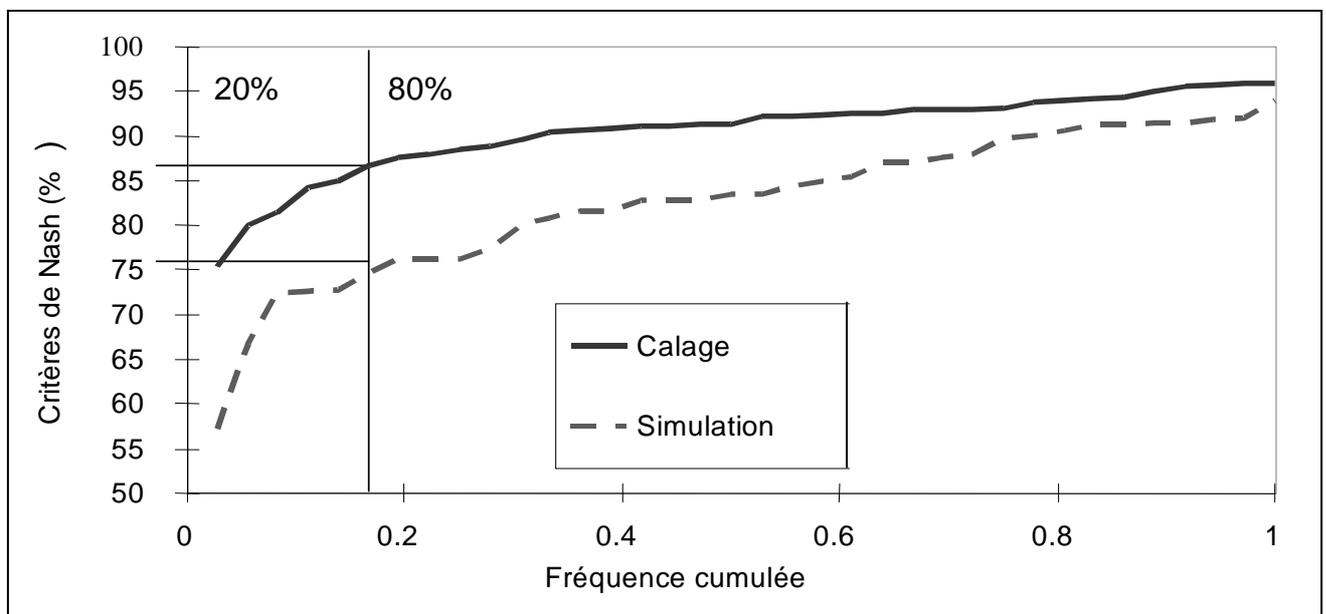
C'est le modèle hydrologique conceptuel de base, GR, qui a été choisi afin d'être couplé avec un modèle de bilan radiatif (modèle de Deardorff, 1978) adapté à l'utilisation de données satellitales.

Le couplage de ces deux modèles permet de simuler et donc de suivre l'évolution journalière de l'état hydrique du sol pour la couche de surface et la couche racinaire. Le modèle ainsi obtenu, est un modèle à deux couches offrant la possibilité de mieux contrôler les états du système grâce à la comparaison possible entre humidités simulées et observées [P17],[P21], [P22].

La modélisation du réservoir sol se rapproche de celle d'un modèle d'interface sol-végétation-atmosphère développé au CETP (Taconet *et al* 1986) où la fonction de production gère les échanges de flux avec l'atmosphère et détermine le devenir de l'eau.

L'évaporation est calculée pour chaque couche de sol en séparant la contribution du sol et celle de la végétation à l'aide d'un facteur caractérisant la couverture végétale. Ce facteur dépend des différents types de cultures présents sur le bassin et de leur répartition. La courbe d'évolution de ce coefficient peut être approchée à l'aide de l'indice de végétation normalisé calculé à partir des canaux visible et proche infrarouge de l'AVHRR du satellite NOAA ou à partir d'une relation empirique entre couvert végétal et évapotranspiration mesurée [P30], [P31].

L'évaporation du sol est modélisée selon le concept d'évaporation limite (Wetzel *et al*, 1987, Soares *et al*, 1988) qui est fonction des conditions climatiques et hydriques du sol. Elle est déterminée par la diffusivité hydrique du sol qui gère les transferts d'eau entre les couches de sol et est bornée par la demande évaporative atmosphérique. La transpiration de la végétation se déduit de l'évapotranspiration potentielle à partir de relations empiriques établies par Otlé et Vidal-Madjar en 1994.



(Cognard, 1996)

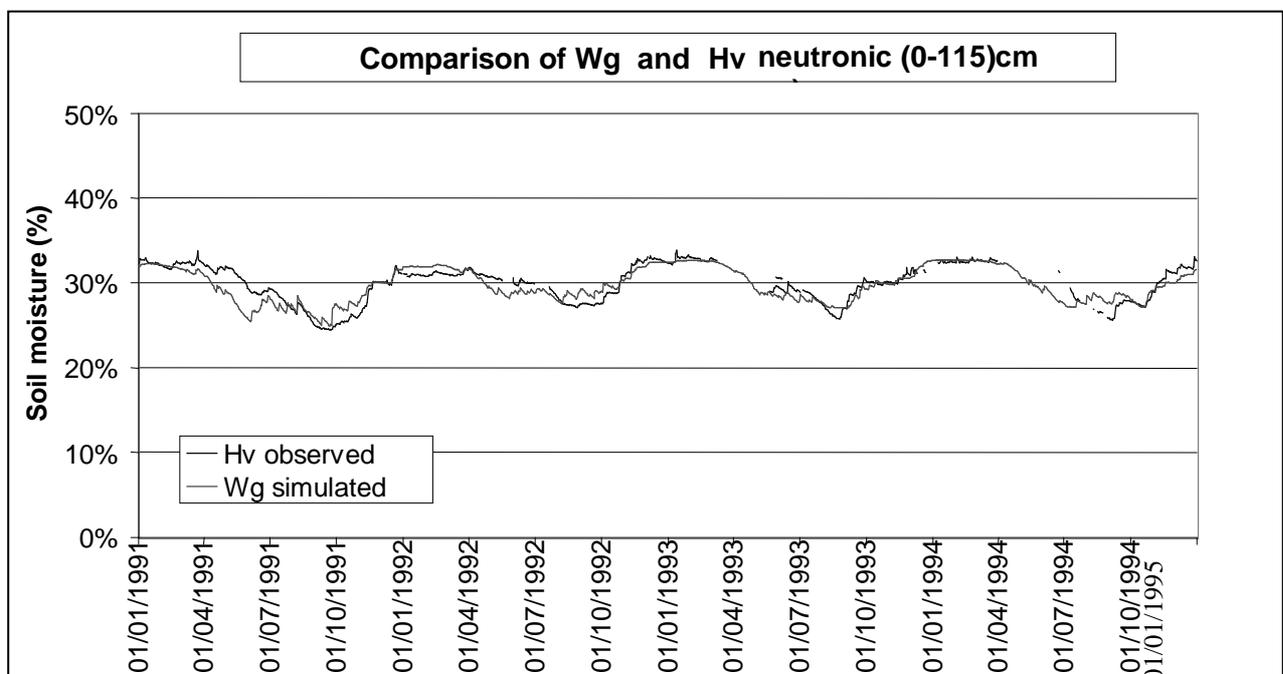
Fig n°4.9: Critère de qualité du modèle GRHUM obtenu sur 36 bassins versants

Le modèle couplé mis au point a fait ses preuves lorsque le modèle fonctionne en simulation, donc quand l'état hydrique du sol est une de ses variables intrinsèques et ceci à l'occasion de plusieurs études [P29], [C6], [C7], [C8], [R7], [R8], [R10], [R11], [R13].

La mise au point de ce modèle a tout d'abord, été faite sur le bassin de l'Orgeval. Les résultats obtenus [P7] en calage et en validation ont montré les bonnes performances du modèle GRHUM en terme de simulation des débits comparativement au modèle de base GR. La robustesse du modèle a été ensuite confirmée lors de son application à un ensemble de 36 bassins situés en Bretagne centrale sur 6 ans de données [P32], [P33], [P34], [P38]. Dans 80% des cas le critère de qualité est supérieur à 85% en calage et est supérieur à 75% en validation (fig n°4.9). Plus récemment, la comparaison effectuée dans le cadre du projet AIMWATER a permis de mettre en évidence les bonnes performances de ce modèle en simulation des débits vis à vis des 38 autres structures de modèles testées et sur plus de 430 bassins répartis à travers le monde [C11],[R27],[R28]. Dans ce cas, le critère de qualité du modèle atteint 70% en validation comme on peut le voir sur la figure 4.7.

L'intérêt de ce modèle couplé a été aussi confirmé pour la modélisation des humidités du sol des couches de surface et profondes. En termes d'humidité superficielle, un exemple en est donné par la corrélation significative ($R=0,88$) entre l'humidité superficielle simulée par le modèle sur le bassin versant du Coët-Dan à Naizin (Bretagne) et l'humidité superficielle du sol déterminée par imagerie radar ERS (Cognard et al, 1995).

Sur le bassin de l'Orgeval, les évolutions des humidités superficielles et racinaires simulées et observées montrent aussi une bonne cohérence. Le signal radar ne donnant pas accès à l'humidité profonde, celle-ci a été mesurée au pas de temps journalier grâce à une sonde neutronique. La figure 4.10 montre les données mesurées à 0-115 cm de profondeur entre 1991 et 1995 en un point représentatif du bassin et les données simulées de la couche racinaire préalablement transformées en utilisant la corrélation trouvée entre humidité mesurée et simulée ($R=0,96$).



(R[28], 2000)

Fig n°4.10: Comparaison de l'humidité de la couche profonde Wg simulée et de l'humidité Hv mesurée entre 0-115 cm avec une sonde neutronique sur le bassin de l'Orgeval.

Le modèle couplé mis au point a montré qu'il permet non seulement de simuler correctement les débits à l'exutoire d'un bassin mais aussi les humidités des couches de sol superficielle et racinaire [C3], [C7], [P29]. Les fortes liaisons existant entre états internes du modèle et valeurs observées nous ont ainsi permis d'intégrer l'état hydrique du sol dans le système modélisé afin de corriger l'état du système au cours de la prévision comme nous le verrons dans le chapitre 2.4.3. L'optimisation de la procédure de modélisation pouvant alors bénéficier de séquences de mesures à des périodes sensibles pour la prévision des débits.

- **Comparaison de l'approche globale et distribuée.** Publications/Communications: [P9], [P10], [P47], [P49], [C12], [R17], [R18], [R23], [R26], [R31]

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre d'un projet pluriannuel "Risques naturels"⁷ Une partie des résultats a bénéficié du travail effectué au cours de deux DEA (Paris VI et Paris XI) en collaboration avec le CPB et le CETP.

Une approche souvent suivie pour prendre en compte la grande variabilité des paramètres de surface déterminants du comportement hydrologique d'un bassin est la discrétisation du milieu étudié avec une taille de maille telle que les paramètres physiques y sont supposés homogènes. La taille et le nombre de mailles varient suivant le bassin étudié. Par exemple pour modéliser les flux hydriques de surface sur le bassin du Rhône de 86 496 km², 2 7054 mailles de 1, 4 ou 16 km² ont été utilisées dans le modèle distribué Modcou (Morvan, 2000). Les modèles mis en œuvre sont alors supposés reproduire une distribution observée des grandeurs physiques du bassin modélisé.

Cette approche dite distribuée s'oppose à l'approche globale qui prend en compte le bassin versant dans sa totalité sans tenir compte des hétérogénéités locales.

Nos recherches ont souvent privilégié l'approche à partir de modèles globaux [R17], [R18], [R23], [R26], [R31] afin de proposer des outils simples et opérationnels pour la gestion et la prévision de la ressource en eau.

Cependant en vue d'obtenir des méthodes transposables d'un site à un autre ou d'une échelle spatiale à une autre, il est apparu nécessaire de relier les paramètres du modèle utilisé à des grandeurs caractéristiques du milieu physique [P47], [P49].

Cette démarche est désignée par le terme de régionalisation des. Pour cela deux approches complémentaires sont généralement suivies :

Une première qui étudie les similarités de comportement entre bassins versants afin de déterminer les variables explicatives pertinentes du comportement hydrologique du domaine étudié.

Une deuxième qui détermine les liens existant entre caractéristiques physiques ou hydrologiques du bassin et les paramètres du modèle.

C'est dans le cadre d'une étude de similarités pour déterminer les variables pertinentes régionales pour la prévision et la gestion de la ressource en eau que s'est tout d'abord située notre recherche.

La question étudiée était de savoir si l'approche discrétisée apportait une amélioration par rapport à l'approche globale pour la prévision des débits et si l'hétérogénéité physique des bassins versants avait une influence sur la fiabilité de la prévision hydrologique.

⁷Soutenu par le PNRN « Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues. Comportement hydrologique des bassins versants » en collaboration avec le CETP/CNRS et le CNRS/CPB de Nancy.

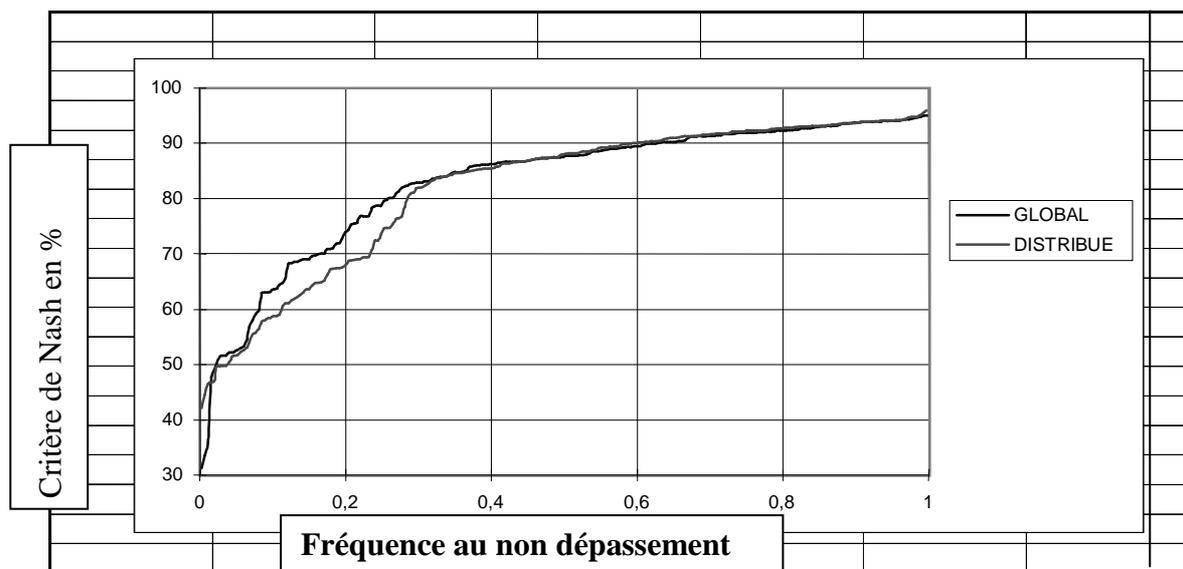
Pour répondre à ce problème deux analyses indépendantes et parallèles ont été effectuées:

- (i) la comparaison entre une modélisation semi-distribuée et une modélisation globale au niveau de séries hydrologiques temporelles acquises pendant plus de dix ans sur 15 couples de bassins versants juxtaposés
- (ii) et la recherche des caractéristiques physiques déterminantes pour l'hydrologie permettant la différenciation des deux bassins juxtaposés composant un bassin global.

Un modèle unique, le modèle GR4 a été utilisé pour l'approche globale et semi-distribuée afin de n'introduire aucun biais relatif à la qualité des modèles [P9], [C12], [R23].

Chacun des 15 couples de bassin versants a été modélisé selon les deux approches, les résultats de la comparaison entre les débits observés, et les débits calculés à l'aide du modèle ont donné des critères de Nash très similaires sans montrer de nette supériorité d'une approche sur l'autre (fig n°4.11). Dans 70% des cas l'approche globale et semi-distribuée ont un critère de Nash supérieur à 85%

La comparaison statistique de l'efficacité de chacune des deux approches à partir du test non paramétrique de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945) a montré que l'approche distribuée n'a permis une meilleure prévision hydrologique que dans le cas du tiers des quinze bassins étudiés, la modélisation globale étant plus performante que la modélisation semi-distribuée dans le cas d'un autre tiers des quinze bassins [P10].



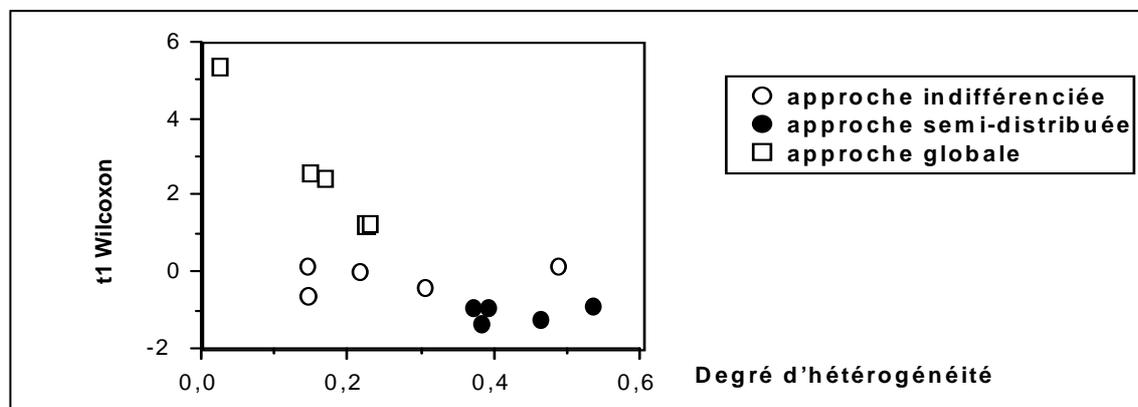
(Baudez, 1997)

Fig n°4.11: Distribution des critères de Nash pour l'approche globale et semi-distribuée sur 15 couples de bassins versants

Pour chacun des bassins versants, les différences et les similitudes de leurs sous-bassins juxtaposés ont été étudiés vis-à-vis des caractéristiques physiques décrivant la densité du réseau hydrographique ou densité de drainage, l'hypsométrie, la couverture végétale et la couverture pédologique.

Les similitudes et les hétérogénéités des bassins ont été caractérisées, à l'aide de la distance euclidienne de de Coursey (1973) et les valeurs t_1 du test statistique de Wilcoxon permettant de comparer l'efficacité des approches globale et semi-distribuée, ont été confrontées aux degrés d'hétérogénéité des bassins correspondants. Cette confrontation a été menée afin d'évaluer les liens potentiels entre le degré d'hétérogénéité d'un bassin et le choix de l'approche utilisée pour un bassin donné.

Il a été montré que les bassins versants pour lesquels l'approche semi-distribuée permettait une meilleure prévision hydrologique que celle obtenue à l'aide d'une approche globale se différenciaient des autres bassins étudiés par leurs plus grandes dimensions (surface de bassin supérieure à 10^3 km²) et des degrés d'hétérogénéité de leurs couvertures pédologiques plus élevés : le degré d'hétérogénéité des sols calculé à partir de la distance euclidienne de de Coursey est supérieur à 0,3 (fig n° 4.12).



