

Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales



Actes du Séminaire national
Paris, 10 - 11 mai 1994

HydrOsystemes

**Du concept de BVRE
à celui de zone atelier
dans les recherches menées
en eaux continentales**

Le GIP HydrOsystemes a été créé par six organismes français de recherche (BRGM - CEMAGREF - CNRS - IFREMER - INRA - ORSTOM) auxquels s'est associé l'OIEau. L'objectif est de promouvoir une approche intégrée des hydrosystèmes et de mobiliser la communauté scientifique sur cet objectif.

Cinq principales missions

■ **faciliter les actions communes des membres fondateurs.** Le GIP fournit aux acteurs un cadre formel pour organiser l'échange d'informations, préparer et négocier des actions de recherche entre eux et avec des tiers, assurer la mise en place de moyens expérimentaux.

■ **dialoguer avec les utilisateurs : faciliter et améliorer le transfert de connaissances** entre les structures nationales impliquées dans la gestion des hydrosystèmes et la communauté scientifique.

■ **valoriser les résultats de la recherche** en organisant des séminaires nationaux et internationaux, et en coordonnant la rédaction de synthèses et de manuels. Faciliter l'accès à l'information.

■ **renforcer les relations** entre instituts de recherche et structures de formation, en particulier les grandes écoles et les universités.

■ **représenter la Communauté scientifique** française au niveau national et international.

Des thèmes de recherche prioritaires

■ les transferts d'eau et de substances dissoutes ou en suspension.

■ les systèmes biologiques.

■ les sociétés et les hydrosystèmes.

L'approche intégrée du fonctionnement et de la gestion des hydrosystèmes nécessite également une recherche sur les méthodes et les outils, de la modélisation à l'élaboration de bases de connaissance.

Le GIP assurera également la promotion de sites ateliers où les différentes disciplines pourront réaliser des recherches complémentaires sur le long terme.

Séminaire national
HydrOsystemes

**Du concept de BVRE à celui de
zone atelier dans les recherches
menées en eaux continentales**

Coordination scientifique
Didier Houi
Jean-Louis Verrel

Avant-propos

De création récente, le GIP HydrOsystèmes a été mis en place, au début de l'année 1993, par six organismes de recherche publique (BRGM, CEMAGREF, CNRS, IFREMER, INRA, ORSTOM) auxquels s'est associé l'Office International de l'Eau. L'intérêt qu'il porte aux sites expérimentaux est directement lié aux missions qui lui sont confiées : mieux coordonner l'offre de recherche publique pour répondre aux nouveaux enjeux d'une gestion intégrée des ressources, à travers une approche globale de la totalité d'un bassin versant ou d'un aquifère.

Face à la complexité des systèmes à étudier et à la multiplicité des approches à développer, la recherche a besoin à la fois de plus d'intervenants et de plus de matériels. Il faut disposer de sites expérimentaux ou de zones ateliers équipés en matériel lourd pour mener des recherches sur le long terme en associant des compétences et des disciplines variées : hydrologues, chimistes, modélisateurs, mais aussi biologistes, économistes ou sociologues.

Dès l'origine, les organismes fondateurs du GIP Hydrosystèmes ont souhaité lui confier la mission d'assurer la promotion, la cohérence et le renforcement des moyens expérimentaux consacrés aux recherches sur les hydrosystèmes, tant dans leur mise en place que dans leur utilisation, en en garantissant, si nécessaire, la continuité du fonctionnement.

Il convient, à mon avis, de donner un sens dynamique à cet objectif de continuité : la pérennité d'un site expérimental, l'actualisation de son équipement doivent toujours être examinées dans une logique d'ensemble favorisant le regroupement de moyens, matériels et humains, au service de thématiques de recherche bien identifiées.

C'est dans cet esprit qu'il a été décidé de rassembler en un seul volume l'ensemble des communications présentées à ce séminaire, avec pour objectif :

- de dresser un bilan précis des actions menées sur les BVRE,
- de repérer l'apport d'un tel réseau de sites expérimentaux au développement des recherches sur les hydrosystèmes,
- d'esquisser des développements possibles soit à d'autres échelles de travail (bassins fluviaux), soit sur des aspects à prendre mieux en compte (liaison avec l'atmosphère, biologie, socio-économie).

Enfin, il me semble opportun de rappeler que ce séminaire n'aurait pu avoir lieu sans d'une part les soutiens logistiques respectifs des ministères de l'Environnement et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, et sans d'autre part le concours actif du Conseil Scientifique et Technique des BVRE qui déploie depuis longtemps de nombreux efforts pour donner un nouvel élan aux BVRE, grâce en particulier aux crédits de jouvence du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Que tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce séminaire en soient remerciés.

Jean-Louis Verrel

Sommaire

Les BVRE dans la recherche sur les hydrosystèmes

- Du BVRE, bassin versant représentatif expérimental, au BVR, bassin versant de recherche, *Bruno Ambroise* 11
- L'outil BVRE : bilan et perspectives, vus à travers le Comité scientifique et technique (CST) des bassins versants représentatifs expérimentaux (BVRE) *Guy Oberlin* 25
- Le CST BVRE : en rester à la structure légère, ou renoncer? *Pierre Pernès* 45

Quelques BVRE français significatifs

- BVRE de l'Orgeval, *Michel Ferry, Thierry Leviandier* 53
- Les bassins versants de recherche du Real Collobrier, *Jacques Lavabre* 61
- Les bassins de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht) *Bruno Ambroise* 71
- Le bassin versant du Coët Dan, Bretagne, *Philippe Mérot, Charles Cann* 89
- Le BVRE d'Ecerex, *Jean-Marie Fritsch* 99
- Système karstique du Baget, *Alain Mangin* 113
- Le site atelier Allegro, Languedoc, *Marc Voltz, Patrick Andrieux, Claude Bocquillon, S. Rambal* 121
- Présentation des BVRE de Draix, *Didier Richard* 131
- Le programme BVRE Mont-Lozère, *François Lelong, B. Guillet* 139

Les BVRE au service des thématiques sur les hydrosystèmes

- Les processus de surface et l'interaction avec l'atmosphère, *Daniel Vidal/Madjar* 157
- Modélisations hydrologiques, *Michel Vauclin* 165
- La prise en compte des eaux souterraines dans les BVRE, *Thierry Pointet* 171
- Dynamique hydrogéochimique, *Bertrand Fritz* 175
- Transfert des fertilisants et des produits phytosanitaires, *Jean-Joël Gril* 181
- Dynamique des écosystèmes - Intérêt des bassins versants, *Maurice Bonneau* 185
- Les crues rapides, *Bernard Chocat* 193
- Place des BVRE dans les études sur l'érosion hydrique des sols, *Jean Boiffin* 197
- Le cycle de l'eau en conditions tropicales, *Pierre Chevalier* 203

Quel avenir, quelles perspectives pour les BVRE?

- Des BVRE aux milieux aquatiques : problèmes d'échelles illustrés par la qualité des eaux, *Michel Meybeck* 215
- La dimension internationale des BVRE, *Pierre Hubert* 221
- Synthèse et conclusion par le GIP "Hydrosystèmes", *Christian Lévêque* 225

**Les BVRE dans
la recherche
sur les hydrosystèmes**

Du BVRE, bassin versant représentatif et expérimental, au BVR, bassin versant de recherche.

Bruno AMBROISE

Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques
(CEREG, URA 95 du CNRS), Université Louis Pasteur (ULP)
3 rue de l'Argonne, F 67083 STRASBOURG Cedex
Tél : (33) 88 45 64 41 - Fax : (33) 88 41 13 59

Introduction

Initiée depuis longtemps aux Etats-Unis, ayant fait ses preuves lors de la Décennie Hydrologique Internationale 1965-74, l'utilisation des bassins versants de recherche dans le domaine des sciences de la planète et de l'environnement est en plein développement depuis une quinzaine d'années en Europe. En France, par contre, cette approche a été peu encouragée jusqu'à très récemment -malgré les avancées conceptuelles considérables, mais longtemps méconnues, faites dans les années 1955-65 dans le petit bassin d'Alrance (*Cappus*, 1960). La prise de conscience de l'utilité de ces outils scientifiques -permettant de dépasser les études classiques de bassins versants, trop souvent globales ou monographiques-semble maintenant acquise en France aussi (*CST/BVRE*, 1990), comme le montre d'ailleurs la tenue de ce premier Séminaire national.

Le développement actuel de ce type de dispositifs de terrain résulte d'un double constat :

- l'eau étant à la fois ressource, vecteur d'autres éléments (en solution ou en suspension), agent de nombreux processus (géomorphologique, géochimique) et milieu de vie, le cycle de l'eau conditionne directement ou indirectement l'ensemble du fonctionnement du milieu naturel;
- l'extrême imbrication des aspects physiques et biologiques, leur grande variabilité spatiale et temporelle, rendent indispensables une approche interdisciplinaire des fonctionnements sur un même site.

Cette note vise à mettre en perspective les bassins de recherche dans le contexte des géosciences et des sciences de l'environnement, en précisant ce qu'ils sont et ce à quoi ils peuvent servir, en rappelant leurs principales caractéristiques et leurs limitations, et en donnant quelques indications sur le potentiel existant. Elle s'appuie sur une analyse bibliographique du domaine, sur la connaissance d'une trentaine de bassins de recherche en Europe, Amérique et Israël, ainsi que sur l'expérience acquise depuis 1976 avec la mise en place progressive des bassins de recherche vosgiens (*Ambroise*, 1994,a).

BV, BVRE ET BVR...

Le concept de **bassin versant (BV)** -surface drainée par un cours d'eau, en amont d'un point définissant son exutoire- est vite apparu comme essentiel dans l'étude du milieu naturel. En tant qu'unité de bilan, le bassin versant s'impose en effet comme une unité fonctionnelle fondamentale pour l'étude du cycle de l'eau et de son couplage avec les flux d'autres éléments; à ce titre, il est également une unité de base pour la gestion et l'aménagement des ressources en eau. Il s'agit aussi d'un concept intégrateur, qui présente l'intérêt de pouvoir s'appliquer à toutes les échelles spatiales: depuis celle du bassin élémentaire, représentant la plus petite unité spatiale et fonctionnelle où peut se manifester complètement le couplage écosystème-hydrosystème, jusqu'à celle des bassins des grands fleuves; et de pouvoir concerner tous les types de milieu (bassins urbains ou ruraux, agricoles ou forestiers; bassins particuliers de lacs, de karst, de nappe,...). Ceci explique le choix de ce type d'unité spatiale pour de nombreux dispositifs de terrain.

Définitions

Même si, comme le souligne de Marsily (1990), le sigle **BVRE** peut actuellement prêter à quelque ambiguïté (R comme *représentatif*, ou *de recherche*, ou *de référence*? E comme *expérimental*, ou *environnemental*?), sa signification originale est *bassin versant représentatif et expérimental* et s'appuie sur les définitions de ces termes formulées notamment par Toebes et Ouryvaev (1970).

Un **bassin versant représentatif** correspond à un bassin versant (généralement de 1 à 250 km²) dont les caractéristiques physiographiques et le fonctionnement sont considérés comme typiques, ou représentatifs, d'une région hydrologique donnée. Dans le cas de régions hétérogènes, le bassin peut être subdivisé en sous-bassins plus homogènes: des **bassins comparatifs**, ne différant que par l'une de leurs caractéristiques, permettent alors de préciser le rôle hydrologique de cette caractéristique. Ce type d'approche repose sur l'hypothèse que les résultats obtenus sur le bassin et/ou ses sous-bassins pourront être transposés à toute la région ou à des bassins semblables. De ce fait, un bassin représentatif ne doit être soumis à aucune autre perturbation que celles éventuellement subies par la région. Dans le cas de régions à évolution marquée, 2 types particuliers de bassin représentatif peuvent être définis: les **bassins vigies** et les **bassins repères**, "chargés d'être les témoins des effets sur le régime hydrologique de l'évolution normale d'une région pour les uns et de l'absence d'intervention humaine pour les autres" (Dubreuil, 1974).

Un **bassin versant expérimental** correspond à un bassin dont les caractéristiques physiographiques sont délibérément modifiées, de façon à étudier l'impact hydrologique de ces perturbations. Du fait du coût de ces interventions et du suivi détaillé nécessaire, il s'agit généralement de petits bassins homogènes, de taille inférieure à quelques km². L'approche étant essentiellement comparative, le dispositif utilisé comporte généralement soit un seul bassin qui est modifié après une période de calage suffisamment longue, soit des **bassins appariés** (2 ou plus) supposés semblables: après calage mutuel, l'un est modifié, l'autre est gardé comme **témoin**.

Cette terminologie classique reposant sur des notions encore difficiles à définir en hydrologie (représentativité, transposabilité, similitude,...) et renvoyant à des approches souvent empiriques, il apparaît maintenant nécessaire d'introduire le terme de **bassin versant de recherche (BVR)** pour dénommer tout dispositif spécialement conçu et équipé pour étudier de façon précise et détaillée le cycle de l'eau et les flux couplés, ainsi que leurs évolutions naturelles ou artificielles, par une approche dynamique et systémique des mécanismes et de leurs interactions. Bien entendu, un BVR peut être aussi représentatif ou expérimental, mais tous les BVRE ne sont pas des BVR...

Historique

L'analyse historique du développement de ces dispositifs de terrain montre une intéressante évolution des concepts et des thématiques étudiées.

Comme le rappelle *Keller (1988)*, les premiers BVRE datent des années 1900, avec la création des bassins de l'Emmental dans les Alpes suisses, à l'initiative de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich. Dans la terminologie précédente, il s'agissait de bassins versants représentatifs et comparatifs (le Sperbelgraben forestier et le Rappengraben prairial), suivis pour étudier l'effet de la reforestation sur les crues en montagne (l'eau comme agent).

Dans les années 1930, la création par l'USDA du Laboratoire d'Hydrologie de Coweeta (22 km²) dans les Appalaches du Sud (Caroline du Nord, USA) marque l'émergence de la notion de bassin versant représentatif et expérimental, avec la mise en place d'un réseau d'une quinzaine de petits bassins emboîtés comparatifs, dont certains ont subi des modifications totales ou partielles de leur couverture végétale (*Swank et Crossley, 1988*). L'objectif initial était d'étudier l'effet de la végétation non seulement sur les crues mais aussi sur le bilan hydrologique régional (l'eau comme ressource), avec une approche essentiellement globale, empirique et comparative.

Dans les années 1960, le début des recherches dans la forêt expérimentale d'Hubbard Brook (New Hampshire, USA) marque l'avènement du concept de bassin versant de recherche, à vocation interdisciplinaire. Il s'agit là de la première étude intégrée du couplage écosystème-hydrosystème, avec notamment l'établissement de bilans hydrogéochimiques détaillés à l'échelle de petits bassins naturels ou perturbés (l'eau comme vecteur) en utilisant une approche dynamique et modélisatrice des processus et des fonctionnements (*Likens et al., 1977*).

C'est à cette époque que débute également la Décennie Hydrologique Internationale 1965-74 de l'UNESCO, qui a fortement contribué au développement des BVRE dans le monde entier (*AIHS, 1965; Toebes et Ouryveav, 1970; Dubreuil et al., 1974*) avec, comme résultat, "le pire et le meilleur": le pire, du fait d'une certaine multiplication de BVRE alibis, mal conçus ou peu durables, sans thématique scientifique ou continuant de privilégier une approche empirique -ce qui a eu pour effet de déconsidérer durablement l'outil BVRE au yeux de nombreux scientifiques; le meilleur, avec l'émergence de l'hydrologie du versant (*Kirkby, 1978*), l'étude systématique de tous les milieux, l'identification des principaux processus et facteurs, conduisant à un développement conceptuel et métrologique considérable en hydrologie.

Quant aux années 1990, elles semblent marquées par une intensification et un approfondissement des recherches interdisciplinaires sur les BVR en relation avec les problématiques environnementales récentes liées aux changements globaux et locaux, avec l'étude des couplages eau-matière-énergie, et notamment le développement de recherches sur les échanges avec l'atmosphère (*Kustas et Goodrich*, 1994). Ceci se traduit par une nette tendance à la constitution de réseaux internationaux de BVR et à l'insertion des BVR dans des dispositifs emboîtés de taille supérieure, pouvant aller jusqu'à la région, et permettant de mieux aborder la question du changement d'échelle, cruciale en hydrologie. L'exemple extrême en est fourni par le bassin du Mississippi, désormais étudié dans son ensemble dans le cadre des recherches sur le climat global et son évolution.

Thématiques

Comme le montre bien la revue bibliographique de *Ward* (1971), et comme le confirme la suite de ce volume, les BVRE et BVR constituent des outils ayant servi, ou pouvant servir, pour de nombreuses thématiques. Un BVR peut d'ailleurs concerner, simultanément ou successivement, plusieurs thématiques: le meilleur exemple en est fourni par le BVR de Coweeta, dont la longévité (60 ans en 1994!) s'explique par un renouvellement périodique des thématiques et des approches (*Swank et Crossley*, 1988). Faisant l'objet de recherches interdisciplinaires, les BVR ont fortement contribué au développement des collaborations entre l'hydrologie et les sciences connexes (hydrodynamique, climatologie, écosystémique, (bio)géochimie, géomorphologie, géophysique,...).

Tout d'abord, les BVR ont joué un rôle déterminant en hydrologie pour dépasser l'approche empirique traditionnelle et aboutir à une approche scientifique du cycle de l'eau, avec la quantification et la modélisation des flux et des bilans, l'identification des processus et facteurs en jeu, la modélisation des fonctionnements (cf. *Ambroise*, 1994,b). Ainsi, c'est sur le BVR d'Alrance en Aveyron (*Cappus*, 1960) qu'a été défini le concept très puissant de zone contributive variable, c'est sur le BVR de Coweeta (*Hewlett*, 1961) que l'importance de la contribution souterraine aux crues a été reconnue, c'est sur de nombreux BVR anglo-saxons qu'a progressivement émergé l'"hydrologie du versant" (*Kirkby*, 1978). Par contre, c'est plus récemment que les unités de bilan que constituent les BVR ont été reconnues comme utiles dans l'étude des échanges d'eau et d'énergie avec l'atmosphère (*Kustas et Goodrich*, 1994).