(R[31], 2000)

Fig n°4.12: Relations entre les valeurs t₁ du test de Wilcoxon et les degrés d'hétérogénéité de la couverture pédologique.

Il existe cependant des bassins versants pour lesquels il n'y a aucune différence significative entre les deux approches.

Ces travaux ont mis en évidence l'existence d'un lien entre la performance d'une modélisation hydrologique distribuée et le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique d'un bassin grâce à la distance euclidienne de de Coursey (1973) qui s'est avérée être un indicateur d'hétérogénéité simple et pertinent [P10].

L'absence d'une confrontation des modélisations hydrologiques avec des caractéristiques physiques de bassins aurait conduit à attribuer la meilleure performance de l'approche semi-distribuée pour un tiers des bassins, au fait d'augmenter le nombre de paramètres dans la version semi-distribuée du modèle GR4.

Cette double approche nous a donc permis d'apprécier l'apport hydrologique d'une décomposition d'un bassin en sous-ensembles dans les cas d'hétérogénéités marquées.

En vue d'approfondir et de développer ces premiers résultats, des recherches relevant de la deuxième approche de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques se sont poursuivies en collaboration avec le CETP/ CNRS de Vélizy dans le cadre d'un DEA de Paris XI.

Dans le prolongement des travaux précédents et afin de déterminer les liens existant entre caractéristiques physiques ou hydrologiques du bassin et les paramètres du modèle les deux approches globale et distribuée ont été comparées cette fois-ci sur le bassin du Rhône⁸. Ce bassin extrêmement contrasté, est marqué par une forte topographie ainsi que par d'importants gradients climatiques et de nombreuses hétérogénéités physiques.

⁸ Programme GEWEX-Rhône avec les équipes du Cemagref Lyon, de l'Ecole des Mines de Paris, du CNRM/ Météo-France et du CETP/CNRS.

Pour cette étude, deux modèles ont été utilisés : le modèle distribué Modcou (Girard, 1974) et le modèle global GR4, calés tous les deux sur 30 sous-bassins du BV du Rhône, sur une période de 3 ans.

Pour Modcou, des paramètres caractérisés par les différents types de sol (géologie et pédologie) ainsi que par la couverture végétale gèrent sa fonction de production. Pour l'ensemble des sous-bassins du Rhône il n'existe qu'un seul jeu de 7 paramètres. On considère donc que le modèle calé sur un domaine est transposable aux bassins voisins à condition que l'ensemble des types de sol et de végétation des bassins voisins soient représentés sur le domaine initial.

Pour GR4, les 4 paramètres du modèle sont calés pour chacun des sous-bassins. Dans ces cas là, les résultats du modèle global GR4 sont meilleurs. Cependant, si l'on utilise dans le modèle global le même jeu de paramètres sans calage pour l'ensemble des sous-bassins du Rhône, c'est à dire le jeu de paramètres défini uniquement par ses valeurs initiales valables pour l'ensemble du territoire national, le modèle distribué Modcou donne alors de meilleurs résultats pour les forts débits.

Afin d'utiliser des paramètres de GR4 non calés et transposables d'un sous-bassin à un autre, une régionalisation des 4 paramètres de GR4 a été menée s'appuyant sur les travaux effectués dans le cadre de la thèse de Ch. Perrin (2000).

Ce travail de régionalisation déjà entrepris auparavant dans les thèses de Edijatno (1991) et de Z. Maklouf (1994) avait montré que seules certaines variables, pouvant être très contrastées d'un bassin à l'autre, telles que pluie moyenne, température moyenne, surface et pente contribuaient à apporter une explication significative des paramètres de routage du modèle, les paramètres de bilan étant plus difficilement liés aux descripteurs de bassin.

Il s'était donc avéré difficile de mettre en évidence une tendance régionale nette sauf quand les variables sélectionnées comprenaient une information concernant la pédologie, la géologie ou le couvert végétal. Ce supplément d'information combiné à une plus grande homogénéité des conditions hydro-climatiques avait permis d'obtenir des corrélations entre paramètres du modèle et descripteurs du bassin plus satisfaisantes.

Cependant, les régressions trouvées entre les paramètres du modèle et les variables descriptives des sous-bassins du Rhône n'ont pas donné de résultats suffisamment pertinents pour utiliser ces relations dans la régionalisation des paramètres du modèle GR4. Sachant que généralement les ajustements ne sont pas parfaits, ils ne garantissent donc pas d'obtenir les meilleurs résultats en termes de simulation de débits avec le jeu de paramètres prédéterminés par les régressions multiples.

Le travail de régionalisation se poursuit donc, en s'appuyant cette fois-ci sur la détermination du jeu de paramètres optimaux non plus en minimisant les erreurs d'estimation des paramètres mais en maximisant les performances du modèle. Ce travail initié dans la thèse de Ch. Perrin devrait permettre d'approfondir et de compléter les conclusions sur l'intérêt respectif des approches globale et distribuée.

2.4.3 Assimilation de l'état hydrique dans un modèle hydrologique

L'utilisation de modèles hydrologiques joue un rôle capital dans la gestion de la ressource en eau et notamment en prévision des crues. Cependant, ces modèles sont encore trop imprécis pour être utilisés tels quels dans une opération de gestion du risque en temps réel.

L'amélioration des performances du modèle en prévision de crues nécessite donc en premier lieu une correction de la trajectoire du modèle à partir d'observations les jours précédant le jour de la prévision, pour en limiter la divergence. C'est cette procédure de mise à jour, permettant de contrôler la dynamique de l'évolution du système hydrologique modélisé qui a fait l'objet de nos travaux de recherche les plus récents.

La mise à jour, par assimilation de données, permet d'utiliser de façon optimale et simultanée l'information contenue dans le modèle et celle contenue dans les observations en minimisant une fonction coût (Le Dimet, 1996). Elle reconstitue de façon optimale, soit les paramètres du modèle, soit l'état du système par correction des erreurs de prévision.

Bien adaptés à la prévision des débits pour des bassins de moyenne échelle (cf chapitre 2.4.4), les modèles conceptuels pluie-débit sont donc mis à jour en corrigeant la dérive des niveaux de leurs réservoirs ou bien en réajustant au mieux leurs paramètres à la situation observée en cours. Les autres méthodes de mise à jour tels que les réajustements des entrées et sorties du modèle sont généralement mieux adaptés à des modèles de type boîte noire (cf chapitre 2.2.2 et 2.4.2).

En hydrologie, l'information externe utilisée jusqu'à présent pour mettre à jour les prévisions de crues concernait essentiellement les débits observés en période de crise. Nos travaux ayant montré le rôle joué par l'état hydrique dans la transformation pluie-débit ainsi que les potentialités pour son suivi à l'échelle du bassin nous avons, au cours de nos recherches, adapté les méthodes de mise à jour existantes afin d'assimiler cette information complémentaire qui peut être utilisée comme variable prédictive, dans les modèles conceptuels pluie-débit.

L'ajustement des états du système et des paramètres du modèle a été étudié à travers deux des principales méthodes développées pour corriger la trajectoire d'un modèle à partir d'observations externes, la méthode variationnelle et la méthode séquentielle. Ce sont ces deux méthodes qui ont été appliquées sur le bassin de la Seine à l'amont de Paris dans le cadre du projet européen AIMWATER⁹ et pour partie dans le cadre du projet PNRH¹⁰.

- **Assimilation variationnelle.** Publications/Communications: [P13], [P14], [P16], [P44], [P46], [P50], [P52], [C14], [R30], [R32].

Les résultats présentés ici ont bénéficié du travail effectué au cours de deux thèses, (Yang, 1993) encadrée par Cl. Michel (CEMAGREF) et (Quesney, 1999) co-encadrée avec le CETP/CNRS ainsi que du travail de post-doctorat d'A. Weisse actuellement en cours.

La méthode variationnelle consiste à optimiser l'état initial du système au début de chaque série de mesures, de façon à ce que le modèle simule des quantités s'approchant au plus près

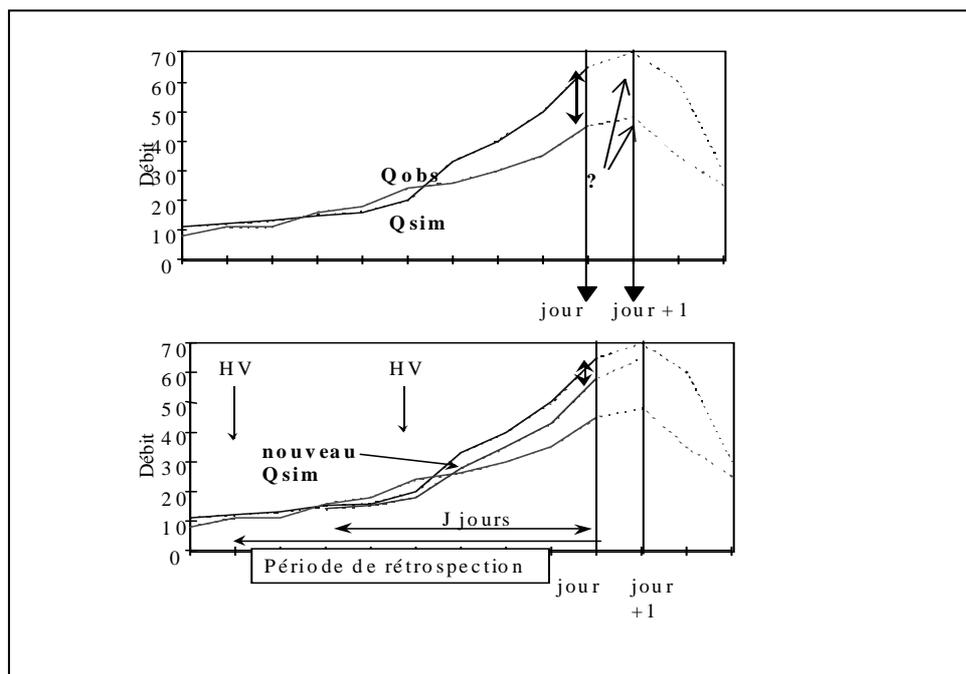
⁹ AIMWATER (Contrat n° ENV4-CT98-0740 (DG12-ESCY)) en collaboration avec l'IH de Wallingford (UK), l'université de Valence (Sp), l'université indépendante de Lisbonne(Pt), le CETP/CNRS de Vélizy l'Associao de Regantes (Pt), l'institution interdépartementale des barrages réservoirs de la Seine.

¹⁰ PNRH/INSU en collaboration avec le CETP/CNRS de Velizy

des observations. Yang (1993) a proposé une application de cette méthode pour la prévision de crues en mettant à jour les paramètres du modèle à partir des débits. La simulation se rattache en permanence à une évolution stationnaire du système et s'en écarte de façon rétrospective de la manière la plus vraisemblable en minimisant une fonction coût qui tient compte de la dernière erreur constatée entre la valeur observée et celle qui est modélisée. Le calcul de cette évolution divergente est repris à chaque instant en repartant du régime stationnaire existant à une époque antérieure.

Testée pour des bassins versants de la Seine à Paris, les résultats ont montré que cette mise à jour des paramètres était supérieure à la correction des erreurs de prévision en utilisant un modèle auto-régressif d'ordre 1 (Yang et Michel, 2000).

Dans nos travaux, cette méthode a été adaptée afin d'assimiler non seulement les débits mais aussi les humidités du sol sur une période de rétrospection précédant la prévision (fig n°4.13).



([P13], 2000)

Fig n°4.13 : Méthode variationnelle assimilant les mesures d'humidité (Hv) pour réduire l'écart entre débits observés (Qobs) et débits prévus (Qsim)

Les mesures d'humidité sont prises en compte à travers l'établissement d'une relation de contrainte entre les différents états du système tels que le taux de remplissage des réservoirs superficiel et global du sol ou le taux de remplissage du réservoir de transfert (Quesney, 1999).

Cette approche se déroule en deux étapes, la première étant faite, a priori, avant toute opération de mise à jour des paramètres. C'est une analyse préliminaire des erreurs du modèle, qui conduit à établir une relation linéaire entre débits observés et débits calculés afin de calculer le biais du modèle.

La deuxième étape est celle de la mise à jour des paramètres. Le principe consiste à réduire au maximum le biais du modèle calculé dans la première étape de la procédure. Une originalité de la méthode est que la mise à jour est faite sur une période précédant la prévision, de manière à ce que les modifications aient le temps de porter leurs fruits. Avant chaque période de mise à jour, on part d'un jeu de paramètres initial qui est toujours le même : c'est celui qui a été calé sur une longue période pour le bassin versant considéré. En fait, on suppose que l'on peut réduire les écarts récents entre modèle et observation, en modifiant provisoirement le jeu de paramètres du modèle pour mieux s'adapter à la situation en cours. De

plus, on impose que le nouveau jeu de paramètres ne soit pas trop différent du jeu initial. Tous les paramètres sont modifiés, puisqu'il est impossible de déterminer lequel pose problème, en respectant leur écart-type d'estimation.

La méthode, appliquée au modèle GRHUM, a d'abord été testée sur les crues de l'Orgeval observées sur la période 1990-1994 avec des humidités du sol mesurées par une sonde à neutrons installée en un point représentatif du bassin [P13], [P14], [P16], [P44], [P46].

L'optimisation des conditions initiales en début de la période d'assimilation a été obtenue en minimisant une fonction coût qui prend à la fois en compte les erreurs sur les débits pendant les 5 derniers jours précédant la prévision et les erreurs sur les humidités sur une période de 10 à 30 jours précédant la prévision.

Quatorze crues ont pu être étudiées sur cette période. Les performances globales de la méthode d'assimilation sont caractérisées par les critères de persistance et d'efficacité comparant les performances de la méthode variationnelle aux performances obtenues respectivement par une prévision naïve où l'on suppose que le débit du lendemain est égal au débit de la veille et par les résultats obtenus en simulation, les pluies et débits étant connus.

Le tableau 1 compare les résultats obtenus avec le modèle GRHUM en assimilation de débits sans prise en compte de la mesure d'humidité et les résultats obtenus en assimilation des débits et des humidités.

ASSIMILATION DES DEBITS SEULS	Persistance	69 %
	Efficacité	0 %
ASSIMILATION DES DEBITS ET DES HUMIDITES	Persistance	72 %
	Efficacité	10 %

Tableau n°1: Performances de l'assimilation variationnelle sur l'Orgeval, ([R30], 2000)

Lorsqu'on ne prend pas en compte les mesures d'humidité dans la procédure d'assimilation, les résultats montrent que par rapport à une prévision naïve la procédure d'assimilation améliore la prévision des crues. Par contre, le gain apporté par la procédure d'assimilation appliquée en prévision, est nul par rapport aux résultats du modèle obtenus en simulation. En effet, plus le modèle est performant en simulation plus il est difficile d'obtenir une procédure de mise à jour efficace.

Les contraintes supplémentaires introduites par la prise en compte des mesures d'humidité entraînent une amélioration des critères de persistance et d'efficacité systématique pour les crues à fort débit de pointe pour lesquelles l'utilisation d'une procédure d'assimilation se justifie non seulement par rapport à une prévision naïve mais aussi par rapport aux simulations sans prévision. Les mises à jour des prévisions semblent être globalement plus efficaces et plus rapides lorsque les humidités sont ainsi utilisées. La méthode manque cependant de robustesse, car si pour les forts débits de pointe la prise en compte de l'humidité permet de limiter les mauvaises performances en prévision, pour les autres événements les dégradations en prévision subsistent: le critère de Nash augmente faiblement (2%) sur l'ensemble de la période.

Dans cette comparaison, l'assimilation avec et sans prise en compte de l'humidité n'utilise pas les mêmes critères d'optimisation. Dans un cas la fonction coût ne prend en compte que les dernières erreurs sur les débits. Dans l'autre cas la fonction coût prend à la fois en compte les dernières erreurs sur les débits et les erreurs sur les humidités.

Considérant que les critères d'optimisation n'étaient pas les mêmes et ne permettaient donc pas une comparaison claire des deux méthodes d'assimilation, une approche un peu différente à été utilisée sur le Serein, sous-bassin versant de la Seine (1120 km² à Chablis) [P50], [P52], [R32]:

Une nouvelle contrainte a été ajoutée sur les humidités : l'erreur des humidités modélisées par rapport aux humidités observées doit être inférieure à l'écart type des valeurs calculées, pondéré par un paramètre ($1/k$) qui impose la sévérité de la contrainte. Lorsque k tend vers zéro la contrainte est nulle. Plus k croît plus la contrainte est grande et plus les mesures d'humidité sont prises en compte. Ce paramètre donne une mesure de l'intérêt apporté par l'assimilation des humidités observées.

La méthodologie s'appuie donc sur deux contraintes : le nouveau jeu de paramètres doit réduire les dernières erreurs sur les débits et ce jeu doit aussi satisfaire la condition imposée sur les humidités sinon il est rejeté.

La méthode a été testée pour la période 1999-2000 avec les modèles GR4j et GRHum. Sur cette période, nous avons recensé 9 crues. Le délai de prévision a été choisi égal à 2 jours. Dans un premier temps, la base de données satellitales n'étant pas suffisante, les données d'humidités utilisées sont des humidités de surface ponctuelles fournies par une sonde TDR placée près de l'exutoire du bassin versant.

Pour un coefficient k faible, c'est à dire une contrainte sur les humidités nulle, seules les erreurs sur les débits sont prises en compte. Les résultats montrent [P52], que par rapport à une prévision naïve la procédure d'assimilation améliore nettement la prévision des crues: le critère de persistance est de 90%. Le critère d'efficacité qui dépend des performances du modèle en simulation sur le bassin étudié, est supérieur à 30%. Par contre, quand le coefficient k est grand, ce qui signifie que l'on tente de prendre en compte l'humidité des sols, les coefficients de persistance et d'efficacité diminuent et dans ce cas, l'humidité n'apporte rien à la prévision.

Il faut souligner cependant que sur la période étudiée peu de crues avaient un fort débit de pointe contrairement à ce qui était observé sur l'Orgeval. Ces résultats seront donc validés sur une deuxième année d'étude afin de déterminer si l'assimilation des humidités superficielles améliore effectivement la prévision des crues à fort débit de pointe.

La méthodologie doit aussi être testée sur d'autres bassins versants : dans le cadre du projet AIMWATER, deux autres sous bassins de la Seine sont suivis du point de vue de l'humidité des sols.

La méthode variationnelle d'assimilation des débits seuls, apporte un gain à la prévision des crues. Cependant, au vu des premiers résultats, il apparaît qu'en dehors des crues à forts débits de pointe, l'assimilation complémentaire des humidités de la couche de surface n'apporte pas une information suffisamment pertinente. Cette couche, en effet, réagit très vite aux pluies et s'assèche très rapidement alors que les couches de sol plus profondes montrent une évolution plus atténuée de l'humidité et semblent plus conformes à l'état hydrique simulé par le modèle. Des tests en cours devraient nous permettre d'évaluer l'intérêt respectif des humidités superficielles et profondes pour l'établissement des équations de contraintes.

Il est à noter aussi que les données utilisées sont des données ponctuelles non forcément représentatives de l'état de saturation du bassin dans son ensemble. Lorsque la base de données sera suffisante pour son utilisation en assimilation variationnelle, la méthode pourra alors utiliser les données spatialisées issues de l'information satellitale.

Conjointement à cette approche, une autre méthodologie d'assimilation, plus délicate à mettre en œuvre mais ne nécessitant pas un aussi grand nombre de données externes, a été étudiée afin de mettre en perspective les potentialités de l'assimilation de l'humidité du sol dans un modèle pluie-débit

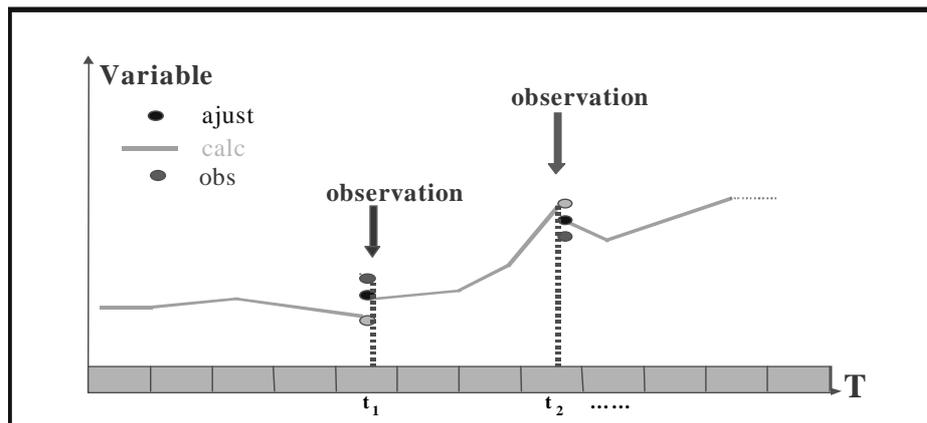
- *Assimilation séquentielle. Publications/Communications : [P14], [P15], [P16], [P43], [P44], [P46], [P51], [C14], [R30], [R32]*

Ce travail de recherche actuellement en cours de développement a bénéficié du travail de thèse d'A. Quesney (1999) et du travail de D. Aubert, qui a commencé un post-doctorat en octobre 2000.

La méthode séquentielle utilise pas à pas l'information issue des observations et celle calculée à partir des variables internes du modèle afin d'obtenir une estimation optimale de la valeur prévue comprise entre la valeur observée et celle découlant de l'évolution du système. Son application avec une approche de type filtre de Kalman (1960) paraît intéressante, car elle tient compte de façon séparée de l'erreur d'observation et des erreurs d'estimation des états internes du modèle en prévision. Elle fournit la meilleure estimation non biaisée de la variable d'état en fonction des observations passées. Cette technique s'adapte bien à un système hydrologique où les observations sont affectées d'erreurs et permet de considérer des systèmes non stationnaires (Bergman et Delleur, 1985). Le problème dans cette méthode est de linéariser le système et d'évaluer correctement les matrices des variances-covariances des termes d'erreur du filtre de Kalman car celles-ci varient avec l'état du système linéarisé.

Dans nos recherches, cette méthode a été adaptée afin d'assimiler des indices hydriques pouvant être déduits de la télédétection radar et disponibles à des pas de temps irrégulièrement espacés. Pour ce faire, le modèle GRHUM a été utilisé de façon à simuler et caler les humidités de la couche de surface représentatives des mesures radar, les humidités de la couche profonde et les débits ([P14], [P44], [C14]) (fig n°4.14).

Les observations disponibles (humidité, débit) sont reliées aux variables internes du modèle (taux de remplissage des réservoirs) par une équation de contrainte et permettent ainsi de contrôler son évolution. Les valeurs instantanées de ces variables sont alors corrigées pour se rapprocher des valeurs observées et donc limiter la divergence du modèle par rapport aux observations. La détermination du facteur de correction s'effectue en linéarisant localement le modèle et en tenant compte des incertitudes estimées sur le modèle et les mesures.



(R[51], 2000)

Fig n°4.14: Schéma de principe de l'assimilation séquentielle, avec mise à jour des états (ajust).

Cette approche a été testée pour la période de novembre 1995 à octobre 1997 sur le bassin de l'Orgeval (sous-bassin de la Seine) période pour laquelle des données satellitaires étaient disponibles (fig n°4.15). L'application du filtre de Kalman s'est faite en deux phases : la phase d'ajustement et la phase de propagation [P15], [P43], [P46] :

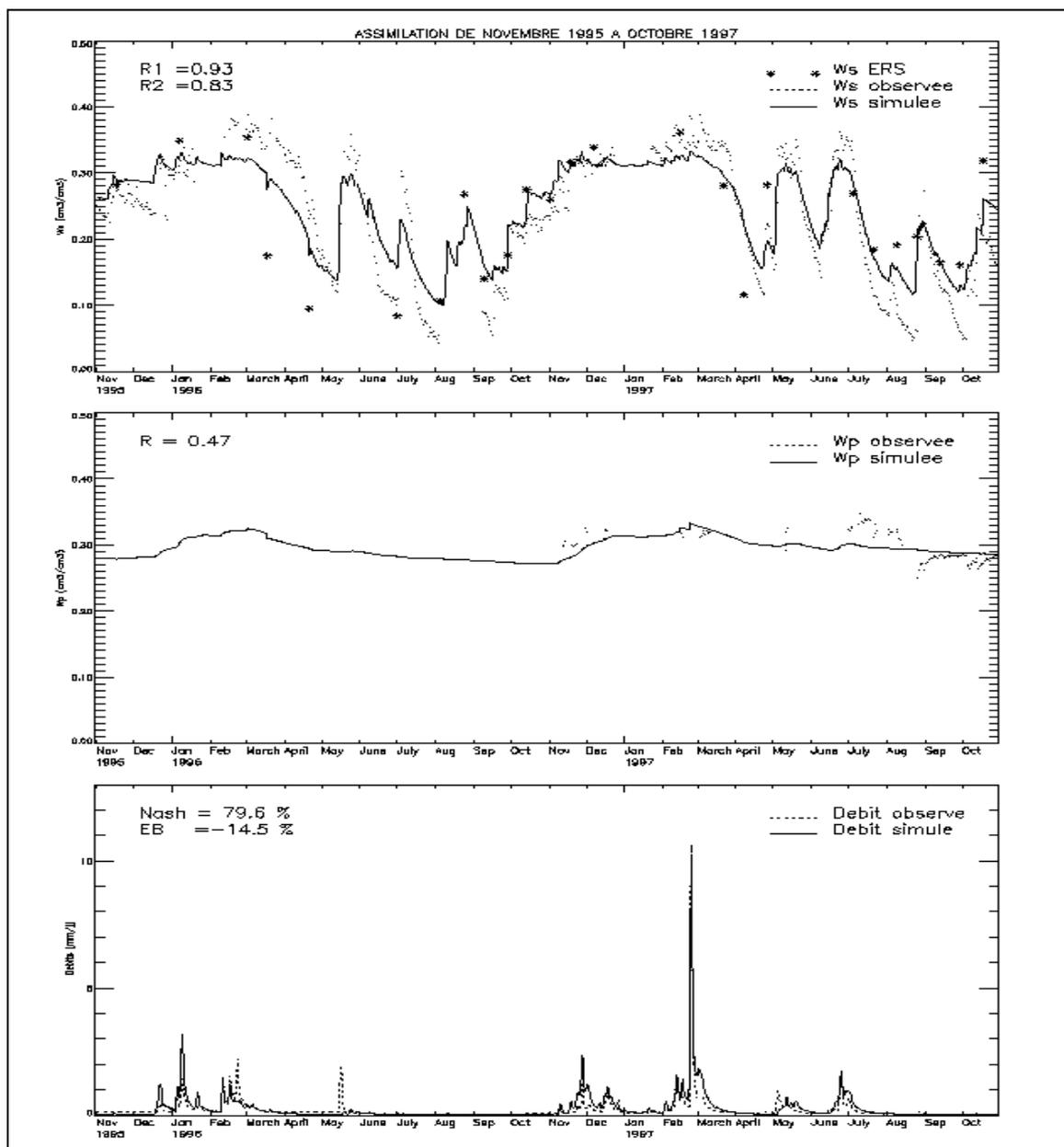
-Durant la phase d'ajustement, le gain de Kalman est calculé en premier. Il indique, sur chacune des variables internes, le facteur de correction qui sera appliqué. Ce calcul prend en compte les matrices de covariance d'erreur instantanées. Cet ajustement est alors appliqué au vecteur d'état et aux matrices de covariance d'erreur du modèle.

-Durant la phase de propagation, les valeurs prévues sont déterminées : un nouveau vecteur d'état et une nouvelle matrice de covariance d'erreurs sont calculés en ajoutant les erreurs propagées par le modèle et la nouvelle erreur générée durant ce pas de temps.

Les matrices de covariance d'erreur sur les observations sont déterminées empiriquement à partir des incertitudes des humidités déduites des observations radar. Ces incertitudes ont été estimées globalement sur l'année agricole avec une précision de 4% pour les données satellitales (cf chapitre 2.4.1). Pour la détermination des erreurs du modèle, différentes valeurs de l'erreur introduite en prévision durant un pas de temps ont été testées. Les résultats obtenus ont alors été comparés avec la différence entre les données mesurées et simulées en calage. Les valeurs retenues sont celles pour lesquelles les deux méthodes donnent des résultats similaires. Sur l'Orgeval, ces incertitudes sont de l'ordre de 0,1% pour la couche profonde et de 1% pour la couche superficielle (Quesney, 1999, [P51], [R32]).

Si les incertitudes sur les observations sont supposées très faibles le gain de Kalman sera quasiment égal à l'unité et l'état interne du système sera totalement corrigé. Inversement, si les observations sont très peu fiables, le gain de Kalman sera quasiment nul et il n'y aura pas de correction du système.

L'assimilation des humidités superficielles avec le filtre de Kalman étendu a montré une amélioration de la simulation des débits pour l'ensemble de la période étudiée [P16], [R30],[R32]: le critère de Nash a augmenté de 4% (fig n°4.15).



(R[30], 2000)

Fig n°4.15 : Simulations obtenues après assimilation des humidités de surface (Ws)ERS par le filtre de Kalman et comparaison avec humidités de surface (Ws) et profondes(Wp) observées.

Si on ne considère que les périodes de crues le critère de Nash augmente fortement de 10.5% et les critères de persistance et d'efficacité sont respectivement égaux à 82% et 40%. Ces résultats montrent donc que cette méthode d'assimilation séquentielle des humidités superficielles conduit à une nette amélioration des performances du modèle en prévision de crue. Comparés aux résultats obtenus en forçage des humidités pour les mêmes périodes (les humidités observées viennent remplacer directement les variables calculées par le modèle), ces résultats justifient pleinement l'utilisation d'une méthode d'assimilation qui prend en compte les erreurs d'observations et les erreurs du modèle.

L'assimilation des humidités a une influence variable sur la valeur du débit simulé à l'exutoire du bassin. Ceci a été mis en évidence par l'étude de crues particulières [P15].

Lorsque les humidités sont élevées, la sensibilité est maximale: en cas de forte pluies, les écoulements profonds augmentent en entraînant ainsi une élévation sensible des débits à l'exutoire du bassin (cas de la crue de février 97). Lorsque par contre les taux de précipitation sont trop faibles, l'assimilation des

humidités n'a aucune conséquence sur les débits (cas de la crue de mai 96) quel que soit le niveau de saturation de la couche de surface. Cette couche, comme nous l'avons déjà signalé pour la méthode variationnelle, réagit très vite aux pluies et s'assèche très rapidement.

Dans le cas « idéal » testé ici, où le modèle est calé sur de grandes séries de mesures, le modèle est robuste et les corrections sont faibles. Ce comportement du filtre est intéressant car il montre son avantage par rapport à l'assimilation par forçage qui, en faisant toute confiance aux mesures, dégrade les simulations du modèle.

Les résultats obtenus amènent aux principales conclusions suivantes:

Si les deux méthodes d'assimilation développées ne peuvent pas être réellement comparées car elles n'ont pas bénéficié du même type de données on peut cependant souligner que:

- L'intérêt de la prise en compte de l'évolution de l'état hydrique des sols dans un modèle pluie-débit conceptuel global a permis de progresser en matière de prévision de débit, en utilisant essentiellement l'assimilation séquentielle des données d'humidité de surface dérivées de l'observation satellitale. Cette méthode permet de corriger les dérives du modèle lorsqu'une mesure est disponible. Les améliorations obtenues sur les débits simulés en périodes de forts débits montrent tout l'intérêt qu'elle présente en matière de prévision de crues.

- L'assimilation des humidités ponctuelles par la méthode variationnelle, moins délicate à mettre en œuvre que la méthode séquentielle, n'a montré d'amélioration pour la prévision des crues que pour certains événements à fort débit de pointe.

Cependant, quelle que soit la méthode d'assimilation utilisée, des validations doivent être faites sur d'autres périodes d'observation et d'autres bassins versants avant de pouvoir conclure sur l'intérêt respectif des méthodes d'assimilation ainsi que des données d'humidités du sol observées.

Ces premiers résultats sont néanmoins encourageants du point de vue de l'amélioration de la prévision des crues grâce au contrôle de la dynamique du système modélisé.

2.4.4 Gestion de la ressource en eau pour la prévision des débits

La prévention et la prévision des risques naturels suscitent une forte demande sociale et c'est donc la politique de décision publique qui détermine les actions de prévention du risque en insistant soit sur les aspects de gestion à long terme soit sur la prévision et l'alerte pendant la crise.

Lorsque c'est la gestion à long terme de la ressource qui est privilégiée, la problématique dominante est l'étude des impacts environnementaux et sociaux. La connaissance physique des phénomènes à l'origine de ces risques permet de produire des éléments quantitatifs qui participent à la décision publique par le couplage de modèles aléa-vulnérabilité qui définissent le risque: l'aléa renvoyant aux différents processus physiques et la vulnérabilité traitant des enjeux environnementaux, sociaux et économiques.

Pour la prévision et l'alerte, les systèmes sont basés sur la métrologie de paramètres environnementaux, leur analyse, et les procédures d'aide à la décision pour la gestion de crise et d'après crise. Apporter une attention à ce problème conduit à mettre en place une recherche fortement tournée vers l'opérationnel dans les domaines considérés, allant de la métrologie environnementale (y compris satellitale) aux outils de prévision, méthodes de contrôle des crues et techniques d'aide à la décision. Ce sont ces domaines qui ont fait l'objet principal de nos recherches.

Les outils de prévision s'appuient généralement sur des modèles dont le choix dépend du délai de prévision. Cependant lorsque les délais de prévision sont trop longs, peu de modèles sont efficaces pour prévoir la valeur du débit à un instant donné.

La prévision à court terme (en général une semaine maximum) est le plus souvent utilisée pour des objectifs d'alerte et des opérations de gestion de la ressource en temps réel. Dans ce cas là, les méthodes opérationnelles à la disposition des gestionnaires sont fondées soit sur les seuls débits, soit sur les pluies et les débits par des méthodes hydropluviométriques.

Mais quels que soient les modèles utilisés, il existe de nombreuses sources d'erreurs qui sont susceptibles d'affecter la prévision résultante au-delà de sa performance moyenne. Parmi elles figurent naturellement les différentes perturbations sur les données d'entrée, mais aussi l'adéquation du modèle de prévision à chaque événement de crue particulier.

Pour aider le prévisionniste dans sa tâche, des techniques de mise à jour sont mises en œuvre (cf § 2.4.3) conjointement aux procédures automatiques et outils d'aide à la décision. Ceux-ci sont constamment révisés en fonction des progrès effectués dans la représentation des processus hydrologiques et la modification des objets et des contraintes. La première partie de ce chapitre est consacrée à ce problème.

Par ailleurs, sachant que sur les bassins versants ruraux le risque hydrologique résulte de la transformation par le bassin d'un aléa météorologique sous la dépendance de conditions initiales, notre recherche s'est orientée donc naturellement vers l'amélioration des outils de prévision grâce à la caractérisation structurale et hydrique de la couverture pédologique, sa variabilité spatiale et temporelle, et l'étude des mécanismes d'écoulement de crues, particulièrement dans les conditions initiales favorables au risque.

Un autre aspect de la prévention des risques de crues est la protection des personnes et des biens par l'aménagement du bassin versant. Les barrages réservoirs construits en amont de la zone à protéger sont une des principales mesures prises pour se prémunir face au risque

hydrologique. De tels réservoirs sont très sensibles à la précision de la prévision des débits. Pour une protection efficace il faut pouvoir mettre en place un contrôle adaptatif basé sur la prévision des crues en temps réel et gérer le système de réservoirs en mode optimal. Cet aspect a aussi été abordé dans nos recherches en essayant de mettre en évidence le rôle bénéfique que pourrait avoir la télé-détection dans le système de gestion des réservoirs.

- **Prévision des crues en temps réel.** Publications/Communications: [P2], [P3], [P6], [P13], [P14], [P15], [P24], [P46], [P47], [P50], [P51], [P52], [C1], [R1], [R2], [R5].

A court terme, les modèles utilisés pour l'estimation des crues en temps réel dépendent du délai de prévision et de la réponse hydrologique du bassin étudié. Si le délai de prévision est supérieur au temps de concentration du bassin, alors les modèles les mieux adaptés sont des modèles combinant à la fois des modèles de prévision de pluie et des modèles pluie-débit. Si le délai de prévision est plus court que le temps de concentration du bassin et que ce temps est dominé par le temps de transfert dans le système hydrologique, alors ce sont des modèles de transfert de flux qui seront utilisés. Dans le cas où c'est la réponse hydrologique qui domine, ce sont des modèles pluie-débits qui sont mis en œuvre et plus spécifiquement des modèles pluie-débit conceptuels comme ceux décrits dans le chapitre 2.4.2.

Bien adaptés à la prévision en temps réel pour des bassins de moyenne échelle, ces modèles ont montré de bons résultats en prévision (Lettenmaier & Wood, 1992) et ont été utilisés dans plusieurs de nos projets : risques naturels du PNRN [P24], [P47], prévision de crues du PNRH [P46] ou gestion de la ressource de la CEE [P13], [P14]. Ces modèles ne sont néanmoins pas parfaits et pour améliorer leurs résultats, des mises à jour ont été faites au fur et à mesure de la prévision (cf §2.4.3). La mise à jour des débits grâce à des algorithmes spécifiques tels que le filtre de Kalman [P15], [P51], l'ajustement variationnel [P50], [P52] ou les méthodes autorégressives de traitement des erreurs [P2], [P3], [C1], [R1], complexifie la prévision mais augmente significativement sa précision.

Cependant, en temps réel, le prévisionniste n'a que peu de temps pour analyser une situation, traiter les informations et mettre en œuvre les modèles. Pour l'aider à réaliser le diagnostic d'une situation complexe, son analyse doit reposer sur des procédures automatiques et des outils d'aide à la décision bien adaptés. Les recherches menées dans ce domaine ont bénéficié du travail d'un DEA de Paris XII et ont été proposées dans le cadre d'une collaboration entre le CERREVE (ex CERGRENE) et le Service hydrologique centralisateur du bassin de la Garonne de la DIREN Midi-Pyrénées.

L'objectif de la recherche effectuée a porté sur la mise en œuvre d'une procédure de décision réellement adaptée à la prévision des crues en temps réel. En effet, le prévisionniste est conduit souvent à effectuer lui-même des corrections, seulement guidé par sa seule expérience :

Les procédures automatiques de traitement d'erreur généralement mises à sa disposition dans les systèmes de décision sont très performantes lorsqu'il s'agit de corriger des erreurs persistantes et régulières mais réagissent mal aux erreurs accidentelles comme l'absence de données. Dans l'approche proposée, une méthode a été adaptée pour traiter tout type de perturbation et notamment les erreurs accidentelles mettant en défaut les autres systèmes de prévision.