Ces dispositifs ont également été très utilisés pour de nombreux problèmes concernant l'eau comme ressource, comme vecteur ou comme agent. La plupart des bassins représentatifs a eu comme objectif majeur l'étude des ressources d'une région et de leur évolution; à l'exemple du BVR de Coweeta (*Swank et Crossley*, 1988), de nombreux bassins expérimentaux ont permis de préciser l'effet hydrologique d'aménagement ou de perturbations anthropiques (changement de couvert végétal, d'occupation du sol, de techniques culturales,...). Sur le modèle d'Hubbard Brook (*Likens et Bormann*, 1977), de nombreux BVR ont porté sur les bilans hydro(bio)géochimiques d'écosystèmes tant naturels que perturbés (*Hornung et al.*, 1990), permettant de mieux comprendre les cycles d'éléments dans le système sol-plante-atmosphère, la dynamique d'altération des sols et des roches, et les mécanismes d'acquisition et de transformation de la qualité des

eaux. Le plus souvent sous l'impulsion de géomorphologues (*Burt et Walling*, 1984; *Vogt et Slaymaker*, 1986), des BVR ont permis de quantifier les processus d'érosion, de transport et d'accumulation tant sur les versants que le long des cours d'eau, d'établir des bilans précis de sédiments, d'étudier les effets de précipitations et de crues exceptionnelles, d'analyser les interactions eau-matière en jeu lors des mouvements de masse (laves torrentielles, coulées boueuses, glissements de terrain).

Fonctions

De ce qui précède, il ressort que les BVR -outils au service de thématiques scientifiques- assurent 4 fonctions distinctes mais complémentaires, pouvant coexister ou non sur un même site:

- celle de **laboratoire de terrain** pour des recherches interdisciplinaires se complétant et se valorisant mutuellement, et justifiant par une activité de recherche permanente le maintien à long terme de ces dispositifs: établissement de bilans détaillés, étude des fonctionnements (processus, interactions, couplages), expérimentation in situ,...;
- celle de **observatoire du milieu**, pour mesurer à long terme les flux et les paramètres qui les contrôlent, déceler d'éventuelles évolutions liées à des perturbations anthropiques ou à des changements climatiques;
- celle de **site de validation** de méthodes et d'outils: test et intercalibration de capteurs de mesure, "vérité terrain" en télédétection, constitution de jeux de données de référence pour tester différents modèles,...;
- celle de **lieu de formation**: formation à et par la recherche, formation permanente.

L'outil BVR

Pour répondre correctement à leurs objectifs, les BVR doivent présenter certaines caractéristiques et répondre à certains critères. Ils doivent aussi disposer de solutions pour pallier les limitations inhérentes à tous les dispositifs de terrain (*Ward*, 1971), et pour résoudre certains problèmes opérationnels et structurels pouvant restreindre leur valorisation.

Caractéristiques

Lors de la création d'un BVR, le choix du bassin doit se faire sur la base de plusieurs critères, souvent difficiles à concilier, mais dont dépend grandement la qualité des résultats:

- critère de **délimitation**: le choix de l'exutoire est crucial puisque les limites correspondantes de l'unité de bilan qu'est le bassin doivent pouvoir être déterminées avec précision, et que ce site doit permettre une mesure précise des débits de surface; du fait de la difficulté de leur mesure, il est bien sûr préférable

que les échanges souterrains latéraux, aux limites du bassin, soient aussi faibles que possible.

- critère d'**homogénéité**: selon la nature du dispositif (expérimental ou représentatif) et l'objectif poursuivi, l'homogénéité ou au contraire l'hétérogénéité du bassin sera recherchée pour toutes ou certaines de ses caractéristiques; dans le cas d'un bassin hétérogène, il est souvent important de pouvoir le subdiviser en sous-bassins plus homogènes respectant aussi le critère précédent;

- critère d'**accessibilité**: compte tenu du suivi de routine à assurer et des campagnes de mesures à réaliser, la distance de transport des intervenants jusqu'au bassin et les conditions d'accessibilité par tout temps constituent un critère très important en pratique; de même, l'implantation d'un BVR dépend toujours du bon vouloir des propriétaires du terrain et du soutien des autorités locales: l'absence de maîtrise foncière est un problème majeur pour le maintien à long terme de tout dispositif de terrain.

A ces critères généraux, peuvent s'ajouter des critères plus spécifiques dépendant de l'objectif poursuivi (par exemple, absence de sources de pollution locale dans le cas de bilans hydrogéochimiques).

Pour permettre d'aborder aussi l'important problème du changement d'échelle, il est actuellement fortement recommandé que ces bassins soient constitués de **dispositifs emboîtés** à plusieurs échelles spatiales, équipés pour suivre avec précision les flux (eau, énergie, matière) et les paramètres qui les contrôlent (cf. *Toebes et Ouryvaev, 1970; Mailhol et al., 1984*):

- des **stations de mesures** (parcelles, versants,...) situés sur des **transects** représentatifs, pour quantifier les flux verticaux et latéraux dans le système sol- plante-atmosphère, établir des bilans locaux, étudier les mécanismes élémentaires et leurs interactions, caractériser les hétérogénéités locales;

- des **bassins élémentaires** relativement homogènes pour contrôler par des bilans détaillés la cohérence et la validité de ces flux élémentaires, estimer la représentativité spatiale des mesures locales, rechercher des descripteurs globaux de fonctionnement;

- des **bassins versants** de taille croissante englobant une mosaïque d'écosystèmes et de conditions différentes à l'échelle du paysage, pour étudier les solidarités amont-aval et les relations entre la structure de l'espace et son fonctionnement, analyser les phénomènes d'intégration spatiale et de changement d'échelles, tester les apports de la télédétection.

Ils doivent également être intégrés dans des **réseaux** de bassins de recherche recoupant une large gamme de conditions physiographiques et climatiques et permettant de tester la généralité et la transposabilité de ces résultats et modèles. Ceci passe par une harmonisation des protocoles d'observation et la constitution de bases de données communes.

Limitations

Contrairement aux expérimentations en laboratoire, où le **contrôle** de toutes les conditions peut permettre une bonne et rapide reproductibilité des résultats, les recherches sur BVR souffrent d'un manque évident de contrôle possible (sauf dans le cas de microbassins) sur les conditions climatiques imposées, leur fréquence et leur séquence. Cette difficulté majeure est partiellement compensée par une longue durée d'observation, afin d'échantillonner toute la gamme des conditions possibles et d'obtenir des jeux d'événements similaires en nombre statistiquement suffisant, ainsi que par l'utilisation de réseaux de BVR le long de transects climatiques. Ceci explique la durée des recherches portant sur les aspects saisonniers des fonctionnements hydrologiques et donc soumises au rythme annuel, la difficulté d'identifier des évolutions hydrologiques significatives plus ou moins masquées par le "bruit de fond" climatique, la difficulté d'étudier sur des BVR les aléas liés à des conditions extrêmes (exceptionnelles et imprévisibles).

Ce manque de contrôle concerne aussi la nature même du bassin et son évolution. Dans le cas de petits bassin expérimentaux, seules quelques unes de leurs caractéristiques sont susceptibles d'être modifiées, pour des raisons économiques ou techniques évidentes; de plus, le retour à l'équilibre peut être très lent à atteindre en milieu naturel, obligeant au maintien à long terme du dispositif. Inversement, en l'absence de maîtrise foncière, l'activité anthropique sur les BVR peut provoquer des évolutions lentes ou conduire à des perturbations brutales non contrôlées, compliquant voire empêchant l'interprétation des résultats.

Une autre difficulté majeure concerne la **représentativité** des bassins et la **transposabilité** des résultats (avec ou sans changement d'échelle). Faut de bons critères de similitude hydrologique pour définir tant la similarité entre 2 bassins que la représentativité d'un bassin dans une région donnée, l'approche globale et empirique initialement utilisée avec les bassins représentatifs a rendue souvent difficile la transposition de leurs résultats (*Rodier*, 1982). C'est que, comme le note *de Marsily* (1990), les propriétés d'"émergence" spatiale ou temporelle des systèmes hydrologiques semblent limitées, du fait de leur complexité, de leur grande variabilité spatio-temporelle, et de leur comportement fortement non-linéaire et hystérétique.

Cette difficulté a pu être en partie contournée dans les BVR, en adoptant une approche dynamique et systémique des fonctionnements, centrée sur l'étude et la modélisation des mécanismes, des facteurs qui les contrôlent et de leurs combinaisons. Ce qui est alors transposable, ce ne sont plus les résultats quantitatifs obtenus sur un BVR, mais plutôt les "clés de lecture" qui y ont été trouvées pour identifier les processus et paramètres dominants, ainsi que l'analyse et la modélisation à bases physiques des processus et des comportements, qui elles peuvent avoir une portée générale. Le BVR apparaît alors comme "un instrument privilégié d'étude de ces systèmes désordonnés complexes, non linéaires, non émergents, non stationnaires ayant pour vocation principale de rechercher et de représenter les émergences partielles (dans le temps et dans l'espace) qui peuvent être modélisées pour simuler telle ou telle partie du cycle de l'eau" (*de Marsily*, 1990). Ceci passe néanmoins par la constitution de réseaux de BVR aux caractéristiques différentes, ainsi que de dispositifs assurant un emboîtement d'échelle: la nature est trop complexe, les combinaisons de facteurs

et de processus trop multiples, pour qu'il soit possible de les comprendre et de les modéliser à partir d'un seul bassin, d'une seule échelle.

Une autre difficulté, de nature plus technique, est liée à la **qualité des données** collectées. La précision des mesures et la continuité des séries est bien plus difficile à assurer in situ qu'en laboratoire, du fait d'une fiabilité moindre des appareils soumis à des conditions climatiques parfois rigoureuses. La forte variabilité spatiale et/ou temporelle des paramètres limite aussi la représentativité de toute mesure; ceci pose des problèmes complexes d'échantillonnage, pas toujours bien résolus en raison notamment du surcoût d'une densification du réseau de mesure. Enfin, l'adéquation entre l'échelle de mesure (le plus souvent locale) et celle des phénomènes étudiés est difficile à assurer, faute de solutions techniques appropriées: le développement de méthodes de mesure plus intégratrices conditionne largement les progrès de nombreuses recherches in situ. Il en résulte une incertitude, difficile à estimer, sur les flux et les bilans mesurés. Seul un effort important de développement métrologique permettrait de la réduire -comme cela a été réussi dans d'autres domaines des géosciences.

Problèmes

Un bassin de recherche -qui ne se justifie que sur une longue période- est équivalent à un **équipement "mi-lourd" du CNRS**: sans être d'un coût d'investissement et de maintenance très élevé, il nécessite une infrastructure de mesure importante, du personnel permanent qualifié (ingénieur, technicien) pour assurer leur gestion et la collecte, le contrôle et l'archivage des données, et des moyens financiers suffisants pour le suivi de base et la jouvence du matériel. La concentration sur un même site bien choisi de moyens complémentaires et de recherches se valorisant mutuellement peut cependant conduire globalement à une économie d'échelle. Ces moyens ne sont pas toujours disponibles de façon satisfaisante -notamment en France, probablement faute d'une Agence de moyens multi-organismes.

Par ailleurs, les **questions juridiques et déontologiques** posés par ces dispositifs de terrain doivent impérativement être bien précisées a priori dans chaque cas: statut juridique, structure d'animation scientifique (coordination, évaluation,...), "règles du jeu" collectives (accès aux sites, aux équipements, aux données; droits d'auteur; règles de publications;...). Une réflexion approfondie reste à mener sur ces questions, qui sont sources potentielles de conflits difficiles à régler a posteriori. Il est en particulier indispensable de bien mieux valoriser et "protéger" l'activité d'acquisition des données in situ, souvent longue, parfois pénible mais rarement gratifiante. L'"accessibilité aux données", qui ne signifie pas forcément "libre accès aux données", sera d'autant mieux assurée qu'elle se fera dans le cadre de collaborations explicites et équilibrées entre les producteurs de données et les autres utilisateurs potentiels, et notamment les modélisateurs. Une bonne modélisation dépend tout autant de la qualité du modèle que de celle des données.

Enfin, compte tenu de l'investissement matériel mais aussi scientifique en jeu, il est important de définir des **procédures d'évaluation** pour décider de la création, de l'extension et de la suppression de tels dispositifs: il faut tout autant éviter de maintenir un BVRE non productif ou mal adapté que de fermer arbitrairement un

BVRE, sans s'être assuré qu'il ne pouvait pas être mieux valorisé: une série interrompue ne se reconstitue pas, et la durée est un aspect essentiel de la rentabilisation des BVR.

Potentiel existant

De tels bassins de recherche sont utilisés depuis longtemps dans de nombreux pays dans le domaine des sciences de la planète et de l'environnement. Ainsi, le nombre de ces dispositifs a beaucoup augmenté depuis une dizaine d'années dans les pays anglo-saxons et scandinaves, notamment pour mieux évaluer l'effet des pollutions sur les écosystèmes. Au niveau européen, plusieurs inventaires récents à caractère généraliste (**Figure 1** : *Barbet et Givone, 1993*) ou plus thématique (**Figure 2**; *Hornung et al., 1990; Robinson et al., 1993*) sont actuellement disponibles. Il existe déjà en Europe plusieurs réseaux de bassins de recherche, comme par exemple:

- le Réseau ERB "*European Network of Experimental and Representative Basins*" créé en 1986 à l'initiative de P. Dubreuil;
- ou, sur une thématique écosystémique, le Réseau ENCORE 1991-94 "*European Network of Catchments Organized for Research on Ecosystems*" de la CEE-DGXII, animé par M. Hornung.

En France, comme le montre bien la suite de ce volume, il existe déjà un potentiel important, parfois ancien (cf. *Vuillaume et Cosandey, 1979*), mais encore trop peu connu et valorisé. Le *Conseil Scientifique et Technique des Bassins Versants de Recherche et Expérimentaux (CST/BVRE)*, créé en 1986 par le Ministère de la Recherche, a ainsi sélectionné une dizaine de bassins de recherches ruraux (**Figure 3**) portant sur des thématiques variées (hydrologie, hydrogéochimie, écosystème, érosion,...) (*CST/BVRE, 1990*).

Plusieurs de ces sites (Orgeval, Réal Collobrier, BVR vosgiens, Mont-Lozère, La Peyne,...) font actuellement l'objet de programmes de recherches interdisciplinaires et pluri-organismes, et les **sites ateliers** que sont ces BVR pourraient probablement servir d'appui pour définir des **zones ateliers** à l'échelle régionale. Cependant, faute d'un soutien permanent assuré par des programmes de longue durée, ces bassins de recherche sont pour la plupart dans une situation précaire.

Conclusions et perspectives

Ainsi, les bassins versants de recherche -outils au service de thématiques scientifiques- constituent l'un des éléments majeurs du dispositif de recherche pour l'hydrologie (au sens large) et les sciences connexes. Il s'agit d'un des types d'équipement structurant dont a grandement besoin la communauté hydrologique -et ce, à un coût relativement limité, notamment au regard des équipements disponibles dans les autres géosciences (plate-forme analytique, bateau océanographique, avion de recherche,...). Bien entendu, les BVR ne sont pas la panacée: l'unité spatiale "bassin versant" n'est pas pertinente pour toutes les

thématiques liées aux hydrosystèmes, et tous les problèmes ne relèvent pas forcément de sites fortement instrumentés ni de suivis à long terme.

Dans les recherches sur les cycles et les bilans, il y a donc lieu, non pas d'opposer, mais au contraire de combiner au mieux les différents types de dispositifs de terrain (BVR/stations ou parcelles expérimentales, site permanent/site temporaire, site "lourds"/ site "léger"), ainsi que les différentes approches possibles (observation in situ, expérimentation au laboratoire, conceptualisation et modélisation), qui sont tout à fait complémentaires. Il y a lieu également de donner la priorité sur ces sites à des projets scientifiques interdisciplinaires, permettant d'éviter la simple juxtaposition de travaux disciplinaires.

Par leur quadruple fonction (laboratoire de terrain, observatoire du milieu, site de validation, lieu de formation) et leur insertion possible dans des zones atelier à l'échelle régionale, les bassins versants de recherche constituent des sites privilégiés pour de telles études interdisciplinaires, dont la nécessité et l'urgence sont de plus en plus largement ressentie dans la communauté scientifique internationale (Dubreuil, 1989; Christophersen et Neal, 1990; DeCoursey, 1991) - et notamment, pour améliorer la coopération entre les hydrologues de terrain et les modélisateurs, "*les Caïn et Abel de l'hydrologie*" (Dunne, 1983).

In Memoriam

Cet article est dédié à la mémoire de Hans M. Keller (WSL/FNP, Birmensdorf-CH), coordinateur du Réseau Européen ERB, décédé accidentellement le 30 juillet 1993.

Références

AIHS (1965): Bassins Représentatifs et Expérimentaux. Actes du Symposium de Budapest, *AIHS Publ.* 66 (2 vol.), 710 p.