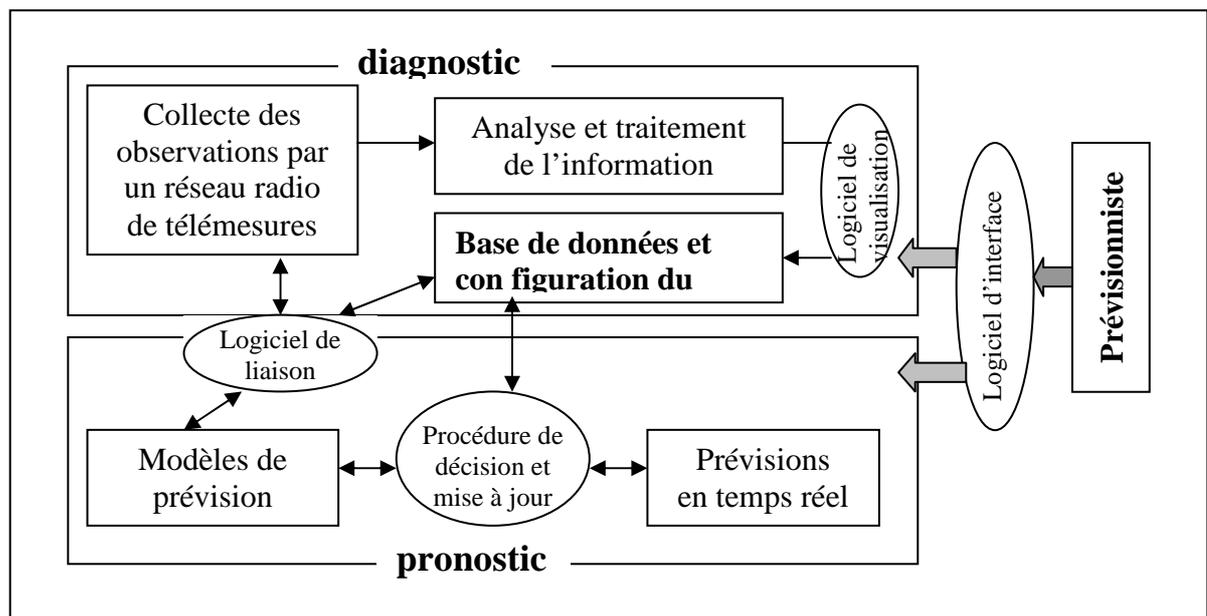
La procédure développée dans cette recherche [P6] a été implantée dans le système de prévision en temps réel du bassin supérieur de la Garonne exploitant le résultat de plusieurs modèles.

Ce système a été conçu en deux étapes, le diagnostic et le pronostic :

Pendant la première étape, après analyse de l'ensemble des informations collectées, les états possibles du système sont déterminés. Un état du système ou configuration correspond à une situation hydrologique et à un ensemble de perturbations sur les données collectées.

La deuxième étape établit, à partir de cette analyse, une prévision, par exemple en calculant des poids optimaux accordés à chaque modèle en fonction des différentes configurations possibles du système. Des mises à jour sont faites ensuite au fur et à mesure que l'information sur les débits arrive.

Afin de mettre en œuvre la procédure de décision, il a fallu adapter certains des outils existants (fig n° 4.16).



([R2],1990)

Fig n°4.16 : Système de décision utilisé pour la prévision des crues sur le bassin supérieur de la Garonne

Ces outils sont :

- Un logiciel permettant de visualiser les informations mises à jour en temps réel pour l'analyse des informations collectées.
- Un logiciel de liaison entre le central de collecte des observations, la base de données et les modèles de prévision de crues pour l'introduction automatique des données des stations d'annonce de crue dans les modèles de prévision.
- Une procédure pour la mise à jour des différents modèles de prévision ayant des échéances de prévision variant de 3 heures à 6 heures. Pour chaque station, il existe plusieurs modèles linéaires qui utilisent des variables explicatives différentes, ceci pour assurer une certaine pérennité de la prévision en cas d'absence de données.
- Un logiciel d'interface qui permet d'activer toutes ces opérations automatiques afin d'en maîtriser l'exécution et l'instant précis où l'on dispose des résultats.

Dans ce système de décision, le pronostic s'est basé sur une procédure mise au point sur le bassin de la Vézère (ROCHE et TAMIN, 1987). Sur la Garonne où elle a été transposée et simplifiée, elle a nécessité une étude complète afin de spécifier de façon détaillée les

différentes hypothèses envisageables pour l'état du système, afin que toutes les perturbations, et les situations hydrologiques puissent être décrites et modélisées [R2].

Pour essayer de prendre en compte les erreurs accidentelles, la procédure s'est appuyée sur une combinaison de plusieurs modèles de prévision en attribuant un poids différent à chaque modèle. Cette méthode modifie la confiance accordée aux modèles selon la façon dont ceux-ci réagissent. Les poids évoluent en fonction de l'état du système de prévision et des performances récentes des modèles.

Du fait de sa composante évolutive, cette technique réagit rapidement aux aléas des mesures sans introduire les oscillations observées avec les traitements automatiques d'erreur classiques.

La prévision finale est donc issue de la meilleure combinaison possible des modèles confrontés aussi bien à une information historique que récente.

Par rapport à la procédure initiale, il y a eu non seulement simplification des procédures de calcul mais également adaptation des principes initiaux. Ceci résulte de la difficulté qu'il y avait à identifier les probabilités de configurations caractérisant l'état du système ainsi que l'échantillon de données destiné à caler les pondérations propres à chaque configuration.

L'implantation de la procédure dans le système de prévision en temps réel du bassin de la Garonne a permis de vérifier ses bonnes performances sur plus de trois ans [P6], [R2]:

Elle a été testée face à deux types de perturbations susceptibles d'intervenir en temps réel : les absences de données et les erreurs de mesure. Les simulations effectuées avec la pondération multimodèles montrent seulement une dégradation de la prévision de 25% dans le pire des cas alors qu'elle atteint 45% pour le meilleur modèle. Dans le cas où les perturbations affectent le meilleur modèle la pondération permet de réduire de 50% la dégradation de la prévision.

En validation [R5], la majorité des anomalies auxquelles devait faire face la procédure ont été observées pendant cette période. Face à ces perturbations la procédure n'a pas été mise en défaut, et elle a permis de meilleures prévisions que celles obtenues avec le meilleur modèle.

Comparativement à des méthodes de changement de modèle telles que le choix bayésien d'un modèle ou la meilleure combinaison des modèles, cette procédure a montré de meilleurs résultats. Ces méthodes peuvent par exemple conduire à des changements brutaux de modèle de prévision, et par conséquent à des discontinuités qualitatives et quantitatives de la prévision.

La pondération multimodèle permet de traiter de façon très satisfaisante tout type de perturbation et notamment les erreurs accidentelles. Elle peut s'appliquer à d'autres bassins à condition que soient exploités plusieurs modèles de prévision utilisant différentes combinaisons d'indicateurs télétransmis, afin d'assurer à la fois une certaine redondance et une certaine complémentarité entre les diverses sources de données.

Grâce à la simplicité de sa mise en œuvre et à son efficacité la procédure développée a été adaptée à d'autres systèmes de prévision français.

Les développements envisagés se basent essentiellement sur l'amélioration des modèles de prévision. En effet, les modèles utilisés par la procédure sont des modèles linéaires très simples qui peuvent être remplacés par des modèles conceptuels pluie-débit plus performants prenant en compte d'autres types de paramètres jouant un rôle essentiel sur l'écoulement. D'autre part, ces modèles qui utilisent différentes sources d'information afin d'assurer une certaine complémentarité entre les données, pourraient prendre en compte d'autres types de

données telles que celles issues de l'observation satellitale et intégrer une composante spatiale jusqu'à présent négligée. Certains de ces points sont discutés dans les paragraphes suivants.

- **Amélioration des outils de prévision de débits.** Publications/Communications: [P13], [P14], [P15], [P16], [P29], [P33], [P35], [P36], [P46], [P47], [P49], [P50], [P52], [C5], [C12], [R17], R[18], R[23], [R25], [R26], [R30], [R31]

Les résultats présentés ici ont bénéficié des travaux de recherche menés dans le cadre de plusieurs DEA de PARIS XI et de PARIS VI ou de thèses (Loumagne, 1988, N.; Chkir, 1994, A.L. Cognard, 1996) au sein de nombreux projets de recherche¹¹ dont le projet pluriannuel « Risques naturels »¹² ayant comme objectif final d'améliorer les outils de prévision et plus particulièrement les modèles utilisés pour la prévision des débits.

Pour atteindre cet objectif, nous avons essayé de confronter les estimations de risques de crues, avec les facteurs explicatifs du fonctionnement des bassins versants, soit au niveau de la transformation pluie-débit, soit au niveau de la caractérisation du bassin versant, afin de mieux intégrer les facteurs de risque évoluant dans le temps ou dans l'espace.

Les conditions initiales concernent surtout l'état de saturation du bassin ou d'une partie du bassin, et à un moindre degré, l'état d'imperméabilisation de la couche de surface. Dans de nombreuses régions, le stockage d'eau mobilisable à court terme intervient surtout dans la couverture pédologique et est limité par la présence, à une profondeur souvent faible, d'un horizon d'accumulation d'argiles relativement imperméable. La recherche sur le risque hydrologique s'est donc orientée vers la caractérisation structurale et hydrique de la couverture pédologique, sa variabilité spatiale et temporelle, et l'étude des mécanismes d'écoulement de crues, particulièrement dans les conditions initiales favorables aux écoulements de surface et dans le sol [P47].

- *La première étape a été centrée sur des études de variabilité temporelle:*

L'une des difficultés des méthodes hydro-pluviométriques utilisées en prévision est la saisonnalisation. Si l'on traite ensemble toutes les crues, on a des conditions de saturation initiale très dispersées. Si l'on distingue les saisons, on a, de façon plus ou moins contrastée selon le climat, une période hivernale, à saturation forte et pluies modérées, et une période estivale, à saturation faible et fortes pluies.

Les recherches entreprises ont consisté à détecter les comportements saisonniers non directement pris en compte dans la modélisation pluie-débit.

La disponibilité de longues chroniques de données, tant en pluie qu'en débit sur l'Orgeval, a permis d'identifier des comportements saisonniers, pouvant être reliés à des évolutions physiques, comme la variation de porosité du sol [P35], [P36].

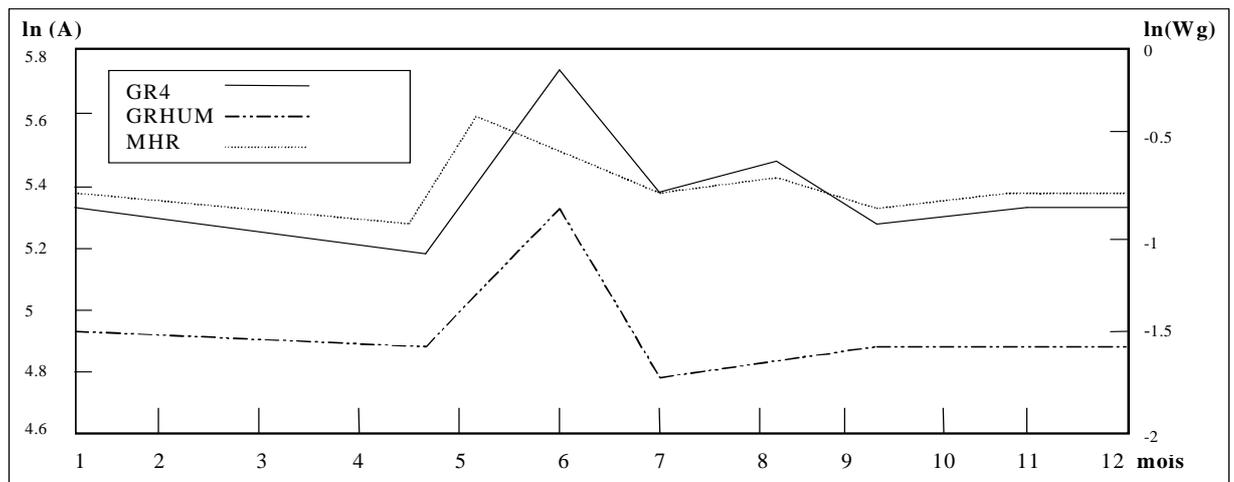
En calant les valeurs mensuelles des paramètres gérant la fonction de production des modèles, paramètres qui d'habitude sont considérés comme constants sur l'ensemble de l'année, une augmentation de la capacité de stockage de la couche pédologique entre avril et juin, a été mise en évidence par des modèles d'architecture différentes GR4, MHR (Leviandier *et al*, 1994) et GRHUM sur 20 années d'observations (fig n°4.17).

La variation de la capacité de stockage entre avril et juin est par ailleurs cohérente avec la plupart des mesures de porosité du sol faites dans différentes unités pédologiques (Gomendy, 1996, [R17]), à condition d'agglomérer les porosités supérieures à 1 micron. Les variations de porosité sont non seulement spatiales (haut de pente, bas de pente) mais aussi saisonnières.

¹¹ Les projets ERS1 et ERS1/ERS2 soutenus par l'ESA, le CNES et le PNTS, en collaboration avec l'INRA, le CETP, GEOSYS, et le CESBIO/CNRS, le projet PNRH soutenu par l'Insu, en collaboration avec le CETP.

¹² Soutenu par le PNRN « Influence de l'état hydrique des bassins sur les risques de crues. Comportement hydrologique des bassins versants » en collaboration avec le CETP/CNRS et le CNRS/CPB de Nancy.

L'augmentation de porosité étant liée au travail du sol puis sa diminution à la formation d'une croûte de surface.



([R17], 1997)

Fig n°4.17: Variation saisonnière des paramètres représentant les capacités de stockage du réservoir sol sur 20 années d'observation: A pour les modèles GR4 et MHR et Wg pour le modèle GRHUM.

L'étude de saisonnalisation, tant sur les paramètres des modèles hydrologiques que sur les caractéristiques pédologiques, a montré que la capacité de rétention de la couverture pédologique ne pouvait être considérée comme constante tout au long de l'année hydrologique, il faut donc pouvoir prendre en compte ses variations saisonnières dans la modélisation des écoulements [R18], [R23].

Si, à court terme, les conditions initiales sont prépondérantes dans la formation des crues, leur évolution à long terme est basée sur l'étude des non-stationnarités d'origine climatique ou humaine. De nombreuses études largement décrites par Cosandey et Robinson, (2000) ont montré les conséquences de ces non-stationnarités sur l'écoulement. Cependant, cette question n'a été étudiée que de façon relativement sommaire sur l'Orgeval, pour éviter simplement des erreurs grossières qu'entraînerait de telles perturbations. Le calage de modèles pluie-débit sur des périodes glissantes de 3 ans, sur le bassin de l'Orgeval, n'a pas fait apparaître de tendance nette, si ce n'est une diminution des temps de transfert au cours des 10 dernières années, qui peut être mise en relation avec des recalibrages de rus [P35], [P36]. Ce phénomène, qui pourrait perturber des dispositifs d'alerte, ne joue pas, à l'échelle du bassin considéré, sur les risques et dommages éventuels occasionnés, ce qui nous a permis de considérer par la suite les phénomènes comme stationnaires.

Cependant pour étudier l'impact du changement climatique, le processus météorologique devrait être pris en compte de façon beaucoup plus détaillée, dans ses variations spatio-temporelles et dans ses composantes physiques (pluie, neige, évaporation, etc...), c'est un de nos objectifs à plus long terme (cf chapitre 3).

- La deuxième étape a été centrée sur des études de variabilité spatiale:

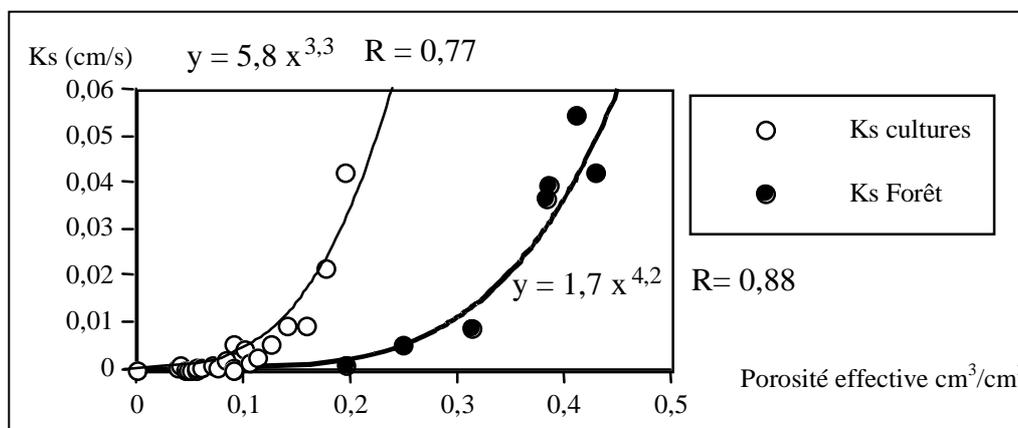
Il est apparu à l'issue de la première étape que les variations temporelles de l'état initial du sol était un facteur explicatif déterminant dans la formation des crues, dont la prise en compte pourrait améliorer l'estimation des risques, au moins à court terme.

Dans le but de mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin vis à vis des variations spatiales de ses paramètres de surface, une étude sur les différences de régime

hydrologique observées sur des bassins emboîtés (sous-bassins inclus l'un dans l'autre) a été entreprise. Elle a permis de montrer l'influence de l'hétérogénéité physique des bassins sur la sensibilité de leur comportement hydrologique [P47], [P49], [C12].

La différence de régime hydrologique des bassins emboîtés s'explique par le rôle régulateur des sols dans la relation pluie-débit. La quantification des unités pédologiques a mis nettement en évidence des zones plus perméables dans un cas que dans l'autre affectant ainsi les lames d'eau écoulées à l'exutoire du bassin [R26], [R31].

D'autre part, une étude des relations structures-transferts effectuée à partir de toposéquences représentatives des unités pédologiques a montré les liens existant entre la conductivité hydraulique à saturation et la macroporosité des unités pédologiques, et mis en évidence un seuil critique d'écoulement pour des valeurs caractéristiques du système sol-végétation pour sols cultivés ou forestiers ainsi que la loi de puissance qui détermine l'écoulement au-delà de ce seuil (fig n° 4.18).



([P47], 2000)

Fig n°4.18: Loi de puissance entre la conductivité hydraulique à saturation K_s et la porosité effective

Cette approche a bien montré l'intérêt de la prise en compte de la répartition spatiale des unités pédologiques et la connaissance de leurs propriétés hydrauliques. Cette démarche va dans le même sens que l'approche mettant l'accent sur la discrétisation du bassin en zones contributives, zones saturées, qui pour l'essentiel contribuent à l'écoulement (Beven et Kirkby, 1979, Gascuel-Oudou et al, 1996).

Jusqu'à présent dans nos travaux [P13], [P14], [P15], [P29], [P33], [P46], [P50], [P52], les variations spatiales de l'état hydrique au sein du bassin n'ont été prises en compte que par un indicateur global dérivé de l'observation satellitale. Cet indicateur représentatif de l'état de saturation est un intégrateur des variations observées sur l'ensemble de la zone étudiée [R25], [R30]. Il a montré son intérêt pour la prévision des débits ainsi que pour la remise à jour des états internes du système [P15], [P46], [P50], [P52] (cf chapitre 2.4.3).

Un indicateur de saturation global, s'il est connu à un pas de temps compatible avec les modèles de prévision, peut être utilisé comme une information supplémentaire sur le risque de crue. Un des objectifs affichés du projet AIMWATER [P13], [P16] est de fournir aux utilisateurs des informations spatialisées sur les conditions de saturation initiales des bassins versants étudiés.

Pour cela, des cartes d'humidité de surface réalisées à l'aide d'un système d'information géographique peuvent être fournies, comme cela a été le cas pour 21 dates sur une période de 3 mois à partir d'images ERS1 sur la Bretagne, où des comparaisons d'état de saturation entre bassins ont été possibles à partir d'une image de référence [P29], [P33], [C5]. Le problème du pas de temps d'acquisition et du traitement reste entier lorsqu'il s'agit de faire de la prévision en temps réel.

- ***Gestion des réservoirs pour la prévision des débits. Publications/Communications:*** [P11], [P12], [P14], [P15], [P16], [P40], [P41], [P42], [P43], [P44], [P45], [P50], [P51], [P52], [C14], [R27], [R28], [R29], [R32]

Les ouvrages d'aménagement du bassin versant tels que les barrages-réservoirs sont un des éléments majeurs du système de gestion de la ressource en eau. Ces réservoirs sont en général à buts multiples et ont des missions souvent antagonistes tels que le soutien d'étiage, l'irrigation ou le contrôle des crues.

La régularisation des débits pour le contrôle des crues peut être la finalité première des aménagements, mais peut aussi être parfois la conséquence secondaire d'autres objectifs.

Cependant, ces objectifs contradictoires peuvent être conciliés grâce à la saisonnalisation des flux si les gestionnaires ont accès à des outils de prévision suffisamment fiables pour les aider à prendre des décisions complexes. Pour le contrôle des crues, il faut asservir le maintien de la capacité de stockage à la prévision des débits à venir : si un gestionnaire utilise trop tôt la capacité de stockage du barrage il ne peut plus rien faire au moment de l'arrivée des nouveaux flux, et s'il l'utilise trop tard il ne peut pas faire jouer de façon optimale son rôle de protection contre les crues.

En l'absence d'outils de prévision fiables les gestionnaires adaptent leurs règles de gestion sur la base d'objectifs fondés sur des études statistiques d'événements passés ce qui manque de flexibilité. En particulier ils n'ont pas la possibilité de prendre en compte les événements futurs ou les périodes de répit. Des outils améliorés pour la gestion doivent permettre la réduction des incertitudes sur les informations qui leur sont disponibles en période de crise. C'est sur la base d'un tel postulat que des recherches ont été menées dans ce domaine.

Les recherches en cours s'inscrivent dans le cadre d'un projet financé par la commission européenne¹³ pour encourager l'utilisation de données d'observation de la Terre au sein de la communauté de gestionnaires de barrages-réservoirs.

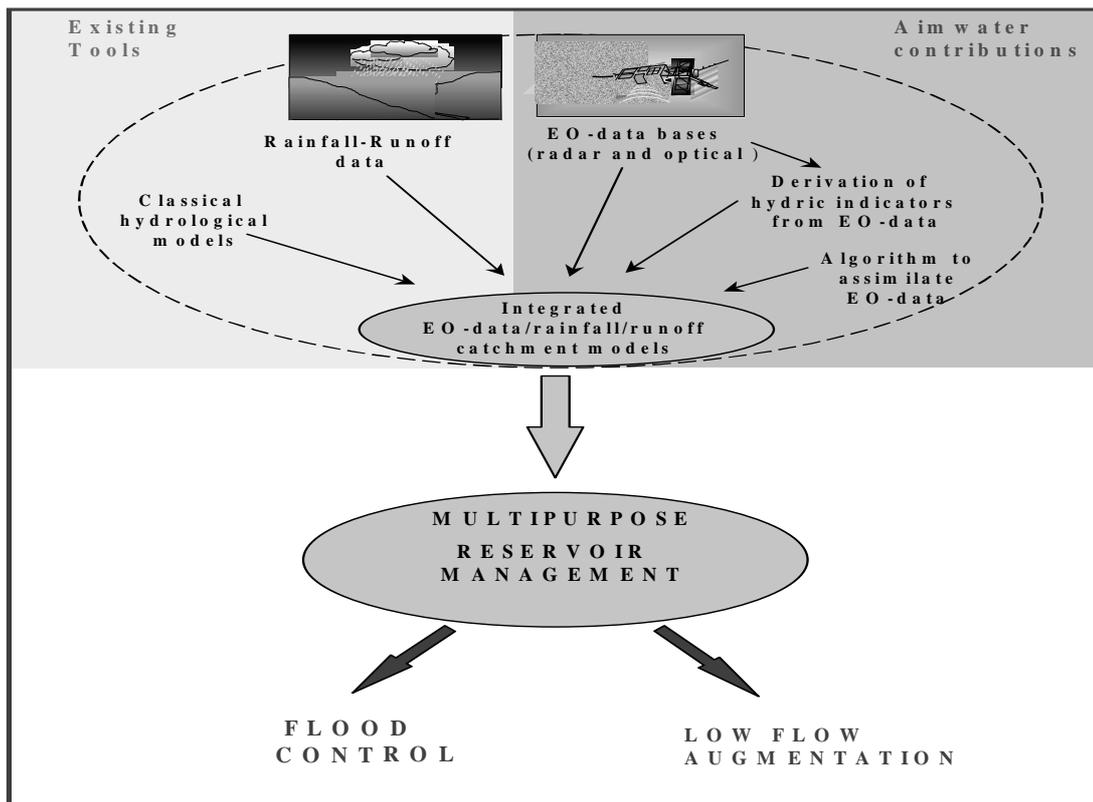
Ce projet a été proposé dans le but de montrer les possibilités d'amélioration des outils de prévision hydrologique en s'appuyant sur l'intégration de données de télédétection dans des modèles communément utilisés pour la gestion de la ressource en eau.

Une méthodologie dont le schéma de principe est donné sur la figure n°4.19 a été proposée pour déterminer l'humidité des sols à l'échelle du bassin versant à partir de données d'observation spatiale et pour étudier les possibilités d'amélioration de la prévision des crues grâce à l'assimilation de cette information dans les modèles hydrologiques.

Tout d'abord développée sur le bassin versant de la Seine en amont de Paris, où des barrages-réservoirs sont utilisés pour contrôler les crues et soutenir les étiages, avant d'être appliquée sur le bassin de l'Arade en Algarve, au sud du Portugal, cette recherche bénéficie du travail de deux post-doctorats.

¹³ AIMWATER (Contrat n° ENV4-CT98-0740 (DG12-ESCY)) en collaboration avec l'IH de Wallingford (UK), l'université de Valence (Sp), l'université indépendante de Lisbonne(Pt), le CETP/CNRS de Vélizy l'Associao de Regantes (Pt), l'institution interdépartementale des barrages réservoirs de la Seine.

La méthodologie est fondée sur plusieurs étapes successives, la première étape est le traitement des images satellitales pour le calcul d'indicateurs d'état hydrique du sol à l'échelle du bassin versant [P11], [P40], [P45]. La deuxième étape, est l'inversion de cette nouvelle information et son utilisation afin d'améliorer les simulations des débits à l'exutoire du bassin [P12], [P41], [P42]. Une autre étape concerne la mise au point de techniques d'assimilation de cette information pour la mise à jour des prévisions de débits à l'exutoire du bassin [P14], [P15], [P16], [P43], [P44], [P50], [P51], [P52]. La dernière étape étant l'évaluation des améliorations apportées dans le système opérationnel de gestion des barrages réservoirs [R27], [R28].



([R27], 1999)

Fig n° 4.19: Schéma de principe de la méthodologie développée dans le cadre du projet européen AIMWATER

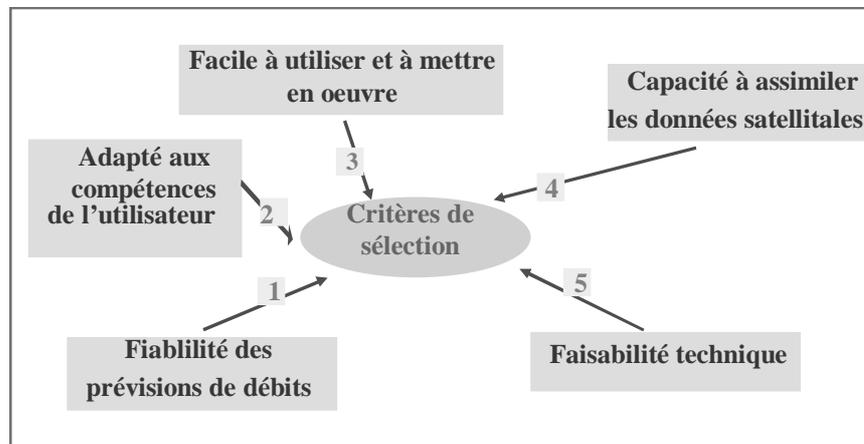
La définition des besoins des utilisateurs a été une étape préalable avant l'application de la méthodologie proposée. Malheureusement, les besoins des gestionnaires ne sont pas toujours clairement définis et il a fallu coupler une approche qualitative à une approche quantitative afin de traduire en langage scientifique les demandes des gestionnaires pour leur proposer des outils adaptés.

Dans ce projet de recherche, les outils de prévision ont été sélectionnés en considérant plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs (fig n° 4.20).

Les outils existants ont tout d'abord été étudiés ainsi que leurs défaillances vis à vis des besoins exprimés. Puis, de nouveaux outils s'adaptant mieux aux contraintes et aux données du projet ont été sélectionnés [P14], [C14], [R28].

Pour les réservoirs en amont du bassin Seine, l'exploitation journalière est conduite en suivant une courbe d'objectif de remplissage et de vidange en l'absence de crues et d'étiages prononcés. Lorsqu'une crue importante survient, le débit total laissé en rivière à l'aval de

l'ouvrage est limité à une valeur dite débit de référence. Les lâchures se basent sur des règles de gestion en avenir déterminé (H.J. Morel-Seytoux, 1998). En temps réel, leur gestion ne s'appuie pas sur des modèles de prévision mais sur des simulations préalables de la réponse du système.



([R28], 2000)

Fig n° 4.20 : Critères de sélection des outils de prévision pour la gestion des réservoirs

Dans le sud du Portugal aucun outil de prévision n'est utilisé et les gestionnaires s'appuient seulement sur leur connaissance empirique du système hydrologique.

Dans ce cas, les outils de prévision étant quasiment inexistant, le projet devait pouvoir leur fournir des modèles fiables en termes de prévision des débits. Ces modèles devaient être très simples, faciles à comprendre et à mettre en œuvre, ne demandant pas de moyens de calcul trop importants, ni de données d'entrées trop nombreuses et difficiles à acquérir.

Un autre point à prendre en compte était la capacité des modèles à intégrer un nouveau type de données issues de l'observation satellitale. Dans le projet, les variables pronostiques sont le débit et l'état hydrique, la première étant l'objectif ultime à améliorer tandis que la seconde n'étant qu'une variable intermédiaire pour la mise à jour des débits. Il était donc important que les modèles proposés possèdent des états internes pouvant être reliés à ces deux variables observées.

Le rapport coût/efficacité de la méthodologie proposée devait être aussi pris en compte à l'issue du projet. En effet, si les améliorations apportées par les nouveaux outils n'améliorent que marginalement la qualité du système de gestion, alors ils ne peuvent être considérés comme suffisamment performants pour être intégrés à un système opérationnel.

La sélection a donc été faite parmi une quarantaine d'approches différentes en modélisation, en se fondant sur des critères quantitatifs et qualitatifs [P16], [R28], [R29]. En analysant les résultats de cette comparaison, plusieurs structures de modèles ont pu être recommandées dans le contexte du projet en raison de leurs bonnes performances et de leur robustesse: Deux modèles de la lignée des modèles GR du Cemagref, GR4 (Edijatno et al. 1999) et GRHum (Loumagne et al., 1996), et deux modèles d'origine britannique, IHACRES (Littlewood et al., 1997) et TOPMODEL (Beven, 1997).

Les modèles sélectionnés sont actuellement utilisés en prévision sur les bassins de la Seine et de l'Arade avec mise à jour des débits par assimilation de l'état hydrique dérivé ou non de l'observation spatiale. Les premiers résultats [R32], sont présentés dans le chapitre 2.4.3.

L'intégration de ces modèles de prévision dans le système de gestion des utilisateurs, ainsi que l'évaluation de l'intérêt de la méthodologie mise au point, doit faire partie de la dernière étape de ce travail de recherche. Cette étape comprend le couplage du modèle de

prévision assimilant des données sur l'état hydrique du sol avec le modèle de gestion optimale des réservoirs utilisé par les gestionnaires ainsi que l'estimation du rapport coût d'acquisition des nouvelles données et efficacité accrue du modèle de prévision (cf chapitre 3).

3 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

- **CONCLUSIONS**
- **PROJETS A COURT ET MOYEN TERME**
- **PROJETS A PLUS LONG TERME**

3.1 CONCLUSIONS

Dans chacun des domaines abordés des avancées significatives ont été mises en évidence et exposées dans la synthèse des résultats décrits dans les chapitres précédents. Ces avancées sont brièvement rappelées dans ce chapitre ainsi que les difficultés et limitations rencontrées. De nombreuses questions restent en suspens, certaines ont donné lieu à l'élaboration de nouveaux projets et d'autres ont permis de nouvelles orientations.

Dans mes orientations futures, une plus grande part sera laissée à l'enseignement par une participation au DEA d'hydrologie et hydrogéologie appartenant à l'école doctorale "Dynamique et Physico-Chimie de la Terre et des Planètes" d'Orsay. Du point de vue recherche, les perspectives envisagées sont, à court terme et moyen terme, directement issues des résultats obtenus, alors que les projets à plus long terme sont des élargissements possibles des travaux entrepris au travers de nouvelles collaborations ou de nouvelles thématiques.

Caractérisation des processus de surface:

La caractérisation des processus de surface responsables du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant a permis au travers de l'observation spatiale et de l'étude des modèles de comportement, de confirmer le rôle prépondérant de l'état hydrique du sol dans la formation des écoulements.

Les potentialités des radars à synthèse d'ouverture pour le suivi de l'état hydrique du sol à l'échelle du bassin versant ont été démontrées et ont abouti à l'établissement d'une méthodologie semi-empirique, la méthode multi-selective, permettant d'estimer les humidités superficielles du sol avec des erreurs inférieures à 4%.

Les effets perturbateurs de la végétation et de la rugosité de la surface du sol ont pu être analysés et quantifiés pour différentes configurations des radars spatiaux ou aéroportés et ont permis de définir les limites de la méthode d'inversion des données radar. Ces limites sont liées à la densité du couvert végétal et à la géométrie de la surface du sol.

Des relations significatives ont été mises en évidence entre l'état hydrique simulé par un modèle global conceptuel et l'état hydrique observé tant à l'échelle ponctuelle qu'à celle d'un bassin versant:

A l'échelle ponctuelle, le modèle hydrologique développé a montré une meilleure aptitude à suivre les variations annuelles de l'état hydrique pour les couches de sol profondes que pour les couches superficielles. Ceci s'explique par une plus grande variabilité spatiale de l'humidité du sol en surface qu'en profondeur. Ces mesures sont néanmoins un bon indicateur des variations temporelles de l'état hydrique du bassin et elles ont permis d'établir des relations de contraintes entre états internes simulés et observés.

Au sein d'un bassin versant, l'observation satellitale par hyperfréquences actives intègre les variations spatiales de l'état hydrique superficiel observé. Celui-ci est alors plus représentatif du comportement global du bassin simulé par le modèle que les mesures ponctuelles. Cependant, cette information ne peut venir qu'en appui à la modélisation car la fréquence d'acquisition d'une telle observation n'est pas actuellement suffisante pour alimenter en données d'entrées les modèles simulant les processus hydrologiques.

De nombreuses questions sont encore à résoudre concernant l'opérationnalité de la méthode d'inversion des données radar : Peut-elle être utilisée en temps réel? Peut-elle être étendue à l'ensemble de l'année agricole?

Comment étendre les algorithmes mis au point à des bassins au relief marqué et au couvert dense?

Quels sont les intérêts respectifs des états hydriques des couches de surface et profondes pour la simulation des écoulements?

Modélisation Pluie-débit:

La robustesse et l'efficacité des modèles pluie-débit conceptuels pour la simulation des débits à l'exutoire d'un bassin ont été démontrés à plusieurs reprises dans nos travaux. Il s'est avéré que l'introduction d'une nouvelle information non prise en compte jusqu'à présent dans ces modèles pouvait améliorer significativement la modélisation des débits notamment en période de reprise des écoulements.

Cette information sur l'état hydrique du bassin issue de l'observation ponctuelle ou spatialisée a été introduite dans un modèle mis au point au cours de nos travaux, couplant un modèle conceptuel pluie-débit à un schéma de surface. Ce couplage a permis de simuler l'évolution de l'état hydrique du sol pour la couche de surface et racinaire et de mieux contrôler les états internes du système.

Grâce aux bonnes performances de ce modèle tant du point de vue de la simulation des débits que de la simulation de l'état hydrique des couches de surface et profondes, des relations de passage ont pu être établies entre états du système observés et simulés en vue d'applications à l'assimilation de données.

Une comparaison entre modélisation conceptuelle globale et distribuée a mis en évidence les liens existants entre les degrés d'hétérogénéité des bassins et le type de modélisation choisi en fonction de la taille du bassin et de sa couverture pédologique.

La confrontation des différentes approches de modélisation avec les caractéristiques physiques des bassins a permis d'établir des liens entre les simulations du modèle et certains descripteurs pertinents du comportement hydrologique du domaine étudié.

Ces travaux ont été à l'origine d'un travail de régionalisation des paramètres du modèle global en vue d'une transposition à d'autres bassins versants et à l'étude du comportement régional des approches globales et distribuées. Cependant, aucune relation n'a pu mettre en évidence une tendance régionale nette permettant d'appliquer le modèle global sans calage préalable.

Des questions demeurent donc sur la possibilité d'établir des liens entre paramètres du modèle conceptuel global et caractéristiques physiques du milieu étudié. Peut-on transposer le modèle sur des bassins non jaugés?

A l'échelle régionale doit-t-on décomposer le bassin en sous-ensembles en présence d'hétérogénéités marquées?

Quelles autres variables explicatives du comportement hydrologique du bassin peuvent-elles être introduites comme variables pronostiques du modèle?

Assimilation de l'état hydrique dans un modèle pluie-débit:

Les données d'état hydrique du sol ont été introduites dans une procédure de mise à jour d'un modèle conceptuel pluie-débit afin de contrôler la dynamique du système hydrologique modélisé. Deux approches ont été développées pour corriger la trajectoire des états internes du modèle à partir d'observations externes:

Dans la première approche, la méthode variationnelle, les mesures d'état hydrique ont été prises en compte à travers l'établissement de relations de contraintes entre états du système et observations. Dans un premier temps, l'optimisation des conditions initiales en début de la période d'assimilation a été obtenue en minimisant une fonction coût prenant à la fois en compte les erreurs sur les débits et sur les états hydriques pour une période précédant la

prévision. Les premiers résultats obtenus ont montré qu'une telle procédure se justifiait non seulement par rapport à une prévision naïve mais aussi par rapport aux résultats obtenus en simulation pour les crues à fort débit de pointe. Les mises à jour des prévisions étant plus efficaces et plus rapides lorsque les humidités sont prises en compte conjointement aux débits. Dans un deuxième temps, l'optimisation des conditions initiales s'est faite en prenant seulement en compte les erreurs sur les débits mais en ajoutant une contrainte supplémentaire pour la simulation des humidités. Dans ce dernier cas, l'assimilation des humidités de surface n'a pas montré d'amélioration significative en prévision des débits.