AMBROISE B. (1994,a): Les bassins de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht). Actes du Séminaire National "*Du Concept de BVRE à celui de Zone Atelier dans les Recherches menées en Eaux Continentales*", GIP Hydrosystèmes, 10-10/5/1994, 12 p (ce volume)

AMBROISE B. (1994,b): Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - Processus et modèles. In: P. Stengel (ed) "*Les Flux dans les Volumes Pédologiques et à leurs Limites: Approches à l'Echelle Spatiale du Bassin Versant*". "Les Colloques de l'INRA", 53 p (à paraître)

BARBET D. (1994): ICARE, *Inventory of Catchments for Research in Europe*. ERB Leaflet, CEMAGREF, Lyon, 4 p.

BARBET D., Givone P. (1993): Introduction to the ERB inventory (ICARE): inventory of catchments for research in Europe. In: M. Robinson (Ed.) "*Methods of Hydrological Basin Comparison*", Proc. 4th ERB Conference, Oxford, 29/9-2/10/92, Institute of Hydrology, Report N° 120, Wallingford (U.K.), 22-29.

BURT T.P., Walling D.E. (Eds.) (1984): *Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology*. Geobooks, Norwich (U.K.), 593 p.

CAPPUS P. (1960): Bassin expérimental d'Alrance - Etude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche* No A, 493-520.

CHRISTOPHERSEN N., Neal C. (1990): Linking hydrological, geochemical and soil chemical processes on the catchment scale: an interplay between modeling and field work. *Water Resour. Res.* 26(12), 3087-3100.

CST/BVRE (1990): *Bilan d'activité pour la période 1985-89 - Contribution à une évaluation des BVRE*. Conseil Scientifique et Technique des Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux, MRT, CEMAGREF, Lyon, 11 p. + ann.

DECOURSEY D.G. (1991): Mathematical models: research tools for experimental watersheds. In: D.S. Bowles et P.E. O'Connell (Eds) "*Recent Advances in the Modelling of Hydrologic Systems*", NATO ASI Series C, Vol. 345, Kluwer Academic Publ., 591-612.

DE MARSILY G. (1990): Rapport d'Evaluation du Programme BVRE du CEMAGREF (extraits). In: CST/BVRE "*Bilan d'activité pour la période 1985-89 - Contribution à une évaluation des BVRE*", CEMAGREF, Lyon, Annexe D2, 6 p.

DUBREUIL P.L. (1989): Pour un suivi à long terme de l'évolution des ressources en eau grâce à un réseau européen de bassins de référence. *Hydrogéologie* 2, 111-114.

DUBREUIL P.L. (Ed.) (1974): Décennie Hydrologique Internationale -Résumés des résultats de recherche obtenus par la France sur bassins représentatifs. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol XI, n°2, 65-174.

DUNNE T. (1983): Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. *J. Hydrol.* 65, 25-48.

HEWLETT J.D. (1961): Watershed Management. In: "*Annual Report 1961*", USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC, USA), 61-66.

HEWLETT J.D., Lull H.W., Reinhart K.G. (1969): In defence of experimental watersheds. *Water Resour. Res.* 5, 306-316.

HOOGHART J.C., Posthumus C.W.S., Warmerdam P.M.M. (Eds) (1990): *Hydrological Research Basins and the Environment*. TNO Committee on Hydrological Research Proceedings and Information No 44, CHO-TNO, Den Haag (NL), 347 p.

HORNUNG M., Roda F., Langan S.J. (1990): *A review of small catchment studies in Western Europe producing hydrochemical budgets*. Air Pollution Research Report 28, CEC-DG XII, Bruxelles (B), 186 p.

KELLER H.M. (1988): European experiences in long-term forest hydrology research. In: Swank W.T., Crossley D.A. (Eds), "*Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*". Ecological Studies 66, Springer Verlag, 407-414.

- KIRKBY M.J. (Ed) (1978): *Hillslope Hydrology*. Wiley-Interscience Publ., 389 p.
- KUSTAS W. P., Goodrich D.C. (1994): Preface to the Special Section: Monsoon '90 Multidisciplinary Experiment. *Water Resour. Res.*, 30(5), 1211-1225.
- LIKENS G.E., Bormann F.H., Pierce R.S., Eaton J.S., Johnson N.M. (1977): *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer Verlag, 146.
- MAILHOL J.C., Ferry M., Oberlin G. (1984): *Recommandations en matière d'équipement de bassins versants de surface inférieure ou égale au km²*. Note HHAN, CEMAGREF, Antony, 26 p.
- ROBINSON M., Andersson L., Blazkova S., A. Herrmann, P. Seuna, F. de Troch, D. Viville, P. Warmerdam (1993): Inventory of research basins. In: M. Robinson (Ed) "*Fow Regimes from International Experimental and Network Data (FRIEND), Volume III: Inventory of Streamflow Generation Studies*", UNESCO-IHP IV, 59-60 + 144 p. ann.
- ROBINSON M., Whitehead P.G. (1993): A review of experimental and representative basin studies. In: M. Robinson (Ed.) "*Methods of Hydrological Basin Comparison*", Proc. 4th ERB Conference, Oxford, 29/9-2/10/92, Institute of Hydrology, Report N° 120, Wallingford (U.K.), 22-29.
- RODIER J. (1982): La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n°2, 1982, 115-127.
- SPREAFICO M., Bigler R. (1980): *Verzeichnis der Hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz*. Landeshydrologie, Mitteilung Nr 2, Bern (CH), 294 p.
- SWANK W.T., Crossley D.A. (Eds) (1988): *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. Ecological Studies 66, Springer Verlag, 469 p.
- TOEBES C., Ouryvaev V. (Eds) (1970): *Representative and Experimental Basins - An International Guide for Research and Practice*. Studies and Reports in Hydrology 4, UNESCO, Paris, 348 p.
- VOGT H., Slaymaker O. (Eds) (1986): *Erosion Budgets and their Hydrological Basis*. Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 60
- VUILLAUME G., Cosandey C. (Eds) (1979): *Inventaire Actualisé des Bassins Représentatifs et Expérimentaux Français*. Programme Hydrologique International, ORSTOM, Paris, 96 p.
- WARD R.C. (1971): *Small Watershed Experiments - An appraisal of concepts and research developments*. University of Lull, Hull Printers Ltd, U.K., 254 p.

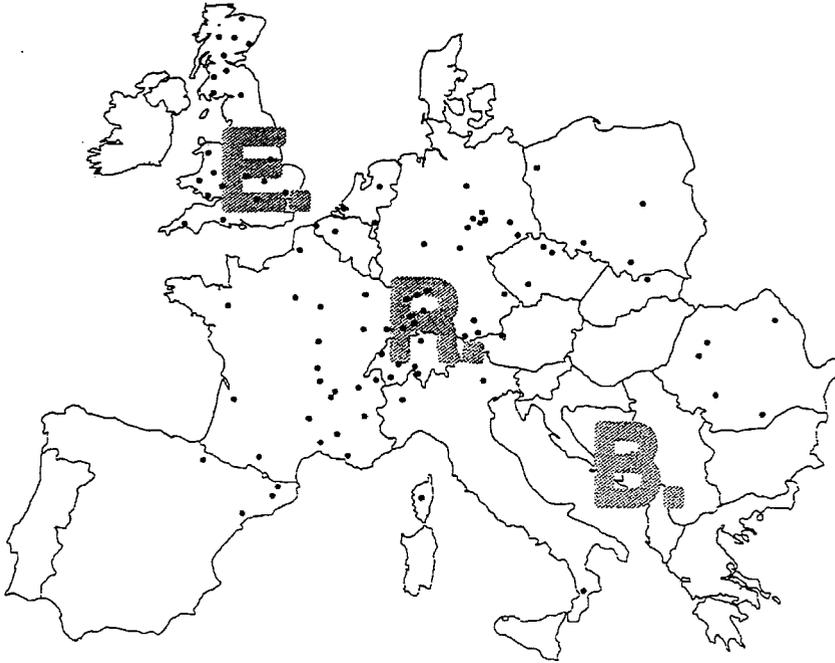


Figure 1: Le réseau européen ERB (European Network of Experimental and Representative Basins) (d'après Barbet, 1994)

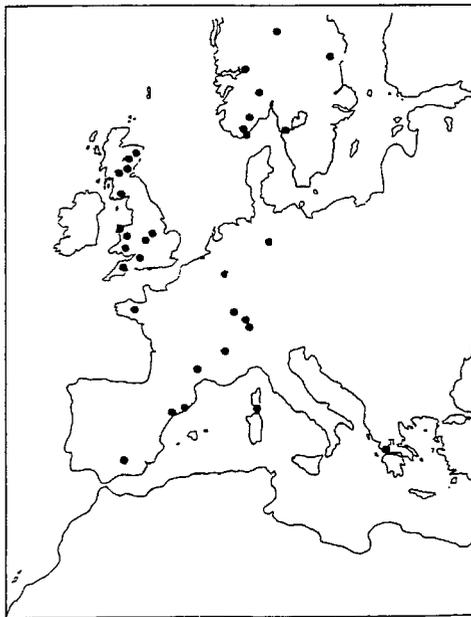


Figure 2: Bassins de recherche à dominante "Bilan hydrochimique" en Europe de l'Ouest (Hornung et al., 1990)

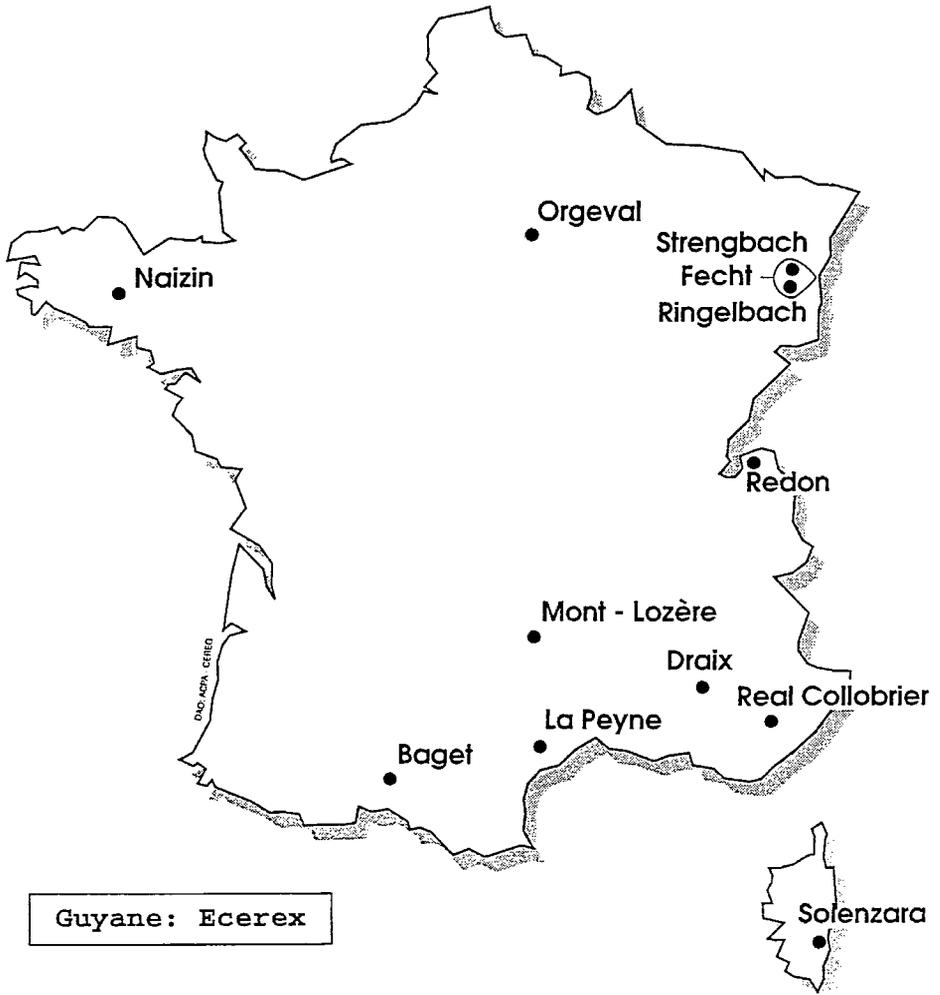


Figure 3: Bassins de recherche français en milieu rural

L'outil BVRE : bilan et perspectives, vus à travers le comité scientifique et technique (CST) des bassins versants représentatifs et expérimentaux (BVRE).

Guy OBERLIN, secrétaire du CST BVRE
CEMAGREF, 3 bis quai Chauveau
69336 Lyon cedex 09
Tél : 72 20 87 72 - Fax : 78 47 78 75

Introduction

Cette note fait suite à un premier exercice de "bilan et perspective", réalisé en 1990 (période 1985-89), et auquel il est fréquemment fait référence. On pourra pour plus de détails, consulter ce rapport disponible sur demande auprès du secrétariat du CST/BVRE.

Bref rappel historique

Le contexte de création du CST BVRE

En 1985, le Ministère chargé de la Recherche et de la Technologie (MRT) réunissait un groupe de travail (une trentaine de participants), de concert avec les Ministères chargés de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Équipement, pour réfléchir sur la politique adéquate à mener en expérimentations de terrain pour les recherches en hydrologie, et plus particulièrement sur la coordination nationale, voire internationale, à assurer autour des sites dits BVRE.

Suite à des expériences relativement légères menées précédemment, entre autres deux "inventaires" nationaux (fin des années soixante, par ORSTOM, puis début des années quatre vingt, par le CNRS), ce groupe proposait de franchir une étape structurelle vers une coordination plus forte. Il a ainsi conduit, entre autres, à la création d'un Comité permanent de suivi (CST BVRE), à la mise en place d'un inventaire informatisé permanent de ceux-ci (ICARE), à la délimitation de moyens d'équipements (alors dits "de jouvence") de soutien à une sélection de BVRE de référence, et au lancement d'une initiative internationale (réseau BVRE/ERB et sa note semestrielle BREVES).

Par souci de déconcentration, le MRT confiait la gestion de ceci à un EPST (CEMAGREF), sous "contrôle" du Comité. Pour garder une adaptabilité, indispensable à la complexité de la problématique scientifique de l'hydrologie, il était décidé de ne pas définir des critères fixes de "label" BVRE, mais de s'appuyer en permanence sur le contenu de l'inventaire.

Outre les aspects nationaux, le contexte de création progressive d'une "structuration européenne" de la recherche et, au-delà, d'une structuration mondiale (PHI, PHO, IGBP et al.), n'étaient pas étrangers à ces réflexions et propositions.

Les premières années 1985-89

On peut résumer en indiquant que la faisabilité des propositions était évaluée comme positive dès 1986, entre autres par l'implication de fait du CEMAGREF (gestionnaire d'une bonne moitié des BVRE qualifiables de référence), par les convictions et le soutien de ORSTOM (peu présent en gestion de par ses priorités en tropical), par l'intérêt du CNRS, par la volonté politique du MRT (ultérieurement MRES) et, in fine, par l'importance du marché de l'eau et de l'effort de recherche qu'il implique. Quelle que soit la méthode de calcul, on aboutit en effet rapidement à un coût relatif très faible de ces efforts de coordination, équipements de jouvence inclus, et d'autant plus que la coordination assurée permettait d'améliorer l'efficacité des divers moyens mis en oeuvre jusqu'à présent.

Dès 1987, le CST se réunissait régulièrement (2 à 3 fois par an), l'inventaire ICARE (progressivement international) pouvait être utilisé, les crédits de jouvence étaient mis en place (sous forme d'AIP au budget "mi-lourds" du CEMAGREF), le réseau européen fonctionnait, et les BVRE français émergeaient de plus en plus sur la scène internationale. Ce dernier élément procédait d'efforts et de moyens dépassant largement le seul contexte de la coordination sous l'égide du CST, mais cette cohérence était effective, et ceci mérite d'être souligné.

Pour ne pas faire double emploi avec les évaluations scientifiques des programmes de recherche en hydrologie, tâches pour lesquelles il n'avait d'ailleurs pas été créé, le CST mettait progressivement en place une déontologie de son fonctionnement. Les évaluations de programme sensu stricto faisaient l'objet de procédures particulières, uniquement sur saisine explicite du MRT (ou d'un autre Ministère), et avec le soutien d'un panel d'experts ("associés") dont une liste nationale était établie.

Le contexte de 1989, et les questions posées alors

Après 3 à 5 ans de fonctionnement de ces diverses missions BVRE, le MRT demandait au CST un premier bilan de ses actions, et une contribution au problème plus général de l'évaluation des BVRE en tant qu'outil de recherche en hydrologie et en sciences connexes. Cela aboutit au rapport déjà cité de 1990 qui peut être résumé par les grandes lignes suivantes. On notera que, par souci de bien assurer la continuité des évaluations, le paragraphe 5 de cette note reprend exactement la plupart des questions posées en 1989-90 et résume les réponses qui y ont été, ou non, apportées depuis.

En 1989-90, la principale préoccupation est la suivante : le bilan des BVRE est à l'évidence bon, et d'autant plus que l'actualité hydrologique se polarise alors sur la compréhension des processus hydrologiques, domaine de l'hydrologie dite analytique, où les expérimentations de terrain sont incontournables. Mais les laboratoires manquent d'ingénieurs et de techniciens (ITA), et plus particulièrement de spécialistes en météorologie. Par ailleurs les budgets de fonctionnement ne sont pas suffisamment orientés vers ces indispensables et pourtant fructueuses mesures et observations de terrain.

Le dispositif fonctionne donc assez bien, mais avec des palliatifs : des chercheurs passent trop de temps à faire des mesures ou des traitements de données, où ils risquent de plus d'être moins efficaces que des techniciens formés pour cela, et les coûts de fonctionnement sont plus ou moins prélevés sur des crédits d'actions finalisées, ce qui rend les plans de financement particulièrement complexes.

En d'autres termes, la coordination interne a été faite avec une rationalisation de l'ensemble des équipements, mais la reconnaissance de ces unités comme des laboratoires mi-lourds n'a été réalisée qu'en partie. Déjà à cette date, le CST suggérait que l'on progresse en renforçant la structure, pour passer d'une coordination à une action plus structurée et permanente. On voit que la question principale de ce séminaire de 1994 était déjà posée en 1989-90. La relative libéralisation des politiques menées depuis est sans doute à l'origine des faibles progrès enregistrés dans cette direction, la création du GIP Hydrosystèmes étant l'exception qui confirmerait la règle ...!

Le CST actuel et son mode de fonctionnement

En 1994, le CST a une composition (liste en annexe) un peu plus large qu'à ses origines pour ce qui est des experts (10 au lieu de 8 ; il y a maintenant un représentant formel du GIP), mais les représentants des Ministères, théoriquement au nombre de 4, sont moins présents qu'à l'origine. L'actuel Ministère chargé de la recherche (MESR) a même éprouvé des difficultés pour choisir son représentant, le vaste domaine des recherches en hydrologie n'ayant pas été de suite bien localisé, au MESR, entre les sciences de l'univers et celles de l'environnement. Les membres sont renouvelés par propositions internes, donc plus ou moins cooptés, et les 4 Ministères concernés sont représentés. Même si les experts n'ont pas de statut de représentativité de leurs EPST et Universités d'origine, il y a de facto une représentation générale de l'ensemble de la communauté scientifique concernée, Ministères de tutelles compris (les Collectivités Territoriales et les Agences de l'Eau sont cependant encore absentes).

Le Comité se réunit 2 à 3 fois par an, au moins une fois sur un site de BVRE (1.5 jour), au moins une fois à Paris (0.5 à 1.0 jour). S'y ajoutent certaines missions spécialisées (2 à 3 membres concernés), la participation au fonctionnement du réseau européen (2 à 3 membres concernés, ou les experts dits associés), et bien sûr des échanges épistolaires, dont certains à pouvoir de décision. Le président est actuellement Pierre Pernès (depuis 1993), de l'ENGREF. Le secrétariat est assuré depuis Lyon, principalement au CEMAGREF (tenue du secrétariat sensu stricto et de l'inventaire, avec les moyens de la division hydrologie-hydraulique, gestion des crédits avec les moyens de l'équipe de direction du Groupement), Guy Oberlin étant secrétaire principal, avec la collaboration de Bernard Chocat, de l'INSA et du GRAIE.

Si toute question concernant les BVRE peut être mise à l'ordre du jour, la préparation du budget annuel suit un calendrier relativement rigide :

- appel d'offre permanent, et sous forme libre, déposé au secrétariat ou directement auprès du président ;
- hiver : dépôt auprès du CEMAGREF du montant total de la demande de crédit d'équipement pour l'année suivante ;
- printemps et été : examen des demandes au fur et à mesure de leurs arrivées ;

- automne : liste indicative des demandes retenues, déposée officieusement par le secrétariat (p.i. et demande de confirmation du total) au CEMAGREF ; nombreux échanges avec les éventuels futurs bénéficiaires pour affiner leurs demandes ; les critères sont réduits s'il s'agit d'une simple "jouvence" sur un site de référence reconnu et pour des programmes en cours et largement évalués par ailleurs ; ils sont plus lourds s'il s'agit de cas moins classiques ;

- hiver de l'année du budget à mobiliser : liste définitive des recommandations d'usage de l'enveloppe des crédits mi-lourds de l'AIP BVRE, expédiée par le président du CST au Directeur Général du CEMAGREF ; le secrétariat est ensuite en charge de la gestion de ces crédits (conventions de redistributions pour les BVRE non CEMAGREF) et de l'information a posteriori du CST sur les résultats des investissements effectués (essentiellement dans l'inventaire et dans la bibliographie, une note spécifique n'étant exigée que sur demande, et pour clore les conventions).

On notera le souci d'un mode de fonctionnement efficace, alliant une modestie de moyens et donc de coût, la continuité des actions et du suivi (entre autres grâce à l'inventaire et au CST permanents). Cette procédure garantit mieux que des appels d'offres plus formels la continuité dans les critères et les évaluateurs. La large représentativité du CST, par ailleurs très ouvert, évite que la continuité n'engendre des scléroses, ou des positions acquises qui perdureraient sans justifications scientifiques renouvelées.

Si le renouvellement des membres du CST s'est fait convenablement, il n'en a pas été de même du secrétaire principal qui est resté en place depuis 1986, malgré des efforts répétés, et largement affichés (et toujours d'actualité ...), pour se faire remplacer ! Si la relative originalité de fonctionnement du CST peut en partie expliquer la difficulté de trouver un secrétaire disponible, une rotation à ce poste reste nécessaire, et la rendre possible, voire obligatoire, peut être un des motifs de choix d'une nouvelle structure à venir pour le futur CST ou ce qui en tiendrait lieu.

Évolution des missions

Si les aspects formels du CST BVRE peuvent sembler stables depuis 1986, il a de fait su évoluer, soit en réponse à des actions externes, soit de sa propre initiative, bien sûr avec l'aval des représentants de ses tutelles qui en sont membres.

S'adapter à la demande

En caricaturant, le CST est passé d'un rôle ingrat d'évaluation-sélection, à ses débuts, à un rôle de soutien partiel, devenu principal aujourd'hui.

En 1986, il a tout d'abord fallu caractériser le dispositif français d'expérimentations hydrologiques. Plus de 100 sites susceptibles de pouvoir être qualifiés de BVRE, ou de candidats BVRE, ou "potentiellement" BVRE, étaient ainsi répertoriés dès 1986. Ensuite, il a fallu progressivement orienter les financements (crédits de jouvence, en particulier) vers les sites les plus intéressants, sans pour autant éliminer des sites secondaires pouvant intéresser la recherche en hydrologie. Après 1989, cette sélection était effectuée et reconnue, l'inventaire a été drastiquement épuré et n'y figurent plus, depuis, que des sites à l'évidence de référence (fermés inclus), et des sites originaux, ou potentiellement BVRE pour le futur, soit une trentaine en tout. Aujourd'hui des sites nouveaux y sont incorporés.

Cette émergence progressive, grâce à l'inventaire, de sites de références a, en contrepartie, permis au CST de devenir progressivement un soutien potentiel (partiel !) de ces sites. Se sont ensuite ajoutées des tâches d'incitation à la qualité, de valorisation européenne, et d'émergences de sites nouveaux, tâches détaillées quelque peu ci-après.

De la jouvence à la qualité

Favoriser la "jouvence" de sites dont l'équipement vieillissait et n'était plus à la hauteur des besoins, et dont le renouvellement était difficile à intégrer dans des appels d'offres très finalisés (y compris en recherche fondamentale), est à l'évidence une action dirigée vers une meilleure qualité des observations et informations qui en découleront. Mais il s'agit en quelque sorte de la qualité de base, ou du premier niveau de la recherche de qualité.

Un second niveau a été défini en 1989-90 à partir des constats de lacunes ou de carences établis lors des évaluations. Il s'agissait en résumé :

- de réduire les lacunes en période de gel, et tout particulièrement pour les précipitations ; ceci concerne une majorité de BVRE, même en plaine ;
- de réduire les lacunes liées à la neige (chutes, stocks et valeurs en eau) ; ceci ne concerne que les BVRE de montagne ;
- de redétailler parfois (surtout spatialement) des mesures qui, lors des inévitables insuffisances de crédits que connaissent les sites pérennes, avaient fait l'objet de réductions (trop) drastiques ;
- de compléter des termes de bilans ignorés ou mal contrôlés, voire des phases de processus négligés, comme les ETR et les infiltrations en profondeur (parfois déjà l'eau dans le sol superficiel), du moins sur les sites de références ayant vocation à boucler les bilans ;
- de réunir les opérateurs en bases de données BVRE pour tenter de préparer un outil commun ... de qualité, permettant une meilleure collaboration et mise à disposition de données, dont on maîtriserait mieux la représentativité.

En résumé, on peut dire que le CST a fait évoluer le concept initial de jouvence vers un concept de qualité des dispositifs expérimentaux. Cette démarche a progressivement été étendue à la conception et à la mise en place de bases de données (projet BRECHE).

Les implications d'une émergence européenne

En 1985-86, lors du groupe de travail qui est à l'origine du CST BVRE, les ambitions internationales visaient surtout les travaux issus de la recherche, et donc une reconnaissance via les publications. Dès le démarrage du CST, il est apparu intéressant de tenter à l'échelle européenne ce qui prenait corps en France, bien sûr dans les limites d'un exercice international. En 1987 Pierre Dubreuil lançait le réseau dit BVRE/ERB et son bulletin de liaison BREVES, en s'appuyant sur les outils du CST BVRE (inventaire, etc...).

Dès 1988, fort du relatif soutien national qu'impliquait le CST, plusieurs gestionnaires de BVRE se lançaient dans l'aventure des contrats de recherche

européens, en association, et les fruits de ces initiatives sont toujours présents en 1994 : plusieurs BVRE sont impliqués dans des contrats européens, voire en sont les pivots, même si les thèmes, équipes et BVRE concernés changent.

En contrepartie de cette rapide émergence, qui profite indéniablement aux outils BVRE, aux chercheurs et aux laboratoires concernés, des obligations s'installent, comme celle de pérenniser le réseau malgré les rotations de responsables, d'assumer des protocoles expérimentaux difficiles malgré l'absence d'ITA, etc... D'une certaine manière tout ceci est difficile et délicat à réaliser par une coordination nationale encore si légère, même si très volontariste. Plus qu'ailleurs, l'émergence européenne liée aux BVRE (et sans doute toutes les autres) exige que les chercheurs et équipes concernés soient structurellement soutenus, au moins à moyen terme.

On a longtemps espéré un tel soutien direct depuis l'UE (ex CE), mais il n'est pas venu, et les autorités européennes renvoient aux nationales, en principe par règle de subsidiarité, en pratique pour laisser la sélection se réaliser via les règles libérales de concurrence ...

Les sites nouveaux

Jusqu'en 1989-90, le terme de site, ou de BVRE, nouveau était presque tabou ! Depuis, le tri ayant été fait, aussi bien que possible, le CST a osé aborder l'indispensable aspect de renouvellement, ou de complément, du réseau de BVRE. Aujourd'hui, c'est presque devenu banal, avec toutefois deux difficultés : l'évaluation est plus lourde car il n'y a moins d'antécédents d'évaluations sur des programmes en cours (évalués par les autorités de tutelle de ces programmes), et les Collectivités Territoriales prennent des initiatives (parfois confondues avec des "observatoires" de l'environnement) trop nombreuses et trop peu renseignées pour que le CST, dans sa configuration actuelle, puisse toujours agir efficacement, et à temps.

Cette ouverture vers des sites nouveaux a principalement concerné des complémentarités de thématiques et de sites BVRE : régimes glaciaires, pour eux-mêmes et pour la problématique de changement climatique ; sites péri-urbains et urbains, pour les enjeux socio-économiques des réseaux pluviaux et leurs impacts sur les milieux récepteurs ; sites à pesticides ; sites en façade atlantique (trop peu représentés) ; etc.... Mais se dessine récemment une tendance à examiner des demandes liées à une problématique "eaux continentales", qui n'est pas nécessairement liée à des expérimentations en bassins, comme les transects hydroclimatiques ou les biefs de cours d'eau (échanges nappes/rivières et hydrobiologie). On aborde là tout naturellement la jonction avec la notion de site-atelier, concept né ailleurs, mais qui peut connaître au moins une convergence, sinon une synergie, avec celui de BVRE.

Quelques exemples d'actions spécifiques

Pour plus de détails, on se référera aux exposés des gestionnaires et chercheurs concernés. On donne ici le point de vue synthétique du CST BVRE.

Développement de l'expérimentation en sous-sol

Le soutien majeur a été accordé au BVRE de Naizin, géré par le CEMAGREF de Rennes, et sur lequel le BRGM a pris l'initiative de réaliser des équipements de forage et de piézométrie destinés, d'une part, à une problématique quasi-autonome de recherches sur les milieux fissurés et, d'autre part, à une contribution à la connaissance du devenir des pertes par infiltration profonde dans ce bassin. La relative spécialisation de l'expérimentation a conduit à attribuer le crédit d'équipement au BRGM, et non au gestionnaire du BVRE (CEMAGREF Rennes), sous réserve d'un accord écrit de bonne collaboration (devenir des équipements, des mesures, des données, etc.).

En outre l'INRA, autre organisme opérant sur ce BVRE, a reçu des aides pour affiner le suivi de l'humidité des sols. Ceci complétera un dispositif déjà amorcé par le CEMAGREF dans un programme d'hydrologie "spatiale" (mesures d'humidité des sols par radar embarqué sur satellite), et permettra un lien avec les observations en sous-sol.

Sur le total des crédits d'équipement reversés par le CEMAGREF à partir de son AIP BVRE (environ 1500 kF/an), environ 20 % ont permis de compléter ce contrôle des termes sols et sous-sol, tant des bilans que des processus.

Développement en échanges sol-atmosphère

Longtemps écartée par suite des difficultés météorologiques et d'interprétation (passer de l'ETP ou de l'Ebac à l'ETR, et/ou de l'ETR locale à la régionale), la caractérisation de l'évapotranspiration avait été anormalement négligée dans les BVRE. Les progrès des méthodes dites de gradient, puis des fluctuations, ont permis le développement d'une expérimentation sur ces termes qui commence à être pertinente pour établir avec rigueur les bilans hydrologiques : il vaut mieux une sortie ETR mesurée avec de larges erreurs, qu'une ETR de fermeture qui stérilise le bilan et bloque l'analyse des processus.

Par ailleurs, les évaluations des premières expérimentations "coup de poing" liées au programme GEWEX (flux d'énergies latentes et sensibles entre sol et atmosphère), comme les HAPEX et alter, démontrent ce qui était connu de la part des hydrologues : il faut assurer un minimum de pérennité dans l'acquisition et le suivi des mesures pour se dégager de la variabilité temporelle, afin d'extraire une variabilité spatiale représentative du régime des échanges sols/atmosphère. Et les BVRE sont, entre autres, faits pour cela.

Le CST a donc proposé aux gestionnaires de BVRE de développer ce nouveau volet expérimental. Mais seules les équipes les plus à l'aise acceptent le challenge (Vosges, Naizin et Réal, actuellement), et on observe ici les limites des aides réduites aux seuls équipements. Ce point exigera donc d'autres efforts d'incitation, et un point de passage obligé semble être la disponibilité d'ITA spécialisés en météorologie.

Sur les 1500 kF/an d'équipement de l'AIP BVRE déjà citée, seulement 12 % environ (depuis qu'une incitation est faite dans ce sens : 1992) ont concerné les échanges sol-atmosphère, vu les difficultés évoquées.

Démarrage d'une action collective d'amélioration des bases de données

Sous le nom de BRECHE, ce qui a tout à la fois un sens commun (ouvrir une brèche dans le mur des difficultés et enjeux liés aux bases de données) et un sens de sigle (**B**ase de données et de logiciels, pour les **B**assins de **R**éférence **E**uropéens, affectés aux recherches en **E**aux **C**ontinentales et en **H**ydrologie de l'**E**nvironnement), un projet concernant l'élaboration commune d'une future base de données BVRE est né en 1991. Ce projet est par ailleurs potentiellement commun à d'autres programmes (comme FRIEND), voire aux outils des bases nationales qu'il pourrait efficacement enrichir.

Il s'agit prioritairement d'améliorer la qualité des données par une meilleure normalisation de leurs règles de codages (les informaticiens disent "de modélisation"). Secondairement, il s'agit de mieux structurer la collaboration et la coordination interne au réseau BVRE (voire aux hydrologues) par l'emploi d'une base commune. Pour que cet effort de coordination soit récompensé, BRECHE à l'ambition d'être de très bonne qualité et moderne, avec un suivi permanent et collectif, l'effort de qualité étant économiquement acceptable par la mise en commun des moyens de tous les laboratoires participants, lesquels portent sur BRECHE les efforts qu'ils auraient investis en ordre dispersé sur une base de données propre à leur seul laboratoire.

Le CST a bien voulu apporter une contribution au lancement de ce projet (en 1992 et 1993), par des crédits d'équipements "de compensation" sur les BVRE des laboratoires participants, de l'ordre de 10 % du total de l'AIP. A présent que les 3 phases initiales de ce projet sont presque achevées (courant 1994), un relais doit être pris, et le GIP Hydrosystèmes va être sollicité dans ce sens.

Collaborent actuellement à BRECHE : CEMAGREF, ORSTOM, LCPC, INRA et CNRS (Moulis).

Mesures structurelles de réduction de lacunes des chroniques

La "jouvence" des équipements de base est un premier pas vers la réduction des lacunes et elle a concerné tous les BVRE de référence. Représentant en moyenne 20 % de l'enveloppe de l'AIP déjà citée, cette part a tendance à se réduire, les crédits ayant des affectations de plus en plus ciblées.

Des équipements "hors gel" ou "neige" sont une étape également indispensable sur une bonne moitié de sites, surtout en montagne et dans l'est du pays. Environ 5 % de l'AIP y ont été consacrés depuis 1990 (Sarenne, Mt Lozère, Draix, TPG, Grézieu, etc...).

A ces efforts spécifiques, il faut ajouter un effort de l'ordre de 10 % de l'AIP (depuis 1990) pour d'autres contributions, coûteuses mais essentielles à l'amélioration de la qualité de sites ou à la résolution de problèmes difficiles, comme ceux concernant la mesure des transports solides d'écoulements chargés (Draix, ...), ou les pesticides à divers niveaux en surface et en sols (Allegro, Grézieu, ...).