La deuxième approche, la méthode séquentielle, fondée sur l'application du filtre de Kalman étendu, nécessite le calcul de l'évolution temporelle des incertitudes sur l'estimations des humidités prédites par le modèle. L'ajustement des humidités superficielles par cette méthode a conduit à une augmentation des performances du modèle en prévision de débits. La mise en œuvre du filtre de Kalman a également montré un avantage significatif par rapport à avec une assimilation par mise à jour forcée qui faisant pleinement confiance aux mesures, dégradait les prévisions du modèle. Dans le cas étudié, le modèle a été calé sur une grande série de mesures, les résultats étant robustes. Les corrections des états internes du système étaient faibles, mais ont montré tout l'intérêt qu'elles pouvaient avoir notamment en prévision pendant les périodes de crise.

Les perspectives dans ce domaine portent sur la validation de ces méthodologies d'assimilation pour d'autres bassins versants mais aussi sur les améliorations qui permettraient de les rendre opérationnelles. Il faut notamment résoudre la question de la périodicité optimale d'acquisition des données d'état hydrique du sol afin de déterminer le meilleur rapport entre le coût des données à acquérir et l'importance des corrections apportées aux prévisions.

Il faut aussi répondre aux questions telles que celle des apports respectifs des données ponctuelles et spatialisées pour l'amélioration de la prévision des flux de surface.

Quelles sont les applications possibles pour l'assimilation des données spatiales dans les modèles de fonctionnement et les schémas de surface couplés à des modèles hydrologiques en vue d'étudier le cycle de l'eau à l'échelle régionale?

Gestion de la ressource en eau pour la prévision des débits:

Dans le cadre de la prévision des crues en temps réel, une procédure de décision a été mise en œuvre, basée sur la combinaison de plusieurs modèles de prévision afin de pouvoir prendre en compte non seulement les erreurs persistantes mais aussi les erreurs accidentelles. La procédure de pondération multimodèle a permis de réduire de 50% la dégradation de la prévision lorsque les perturbations affectaient le meilleur modèle. Comparativement à des méthodes de changement de modèle comme le choix bayésien des modèles, cette procédure a montré de meilleurs résultats. Les limites de cette méthode étant liées aux performances des modèles de prévision, des recherches ont été menées sur l'intégration dans ces modèles des évolutions spatio-temporelles des conditions initiales favorables aux risques de crues.

Ces travaux ont mis en évidence le rôle joué par la couverture pédologique sur le comportement hydrologique d'un bassin. Tant la répartition spatiale des unités pédologiques associée à la connaissance de leurs propriétés hydrauliques que les variations saisonnières de leur capacité de rétention se sont avérés être des facteurs explicatifs déterminants dans la formation des écoulements à l'exutoire du bassin. La prise en compte des conditions initiales favorables aux risques ayant essentiellement concerné jusqu'à

présent l'état de saturation du bassin versant dans son ensemble, nos travaux se sont donc orientés plus récemment vers la caractérisation des variabilités des états de surface au sein d'un bassin.

La recherche d'outils de prévision performants et la réduction des incertitudes sur les informations disponibles en période de crise ont permis d'établir une méthodologie destinée à améliorer le contrôle des débits dans un contexte opérationnel de gestion des barrages-réservoirs. Cette méthodologie s'est tout d'abord appuyée sur la sélection de modèles de prévision les mieux adaptés aux besoins des utilisateurs. Cette approche couplant une approche qualitative à une approche quantitative a permis de définir les critères optimaux pour répondre aux contraintes imposées par les gestionnaires. L'inversion d'indicateurs de l'état hydrique à l'échelle d'un bassin et leur assimilation dans les modèles de prévision sélectionnés a constitué la seconde étape de la méthodologie proposée. Les premiers résultats obtenus sont encourageants et doivent aboutir à l'étude des possibilités d'intégration de ces modèles dans les systèmes de gestion ainsi qu'à l'évaluation du rapport coût/efficacité de la nouvelle méthode de prévision.

Dans ce domaine, une des questions à résoudre est celle de l'intégration des variabilités des états de surface dans les modèles hydrologiques. Faut-il adopter l'approche des zones contributives variables ? Quel gain apportera-t-elle par rapport à une information plus globale sur l'état de saturation d'un bassin pour la simulation des écoulements ? Permettra-t-elle de mieux définir le risque ?

Les données spatialisées pourront-elles être utilisées de façon opérationnelle pour la gestion de la ressource en eau ?

Comment mieux prendre en compte à plus long terme les processus météorologiques dans les modèles de prévision ? Les modèles pluie-débit sont-ils sensibles aux variations à long terme de ces processus ? Peuvent-ils être utilisés pour l'étude des impacts sur le changement climatique ?

3.2 PROJETS A COURT ET MOYEN TERME

A partir des questions non encore résolues, trois objectifs principaux ont été suivis pour l'élaboration des projets à court et moyen terme :

- Le premier objectif, ***dans le prolongement des travaux d'assimilation et de gestion de la ressource en eau***, est le développement et la validation de méthodes de prévision de crues performantes fondées sur des modèles conceptuels pluie-débit ainsi que sur la mise au point des techniques de contrôle des débits par des remises à jour des états internes du système hydrologique.

En effet, les limites rencontrées dans l'utilisation opérationnelle des modèles physiques et des méthodes de propagation et d'atténuation d'une onde hydraulique dans un contexte de prévision de crue ou de gestion de réservoirs nous ont conduits à une approche utilisant des modèles pluie-débit simplifiés.

Ces modèles simplifiés ne donnant pas des simulations parfaites des techniques d'assimilation ont été proposés pour mieux contrôler les dérives du système modélisé. Les techniques d'assimilation mises au point sur des sous-bassins de la Seine doivent encore être développées et leur intérêt vis à vis des procédures existantes doivent être démontrées.

Dans ce cadre, la troisième tranche du ***projet AIMWATER*** est consacrée aux problèmes de mise en œuvre des méthodes d'assimilation dans un contexte opérationnel de gestion des réservoirs.

Un autre projet soumis, le projet Risques et Inondations concerne la mise en place d'outils d'aide à la décision destinée à la prévision de crues dans le Bassin Loire-Bretagne.

Les problématiques abordées seront l'étude des ressources confrontées aux besoins dans une perspective de gestion, le développement de modèles conceptuels pluie-débit caractérisant le comportement du bassin comme outils de prévision et le traitement des incertitudes associées.

- Le deuxième objectif est l'avancement dans la recherche de caractéristiques pertinentes du comportement des bassins versants. *Cette orientation ne va pas dans le sens d'une description exhaustive des processus mais plutôt dans le sens d'une détermination des facteurs dominants dans la modélisation de la relation pluie-débit. Comme nous l'avons montré, à l'échelle spatiale du bassin versant, le comportement hydrologique dépend principalement des conditions initiales et plus spécifiquement des états de surface du sol: états hydriques, structuraux, micro-relief et relief qui déterminent le devenir de l'eau précipitée. Prendre en compte la variabilité spatio-temporelle de ces variables dans nos modèles signifie dans une certaine mesure prendre aussi en compte les conditions dont elles dépendent tout en conservant une approche respectant le principe de parcimonie en modélisation hydrologique. Seule la télédétection offre la possibilité d'intégrer simplement ces variabilités au sein d'un bassin grâce à la capacité des capteurs à obtenir des informations spatialisées. Les projets développés dans ce domaine concernent donc une meilleure définition spatio-temporelle des processus de surface, des conditions météorologiques ainsi que des caractéristiques physiques des bassins versants étudiés.*

Le projet ENVISAT et pour partie le projet SMOS s'inscrivent dans le prolongement des travaux entrepris dans ce domaine. Les problématiques abordées seront l'estimation des paramètres pertinents pour la modélisation de l'écoulement et l'analyse des processus à travers une structuration du bassin et une spatialisation de l'information.

- *Le troisième objectif est l'étude des interactions sol-végétation-atmosphère afin de développer un couplage des phases atmosphérique et continentale du cycle de l'eau.* Ce couplage devient nécessaire lorsque l'on veut 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. Ces dernières années, plusieurs expériences et simulations numériques ont montré la sensibilité des champs atmosphériques dans la formulation des processus de surface. Une bonne représentation des flux de surface sur les continents dans les modèles météorologiques est un facteur important de la qualité des simulations de ces modèles et semble être la clé pour mieux comprendre le cycle hydrologique à des échelles régionales ou globales.

La capacité de la télédétection à appréhender les problèmes de disparité et d'interdépendance d'échelles lui permettent de jouer un rôle majeur pour passer de l'échelle locale à l'échelle globale, agréger et désagréger les informations et élargir le champ de connaissances dans les domaines où les mesures hydrométéorologiques classiques n'ont pas pu apporter de réponse satisfaisante.

Notre contribution à cette problématique a été jusqu'à présent assez modeste et s'est limitée à un premier couplage d'une interface sol-végétation-atmosphère à un modèle hydrologique pluie-débit. Son utilisation sans recalage sur une région étendue a montré ses limites comparativement à une modélisation distribuée prenant en compte les hétérogénéités spatiales des paramètres de surface.

Notre recherche sur le couplage des flux hydrologiques et atmosphériques, et la modélisation des processus à une échelle dépassant celle du bassin versant de taille moyenne se poursuivra par une participation au **projet EOS** développé à l'université de Princeton et au **projet SMOS** de l'ESA. Ces projets devraient nous permettre d'avancer sur les questions de régionalisation

et de prise en compte de la variabilité des paramètres de forçage des modèles de l'échelle locale à l'échelle régionale mais aussi sur les effets des couplages hydrologie/atmosphère et la sensibilité de ces modèles aux changements climatiques.

Les projets soumis pour répondre aux objectifs à court et moyen terme et qui sont décrits ci-dessous devraient donc apporter certains éléments de réponse concernant la détermination et la hiérarchisation des facteurs de l'écoulement tant sur le plan des caractéristiques physiques des sols déterminantes, que sur l'approche spatialisée des conditions initiales et des flux de surface aux échelles locales et régionales mais aussi devraient permettre de proposer des méthodes opérationnelles pour la prévision et le contrôle des crues d'un bassin versant.

- Poursuite du projet AIMWATER: 3^e tranche:

Contexte

Cette partie du projet qui doit s'achever en 2002 fait suite aux résultats obtenus lors des premiers travaux présentés dans les chapitres 2.4.3 et 2.4.4 concernant l'évaluation des limites des méthodologies de prévision utilisées, la sélection de modèles de prévision les mieux adaptés aux besoins des gestionnaires et la mise au point de méthodes d'assimilation pour le contrôle des dérives du système modélisé.

Objectifs

Il s'agira dans la dernière partie de ce projet de mettre en évidence l'intérêt de la méthodologie d'assimilation proposée fondée sur la réduction des incertitudes dans l'information disponible pour les gestionnaires, puis de l'intégrer dans les systèmes de gestion existants. Un autre point concernera l'évaluation des bénéfices potentiels obtenus grâce à l'utilisation des modèles de prévision utilisés.

Démarche

Cette partie s'appuie sur une étude comparée des méthodologies d'assimilation développées couplées aux modèles pluie-débit proposés dans le projet: IHACRES, GR4 et GRHUM en référence aux résultats de TOPMODEL. Dans cette étude comparative on étudiera les apports des différentes représentations des relations pluie-débit et des couplages effectués pour intégrer l'état hydrique du sol.

Différents critères évaluant le rapport coût d'acquisition des nouvelles données et efficacité de la prévision seront utilisés pour évaluer la qualité des méthodologies proposées sous deux climats contrastés, humide tempéré (sous-bassins de la Seine) d'une part, et semi-aride (bassin de l'Arade) d'autre part.

Cette étape comprend aussi le couplage des modèles de prévision assimilant des données d'état hydrique du sol avec les modèles de gestion optimale des réservoirs. Un prototype pour la gestion en temps réel issu de l'analyse des besoins exprimés par les utilisateurs sera développé.

Résultats attendus

Le projet devrait apporter aux gestionnaires des outils améliorés pour l'atténuation des effets nuisibles liés aux inondations ou aux longues périodes d'étiages. A l'issue de ce projet, des informations spatialisées sur les conditions de saturation initiales des bassins pourront être fournies aux utilisateurs. Des modèles de prévision plus performants et pouvant s'intégrer dans les systèmes de gestion existants devraient être proposés, assortis d'une évaluation du rapport coût/efficacité de la méthodologie développée.

- Le projet Risques et Inondations:

Contexte

Ce projet soutenu par le MATE et qui doit débiter en 2001 a été soumis en collaboration avec le CEREVE, l'ENGREF et l'université de Laval au Québec. Il s'agit de proposer aux services d'annonce de crues de la DIREN du Bassin Loire-Bretagne des outils de prévision mieux adaptés que ceux dont ils disposent essentiellement fondés sur l'expérience des gestionnaires et sur des méthodes approchées de propagation et d'atténuation d'une onde hydraulique. Une participation à ce projet permettra de valider et d'approfondir les méthodologies proposées pour la prévision des crues dans le cadre du projet AIMWATER. Nous tenterons de répondre aux questions d'opérationnalité des méthodes proposées, d'évaluer les incertitudes associées aux prévisions ainsi que l'efficacité des mises à jour vis à vis des améliorations apportées pour la prévision des crues.

Objectifs

Le projet visera en particulier à comparer et améliorer des outils de prévision des débits fondés sur diverses approches de modélisation pluie-débit destinés à allonger la période d'alerte et de prévision des crues et inondations. Le projet évaluera tout d'abord la capacité prédictive de différentes méthodologies de prévision de crues et caractérisera ensuite les incertitudes associées à la prévision.

Démarche

La mise en œuvre des modèles pluie-débit prendra en compte les caractéristiques des sous-bassins étudiés, en dégagant les variables et processus hydrologiques pertinents et en analysant les grands traits comportementaux.

On identifiera tout d'abord sur la zone d'étude, parmi des modèles conceptuels communément utilisés, le ou les modèles les plus satisfaisants pour simuler le comportement hydrologique des bassins.

On évaluera ensuite différentes méthodologies de prévision de crues, avec d'une part l'application des techniques de mise à jour des modèles conceptuels testées au préalable sur les bassins Seine et d'autre part la mise en œuvre de réseaux de neurones artificiels.

Ces techniques d'assimilation seront appliquées sur des bassins versants de caractéristiques physiques différentes et dans d'autres conditions climatiques que celles rencontrées sur les sous-bassins de la Seine.

Toutes ces techniques seront évaluées comparativement les unes par rapport aux autres: leurs résultats seront comparés d'une part à d'autres méthodes plus rudimentaires de mise à jour des modèles conceptuels (correction des sorties par exemple) et d'autre part aux prévisions réalisées par les services d'annonce de crues de la DIREN avec les dispositions actuelles.

Parallèlement à ces méthodes de mise à jour, on utilisera des approches fondées sur les statistiques bayésiennes pour caractériser les incertitudes associées à la prévision, utiles dans la construction d'outils d'aide à la décision, en particulier pour l'établissement de seuils d'alerte aux populations en périodes de crues.

Résultats attendus

Un des résultats majeurs attendus sera l'évaluation comparative sur des bases quantifiées et homogènes de plusieurs méthodes de prévision des débits, qui sont applicables dans un contexte opérationnel;

Des méthodologies de prévision des débits appliquées au cas de la Loire seront proposées, avec une réflexion sur les avantages et inconvénients de chacune d'elles et leur possibilité d'utilisation dans un service d'annonce de crue.

A l'issue de ces travaux, si les résultats permettent de montrer des améliorations significatives par rapport aux outils hydrologiques actuellement utilisés à la DIREN, il peut être envisagé de transférer ces méthodologies à d'autres services d'annonce de crues en France.

- Le projet ENVISAT:

Contexte

Ce projet soutenu par l'ESA à été proposé en collaboration avec le CETP/CNRS et le BRGM en vue d'approfondir les connaissances déjà acquises sur l'inversion du signal radar pour estimer l'état hydrique du sol et élargir la méthodologie afin d'estimer les états de surface propices aux ruissellements de surface. Ce projet devrait pouvoir répondre aux questions non encore résolues de l'utilisation opérationnelle de données satellitales, de l'intégration des effets d'échelles spatiales au sein du bassin et de la quantification des effets de la rugosité sur le ruissellement de surface.

Objectifs

Il s'agit d'étudier les potentialités du radar spatial qui sera lancé fin 2001 et qui succédera à ERS2 avec des possibilités étendues en terme de configuration du capteur par rapport aux satellites ERS.

Le premier objectif de ce projet est le suivi à moyenne résolution de l'état hydrique de surface. La couverture globale de ce nouveau satellite, permettra le passage de l'échelle du bassin versant à l'échelle régionale. Le second objectif est l'évaluation des potentialités offertes par la configuration multi-angles d'incidence et multi-polarisations pour caractériser la rugosité du sol, accéder aux paramètres de frein ou d'accélération du ruissellement et aux éléments structurants du cheminement de l'eau au niveau du bassin versant afin d'introduire des règles de forçage dans les modèles d'écoulement. et de modéliser le ruissellement de surface.

Démarche

Des images seront acquises en Mode Global (GM) et Large Fauchée (WS) sur les mêmes bassins que ceux utilisés dans le projet AIMWATER. La résolution spatiale moyenne (kilométrique) ne permettra pas la mise en œuvre de la méthodologie de sélection de cibles sensibles mais permettra l'analyse des effets de variations d'angle d'incidence et de polarisation pour une redéfinition de nouveaux algorithmes basés sur les résultats des travaux antérieurs (SIRC/XSAR, Schumullius & Evans, 1997).

Cette approche s'appuiera sur la comparaison des mesures en moyenne résolution (km) avec les simulations de l'état hydrique du modèle GRHUM calé sur les sous-bassins de la Seine et les mesures de vérité-terrain.

L'acquisition de données en Mode Image(IM) haute résolution (m) sur le site test de l'Orgeval permettra de confronter la base de données ERS et ENVISAT. Des interpolations temporelles à partir du modèle hydrologique seront utilisés pour résoudre les problèmes de synchronisation entre les différents modes opératoires et analyser les possibles disparités d'échelles entre les données obtenues à moyenne résolution (GM et WS) et à haute résolution (IM).

Par ailleurs les potentialités de la polarisation croisée et de l'approche des différences angulaires (King et al, 1995) seront utilisées pour le suivi de la macro-rugosité pendant les périodes critiques, printemps et hiver, où le ruissellement de surface est dominant à l'est du bassin Seine. Une approche semi-empirique sera suivie basée sur des modèles de rétrodiffusion du signal radar. Les données en Mode Image (IM) et en Polarisation Alternée(AP) seront dérivées afin obtenir des cartes de ruissellement potentiel.

Résultats attendus

Le bénéfice attendu de ce projet est double: l'accès au suivi des paramètres de surface d'un bassin versant et d'une région, et la possibilité d'intégration des effets d'échelle.

La configuration de ce nouveau radar avec une combinaison d'angles d'incidence et une combinaison de polarisations doit permettre de discriminer rugosité et humidité des sols à l'échelle du bassin.

Sa couverture globale avec une résolution kilométrique permettra une occurrence temporelle plus compatible avec les processus hydrologiques que dans le cas du satellite ERS. Le programme Envisat offrira donc la possibilité d'accéder à la cartographie des états de surface pouvant être utilisés en données d'entrée dans les modèles hydrologiques.

- Le projet SMOS:

Contexte

Ce projet soutenu par l'ESA regroupe de nombreux organismes de recherche tels que le CESBIO, le CETP, l'INRA, le CNRM, le LMD, le LTHE, l'IRD et le CEMAGREF. Cette proposition est basée sur la mise en orbite en 2003-2004 d'un capteur micro-onde passif en bande L qui devrait permettre un suivi des états de surface à faible résolution spatiale (50 km) mais avec une récurrence temporelle de quelques jours. Ce projet devrait pouvoir répondre aux questions de l'utilisation en temps réel des données satellitales, du suivi spatio-temporel des états de surface à des pas de temps compatibles avec les processus hydrologiques et des études du cycle hydrologique des grands bassins pour une meilleure compréhension des processus au niveau régional.

Objectifs

Il s'agit tout d'abord dans ce projet de préparer l'utilisation de données radiométriques satellitales en bande L à l'échelle régionale. L'objectif est d'avancer de façon significative sur les questions qui sont essentiellement liées à l'optimisation des inversions du signal de ce nouveau capteur pour l'analyse de l'effet de la macro-rugosité, du relief et des couverts végétaux denses ainsi que l'analyse de l'impact de la résolution spatiale sur la mesure inversée.

Ce projet portera aussi sur la spatialisation des algorithmes d'inversion qui devra résoudre les problèmes d'estimation de paramètres équivalents et de similarité pour la caractérisation des états de surface des sols et leur couplage avec des modèles hydrologiques sur des bassins versants de quelques centaines de km².

Démarche

La première étape consistera à étudier la capacité multi-angulaire très nouvelle de ce nouveau capteur et à l'utiliser de façon optimale dans les algorithmes d'inversion. Pour cela il faut reprendre l'analyse des données existantes puis définir et effectuer des campagnes de mesures spécifiques permettant d'accéder au contenu en eau du sol et de la biomasse végétale aux échelles locales et régionales.

Pour mener à bien cet objectif nous disposerons d'un radiomètre en bande L qui fonctionnera en continu pendant des cycles végétatifs entiers. Ces mesures en continu permettront de mieux appréhender les phénomènes ponctuels et mal quantifiés actuellement tels que la rosée ou les gelées mais également de quantifier la qualité de l'inversion en termes de variabilité spatiale des états hydriques et de prise en compte des hétérogénéités intra-pixel.

Il importe aussi de mieux comprendre et quantifier l'influence du relief ainsi que les potentialités des mesures sur les couverts forestiers. Pour traiter ces points au-delà de la modélisation théorique, il faudra disposer de données réelles pour valider les modèles de fonctionnement.

Dans le cadre de ce projet, la résolution spatiale moyenne sera de 50 km, ce qui implique une utilisation de ces données à l'échelle régionale. Alors que les méthodes d'analyse du signal et d'assimilation des données pourront être évaluées à l'échelle locale à partir de mesures expérimentales réalisées au niveau parcellaires et du bassin versant de moyenne échelle, la signification du signal intégré à l'échelle régionale ne peut être appréhendée que par un modèle couplé hydrologie/ flux de surface/ émission en bande L, fonctionnant à

l'échelle régionale. Pour cela, nous travaillerons sur les procédés d'agrégation/désagrégation des processus de surface dans un modèle hydrologique couplé à la modélisation des flux de surface sur des bassins versants de grande taille.

La question de l'assimilation des données des états hydriques de surface sera également traitée conjointement avec la réactualisation du contenu en eau du réservoir racinaire à partir de mises à jour séquentielles et variationnelles.

Résultats attendus

L'étude expérimentale et le travail de modélisation doivent contribuer à valider les algorithmes d'assimilation permettant d'exploiter les températures de brillance et à optimiser la configuration des acquisitions satellitales d'un radiomètre en bande L. Une interface couplant des schémas de surface à des modèles hydrologiques sera proposée. Cette interface permettra l'assimilation des températures de brillance pour l'obtention de paramètres de surface, y compris le contenu en eau dans la zone racinaire.

Un modèle couplé hydrologie/ flux de surface/ émission en bande L sera développé et les simulations du contenu en eau dans la zone racinaire seront confrontées aux valeurs obtenues actuellement par assimilation séquentielle dans les modèles opérationnels de prévision de Météo-France.

L'agrégation des points simulés fournira des images du signal micro-ondes qui sera obtenu par le satellite et permettra de définir l'utilisation des données satellitales en météorologie et en hydrologie en fonction des contraintes orbitales (fréquence d'acquisition, angle d'incidence). En particulier, la précision obtenue sur l'estimation du contenu en eau superficiel du sol pourra être évaluée, ainsi que sa signification à l'échelle régionale et son utilisation en assimilation.

- Le projet EOS

Contexte

Ce projet de recherche soutenu par la NASA est un projet développé à l'université de Princeton en collaboration avec l'université de Maryland et de Washington. Il est orienté vers l'étude des variabilité des termes du bilan d'eau et d'énergie à différentes échelles spatiales et temporelles. Suite aux précédents programmes soutenus par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat dans ce domaine, de longues séries de données issues de l'observation spatiale sont disponibles. D'autre part, des avancées récentes pour l'inversion de variables telles que l'humidité du sol, la température de surface ou les flux radiatifs ainsi que le développement de nouveaux capteurs prochainement installés sur des plates-formes satellitales telles que EOS(NASA) ENVISAT(ESA) ou SMOS(ESA) vont permettre d'accéder à de telles variables pour des résolutions et des pas de temps compatibles avec les prévisions météorologiques et hydrologiques de l'échelle locale à l'échelle globale.

Objectifs

Le projet de recherche proposé consisterait à utiliser les données collectées lors des missions satellitales existantes afin d'avancer dans la compréhension des variations spatio-temporelles des processus de surface par le développement et le test de schémas de surface et leur incorporation dans des modèles hydrologiques du niveau local au niveau régional puis global. L'objet final étant d'essayer de répondre aux questions qui demeurent sur le rôle joué par les caractéristiques des bilans hydriques et d'énergie sur les variations interannuelles de climat et les conséquences du changement des conditions de surface.

Démarche

Ce projet s'appuie sur des travaux antérieurs de l'équipe proposante pour le développement et la validation des modélisations de processus de surface à partir de données à des échelles

locales (Liang et al, 1996). Il s'appuie aussi sur la mise en œuvre de paramétrisations de modèles hydrologiques à des échelles régionales (Wood et al, 1997) et enfin sur des simulations à partir de l'observation spatiale des flux hydriques et d'énergie à des échelles globales (Dubayah et al, 1997).

Notre contribution dans ce domaine serait de tester les processus hydrologiques développés dans chaque type de modélisation et d'évaluer leur intérêt vis-à-vis des différentes échelles spatio-temporelles grâce aux données et résultats issus des projets ENVISAT et SMOS.

La confrontation des différents schémas de surface et des différentes approches globales ou distribuées développées par les deux laboratoires (Princeton-CEMAGREF) permettra de clarifier les dépendances entre les réponses observées aux échelles globales vis à vis des hypothèses formulées aux échelles locales ainsi que de mettre en évidence les paramètres de surface pertinents pour l'hydrologie et la gestion des ressources en eau tant aux échelles spatiales que temporelles.

Résultats attendus

Une meilleure intégration des processus hydrologiques dans les schémas de surface peut apporter une contribution cruciale à la prévision des changements climatiques interannuels et globaux et permettre un rapprochement entre modélisations hydrologiques et météorologiques.

3.3 PROJETS A PLUS LONG TERME

Mes activités de recherche à plus long terme s'inscrivent dans une démarche préalablement initiée dans les derniers projets soumis et dont les orientations reposent sur une extension des méthodologies utilisées pour la gestion de la ressource en eau, une plus grande interdisciplinarité et l'ouverture à d'autres thématiques dans le cadre de nouvelles collaborations (tableau n°2).

<i>Orientations</i>	<i>Objets de recherche</i>	<i>Méthodes</i>	<i>Domaines</i>	<i>Collaborations</i>
<i>Extension des méthodologies</i>	<i>Bassin versant Relations pluie-débit</i>	<i>Observation spatiale Modèles Pluie-débit</i>	<i>Processus dominants</i>	<i>CETP, CESBIO, BRGM</i>
	<i>Etats internes</i>	<i>Assimilation Quantification des incertitudes</i>	<i>Prévision des crues Gestion des réservoirs</i>	<i>CEREVE, ENGREF DIREN, IIBRBS, CEH, Univ. Laval</i>
<i>Plus grande interdisciplinarité</i>	<i>Interface sol/atmosphère</i>	<i>Couplages de modèles hydro/météo</i>	<i>Hydrologie régionale</i>	<i>CNRM, LTHE, CETP, LMD</i>
	<i>Texture, structure et rugosité du sol</i>	<i>Prise en compte d'hétérogénéités spatiales</i>	<i>Ruissellement de surface</i>	<i>CNRS/CPB BRGM, INRA</i>
<i>Ouverture à d'autres thématiques</i>	<i>Bilans hydriques et d'énergie</i>	<i>Changement d'échelles agrégation/désagrégation</i>	<i>Changement climatiques</i>	<i>Univ. Princeton, Washington, CNRM</i>
	<i>Conditions météorologiques</i>	<i>Modèles spatialisés Indices de similarité</i>	<i>Impacts sur le cycle hydrologique</i>	<i>IRD Univ Laval</i>

Tableau n°2: Orientation des recherches à plus long terme

Extension des méthodologies utilisées pour la gestion de la ressource en eau

La connaissance s'acquiert par un processus interactif entre observations et modélisations. 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 hydrologiques pour une meilleure compréhension des *relations* de transformation *pluie-débit*. Cet axe de recherche s'appuie donc sur l'acquisition de données environnementales en quantité et qualité suffisantes pour alimenter les modèles de comportement.

Dans ce domaine, la *télé-détection*, grâce en particulier aux capteurs tout temps en hyperfréquences, peut jouer un rôle clé pour fournir les données nécessaires à l'élargissement du champ de connaissances sur les *processus hydrologiques dominants* au sein d'un *bassin versant*. Cependant, si ces dernières années des progrès considérables ont été faits sur la compréhension du signal établissant les configurations optimales pour l'accès à un paramètre donné, ces paramètres sont souvent ajustés aux données expérimentales et les algorithmes sont difficilement généralisables à des zones où ils n'ont pas été calés. Ainsi, au-delà des approches semi-empiriques, des progrès sont à faire dans la modélisation théorique des interactions cibles/signal. Les travaux s'orientent donc vers une meilleure paramétrisation des structures sol/végétation et un développement des complémentarités entre physique du signal et mesure expérimentale, notamment pour la modélisation des surfaces hétérogènes, la prise en compte de la rugosité, l'influence du relief et de la végétation grâce aux collaborations avec *le CETP, le CESBIO et le BRGM*.

Les *modèles hydrologiques pluie-débit* ne sont pas toujours très bien adaptés au couplage avec la télé-détection spatiale. Les perspectives dans ce domaine sont de tendre vers la mise au point de méthodologies couplant données sol et satellitaires tout en intégrant les changements d'échelle et en utilisant des séries temporelles concomitantes à différents pas de temps. Plusieurs techniques de couplage sont possibles: les données peuvent être utilisées soit pour alimenter les modèles si elles sont acquises à des pas de temps compatibles avec la modélisation hydrologique soit pour déterminer certains paramètres par inversion du modèle et comparaison avec les observations ou bien pour réajuster les variables du modèle en recalant ses dérivées par *assimilation* de données externes et mise à jour des *états internes*. Cette dernière technique plus prometteuse doit encore être développée et validée avant de pouvoir démontrer l'amélioration de ses performances pour des applications opérationnelles telles que la *prévision des crues* ou la *gestion des réservoirs*. Un effort particulier dans le domaine de l'assimilation des données vue sous l'angle de la *quantification des incertitudes* de prévision est aussi important pour progresser dans la conception et le transfert d'outils performants aux *DIREN* ou aux organismes gestionnaires de barrages tels que *l'IIBRBS*. Des collaborations avec *le CEH, le CEREVE, l'ENGREF, et l'Université de Laval* sont prévues pour avancer dans ce domaine.

Une plus grande interdisciplinarité

Les dynamiques de la biosphère et de l'atmosphère évoluent de façon couplée par l'intermédiaire des processus régissant les flux à l'interface sol/végétation/atmosphère. Par effet de rétroaction, les modifications des interactions entre biosphère et atmosphère peuvent donner lieu à une modification du fonctionnement du cycle hydrologique.

Il importe donc en premier lieu de bien comprendre ces interactions dans le temps et dans l'espace si l'on veut pouvoir modéliser les processus à des *échelles régionales* et évaluer les conséquences sur la ressource en eau, des évolutions qui pourraient intervenir dans le régime climatique, en particulier dans les caractéristiques de l'interface avec l'atmosphère.

Il convient donc de développer d'une part des méthodologies qui permettent un passage réaliste de l'échelle des transferts vers l'atmosphère à celle des écoulements au sein d'un

bassin versant et d'autre part de traiter les impacts des changements des conditions de surface sur le cycle de l'eau.

Dans nos travaux de recherche antérieurs, des liens avaient été établis avec les météorologues du **CNRM** et le département Interactions Océan/Terre/Atmosphère *du CETP*, pour l'intégration d'un schéma de surface dans un modèle pluie-débit. Nous envisageons dans le futur de renforcer ces liens et d'établir des passerelles de plus en plus nombreuses avec les atmosphériciens pour essayer de modéliser le ***couplage*** des phases ***atmosphérique et hydrologique*** du cycle de l'eau à mésoéchelle. Dans ce sens des collaborations sont envisagées notamment avec le **LMD** et le **LTHE** dans le cadre du projet SMOS.

Le sol, comme nous l'avons montré dans nos travaux antérieurs est aussi un élément clé des interactions biosphère-atmosphère. Les conditions initiales et plus spécifiquement les états de surface du sol: états hydriques, structuraux, micro-relief et relief déterminent le devenir de l'eau précipitée et exercent un contrôle sur la partition entre ruissellement, infiltration et évaporation. La prise en compte dans les schémas de surface de l'évolution de ces états sous l'effet des conditions climatiques est essentielle pour estimer leur impact sur le cycle de l'eau et les flux associés. Des collaborations avec les pédologues du **CNRS/CPB** avaient montré comment la dynamique de ***la texture, la structure et la rugosité du sol*** agissait comme accélérateur ou frein pour l'écoulement de surface et de subsurface. La prise en compte des ***ruissellements de surface*** est encore mal intégrée dans les modèles couplés de mésoéchelle. Les avancées dans ce domaine dépendent étroitement des données disponibles et les progrès 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. La télédétection semble pouvoir appréhender ***l'hétérogénéité spatio-temporelle*** des états de surface et peut permettre de déterminer les états initiaux nécessaires à l'inversion des modèles couplés. Des progrès sont donc attendus dans ce domaine par le renforcement des liens avec des spécialistes des sciences du sol de **l'INRA** et du **BRGM**.

Ouverture à de nouvelles thématiques

*Les nouvelles collaborations telles que celles établies avec le **CNRM**, l'**Université de Princeton** ou de **Washington** et les plus récents projets soumis tels que **SMOS**, **ENVISAT**, **EOS** nous ont poussés à élargir les thématiques sur lesquelles nous avons travaillé jusqu'à présent: modélisation des processus à l'échelle du bassin versant, variations temporelles des états de surface, applications à la prévision des crues et à la gestion des réservoirs.*

*Les nouvelles thématiques envisagées concernent des problèmes environnementaux dans des domaines tels que l'étude des variations climatiques et l'évolution spatio-temporelle des flux de surface spécialement pour répondre aux problèmes de **changement de climat**. Les domaines privilégiés sont ceux de l'hydroclimatologie, de la télédétection, de l'analyse des données environnementales, et des relations entre l'hydrologie et les changements de climat. Ce travail étant centré sur les **bilans hydriques et d'énergie** provenant des interactions surface/atmosphère à **différentes échelles spatiales et temporelles** impliquant des recherches sur **l'agrégation et la désagrégation des processus**.*

Une autre thématique qui est bien sûr très liée à la première est l'analyse de l'impact des évolutions climatiques ou anthropiques sur la ressource en eau. Les efforts de recherche doivent se porter sur le passage de variables météorologiques à des variables hydrologiques et, à terme, pouvoir anticiper la réponse des écosystèmes aux contraintes externes pour fournir des éléments de décision en vue d'une meilleure gestion de la ressource.

L'influence directe de cet impact sur les *conditions météorologiques* doit être clarifiée car elle est pour l'instant difficile à transcrire dans les paramètres des modèles hydrologiques globaux. La faible sensibilité de ces modèles aux hétérogénéités spatiales et aux évolutions inter-annuelles et saisonnières de l'évapotranspiration et des précipitations fait douter de leur capacité à prévoir les effets de changement de climat et à connaître leur *impact sur le cycle hydrologique*.

Une réflexion doit donc être menée en collaboration avec *l'Université de Laval et l'IRD* sur la capacité à prendre en compte de manière effective ces variables de forçage, à travers l'intégration de leur variabilité spatio-temporelle soit dans des *modèles* pluie-débit plus *spatialisés*, soit par l'intermédiaire des paramètres équivalents ou d'*indices de similarité*.