Confortement des bassins repères à long terme

Cet objectif est prioritaire mais fort difficile à mettre en oeuvre car peu d'organismes aujourd'hui peuvent assurer des soutiens constants à long terme. Le CST s'est courageusement engagé dans cette voie, entre autre sur le Réal Collobrier (Maures, CEMAGREF Aix), sur le Mt Lozère (CNRS) et sur Sarennes (CEMAGREF,

EdF et LGGE; Grenoble). Bien lui en a pris puisque le Réal a par ailleurs domicilié des programmes à court et moyen termes, et que Sarennes est une réussite en terme de collaboration et de partenariat. La situation est plus difficile pour le Mt Lozère, mais tout BVRE à vocation pérenne passe de temps à autre par des phases de baisse d'activité qui ne signifient pas nécessairement une fermeture prochaine ou inéluctable.

Il n'est pas possible d'estimer la part que l'AIP a investi pour ces références à long terme. Cet objectif est en effet transversal et se retrouve pris en compte dans les opérations à plus court terme citées par ailleurs.

Maintien du rôle européen de coordination

En 1990, à Wageningen, la France (Pierre Dubreuil) a passé le relais de la coordination du réseau européen ERB (à la Suisse), et de l'édition du bulletin BREVES (au Royaume-Uni), comme il sied dans une collaboration internationale où la rotation est de règle. Par contre, il n'a pas été possible de transférer les tâches liées à l'inventaire, malgré la portabilité potentielle de l'outil SGBDR utilisé (DB2 sous OS/2).

Pour tenter d'officialiser davantage l'effort de coordination du réseau, une plaquette européenne de grande diffusion a été élaborée, et le CST a proposé une version française, le tout à la charge de l'AIP.

Le secrétaire du CST s'efforce de participer aux deux réunions annuelles du réseau, et de susciter une forte participation française, animation comprise, à la biennale du réseau qui se tient maintenant régulièrement, tous les deux ans depuis 1986 (réunion constitutive à Aix). Un dixième anniversaire est prévu en 1996, sur le site Vosges et à l'initiative du Cereg de Strasbourg.

Un maximum d'effort est fait pour reconnaître le caractère indispensable des BVRE, et l'intérêt d'une coordination, voire d'une structuration, en réseau international, entre autres dans le cadre du PHI et du PHO (Programmes Hydrologiques de l'UNESCO et de l'OMM), mais les projets avancent beaucoup plus lentement au niveau international, toujours très réducteur.

L'effort financier prélevé sur l'AIP pour ce maintien des actions internationales (initiées en 1987 sur des crédits MRT spécifiques aux réseaux) est compris dans les coûts dits de fonctionnement (secrétariat, inventaire, gestion des crédits, etc...), qui représentent une moyenne de 10 % au total (environ 150 kF/an).

Ouverture vers des site-ateliers non structurés en bassins versants

Le premier essai d'ouverture (demande TPG (Transect Pluie Gradient) du CEMAGREF, à la fin des années 80, pour des recherches hydrométéorologiques) a été un échec, le CST s'y étant unanimement (sauf le demandeur, qui doit s'abstenir ...) opposé. Plus récemment un autre réseau hydro-météorologique, il est vrai plus proche d'une approche de bassin (bassins urbains et périurbains de la COURLY, en 1989-90), et un site d'échange nappes-rivières (Grand Gravier, sur le Rhône, pluridisciplinaire à gestion CEMAGREF, en 1991) ont été retenus, ce qui a débloqué la situation, en même temps que le concept de site-atelier naissait par ailleurs au MRES (en 1992).

Sachant le GIP Hydrosystèmes actif sur ce nouveau concept, le CST BVRE a modéré le suivi des demandes de ce type, dans l'attente d'une doctrine en gestation, qui pourrait d'ailleurs largement s'inspirer des expériences BVRE, voire les intégrer pour gérer les deux concepts de manière coordonnée dans le futur.

En ajoutant à ces sites-ateliers avant la lettre, les nouveaux BVRE aidés (Sarenne en glaciologie, Paris en pollution par reprise de dépôts en réseaux, Arièrès en pesticides, etc...), le CST y a investi environ 15 % de l'AIP BVRE depuis 1990. C'est relativement modeste (rappel : total de l'AIP environ 1500 kF/an) compte tenu des coûts de démarrage d'un site, mais le CST n'est ni armé, ni mandaté, pour proposer d'investir massivement sur des sites nouveaux. Il ne peut qu'apporter un modeste complément pour soutenir un site dont la création a été décidée par ailleurs, pour des motifs de programme spécialisé à court ou moyen terme, et en faire un candidat potentiel au statut de BVRE de référence, si sa problématique est intéressante et sa qualité potentielle élevée.

Répartition des crédits d'équipement de l'AIP BVRE du CEMAGREF période 1990-1994 (en kF)

	1990	1991	1992	1993	1994
Jouvence sensu stricto (+ écoulements)	455	250	90	0	485
Qualité mesures et données	290	395	280	460	125
Réduction lacunes gel et neige	0	85	65	170	57
Complément terme sol et souterrain	200	140	895	85	50
Complément terme ETR et atmosphérique	40	0	0	520	383
Sites nouveaux complémentaires	210	250	275	115	250
Fonctionnement inventaire et réseaux	150	150	150	150	150
Totaux	1345	1270	1755	1500	1500

Les BVRE concernés par ces crédits sont gérés par divers EPST et organismes. Environ la moitié de ces crédits ont été affectés, en moyenne, à des BVRE du Cemagref, ce qui correspond bien au "poids" de ceux-ci dans le contexte français, outre que les BVRE du CEMAGREF sont très largement utilisés par des chercheurs non-Cemagref. L'autre moitié a été affectée, dans un ordre approximatif d'importance décroissante, à des BVRE du CNRS, des Collectivités Territoriales (surtout en urbain), de INRA, du Cergrene, du LCPC, de ORSTOM/CIRAD, etc... Dans certains cas (équipements spécifiques et/ou délicats), le crédit a été affecté à un non- gestionnaire du BVRE concerné (BRGM, EDF, Université, ...), sous réserve d'un accord contractuel avec le gestionnaire.

Quelles réponses ont été données aux questions et perspectives affichées en conclusions du bilan de 1989 ?

Le présent exercice, un peu formel, est néanmoins obligatoire pour rester cohérent avec le souci de continuité qui est une des règles de conduite du CST et de l'esprit de responsabilité durable qu'il veut promouvoir. Continuité ne signifie d'ailleurs nullement absence d'évolution, voire de révolution ou de rupture, mais plutôt évaluation permanente et complète, explicite ou implicite.

Neuf perspectives avaient été dégagées dans le rapport de 1990. Sans revenir sur leur formulation, nous allons tenter d'analyser leur état d'avancement.

Élargir le domaine d'utilisation des BVRE

On a observé, ces dernières années, un élargissement interne à l'hydrologie, et plus particulièrement en recherches sur les processus (liés aux sols, aux genèses des contaminations, et aux échanges avec l'atmosphère), ainsi qu'en représentativité (BVRE glaciaire, urbain, ...), auquel il faut ajouter l'irruption de site-ateliers très liés au cycle de l'eau (pluies, échanges nappe-rivières, ...).

Par contre, les ouvertures vers la biologie et l'hydrobiologie ont été modestes. L'échelle BVRE, voire sa structure un peu trop large pour des objectifs prioritairement liés au milieu aquatique lui-même, expliquent sans doute cela, et font recommander l'usage du BVRE comme des auxiliaires, utiles sinon indispensables mais toutefois secondaires, à utiliser avant des expérimentations en biologie qui sont d'abord à conduire en site-ateliers.

Hors le cycle de l'eau, l'élargissement se fait attendre. Les observatoires de l'Environnement, ou les programmes de recherche sur la qualité de l'air, ou encore les thématiques diverses qui gagneraient à exploiter des acquis sur l'eau et/ou sur les bassins eux-mêmes, restent pour l'essentiel des vœux pieux à ce jour.

Développer des thèses en hydrologie sur des BVRE

Sans avoir été jusqu'à proposer aux écoles doctorales et aux jurys d'exploiter le label BVRE pour pré-évaluer l'intérêt d'une thèse en hydrologie, ce qui aurait été un péché d'intégrisme ou de fondamentalisme, on peut avancer que nombre de thèses remarquables ont effectivement été fondées sur des expérimentations en BVRE. Cette situation a tendance à se développer, mais il est difficile d'évaluer l'influence relative de la mode actuelle (recentrer l'hydrologie sur les processus à bases physiques) et du développement d'un label BVRE sensu stricto.

Améliorer la représentativité du CST

Des progrès certains ont été réalisés, sans augmenter le nombre de membres. INRA, présent lors de la phase de lancement puis absent, a réintégré le Comité lors de son redéploiement interne vers l'Environnement et l'Eau. ORSTOM, membre dès l'origine mais d'abord peu participant de par la localisation tropicale de ses programmes, a réactivé sa participation. IFREMER a fini par nommer un expert. Le CNRS a renforcé le nombre de ses experts. Le BRGM, formellement absent, est de

fait représenté par un expert, et il en a été de même des thématiques spatiales et atmosphériques, etc...

Tout s'est passé, pendant cette période 1989-94, comme si la gestation du GIP Hydrosystèmes avait immédiatement déteint sur la composition du CST. C'est de bonne augure.

Par contre, la liste des experts associés, composée de quelques dizaines de spécialistes, que le CST avait pressentis pour être mobilisés en cas de besoin, n'a pas beaucoup été ... "associée" ! De même, l'ouverture du CST aux usagers non scientifiques n'a pas été entamée.

Il ne faut voir là aucune motivation de fermeture : conscient de l'étroitesse de sa mission, et souhaitant la poursuivre au mieux, et dans l'intérêt général, le CST a préféré, avec l'entier accord du MRES (on est pour l'essentiel avant 1993), rester efficace et ne pas virer au forum. En compensation de la modestie de ses effectifs, le CST a mené une politique très ouverte, sans aucune confidentialité de ses travaux et informations : personne ne s'est vu refuser, tel compte-rendu de réunion, telle décision de répartition de crédits, ou telle note d'évaluation ou d'information. Bien au contraire, le secrétariat s'est vu plusieurs fois recommander d'être plus discret !

Rechercher un soutien de la CEE

Les échecs antérieurs furent malheureusement confirmés : malgré de nombreuses démarches, menées en particulier par P. Dubreuil, ou via le Réseau Euro-Méditerranéen ERB (P. Dubreuil, puis H. Keller), et tant orales qu'écrites, et malgré la tenue d'Assemblées Générales biennales pour le Réseau, concomitantes à des séminaires scientifiques internationaux, tous de bonne tenue, les autorités européennes n'ont jamais voulu s'intéresser aux actions de coordination et de structuration entreprises, ni aux échelles pluri-nationales, ni à l'échelle euro-méditerranéenne. Au-delà du probable manque d'influence des animateurs du Réseau, et donc pour la France des membres du CST (au moins de son Bureau, ...), un non-dit semblait émaner des tutelles européennes de la Recherche (DG XII) : une situation concurrentielle entre BVRE (plus généralement, entre laboratoires de terrain) semblait préférée à une situation de réseau structuré, perçue comme pouvant acquérir un poids qui n'était visiblement pas recherché.

Rotation accélérée des membres du CST

Une rotation partielle a été assurée (environ 50 % des membres), mais d'autres membres sont au CST depuis l'origine, et souvent à leur corps défendant : qui n'a entendu le secrétaire principal, en charge de tâches délicates et à la longue moins motivantes, chercher en vain un remplaçant ?

Visiblement, l'utilité du rôle est reconnue et respectée, mais les candidats (participants et actifs) sont trop rares. Le CST gagnera sans doute, avec l'appui et l'autorité du GIP Hydrosystèmes, à durcir les règles et à limiter la durée des mandats, fussent de simples mandats d'experts comme actuellement.

Quel compromis légèreté/efficacité ?

A part un léger renforcement comme noté ci-dessus (cf. § 5.3), la réponse a été un statu quo. La situation était pourtant prête à évoluer, et dès 1990, si les vœux de mise à disposition d'ITA, pour gérer de manière coordonnée les BVRE français, avaient été concrétisés. Le CST était préparé à accroître ses missions, seul ou sous la tutelle d'un des Comités officiels alors déjà présents (le CCRPE, par exemple, le GIP Hydrosystèmes n'étant pas encore né). Mais compte tenu du statu quo des missions, et de leur limitation aux crédits "de jeunesse" et à l'animation du Réseau Euro-Méditerranéen, il a été jugé inutile de modifier le statut léger de la structure CST.

L'émergence du GIP Hydrosystèmes a conduit le CST à progressivement rechercher, dans sa mise à disposition du GIP Hydrosystèmes, une réponse à cette question.

Développement des expérimentations en régimes atlantiques et côtiers.

Il y a eu des réussites, comme le redémarrage du BVRE du Naizin (Bretagne), certes dû avant tout aux scientifiques qui le gèrent, l'animent et l'exploitent, mais aussi un peu au CST, qui n'a pas hésité à soutenir ce site avant qu'il ne soit reconnu.

Il y a eu des demi-réussites, comme un début de coordination des projets de création de BVRE côtiers, sans toutefois qu'émerge un BVRE côtier de référence (il y a déjà des sites ateliers : Charente par exemple).

Il y a aussi un échec relatif. Alors que la priorité était de créer des BVRE à l'Ouest, certains développements, bien sûr justifiés, ont encore privilégié l'Est : références climatiques glaciaires, transferts de pesticides, etc...

Des normes formelles d'agrément et de qualité pour les BVRE ?

Il n'y a jamais eu, au sein du CST, une conviction profonde et partagée par tous, pour établir une norme formelle qui serait un outil de sélection. La position qui a prévalu conformité dès l'origine, est de se baser sur l'Inventaire permanent (base ICARE) pour juger, chaque fois que nécessaire, de tel bassin d'expérimentation, au concept de BVRE. Cette solution semble toujours la meilleure ou la moins mauvaise.

Pour la qualité des BVRE, une réponse structurelle a été donnée : lancer un projet ambitieux de base de données qui poussera à la qualité des expérimentations, d'une part, via les attributs recommandés ou imposés et, d'autre part, via la relative transparence que cela imposera sur l'état des informations et données. Ceci a conduit au projet BRECHE, et à son groupe de travail qui rassemble au moins un représentant des principaux EPST concernés, avec là aussi un problème de candidats et de participants insuffisants en nombre.

Le CST a bien voulu soutenir le lancement de ce projet. Mais, situé en marge de ses missions, et en marge de la vocation des crédits annuels de l'AIP BVRE, il est à présent urgent de trouver un relais plus institutionnel. Le CST, ainsi que le groupe

BRECHE, se tournent avec insistance vers le GIP Hydrosystèmes, ainsi d'ailleurs que vers le PRH du CNRS, qui a proposé un atelier dans ce sens.

Quant à l'adaptation à des normes de qualité, comme celles de la famille dite ISO 2000, il n'est pas sûr qu'elle réponde efficacement à une problématique expérimentale dirigée par les besoins de la recherche. Mais le groupe BRECHE, s'il était soutenu, pourrait entrer une telle analyse dans son programme de travail, y compris en testant d'éventuelles solutions opérationnelles au niveau de la base de données.

Résoudre les insuffisances en ITA

Second échec patent : la réduction générale de l'emploi dans le secteur public accompagné d'une réduction relative des ITA en recherche font qu'aucun progrès n'a été enregistré. Seul des EPST gestionnaires, ont parfois pu affecter des ITA à leurs BVRE reconnus grâce au soutien du CST. Dans ces conditions, il n'a pas été utile de réfléchir aux modalités pratiques d'une gestion plus collective de l'ensemble des postes d'ITA dédiés aux BVRE.

Si demain ceci voyait le jour, l'éventuel renforcement, direct ou indirect, du CST et de son mandat, pour gérer l'affectation du personnel, serait devenue facultative, le GIP Hydrosystèmes ayant vocation à développer les actions inter organismes.

Réciproquement, si le CST a une composition et un outil (l'inventaire ICARE) qui lui donnent les informations l'autorisant potentiellement à faire des recommandations objectives de répartition des ITA, il n'en est pas de même du GIP Hydrosystèmes actuel.

On voit que les deux structures sont faites pour se compléter et collaborer, et prioritairement dans ce domaine sensible des ITA.

Conclusion : le point de vue d'un "ancien" du CST sur quelques unes des actions à entreprendre

Un certain nombre de recommandations pour l'avenir ont déjà été faites au paragraphe précédent, lors de l'examen des questions qui se posaient en 1989. On complétera par d'autres conclusions à caractère opérationnel. On ne reviendra pas sur l'intérêt à poursuivre ce type de coordination, n'en déplaise à ceux qui rêvent d'une concurrence plus libérale, et accrue, entre EPST créateurs et gestionnaires de BVRE.

Ratio coûts/avantages

Il serait bon d'explicitier le ratio, même si on le sait d'avance très faible et donc potentiellement performant, entre le coût des BVRE et l'importance du secteur économique de l'eau. Tous les acteurs ont intérêt à diffuser largement ces informations, mais l'exercice ne passionne pas les chercheurs. Ce serait pourtant une piste à suivre pour tenter de débloquer la situation liée à un manque de postes ITA.

Renforcer, d'une manière ou d'une autre, la structure de coordination

Il semble incontournable de structurer davantage, malgré l'alourdissement, pour passer de la coordination relativement légère actuelle à un vrai fonctionnement en réseau. Il semble tout aussi incontournable de profiter du GIP Hydrosystèmes pour ne pas créer une structure supplémentaire. Le CST pourrait ainsi servir de Conseil spécialisé, pour les BVRE et al. (site-ateliers?), à un GIP Hydrosystèmes qui, de par ses représentants officiels et mandatés des EPST concernés, aurait une action plus efficace que les simples recommandations actuelles du CST.

BRECHE

Il faut soutenir le lancement d'un projet de base de données commune, grâce au groupe de travail BRECHE, en le transformant en un programme définitif et reconnu par les EPST participants. Ce devrait être d'autant plus facile à réaliser que les moyens existent en ressources humaines : ce sont les nombreux mois-chercheurs et mois-ingénieurs que chaque EPST est de toutes manières obligé d'affecter en permanence à sa propre base de données. Le GIP Hydrosystèmes est donc sollicité dès maintenant, pour relayer le CST et motiver sur ce programme les organismes qui le composent. On a déjà cité la coordination nécessaire avec l'atelier "Bases de données", créé par le CNRS dans le cadre de son PRH.

En rassemblant les moyens, et en profitant de la dynamique créée par le lancement de BRECHE, chacun pourra faire beaucoup mieux. La contrepartie sera qu'au lieu d'avoir une base de données qui peut jouer comme arme de concurrence, on aura un outil commun. La concurrence, à supposer qu'elle soit efficace ici, se déplacera de toutes manières sur la production plus spécifiquement scientifique : qui s'en plaindrait ?

BVRE et réseaux d'observations généraux

Outre son intérêt propre aux BVRE, à leur gestion, à la qualité de leurs données et à la collaboration (faciliter l'échange des données), BRECHE peut aider les BVRE à mieux s'articuler avec les réseaux hydrologiques généraux (hydrométriques, climatologiques, piézométriques, etc...). Compte tenu des enjeux climatiques, des collaborations qui se structurent autour des programmes de type GEWEX (préparation des couplages de modèles hydrologiques et atmosphériques, avec pour l'instant confrontation de leurs résultats), et de l'intérêt permanent de l'hydrologie dite régionale (pour la gestion intégrée des eaux, enfin en voie de démarrage), l'hydrologie a tout intérêt à ce qu'il existe des liens forts entre BVRE et réseaux de base. Le GIP Hydrosystèmes, de par sa vocation finalisée, ne peut que soutenir le développement de ces liens.

On retrouve la même perspective dans le domaine des modèles : les modèles synthétiques régionaux, élément clé de la gestion intégrée des eaux, et les modèles continus à base plus ou moins déterministe, élément clé des analyses de processus, peuvent se valider réciproquement, si des données expérimentales communes de qualité sont disponibles.

Un effort dans ce sens passe par le soutien de programmes internationaux de type FRIEND et ERB, créateurs de bases de données internationales, et qui feront peut-

être référence dans le proche futur. Ce sont des lieux privilégiés d'analyse des effets d'échelles spatiales et temporelles.

Si l'on doutait encore de l'intérêt de cette bonne articulation BVRE/réseaux, il suffirait d'examiner le soin extrême avec lequel bon nombre de nos principaux collègues étrangers veillent à cette liaison.

BVRE et Biologie

Par rapport à la composante hydrobiologique, les BVRE apportent une information amont, nécessaire mais pas suffisante, aux site-ateliers aval sur biefs qui paraissant incontournables en hydrobiologie.

Pour la biologie en général, et en y incluant la terrestre, le BVRE peut apporter des connaissances pertinentes de synthèse ("signatures" des bassins), mais beaucoup reste à faire dans ce qui est plus une intuition, parfois une conviction, qu'une réalité explicitée et publiée.

BVRE et Observatoires

Diagnostiqué depuis longtemps, le rôle potentiel des BVRE comme partie spécialisée d'un observatoire de l'Environnement, reste à concrétiser. Le niveau actuellement très médiatique et politique du choix et de la localisation de beaucoup de ces observatoires, n'a pas (encore) permis de confirmer ce diagnostic. Là aussi, une maîtrise efficace de l'information par une base de données performante (potentialités de mises à disposition et de diffusion, y compris par télétransmission, larges et fiables), pourrait aider à préciser ce rôle. En retour des services ainsi assurés, on conforterait un peu la stabilité (pérennité) recherchée pour les BVRE. Un BVRE intégré à un site-atelier plus vaste, serait a priori mieux placé.

Risques de foisonnements

Il faudrait imaginer une mission permanente d'évaluation des sites potentiels de BVRE, de Site-Ateliers, voire d'Observatoires, chargée, d'une part, de diffuser ses informations et, d'autre part, de tenter une coordination. Sans vouloir trop contrôler et réduire, des économies et des synergies pourraient sans doute être décelées à la satisfaction de tous, grâce à un effort de cohérence.

Les principaux lieux de créations isolées et non concertées de tels sites sont les Collectivités Territoriales et les Universités.

Soutien international ...

Malgré les déceptions passées et actuelles, le CST et le GIP Hydrosystèmes, si possible de concert avec les réseaux internationaux comme ERB (Réseau Euro-Méditerranéen de BVRE) et FRIEND (AMHY, NWE, AOC, ...), devraient continuer à agir pour préparer sans nul doute l'inévitable coordination internationale en matière d'expérimentation hydrologique qui verra le jour demain.

Rotation des membres

Toutes ces activités sont passionnantes, mais correspondent à une lourde charge. Alors que le lecteur permette que ce paragraphe stratégique sur l'avenir se termine par un des petits bouts de la lorgnette : la nécessaire et souhaitable rotation des membres d'un Comité comme le CST, qu'il soit ou non sous la tutelle d'un GIP, doit être réalisée, et les règles pour y arriver doivent être énoncées ... Les contraintes ne doivent toutefois pas mettre l'édifice en péril.

Le mot de la fin

La présente note se base sur une analyse du passé, et sur l'expérience de l'auteur, pour tenter de préparer l'avenir. C'est sans doute nécessaire, mais pas suffisant, et on sait que trop d'expérience stérilise.

Cet exposé d'"ancien" sera donc volontairement suivi, pour conclure cette matinée, par le point de vue du nouveau président du CST, homme d'expérience, mais "neuf" dans ce domaine de l'expérimentation hydrologique. Il peut donc apporter sa relative liberté de manoeuvre et ses idées et convictions nouvelles, comme seul quelqu'un qui découvre un nouveau domaine est capable de le faire.

MINISTERE chargé de la RECHERCHE
MINISTERE chargé de l'ENVIRONNEMENT

MINISTERE chargé de l'AGRICULTURE
MINISTERE chargé de l'EQUIPEMENT

BVRE / CST :

Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux / Conseil Scientifique et Technique

Liste des membres

CHARTIER TOUZE Nathalie	Représ. Fax	42 19 17 42 42 19 17 71	Ministère chargé de l'Environnement DGAD / Service Recherche 20 avenue de Ségur 75732 Paris 07 SP
CHOCAT Bernard	Expert Fax	72 43 82 09 72 43 81 89 72 43 85 21	INSA / Génie Civil / Bat. 304 20 Avenue A. Einstein 69621 Villeurbanne cedex
BOUX Maurice	Représ. Fax	49 55 49 55 49 55 50 63	Ministère chargé de l'Agriculture DERF 19 av. du Maine 75015 Paris
AUGER Christian	Expert Fax	46 48 21 00 46 48 21 88	IFREMER 155 rue J.J. Rousseau 92130 Issy Les Moulineaux
THOMAZEAU Robert	Représ. Fax	72 74 58 51 72 74 59 00	Ministère chargé de l'Equipement CERTU 9 rue Juliette Récamier 69456 Lyon cedex 06
VIVILLE Daniel	Expert Fax	88 35 83 83 88 41 13 59	ULPS / CEREG 3 rue de l'Argonne 67083 Strasbourg cedex
MEYBECK Michel	Expert Fax	44 27 51 48 44 27 51 25	Université Paris VI Géologie Appliquée 4 place Jussieu (Tour 26, 6e Et.) 75252 Paris cedex 5
NOUVELOT Jean-François	Expert Fax	67 61 74 00 67 54 78 00	ORSTOM / HYDROLOGIE BP 5045 34032 Montpellier
OBERLIN Guy	Secrétaire Fax	72 20 87 72 78 47 78 75	CEMAGREF 3 bis quai Chauveau, CP 220 69336 Lyon cedex 09
LAMA Elisabeth	Contact Fax	72 20 87 97 78 47 78 75	CEMAGREF 3 bis quai Chauveau, CP 220 69336 Lyon cedex 09

CLIN François	Représ. Fax	40 65 65 40 40 65 67 82	Ministère chargé de la Recherche MESR / MST DSPT "Environnement" 61, rue Dutot 75015 Paris
REA Michèle	Contact Fax	46 34 38 83 46 34 37 52	DSPT TOEE 1 rue Descartes 75231 Paris cedex 05
SANEJOUAND Renaud	Expert Fax	40 84 58 60 40 84 59 97	LCPC Bauches du Désert 44340 Bouguenais
STENGEL Pierre	Expert Fax	90 31 62 54 90 31 62 32	INRA Domaine St Paul BP 91 84140 Montfavet
PERNES Pierre	Président Fax	45 49 89 11 45 49 88 27	ENGREF 19, avenue du maine 75015 Paris
LEVEQUE Christian VERREL Jean-Louis	Représ. Fax	44 27 65 96 44 27 65 95	GIP Hydrosystèmes Université Paris VI 12 rue Cuvier 75005 Paris

Le CST BVRE : en rester à la structure légère, ou renforcer ?

Pierre PERNES, Président du CST BVRE
ENGREF, 19 avenue du Maine 75732 Paris cedex 15
Tél. : 45 49 89 11 - Fax. : 45 49 88 27

Introduction

Je voudrais rendre hommage au travail de mon prédécesseur à la présidence du CST, Jean Robert TIERCELIN, qui possédait une grande expérience de l'hydrologie scientifique.

Venant de prendre mes fonctions depuis quelques mois, je me considère comme un président "neuf". Vous voudrez bien en conséquence excuser le caractère "naïf" de mon exposé. Je suis hydraulicien, et me classerai volontiers parmi les aménageurs des eaux. Étymologiquement "neuf" et "naïf" ayant la même origine, je n'hésiterai pas à jouer de cette ambiguïté tout au long de mon exposé.

Objectif de l'exposé

Le CST BVRE mis en place en 1986 est une structure légère composée de personnalités recouvrant un champ aussi large que possible de compétences. Le CST propose les orientations de recherches, définit les priorités, suit le déroulement des programmes. Il assure la répartition des subventions via le CEMAGREF. Le secrétariat du CST doit assurer la coordination entre les BVRE et en assurer l'inventaire permanent. Telles sont, brièvement résumées, les missions actuelles du CST.

Peut-on actuellement identifier des missions nouvelles qu'il faudrait donner au CST ? C'est à cette question que le président "neuf" ou "naïf" que je suis va tenter de répondre.

Comment mieux exprimer le besoin de pérennité des BVRE ?

Qu'est-ce qu'un BVRE d'après le nouveau président du CST ?

C'est un instrument de recherche situé en milieu rural ou urbain qui doit mesurer des flux et des stocks de matières et d'énergie en fonction du temps.

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

Un BVRE est donc un système thermodynamiquement ouvert sur lequel on effectue des bilans ... pas uniquement hydrauliques! La connaissance des bilans hydrauliques est indispensable si l'on veut aborder ensuite l'étude d'autres bilans (matières solides transportées, azote, phosphore ...). Un BVRE apparaît comme un laboratoire de terrain à vocation semi-permanente. C'est ce qui oppose fondamentalement le travail effectué sur un BVRE au travail effectué dans un laboratoire de physique dans lequel un phénomène est étudié dans une durée finie.

Définir les caractéristiques spatiales et les conditions aux limites géométriques d'un BVRE est une entreprise très complexe (topographie, géomorphologie, pédologie, géologie, couverture végétale, pression anthropique ...). Les événements extérieurs de type météorologique et énergétique influencent considérablement le fonctionnement d'un bassin versant, et sont d'ordre stochastique. Sur le BVRE sont placés des instruments de mesure, en nombre limité, dont les emplacements ont fait l'objet d'une réflexion approfondie. Les mesures effectuées ont pour principal objectif de comprendre le fonctionnement du BVRE.

La qualité des mesures doit être constamment contrôlée. La variabilité structurale ainsi que celle des flux entrants fait qu'il est indispensable d'établir des chroniques de mesures continues. Des flux entrants hydro météorologiques grossièrement cycliques ne génèrent pas, hélas, des mesures sortantes redondantes dans le temps. C'est la raison pour laquelle un BVRE a une vocation de permanence des mesures.

Une mesure sur un BVRE est le résultat d'un ensemble complexe d'actions élémentaires. Il faut toujours avoir présent à l'esprit ces idées pour comprendre l'originalité et la difficulté du travail s'effectuant sur un BVRE.

Que peut-on attendre des mesures effectuées sur un BVRE ?

Le résultat peut paraître décevant, voire décourageant sur le plan scientifique. Il ne faut pas s'attendre à l'émergence de lois physiques spatio-temporelles globales. Il en résulte que toute transposition de résultats obtenus sur un BV sur un autre BV, même voisin, est une opération risquée. Un BVRE n'est représentatif que de lui-même... Cette conclusion lucide et pessimiste doit être tempérée par le fait qu'une émergence locale ou spécifique est possible à condition que les mesures réalisées constituent des chroniques longues, continues, et que leur qualité soit contrôlée. Il est alors possible d'axiomatiser certains fonctionnements, d'élaborer certains modèles qui peuvent être transposés à d'autres BV.

Un BVRE est un système qui évolue car :

- il "mesure" bien les conséquences d'une évolution anthropique : l'imperméabilisation, par exemple, d'un BV se traduit par l'apparition de débits jusque là inobservés.
- il va devenir l'objet de nouveaux programmes de recherches : par exemple les flux hydriques devront être préalablement maîtrisés avant d'aborder l'étude des flux géochimiques et des pollutions par différents solutés.

Toutes ces remarques banales ont pour conséquences :

- que la création d'un nouveau BVRE doit être mûrement réfléchi ;
- que sur un BVRE le coût d'équipement est relativement faible par rapport à celui du

fonctionnement ;

- que la permanence des mesures exige la permanence en personnels sur les sites, possédant un ensemble de qualités scientifiques et humaines, conséquence directe du fait qu'un BVRE est un laboratoire de terrain ouvert et semi-permanent.

Elles se traduisent à l'attention de nos tutelles par cette conclusion : les BVRE ont absolument besoin de subventions non décroissantes en fonction du temps, et de moyens en personnels permanents très importants.

Une illustration des potentialités des BVRE

On choisira ici la gestion des risques naturels, les POS et les aménagements pour alimenter les réflexions sur l'utilité des BVRE.

Que peut-on attendre des mesures effectuées sur un BVRE quand on a des responsabilités politiques locales ou des responsabilités d'aménagement ?

L'expérience de la crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992 est à cet égard très pédagogique. La catastrophe peut se résumer dans le triste bilan suivant : 41 victimes, environ 9000 sinistres personnels, 67 communes sinistrées, 12 ponts détruits, des digues et des routes emportées, des réseaux d'adduction d'eau potable et de communication divers endommagés.

La quantification de l'hydrogramme de la crue au niveau du pont romain de Vaison la Romaine repose sur :

- les relevés de 3 stations pluviométriques au pas de temps 6 minutes ;
- la répartition spatiale de la pluie par l'analyse des données de postes pluviométriques dispersés et de radar ;
- l'analyse de films vidéo ;
- l'analyse des laisses de crue.

Il faut savoir que les stations hydrométriques les plus importantes n'ont pas résisté à la crue.

Le débit de pointe est compris entre 900 et 1300 m³/s. L'imprécision sur les débits est de l'ordre de 20%. Ces données donnent à réfléchir, ainsi que leur incertitude.

Pourquoi cette crue a-t-elle été catastrophique ?

Parce que la vulnérabilité du site n'était pas en rapport avec la probabilité de l'aléa. La situation d'apparition d'un risque naturel résulte de la confrontation sur un site déterminé, d'un aléa hydraulique lié au fonctionnement d'un bassin versant, et de la vulnérabilité du site résultant de l'analyse de l'occupation du sol. Nous devons apprendre à gérer les risques naturels.

Se protéger contre un risque quantifié constitue toujours un choix politique d'aménagement. Le coût d'un aménagement repose donc bien sur les mesures effectuées sur un BV. La gestion des risques naturels doit être pensée à l'échelon national.

Disposons-nous actuellement d'une couverture en BVRE suffisante ? Je pense que non et, au-delà du secteur Sud-Est pris en exemple ici, singulièrement sur la façade atlantique !

L'activité du CST BVRE, et tout particulièrement celle de son secrétariat, par la qualité de son inventaire et de ses synthèses, pourrait aider les élus locaux et les services techniques chargés des aménagements à mieux gérer les risques naturels, et aussi à mieux réfléchir aux responsabilités de la mise en place d'un Plan d'Occupation des Sols sagement raisonné.

Toute assurance paraît onéreuse avant que la catastrophe ne se produise !

Équiper les BVRE, assurer la diffusion de leurs résultats, tout cela demande des moyens financiers et humains. Il est bon de rappeler encore une fois que le montant des investissements est dérisoire par rapport aux coûts des aménagements et au prix à payer par la communauté nationale après la survenue d'une catastrophe.

Et je n'ai traité ici que d'un domaine parmi d'autres, et je n'ai même pas choisi le plus classique (flux de pollutions).

Missions et moyens des BVRE

J'ai rappelé les missions du CST BVRE au moment de sa création. En ma qualité de président "neuf", j'ai été très surpris de l'inadéquation entre le volume des missions particulières dévolues au secrétariat du CST et les moyens extrêmement modestes dont il dispose.

Le secrétariat du CST est actuellement extraordinairement vulnérable. Je souhaite vivement qu'on renforce très vite la structure trop légère du secrétariat du CST. Redondance est source de fiabilité.

Il faut constituer autour de Guy OBERLIN et Bernard CHOCAT une petite équipe pérenne à laquelle ils communiquent, je pèse mes mots, leur irremplaçable expérience et connaissance des BVRE français ruraux et urbains.