4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SIGLES

REFERENCES

- [1] Plan stratégique Cemagref . Le projet 1999-2002, 16 pg., ed. Cemagref.
- [2] Plan stratégique Cemagref. Les milieux aquatiques 1999-2002, 34 pg., ed. Cemagref.
- [3] Thème de recherche Transfeau , 25pg., publication interne, département GMA.
- [4] Perspectives de développement de l'activité hydrologie à Antony, 8pg., publication interne, UR QHAN.
- Ambroise B., Perrin J.L., Reutenauer D., 1995 :Multi-criterion validation of a semi-distributed conceptual model of the water cycle in the fecht catchment. *Water Resour. Res.*,31(6),1467-1481.
- Ambroise, B. (1998). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. EPFL, HGA (Ed.), Bucarest, 200 p.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen 'SHE'. *Journal of Hydrology*, 87, 45-77.
- Baudez, J.C., 1997. Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau. *Memoire de DEA, Paris VI*, 88pp.
- Bénallègue, M.,1993. Etude de la faisabilité de la mesure par radar de l'humidité et de la rugosité des sols. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 272 p.
- Bénallègue, M., Normand M., Galle S., Dechambre M., 1994. Soil moisture assesment at a basin scale using active microwave remote sensing: the Agriscat'88 airborne campaign on the Orgeval watershed. *International Journal Of Remote Sensing*, Vol 15, n°3, p. 645-656.
- Ben Mehrez M., Taconet O., Vidal-Madjar D., Sucksdorff Y., 1992. Calibration of fluxes model over bare soil during HAPEX/MOBILHY experiment. *Agric. For. Meteorol.*, 58(3/4), 257-283.
- Bergman M.J., Delleur J.W., 1985. Kalman filtering estimation and prediction of daily streamflows: Review, algorithm and simulation experiments. *Water Resources Bull.*, 21(5) 815-825
- Beven K., Kirkby MJ.,1979. A physically based variable contributing area model of catchment hydrology. *Hydrological Science* 24, 43-69.
- Beven, K.J., Calver, A. and Morris, E.M. (1987). The Institute of Hydrology Distributed Model. Institute of Hydrology, Report n°8, Wallingford (UK), 33 p.
- Beven, K.J. (1997). TOPMODEL : a critique. *Hydrological Processes*, 11(9), 1069-1085.
- Bonvoisin NJ, and Boorman DB, (1992), Daily rainfall-runoff modelling as an aid to the transfer of hydrological parameters. Report to MAFF, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Box, G.E. and Jenkins, G.M. (1976). *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day, Oakland, Calif..
- Burnash, R.J.C (1995). The NWS River Forecast System - Catchment Modeling. In *Computer models in watershed hydrology*, V.P. Singh (Ed.), Water Resources Publications, 311-366.
- 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'E.N.P.C. de Paris*. 327 pp.
- Cognard A.L., 1996. Suivi de l'état hydrique des sols par télédétection spatiale (radar et infrarouge thermique) et modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant. Thèse de l'Univ. Paris XI, 150pg + 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 Resources Research*, 31(4): 975-982.
- Cohn S.E., 1997, An introduction to Estimation Theory, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.75, pp.257-288

- Cormary Y. and Guilbot A., (1973). Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation. Proceedings of the AISH Madrid Symposium, IAHS Publ., 108, 265-279.
- Cosandey Cl., Robinson M., 2000. Hydrologie continentale, *Armand Colin /HER Editeur, Paris 2000, ISBN 2-200-25113-0, 360pp.*
- Daley R., 1997. Atmospheric Data Assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.75, pp.257-288.
- Deardorff, JW, 1978, Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys.res.*, vol 83, pp. 1889-1903
- De Coursey D.G., 1973. Objective regionalization of peak flow rates. Water Resources Publications, pp. 395-405.
- Dingman, S.L., 1994. Physical Hydrology, New York, R. McConnin, Macmillan College Publishing Co.
- Dobson M-C., Ulaby F.T., 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 , Lawrence Kansas.
- Dubayah R., Loechel S., 1997 Modeling topographic solar radiation using Goes data. *J; Applied Meteor*, 36:141-154.
- Edijatno, Michel C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2: 113-121
- Edijatno, 1991: Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation Pluie-Débit. Thèse de l'ENPC, Sc. et Techn. de l'Env, 327 pp.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. and Michel, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 263-278.
- Entekhabi D., Nakumura H., Njoku E.G., 1994, Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation multifrequency remotely sensed observations, *IEEE Trans. Geosci. Remote sens.*, vol.32, pp.438-448
- Fung, A.K., Li, Z., and Chen, K.S., 1992, Backscattering from randomly rough dielectric surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.30, no.2, pp.356-369.
- Galantowicz J.F., Entekhabi D., Njoku E.G., 1999, Test of sequential data assimilation for retrieving Profile soil moisture and temperature from observed L band Radiobrightness, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.37, pp. 1860-1870.
- Gascuel-Odoux C., Hallaire V., Mérot P., Robin P., 1996. Structure des zones contributives de bas-fonds: modélisation et validation expérimentale. In: étude des Phénomènes Spatiaux en agriculture. Paris, INRA, Les Colloques n°78 pp.201-213.
- Georgakakos KP, and Baumer OW, (1996),. Measurement and utilisation of on site soil moisture data. *Journal of Hydrology*, 184, 131-152.
- Girad G., 1974. Modèle global ORSTOM, première application du modèle journalier à discrétisation spatiale sur le bassin versant de la crique Grégoire en guyane. In: Atelier Hydrologique sur les modèles mathématiques. Orstom, Paris.
- Gomendy V., 1996. Variabilité spatiale et temporelle des structures et des propriétés hydriques des horizons de surface des sols limoneux de Brie. Thèse Université Poincaré Nancy, 196 pp.
- Houser P.R., Shuttle W. J., Famiglietti J.S., Gupta H.J., Syed K.H., Goodrich D.C., 1998, Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modelling using data assimilation, *Water Resour. Res.*, vol.34, pp.3405-3420.
- Jackson T.J., Schmugge T.J., Wang J.R., 1982. Vegetation effects on the microwave emission from soils. *Remote Sens. Environ.*, vol 36, pp.203-212
- Kalman, RE., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, *J. Basic Eng.*, Vol. 82D, pp 35-45
- Karam M., Fung AK., Lang RH., Chauhan NS., 1992. A microwave scattering model for layered vegetation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30:767-784.
- King C, Le Bissonais Y., Taconet O., Benkhadra H., Tutiel R., Rakotoarivoty , 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 , pp 338-347
- Kirby MJ, 1978. Hillslope Hydrology, John Wiley and Sons.

- Leviandier Y., Mantilla-Morales G., Zermani A., 1994. Etude comparative de la résolution spatiale des modèles hydrologiques sur le bassin de la Charente. Symposium GIP hydrosystème. La Rochelle 13-15/09/94, Actes pp. 14-15.
- Le Dimet F.X., 1996. Assimilation de données : une approche globale de la modélisation. *Colloque CNRS « Tendances nouvelles en modélisation », Janvier 1996, Paris, Actes, 115-120*
- Le Hégarat-Masclé, S., 1996. Classification non supervisée d'images SAR Polarimétriques. Thèse de ENST 96 E024, 185p.
- Lettenmaier D., Wood E., 1992. Hydrologic Forecasting. In Handbook of Hydrology, edited by Maidment D., Mc Graw-Hill, Inc, ISBN 0-07-039732-5
- Liang X. Wood E., Lettenmaier D., 1996. Surface soil moisture parameterization of the Vic-2L Model: Evaluation and modifications. *Global and Planetary Change*, 13, 195-206.
- Littlewood, I.G., Down, K., Parker, J.R. and Post, D.A. (1997). The PC version of IHACRES for catchment-scale rainfall-streamflow modelling. Version 1.0. User Guide. *Institute of Hydrology*, 89 p.
- Loague, K.M. and Freeze, R.A. (1985). A comparison of rainfall-runoff modelling techniques on small upland catchments. *Water Resour. Res.*, 21(2), 229-248.
- Makhlouf Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Cemagref, 227pp.
- Michaud, J. and Sorooshian, S. (1994). Comparison of simple versus complex distributed models on a mid-sized semiarid watershed. *Water Resour. Res.*, 30(3), 593-605.
- Michel C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux (Applied hydrology for small rural catchments). *Cemagref (Antony)*, 528 p.
- Morel-Seytoux, H.J. and Al Hassoun, S. (1989). The unsaturated component of SWATC: a multiprocess watershed model for runoff generation and routing. In : H.J. Morel-Seytoux (Ed.) "Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling - Theory and Practice", NATO ASI Series C, Vol. 275, Kluwer Academic Publ., 413-433.
- Morel Seytoux, H.J., (1998). Gestion optimale d'un réservoir en avenir déterminé. *Revue des sciences de l'eau*, 4, 569-597 pp.
- Morvan X., 2000. Comparaison de deux approches de modélisation hydrologique l'une globale et l'autre distribuée en s'appuyant sur les données du bassin du Rhône, 54pg + annexes DEA Paris XI
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of Principles. *Journal of hydrology*, 27(3), 282-290.
- Nielsen SA and Hansen E., 1973. Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, 171-190.
- O'Connell P.E., Clarke R.T. (1981). Adaptive hydrological forecasting a review. *Hydrol.Sci. Bull.*, 26(2), 179-205.
- Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T., 1994. An inversion algorithm to retrieve soil moisture and surface roughness from polarimetric radar observation. Proc of the Int Geoscience and Remote Sens. Symp. IGARSS494, Firenze, Italy.
- Ottlé C., Vidal-Madjar D., Girard G., 1989. Remote sensing applications to hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 105: 369-384
- Ottlé C., Vidal-Madjar D., 1994. Assimilation of humidity inverted from infrared remote sensing in an hydrological model over the HAPEX/MOBILHY region. *Journal of Hydrology*, 158: 241-264.
- Perrin Ch., Michel Cl. and Andréassian, V. (2000). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Accepted in Journal of Hydrology*;
- Perrin C., 2000. , Vers une amélioration d'un modèle global Pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, CEMAGREF/INPG, 128pg + annexes
- Quesney, A., 1999, Assimilation de mesures d'humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR, Thèse de doctorat, Université Paris VII, 167 pp.

- Rakotoarivony L., Taconet O., Vidal-Madjar D., Benallegue M., 1996. Radar backscattering over agricultural bare soils. *J. Electromagn. Waves Appl.* 10(2):187-209.
- Rakotoarivony L., 1995. Validation de modèles de diffusion électromagnétique: Comparaison entre simulation et mesures radar hélicoptère sur des surfaces agricoles de sol nu. Thèse de doctorat, Université de Caen, 87pg +annexes
- Refsgaard, J.C. (1996). Model and data requirements for simulation of runoff and land surface processes in relation to global circulation models. In *Global Environmental Change and Land Surface Processes in Hydrology: The trial and Tribulations of Modelling and Measuring*. NATO ASI Ser. I, 46, Sorooshian, S., Gupta, H. and Rodda, J. (Ed), Springer-Verlag, New-York, 423-445.
- Refsgaard J.C. (1997). Validation and intercomparaison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrol.*, 28, 65-84.
- Robinson M., Dean T.J., 1993. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, vol7,77-86.
- Roche P.A, Tamin R., 1987. La combinaison de modèles: un moyen de limiter l'impact des perturbations en prévision des crues. *Rev. Inter. Sci. Eau*, 3, n°2, P.57-65.
- Roche P.A., Torterotot J.P., 1988. Les procédures de décision en temps réel pour la prévision des crues. *La Houille Blanche*, n°5/6, 399-409.
- Roche P.A. (1988). Les modèles (Models). In *Gestion des eaux: Automatisation, Information et Télégestion*, III, Valiron, F. (Ed.), Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 138-166.
- Rowntree PR., et Bolton JA, 1983. Simulation of atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe. *J. Roy. Meteor. Soc.*, vol 109, PP501-526.
- Schmullius C., Evans D., 1997. Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology and oceanography: a tabular staus after SIR-C/X-SAR. *Int. J. Remote Sens.* 18:2713-2722.
- Séguin B., Itier B., 1983. Using midday surface temperatures to estimate daily evapotranspiration from satellite thermal infrared data. *Int J. Remote Sensing*, vol 4, n°2, pp. 371-383
- Singh V.P., 1995, *Computer models of watershed hydrology*, ISBN n°0-91834-91-8, Edition Water Resources Publication, 1130p.
- Soarès J.V., Bernard R., Taconet O., Vidal Madjar D., Weill A., 1988. Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *J. of Hydrol*, vol 121,pp. 321-333
- Sugawara, M. (1995). Tank model. In *Computer models of watershed hydrology*, V.P. Singh (Ed.), Water Resources Publications, 165-214.
- Taconet O., Carlson T., Bernard R., Vidal-Madjar D., 1986. Evaluation of a surface/vegetation parameterization using satellite measurements of surface temperature. *J. Climate Appl. Meteor*, vol 25, pp.1752-1767
- Taconet O., Vidal-Madjar D., Emblanch C., Normand M., 1996. Taking into account vegetation effects to estimate soil moisture from C-band radar measurements. *Remote Sens. Environ.* 56:52-56.
- Tsykin, E.N. (1985). Multiple nonlinear statistical models for runoff simulation and prediction. *Journal of Hydrology*, 77, 209-226.
- Ulaby F.T., Razani M., Dobson M.C.,1983. Effects of vegetation cover on the microwave radiometric sensitivity to soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol 21, pp. 51-61.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., 1986, *Microwave Remote Sensing Active and Passive*, Eds Artech House, inc.
- 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, pp.1327-1337.
- Viterbo P., 1996. The representation of surface processes in general circulation models. Thèse de doctorat Univ. Lisbonne 201pg.
- Wigneron, J.P., Chanzy, A., Calvet, J.C., Bruguier, N., 1995, A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields, *Remote Sens. of Environ.*, vol. 51, pp.331-341.

Wilcoxon F., 1945. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics* 1, 80-83.

Wetzel PJ, Chang JT, 1987 : Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture. *J. Clim. Applic. Meteorol.*, 26, 18-27.

Wetzel PJ., Xu L., Irannejad P., Boone A., Noilhan J., Shao Y., Skelly C., Xue Y., Yang ZL., 1996 : Modelling of the liquid water fluxes : infiltration, runoff, drainage, interflow. *Global Planetary Change*, 13, 57-71

Wood E., Lettenmaier D., Zartarian V., 1992. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for General circulation Models. *J. Geophys. Res.*, 97, 2717-2728.

Wood E., Lettenmaier D., Liang X., Nijssen B., Wetzel W., 1997. Hydrological modeling of continental scale basins. *Annual reviews of Earth and Planetary Sciences* 25 :279-300.

Yang X., 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. *Thèse ENPC/Cergrène*, 204 p. + Annexes.

Yang X ; Michel C., 2000, Flood forecasting with a watershed model : a new method of parameter updating. *Hydrol. Sci. J.*;45(4), 1-10

Zribi M., 1998. Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol. *Thèse UniV. Paul Sabatier, Toulouse III*, 195p.+Annexes

SIGLES

ADRO

Agence spatiale Canadienne

ATR

Axe thématique de recherche

BRGM

Bureau des recherches géologiques et minières

CEH

Centre for Ecology and Hydrology

CEMAGREF

Centre national de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

CEREVE ex CERGRENE

Centre d'enseignement et de recherche pour la gestion des ressources naturelles et de l'environnement

CETP

Centre national d'études terrestres et planétaires

CESBIO

Centre national d'études spatiales et biologiques

CIRAD

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CNES

Centre national d'études spatiales

CNRS

Centre national de la recherche scientifique

CNRM

Centre national de la recherche pour la météorologie.

CPB

Centre national de pédologie et biologie

CST-BVRE

Comité scientifique et technique- Bassins versants de recherche expérimentaux

DIREN

Direction régionale de l'environnement

EEWR

Engineering in Environment and Water Resources

ENGEES

Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg

ENGREF

Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts

ENS

Ecole normale supérieure

ENSA

Ecole nationale supérieure d'agriculture

ENPC

Ecole nationale supérieure des ponts et chaussées

ERS1/2

European Radar Satellite 1/2

ESA

Agence spatiale européenne

EOS

Earth Observation Satellite

GEOSYS

Bureau d'étude pour les systèmes géographiques

GFHN

Groupe français d'humidité neutronique

IIBRBS

Institution interdépartementale des barrages réservoirs du bassin Seine

INRA

Institut national de la recherche agronomique

INSU
Institut national des sciences de l'univers
IRD ex ORSTOM
Institut de recherche pour le développement
LCPC
Laboratoire central des ponts et chaussées
LMD
Laboratoire de modélisation dynamique
LTHE
Laboratoire de transferts en hydrologie et environnement
MATE
Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement
MRE
Ministère de la recherche et de l'environnement
NASA
American National Spatial Agency
OMM
Organisation mondiale de la météorologie
PCRD
Programme cadre de recherche et développement
PHI
Programme hydrologique international
PIREN
Programme interdisciplinaire de recherche en environnement
PNRH
Programme national de recherche en hydrologie
PNRN
Programme national risques naturels
PNTS
Programme national de télédétection spatiale
SAGE
Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SMOS
Soil Moisture and Salinity Measurements
SRAE
Service de la recherche et des affaires économiques
SRETIE
Service de la recherche des études et du traitement de l'information sur l'environnement.
STE
Ecole doctorale en sciences et techniques de l'environnement
TR
Thème de recherche
UMR
Unité mixte de recherche
UNESCO
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation

A) COMPREHENSION DES PROCESSUS

- **P[5]** *COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OLIVIER PH., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., LOUAHALA S., VIDAL A. - 1995*
Evaluation of the ERS.1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. Two-year results over the NAIZIN watershed. *Water Resource Research* 31(4) pp. 975-982.
- **P[8]** *ZRIBI M., TACONET O., LE HEGARAT-MASCLE S., VIDAL-MADJAR D., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 1997.*
Backscattering Behavior and Simulation. Comparison over Bare Soils Using SIR-C/X-SAR and ERASME 1994. Data over Orgeval. *Remote Sens. Environ.* 59: 256-266.
- **P[12]** *QUESNEY A., Le HEGARAT-MASCLE S., TACONET O., VIDAL-MADJAR D., WIGNERON J.P., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 2000*
Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data. *Remote Sens. Environ.* 72: 290-303
- **P[19]** *OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M. - 1996.*
Radar and optical remote sensing to infer evapotranspiration and soil moisture. Chapter 15 in «Scaling up in Hydrology using Remote Sensing», Edited by J. B. Stewart, ET Engman, RA Feddes and Y. Ken, Editors John Wiley and Sons, Institute of hydrology, pp. 221 - 233.

B) MODELISATION DES COMPORTEMENTS

- **P[3]** *LOUMAGNE C., MICHEL C., NORMAND M. - 1991*
Etat hydrique du sol et prévision des débits. *Journal of Hydrology*, 123, pp.1-17.
- **P[7]** *LOUMAGNE C., CHKIR N., NORMAND M., OTTLE 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* 41 (6), pp. 889-902.
- **P[33]** *COGNARD A.L., LOUMAGNE C., NORMAND M., OTTLE C., VIDAL-MADJAR D., VIDAL A. - 1995*
Soil moisture and hydrological modelling using radar and optical remote sensing. A case study in Brittany. 2nd ERS Application Workshop 6-8/12/95 Londres, ESA, pp. 153-160
- **P[10]** *BAUDEZ JC., LOUMAGNE C., MICHEL CL., PALAGOS B., GOMENDY V., BARTOLI F. - 1999*
Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins : vers une comparaison de l'approche globale et de l'approche distribuée. *Etude et Gestion des Sols*. Vol 6, 4, pp. 165-184.

ASSIMILATION DES DONNEES

- **P[52] WEISSE A., MICHEL C., AUBERT D., LOUMAGNE C., 2001.**
Variational assimilation of a watershed soil moisture index in a hydrological model for flood forecasting. *SVAT transfer schemes and large scale hydrological models, IASH Red Book Publication.n°270, edited by Dolman, Pomeroy, Oki, Hall, ISBN 1-90150269-9.*(Accepté)
IASH Red Book Publication (Accepté)
- **P[15] QUESNEY A., FRANCOIS CH., OTTLE C., LE HEGARAT S., LOUMAGNE C., NORMAND M.- 2000**
Sequential assimilation of SAR/ERS data in a surface hydric model coupled to a global hydrological model with an extend Kalman filter. *Remote sensing and Hydrology 2000, IASH Red Book Publication n°267, edited by Brubaker, Ritchie, Rango, ISBN 1-90150246-5, (sous presse)*

Gestion des ressources EN EAU

- **P[6] LOUMAGNE C., VIDAL J.J., FELIU C., TORTEROTOT J.P., ROCHE P.A. - 1995**
Procédure de décision multimodèle pour une prévision des crues en temps réel. Application au bassin supérieur de la Garonne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 8(1995), pp. 539-561
- **P[16] LOUMAGNE C., NORMAND M., RIFFARD M., WEISSE A., QUESNEY A., Le HEGARAT-MASCLE S., ALEM F.- 2001**
Methodology for integration of remote sensing data into hydrological models for reservoir management purposes. *Hydrological Science Journal.*, 46(1), (Sous presse).