Il faut que, sous leur direction, se développent plusieurs missions qui concourent toutes à augmenter et rentabiliser l'action globale des BVRE :

- coordonner les BVRE en les faisant travailler en réseau
- unifier les méthodes et les protocoles de mesures
- coordonner les informations sur les appareils (performance, fiabilité, mise en place, automaticité) et assurer ainsi une veille technologique et métrologique
- mettre en place des protocoles relatifs à la qualité des mesures ainsi qu'à leur contrôle
- mettre au point les logiciels nécessaires aux traitements des données (ils existent en partie actuellement, mais le travail doit être poursuivi, achevé et homologué)
- réfléchir à la déontologie de l'accès à l'information obtenue par les différents utilisateurs potentiels des résultats obtenus sur les BVRE
- harmoniser, uniformiser la publication des résultats et des différentes synthèses
- mettre en oeuvre les différents moyens de diffuser l'information acquise par la

création de colloques, par la formation des responsables divers au niveau des écoles.

Voilà un ensemble de tâches à développer.

Cet effort de synthèse au niveau national est rendu actuellement indispensable si nous voulons efficacement contribuer à la construction de l'Europe des Bassins Versants.

Au niveau international, nous avons le devoir de mieux faire connaître les résultats de nos recherches à la communauté scientifique.

Pour conclure

Le CST, dans sa constitution actuelle, remplit bien les missions confiées.

Mais le CST est une structure trop fragile, et tout particulièrement celle de son secrétariat, pour faire face à de nouvelles missions fondamentales.

L'élargissement des missions du CST doit obligatoirement s'accompagner d'un accroissement de ses moyens en personnel permanent.

Le présent séminaire est organisé sous le double patronage du GIP Hydrosystèmes et du CST . Il doit permettre à notre communauté scientifique de mieux comprendre le concept de Zone Atelier. La structure administrative du Groupement d'Intérêt Public Hydrosystèmes me semble particulièrement bien adaptée pour aborder les fonctionnements multidisciplinaires des systèmes aquatiques continentaux.

Le concept de Zone Atelier, plus général que celui de BVRE, me semble être l'entité efficace pour aborder dans leur globalité les systèmes liés à l'eau à différentes échelles. La connaissance des bilans hydriques, indispensable à l'étude des autres bilans, n'est pas suffisante pour répondre aux problèmes d'aménagement qui vont se poser dans l'avenir.

L'aménagement des zones humides de notre pays, au sens de la convention de RAMSAR, exige l'étude de l'ensemble de leurs paramètres hydrauliques, biologiques, et socio-économiques. Pour moi, le nouveau concept de site atelier ou zone atelier, dont l'explicitation est au coeur du présent séminaire, n'apparaît pas comme concurrent de celui de bassin versant, mais au contraire comme devant permettre l'approche de nouveaux problèmes plus complexes, dont il faudra, dans un proche avenir, prendre en compte toutes les dimensions biologiques et écologiques, qualitatives et quantitatives, mais aussi celles, encore plus difficiles actuellement à maîtriser, qui relèvent des préoccupations économiques et sociologiques.

Ce qui m'intéresse dans le GIP Hydrosystèmes, c'est qu'il fédère les organismes de recherche de notre pays qui concourent à la connaissance des systèmes aquatiques continentaux, qui assurent ainsi leur gestion, et qu'il possède une structure administrative adaptée aux problèmes à résoudre actuellement et dans l'avenir.

Le GIP Hydrosystèmes possède un conseil scientifique, ce qui le rapproche du CST BVRE.

J'ai montré que le comité scientifique et technique des BVRE pouvait voir ses missions se développer sous réserve de l'accroissement, en personnel surtout, de ses moyens.

En ma qualité de nouveau président du CST, je considère que la création du GIP Hydrosystèmes est une opportunité historique qu'il faut savoir utiliser afin d'élargir les missions du CST BVRE. J'attends personnellement de la suite de ce séminaire qu'il confirme cette idée simple..., autrement dit "naïve".

Je vous remercie de votre attention.

**Quelques BVRE
français
significatifs**

B. V. R. E. D E L 'Orgeval

Michel FERRY, Thierry LEVIANDIER

CEMAGREF Modélisation Hydrologie,
Parc de Tourvoie, 92163 Antony cedex
Tél : 40 96 60 52 - Fax : 40 96 61 99

Présentation du bassin versant

Le bassin versant de l'Orgeval occupe une surface de 104 km² dans la partie Nord-Est du département de la Seine-et-Marne. Le ru de l'Orgeval est un affluent secondaire de la Marne. Il se jette en rive droite du Grand-Morin (affluent rive gauche de la Marne), à 2 km en amont de la ville de Coulommiers. C'est un émissaire de 1,7 km de long constitué par la réunion de 2 ruisseaux principaux; le ru de Rognon (15,6 km de long) drainant la partie Ouest du bassin (sous-bassin de 57,5 km²) et le ru des Avenelles (11,2 km de long) drainant la partie Est (sous bassin de 46,5 km²).

Le bassin est situé sur le plateau de Brie. Le relief est très plat, excepté la petite butte de Doue (d'une trentaine de mètres de dénivelé) et le léger encaissement de la vallée vers l'exutoire (altitude moyenne: 148m, maximale: 186m, minimale: 80m). La nature géologique du sous-sol est sédimentaire d'âge tertiaire (Oligocène et Eocène). La formation de Brie (Stampien inférieur) forme l'ossature du plateau. Elle est représentée essentiellement par des calcaires siliceux ou marneux, des argiles et des meulières. On note également par endroits la présence de sables de Fontainebleau (Stampien supérieur). Ils constituent notamment la butte de Doue (butte témoin de faible superficie) préservée grâce à l'existence à son sommet d'une mince couche de calcaire de Beauce (Aquitaniens). Dans le secteur aval, l'érosion fait apparaître, sur les versants du ru, des terrains plus anciens (Bartoniens): marnes supra gypseuses et infra-gypseuses et calcaires de Saint-Ouen.

La majeure partie du bassin est recouverte par des limons de plateau d'origine loessique, rougeâtres ou jaunâtres (épaisseur pouvant atteindre 10m), caractérisés par une faible perméabilité ayant entraîné la formation d'un pseudo-gley. Le sol des plateaux est du type brun-lessivé, à texture limono-sableuse à limono-argileuse, présentant des caractères d'hydromorphie temporaire. Les versants présentent un maximum d'argile à mi-pente.

Les aquifères se développent principalement dans la formation de Brie et les sables de Fontainebleau. La présence de niveaux plus imperméables dans les limons détermine localement la formation de nappes superficielles, dont l'émergence se manifeste en certains points par de petites sources. En période humide ces nappes peuvent atteindre temporairement la surface du sol mais elles sont rabattues rapidement, dans les terres cultivées, par un réseau de drainage très développé (plus de 95% des terres cultivées sont drainées).

Le bassin versant de l'Orgeval est situé en totalité en territoire rural (cultures: 81%, bois et forêts: 18%, villages et routes: 1%). La répartition des cultures (sur le sous-bassin de Mélarchez de 7 km²), qui s'est sensiblement modifiée au cours des années, est actuellement la suivante: 55% de céréales (dont 45% de blé et 10% d'escourgeon), 27% de légumineuses (dont 22% de petits-pois, 4% de féverolles et 1% de haricots), 8% de maïs, 8% d'oléagineux (dont 5% de lin, 2% de colza et 1% de tournesol) et 2% de cultures fourragères (prairies, luzerne et trèfle).

Le bassin versant de l'Orgeval est soumis à un climat de type océanique tempéré (pluviométrie annuelle: 650 mm, température moyenne: 10 °C).

Historique

En 1962, la section technique de l'hydraulique du Ministère de l'Agriculture a été chargée de mettre en oeuvre le suivi hydrologique du bassin versant de l'Orgeval pour répondre à des questions concernant la création de retenues collinaires. Les années suivantes, les objectifs se sont progressivement élargis, impliquant une ouverture à d'autres équipes et une intégration dans des programmes dépassant le cadre géographique du bassin. On peut mettre en évidence trois phases principales dans l'évolution des recherches sur l'Orgeval.

Caractérisation hydrologique du bassin, 1962 à 1981

Les objectifs des 20 premières années visaient surtout à obtenir des variables fréquentielles descriptives du bassin, à l'aide d'un réseau dense d'appareils de mesure (21 pluviographes, 5 stations hydrométriques et 1 station météorologique) et à établir des bilans, d'où un intérêt pour l'ETR. Les données étaient également exploitées pour mettre au point et tester des méthodes d'hydrologie pour l'ingénieur. En 1982 l'équipement a été allégé tout en préservant l'existence d'un réseau de base minimal suffisant pour la poursuite des études.

Étude de la qualité des eaux, à partir de 1975

Les mesures de qualité des eaux ont débuté en 1975 et concernent notamment les formes solubles de l'azote minéral (nitrates, nitrites, ammoniacque), le phosphore (total et phosphates) et les MES. Des prélèvements d'eau (manuels et à l'aide de préleveurs automatiques) sont effectués régulièrement en plusieurs points du bassin (rivière, nappe, sources). Le suivi de la qualité des eaux est centré principalement sur le sous-bassin de Mélarchez. La problématique de pollution diffuse d'origine agricole, à l'origine de ce suivi, a conduit à enregistrer, dès le début, l'occupation du sol. L'expérimentation de pratiques agricoles destinées à limiter les pertes de nitrates, envisagée très tôt, n'a pu être mise en oeuvre qu'à partir de 1988.

Ouverture pluridisciplinaire, à partir de 1984

L'influence de l'état hydrique du sol sur les phénomènes hydrologiques a été étudiée plus précisément à partir de 1984. Un matériel spécifique permettant des mesures dans ce domaine a donc été installé, en particulier, sur la parcelle expérimentale de Boissy-le-Châtel. Par ailleurs, des suivis temporaires sur le bassin sont effectués lors de campagnes "vérité-terrain" destinées à mettre en relation les données recueillies par télédétection radar et les observations relatives à l'état de surface du sol (humidité, rugosité). Parallèlement, l'équipement général a été modernisé, en particulier après l'attribution de crédits de jouvence du CST/BVRE.

Télédétection, pédologie, géochimie, chimie des eaux, micro-économie (faisabilité de pratiques agricoles non polluantes) et hydraulique agricole ont été associées à l'hydrologie, en collaboration avec des équipes extérieures à la division gestionnaire, appartenant ou non au CEMAGREF (voir liste plus loin). Par ailleurs, l'intégration de ces différentes composantes est recherchée par la modélisation à un pas de temps plus fin que les bilans de la période précédente.

Programmes scientifiques

Les recherches et expérimentations réalisées actuellement sur l'Orgeval concernent principalement les thèmes suivants:

- développement et essai de matériels de mesure de terrain.
- télédétection et état hydrique du sol;
- changement d'échelle dans les transferts d'eau et de matières (de la parcelle au bassin de recherche et au grand bassin);
- incidence de l'agriculture sur la qualité des eaux;
- érosion des terres en zone agricole.

Ces thèmes sont actifs au sein du programme "Fonctionnement hydrologique des bassins versants" du CEMAGREF, des programmes nationaux "PIREN-SEINE", "PNTS", "DBT", "ISMAP" et des programmes internationaux de l'Agence Spatiale Européenne et de la NASA.

Intervenants

Le bassin versant de l'Orgeval est utilisé d'une part, par des étudiants et chercheurs de différents organismes (CERGRENE, ENGEES,...) exploitant des données sans effectuer leurs recherches au CEMAGREF et d'autre part, par divers organismes dans le cadre des programmes cités précédemment. De nombreuses études ayant comme support le bassin de l'Orgeval sont conduites par différentes divisions du CEMAGREF et d'autres laboratoires associés. Le bassin constitue un terrain d'observation intensive et d'expérimentation dans des domaines variés (hydrologie, télédétection, humidité du sol, pollutions diffuses, pratiques culturales, etc,...) et accueille régulièrement des équipes de chercheurs français et étrangers pour des opérations de terrain pouvant durer parfois plusieurs semaines. Par

ailleurs, les données anciennes continuent à nourrir certaines recherches sans opérations de terrain.

Liste indicative des équipes travaillant sur le BVRE de l'Orgeval:

- divisions du CEMAGREF: Hydrologie Antony (gestionnaire du bassin), Drainage et assainissement agricoles Antony, Production et économie agricoles Antony, Qualité des eaux Paris, Qualité des eaux Lyon (projet), Télédétection Montpellier (au sein de la structure commune du LCT Montpellier).
- intervenants extérieurs au CEMAGREF: CNRS (CETP de Vélizy, Centre de Pédologie Biologique de Nancy, Laboratoire de Géographie Physique de Meudon), CAMS (Paris), Universités Paris VI et Paris XI Orsay, INRA Grignon, Université d'Arizona, ENGREF (au sein de la structure commune du LCT Montpellier), CGE, Chambre d'Agriculture de la Seine-et-Marne, Syndicats des eaux du Petit et du Grand-Morin, Météorologie nationale.

Équipements et données disponibles

Le BVRE de l'Orgeval est un bassin de référence disposant de plus de trente années de données hydrométriques et pluviométriques, données qui alimentent les banques hydrologiques nationales ("HYDRO" et "PLUVIO").

Deux techniciens apportent leur concours aux campagnes de mesure intensives et assurent le suivi de routine à partir de la base de Boissy-le-Châtel. Celle-ci comprend notamment un bureau (équipé du matériel informatique adapté à la gestion des appareillages de mesure et des données recueillies), un atelier, un laboratoire, un petit studio permettant l'accueil de passagers (étudiants, stagiaires,...) et 2 logements de fonction pour les techniciens basés sur place.

Les appareils de mesure sont répartis sur l'ensemble du bassin et sur la parcelle expérimentale de Boissy-le-Châtel (Mélarchez avant 1971). Depuis 1990, la plupart des appareils de terrain peuvent être suivis à distance par télétransmission (par l'intermédiaire du réseau commuté). Le parc de matériel de mesure a été sensiblement modifié au cours des années pour s'adapter à l'évolution des objectifs de recherche et d'expérimentation.

Les tableaux ci-après présentent les équipements mis en place sur le bassin de l'Orgeval et sur la parcelle expérimentale ainsi que les principales données disponibles. Il est à signaler que les indications figurant dans ces tableaux sont résumées et donc nécessairement incomplètes (dans le détail par exemple, certaines données peuvent ne pas être disponibles sur toute la période mentionnée).

Les principales données recueillies sont également présentées sous forme graphique dans des annuaires depuis 1991.

Quelques résultats significatifs

- démonstration de l'intérêt d'une humidité du sol ponctuelle comme facteur explicatif des écoulements d'un bassin versant (Loumagne et al., 1991, 1993);

- détermination des conditions d'observation d'une bonne corrélation entre humidité du sol et signal radar rétro diffusé (Benallègue, 1993, Benallègue, Normand et al., 1994);
- mise au point de modèles conceptuels validés ensuite à l'échelle nationale (Edijatno, 1991, Michel);
- variations spatiale et temporelle de la structure et de la texture du sol et relation avec les MES exportées (Bartoli et al., 1994);
- intégration des mécanismes de fonctionnement d'un réseau de drainage à l'échelle du bassin versant (Labat, 1993);
- méthodologie d'évaluation par modélisation d'une expérimentation agricole visant à réduire les pertes en nitrates (Zermani, 1993).

Liens avec la demande sociale

Elle est générale dans la mesure où les résultats sont intégrés dans les modèles destinés à être transposés. Elle est plus spécifique sur le plan des pollutions diffuses où le problème se pose localement et a donné lieu à une opération "fertimieux".

Liens de type réseaux

Les collaborations se font plutôt au sein de programmes utilisant plusieurs bassins (Vannetin, Naizin, Mont Lozère, Ruiné) ou les sites tests du programme ISMAP que par des recherches généralisées au sein d'un réseau.

Besoins de renforcement Des collaborations et des aspects réseaux

Les collaborations sur la télédétection, la pédologie et l'économie sont en bonne voie d'intensification (sous condition d'obtention de financement). Une meilleure prise en compte des aspects souterrains, éclairés par la géochimie et la géophysique, est éminemment souhaitable.

Il n'existe pas de GIS sur l'Orgeval. Sa création est prévue, moins pour formaliser les collaborations existantes, que pour accueillir des recherches nouvelles. Elle est peut-être paradoxalement plus nécessaire pour des recherches moins intégrées, qui souhaiteraient bénéficier de l'infrastructure et des résultats acquis, sans nécessiter de fortes relations.

L'aspect réseau se révèle surtout nécessaire pour l'intégration des recherches à l'échelle nationale ou continentale, et est manifeste pour l'étude des interactions avec les phénomènes atmosphériques (programme GEWEX). En effet, un couplage ayant une base physique ne peut être établi que sur des connaissances acquises sur BVRE. L'insertion de ces dispositifs dans des bassins déjà étudiés à une autre échelle est déjà la règle générale (le Grand-Morin et la Marne en ce qui concerne l'Orgeval). L'intérêt qu'il peuvent présenter vis à vis de bassins fluviaux plus grands ne peut se fonder sur la même idée de représentativité et d'emboîtement, elle-

même affaiblie par les difficultés de mesure de contrôle sur les grands bassins fluviaux.

L'accroissement des collaborations ne supplée pas, bien au contraire, le besoin d'un renforcement propre d'un chercheur, pour maintenir une vue synthétique du système que constitue le bassin.

Roles de formation

Les méthodologies mises au point sur l'Orgeval ont été (et sont encore) largement exportées et adaptées pour être utilisées dans d'autres contextes (autres régions, autres types de sol, autres cultures, etc,...). De nombreux bassins versants bénéficient ainsi de l'expérience acquise dans des domaines divers de l'hydrologie (appareillages de mesure, gestion des données, modélisation, télédétection,...).

Régulièrement, des étudiants effectuent des stages concernant plus ou moins directement l'Orgeval (expérimentation sur le bassin, exploitation des données recueillies,...). Ces travaux font l'objet de mémoires pour l'obtention de différents diplômes (technicien, ingénieur, DEA, Doctorat,...).

Le bassin reçoit également de nombreux visiteurs provenant de l'enseignement supérieur et secondaire, de laboratoires français ou étrangers, d'administrations et d'organismes divers. Le colloque, ayant eu lieu à l'occasion du 25^{ème} anniversaire du bassin de l'Orgeval, a rassemblé environ 200 personnes dont une soixantaine a participé à la visite de terrain.

Perspectives

Le bassin de l'Orgeval n'est pas parmi ceux que nous savons le mieux modéliser, loin s'en faut. Il présente donc une complexité de fonctionnement que nous n'avons pas élucidée, mais dont on peut penser qu'elle tient dans la variation temporelle du milieu physique sol, et dans les interactions complexes entre aquifères temporaires et permanents. La qualité de l'eau, et les problèmes d'érosion, qui présentent un intérêt propre, doivent être approfondis simultanément pour en tirer toutes les informations possibles sur les écoulements eux-mêmes.

Même si nous avons tout compris sur l'Orgeval, il faudrait continuer à l'observer, et observer les changements socio-économiques qui y s'y déroulent, ainsi que leurs conséquences sur l'occupation de l'espace, puis sur le régime et la qualité des eaux. Selon le rythme des changements, l'intérêt de la recherche peut s'émousser, et ce n'est sans doute pas à elle seule de soutenir des observations de long terme.

L'intérêt social de ces recherches se justifie si elles sont transposables. Il est possible que des recherches "pointues" finissent par être trop monographiques et inexploitable ailleurs. Mais il reste beaucoup à apprendre, y compris en visant à conserver le même degré de généralité que pour les acquis précédents.

Bibliographie choisie récente

1991

Edijatno - Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier - Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg - 240 pages.

Loumagne C., Michel C., Normand M. - État hydrique du sol et prévision des débits - Journal of Hydrology, 123, 1 à 17.

1992

Dechambre M., Taconet O., Vidal Madjar D., Prévot L., Normand M., Benallègue M., Galle S. - Soil moisture assessment and estimation of the characteristics of the vegetation canopies with airborne radar measurements - MAESTRO-1/AGRISCATT - Radar Techniques for Forestry and Agricultural Application - Final Workshop 6/7 march - ESTEC, Noordwijk (Hollande).

Duvoux B. Ferry M., Lanquetuit D. - Modification de pratiques culturales en vue d'une réduction des pertes de nitrates sur le bassin d'alimentation de la source de Mélarchez - 2^{ème} et 3^{ème} rapports d'étape: campagne 1989-1990 + rétrospective 1979-1990 et campagne 1990-1991.

1993

Benallègue M. - Etude de la faisabilité de la mesure par radar de l'humidité et de la rugosité des sols - Thèse de doctorat de l'Université Paris XI Orsay, CNRS/CRPE - 272 pages.

Duvoux B. - L'influence de l'hydrologie sur l'appréciation des effets de cultures intermédiaires pièges à nitrates dans un bassin de la Brie (Seine-et-Marne) - Colloque H2O 93 "Les pollutions diffuses d'origine agricole: gestion des risques et moyens de lutte" - Alpexpo, Grenoble, 13 mai 1993

Gafrej R. - Modélisation conceptuelle du transfert des matières en suspension. Effets d'échelles spatio-temporelles - Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, division Hydrologie du CEMAGREF - 22 oct. 93 - 200 pages.

Gafrej R., Leviandier T. - Statistical and conceptual modelling of sediments transport in a small catchment - EGS Edinburgh - Soumis à "Journal of Hydrology".

Labat N. - Modélisation pluie-débit en assainissement agricole: compréhension des modalités du changement d'échelle de la parcelle drainée au bassin versant - DEA de l'Université Paris VI, divisions Drainage et Hydrologie du CEMAGREF.

Leviandier T., Gafrej R., Mantilla Morales G., Zermani A. - Modèles récursifs de transfert de pollution diffuse - Rencontres hydrologiques franco-roumaines - Tulcea - CNFSH-CNRSH.

Loumagne C., Chkir N., Normand M., Ottle C., Vidal-Madjar D. - Introduction of the soil/vegetation/atmosphere continuum in a rainfall-runoff model for remote sensing data assimilation - Water Resources Research (en révision).

Prévot L., Dechambre M., Taconet O., Normand M., Vidal-Madjar D. - Estimating the characteristics of vegetation canopies with airborne radar measurements - International Journal of Remote Sensing, Octobre 1993 - pages 2803 à 2818.

Taconet O., Benallègue M., Vidal-Madjar D., Vidal A., Normand M. - Synergy between optical and microwave remote sensing to derive soil and vegetation parameters from Mac-Europe 91 experiment - The Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Washington, 25-29 oct. 93 - 4 pages.

Vidal A., Taconet O., Moran M.S., Rahman A.F., Pelgrum H., Rijckenberg G.J., Normand M., Cellier P., Humes K., Laguette S., Olivier P., Rakatoarivony L., Vidal-Madjar D., Clarke T., Van Leeuwen H. - Estimation of surface fluxes over canopies during Mac-Europe 1991 campaign using combined microwave and optical data - IEEE Topical Symposium on Combined Optical-Microwave Earth and Atmosphere Sensing (22-25 March 1992), Albuquerque, NM, USA - In Co-Meas'93 Topical Symposium - 5 pages.

Zermani A. - Evaluation par la modélisation de l'effet des pratiques culturales visant à limiter les pertes de nitrates - DEA STE de l'Université Paris XII Val-de-Marne, ENPC et ENGREF, division Hydrologie du CEMAGREF - 90 pages.

1994

Bartoli F., Burtin G., Royer J.J., Gury M., Gomendy V., Philippy R., Leviandier T. and Gafrej R. - Particle transport from silty soils to streams: spatial variability of topsoil characteristics within one type of soil type - Geoderma (soumis).

Benallègue M., Normand M., Galle S., Dechambre M., Taconet O., Vidal-Madjar D., Vidal A. - Soil moisture assessment at a basin scale using active microwave remote sensing: "The agriscatt'88 Airborne Campaign on the Orgeval watershed" - International Journal of Remote Sensing, vol. 15 n° 3, 645 à 656.

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

Loumagne C., Normand M., Olivier P., Otle C., Vidal-Madjar D., Louahala S., Vidal A. - Evaluation of the ERS1/SAR capacity to estimate surface soil moisture. First 1992 results over the Naizin watershed - Remote Sensing of Environment (accepté).

Les bassins versants de recherche du Réal Collobrier

Jacques LAVABRE
CEMAGREF - Le Tholonet - B.P. 31
13612 AIX-EN-PROVENCE Cedex 1
Tél : 42.66.99.10 - Fax : 42.66.88.65

Contexte géographique et historique

Contexte géographique

Le BVRE Réal Collobrier est situé sur la bordure côtière méditerranéenne ; plus précisément, sur la partie ouest du Massif des Maures (Var).

Géologie : massif cristallin, qui présente un métamorphisme décroissant d'Est en Ouest : gneiss, micaschistes, phyllades.

Occupation de l'espace : massif presque intégralement boisé. Végétation calcifuge : châtaigniers, chênes lièges, maquis de bruyères... Développement végétatif variable selon le substrat géologique, la pluviométrie, l'exposition. Zone en partie incendiée en août 1990. Le village de Collobrières (1 000 habitants) est situé au centre du BVRE. La zone agricole (vignoble essentiellement) occupe la plaine du Réal Collobrier (quelques % de la superficie totale).

Climatologie : climat méditerranéen humide : pluviométrie annuelle moyenne autour de 1 000 mm ; pluie journalière décennale : 150 mm. Gradient pluviométrique marqué d'est en ouest.

Contexte historique

Le Ministère de l'Agriculture a eu l'initiative de création du réseau de mesure en 1966. Le but était l'établissement de formulation des débits de crues en zone méditerranéenne. Le projet initial prévoyait l'instrumentation d'une zone d'environ 500 km², qui correspond au bassin versant du Gapeau : zone calcaire, zone permienne et zone cristalline. Seule cette dernière a été instrumentée.

Sans but clairement défini, en absence de plan d'expérimentation, avec un environnement scientifique restreint, l'activité autour de ce BVRE n'a été longtemps pratiquement consacrée qu'à sa stricte gestion.

A la fin des années 80, le gestionnaire était face à une alternative : arrêter la gestion du BVRE ou renouveler l'équipement et dynamiser les activités de recherche. Grâce à des crédits de renouvellement du CST/BVRE le parc de

matériel a été renouvelé en 1988 et le gestionnaire a établi des contacts avec différents partenaires du monde de la recherche. Ces contacts ont conduit à la création du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS Réal Collobrier), dont la convention fut signée fin 1990. 1994 est une année de réflexion sur l'orientation des travaux de recherche, sur un élargissement de l'environnement scientifique (GIP Hydrosystèmes ...).

Equipements et données disponibles

Pluviométrie : Réseau de pluviographes déployé sur 100 km².

1967 - 1988 : 28 pluviographes de type Précis Mécanique, bague de 2 000 cm², enregistrement papier (10 mm/heure).

Depuis 1988 : 18 pluviographes de type Précis Mécanique, bague de 1 000 cm², enregistrement CR2M.

Fichier de base informatisé du dépouillement à pas de temps variable (intensité constante).

Climatologie : Une station climatologique. Une partie des observations est disponible sur support informatique.

Hydrométrie : 11 bassins versant équipés de seuil de mesure. Surface des zones contrôlées variable de 70 ha à 70 km².

Fichier de base informatisé des hauteurs d'eau instantanées (pas de temps variable).

Suivi physico chimique :

Avant 1989, peu de données physico chimiques sont disponibles (exceptées celles élaborées par C. MARTIN lors de sa thèse au début des années 1980).

De 1990 à 1993, des préleveurs échantillonneurs ont été installés sur 5 bassins versants. Les données physico chimiques font l'objet d'une banque de données (gérée sur DBASE) en cours d'élaboration.

Deux bassins versants ont fait l'objet d'un suivi isotopique (¹⁸O et ²D).

Depuis 1993, exploitation de seulement 2 préleveurs.

Expérimentations spécifiques diverses :

- bilan hydrique d'une parcelle forestée : interception de la pluie, suivi humidimétrique et tensiométrique ;
- parcelle d'érosion : mesure du ruissellement global et des sédiments ;
- suivi hydrodynamique d'un versant.

Autres sources d'information :

- cartographie des formations superficielles d'un bassin versant de 8,4 km²
- images SPOT.XS (une par an depuis 1990) ;

- modèle numérique de terrain ;
- photographies aériennes ;
- carte de reconnaissance des sources d'un bassin versant ;
- suivi intermittent des débits et de la physico-chimie de 2 sources.

Intervenants et répartition des rôles

Intervenants :

Depuis 1966 la Division Hydraulique et Irrigation du CEMAGREF, Groupement d'Aix-en-Provence (HIAX) assure la gestion du réseau de base : pluie, climatologie, débit.

La création du GIS en 1990, a permis d'étendre le réseau de mesure, à l'hydrochimie notamment.

Les partenaires du GIS Réal Collobrier sont :

- l'URA 903 du CNRS, laboratoire de géographie physique, représenté par C. MARTIN ;
- la Faculté des Sciences d'Avignon, laboratoire d'hydrogéologie représenté par B. BLAVOUX ET Y. TRAVI ;
- le Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF Montpellier, représenté par Ch. PUECH et P. VINÉ ;
- l'Université de Grenoble, laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, représenté par Ch. OBLED et J.M. GRESILLON ;
- la Faculté des Sciences de Montpellier, Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation représenté par J.M. MASSON.

Le GIS a permis de monter un projet de recherche européen, sur le thème de la désertification de la zone méditerranéenne. Le projet se termine en novembre 1994.

Répartition des rôles : Elaboration de données

- . Division HIAX du CEMAGREF : gestion du réseau de base, expérimentations spécifiques.
- . Hydrologie Avignon : suivi isotopique (gestion de préleveur + analyses), suivi chimique de la parcelle d'interception.
- . URA 903 du CNRS : suivi hydrochimique de 3 bassins versants, campagne de mesure de profils d'érosion, suivi de la parcelle d'érosion.
- . LTHE : gestion de l'équipement pour le suivi hydrodynamique d'un versant.
- . LCT : traitement numérique des images SPOT, modèle numérique de terrain.

Répartition des rôles : Thématiques scientifiques

- . Division HIAX du CEMAGREF :
- animation des activités de recherche et coordination du projet Européen ;

- modélisation des écoulements (annuels, mensuels, journaliers, horaires).
- . LCT : végétation et écoulements.
- . Hydrogéologie Avignon : compréhension de la formation des écoulements.
- . URA 903 du CNRS : Erosion chimique (bilan) et mécanique.
- . LTHE : modélisation pluie-débit, à caractère cognitif.
- . LHM : modélisation pluie-débit, couplage qualité-quantité.

Autres partenaires :

Généralement dans le cadre de conventions passées avec le gestionnaire, d'autres équipes de recherche interviennent ponctuellement. Citons le Laboratoire de Géologie Structurale de Paris-Jussieu : J.P. RUDANT (radar ESAR), le CEFE : S. RAMBAL et A. DARY (campagne de LAI), l'IMEP : M. THINON (analyse floristique des parcelles incendiées), l'URA 141 : Ph. BERNARD-ALLEE (érosion après incendie) ...

Diverses équipes du CEMAGREF : divisions Forêt et Hydrobiologie du Groupement d'Aix-en-Provence, division Forêt du Groupement de Clermont-Ferrand, poursuivent une partie de leur activité de recherche sur le BVRE.

Conditions de fonctionnement

Le tableau ci-après présente les principaux postes budgétaires du BVRE : investissement, fonctionnement spécifique, crédits de recherche.

INVESTISSEMENT			
Réalisé		Financements extérieurs (depuis 1988)	
Libellé	Montant KF 94	Provenance	Montant KF
Réseau de base	2 000	MRT (1990)	260
Expérimentations spécifiques	500	Région PACA (1990)	160
Divers	200	CST/BVRE	
		- 1988	400
		- 1990	175
		- 1994	300
		- Union Européenne	100
TOTAL	2 700	TOTAL	1 395
FONCTIONNEMENT - GESTION			
Libellé	Montant KF 94		
Fonctionnement spécifique : entretien, gestion, déplacements/an	200		
Personnel spécifique : 1,5 technicien + 0,2 ingénieur/an	360		
S/TOTAL/AN	560		
FONCTIONNEMENT - ACTIVITES DE RECHERCHE			
Dépenses 1990-1994	Montant KF	Financements extérieurs perçus par CEMAGREF - Aix (1990-1994)	Montant KF 94
Montants reversés aux autres équipes du GIS :			
URA 141	16	- MRT (1990-1992)	400
URA 903	560		
IMEP	30	- Région PACA (1991-1993)	900
LTHE	591		
Hydrogéol. Avignon	440	- Union Européenne (1993-1994)	2 500
S/TOTAL 1	1 637		
Montants reversés à d'autres équipes CEMAGREF :			
LCT	482		
HYAX	18		
S/TOTAL 2	500		
Fonctionnement recherche CEMAGREF Aix :			
Salaires CDD	900		
Stagiaires	300		
Ingénieurs	500		
Techniciens	500		
Frais de structure	200		
S/TOTAL 3	2 400		
TOTAL	4 537	TOTAL	3 800
ST1 + ST2 + ST3			

Programmes scientifiques

Les programmes scientifiques sont en priorité orientés vers l'étude des spécificités de ces bassins versants. A savoir : l'environnement climatique méditerranéen avec notamment deux composantes fortes : la désertification de la zone méditerranéenne et in fine la disponibilité de la ressource en eau et les phénomènes de crues. Il est bien évidemment sous-entendu que seul un observatoire permanent, jouant un rôle de repère et de référence, est le support incontournable pour l'étude de ces thématiques. Sans hiérarchisation, citons quelques axes de recherche actuels

Disponibilité de la ressource en eau : sa modélisation en fonction de l'occupation de l'espace, sa variabilité et ses interactions interannuelles, ... Est-il utile de remarquer l'extrême sensibilité de cette problématique pour les pays riverains de la Méditerranée ?

Les crues soudaines : leur genèse, leurs modélisations à caractère cognitif ou plus opérationnel pour transférer les connaissances sur des bassins non jaugés ... Remarquons aussi à ce sujet, la représentativité climatique, géologique, géomorphologique ... des bassins versants du Réal Collobrier au regard des zones côtières françaises à fortes crues potentielles : Cévennes, Pyrénées Orientales notamment.

Les interactions végétation-cycle de l'eau : l'évapotranspiration de la forêt méditerranéenne, sa régulation physiologique, le phénomène d'interception de la pluie par la végétation, la régulation de la ressource en eau et des crues, la régulation du processus d'érosion mécanique et les interactions avec les cycles biogéochimiques ... Suite à l'incendie de forêt qui a partiellement affecté les bassins en août 1990, le BVRE est un site expérimental unique pour l'étude des conséquences de ces "brusques discontinuités écologiques", malheureusement caractéristiques du milieu méditerranéen.

L'hydrobiologie de cours d'eau temporaires : dynamique de développement des populations d'invertébrés, rôles dans l'édifice trophique, causalités hydrologiques.

Outre les recherches associées à la compréhension de la formation des écoulements : traçages chimiques et isotopiques, caractérisation du milieu physique et géomorphologique, les études poursuivies sur ce BVRE ont une composante opérationnelle affirmée, rendue possible par la taille hydrologiquement significative des bassins versants instrumentés. Citons quelques développements récents :

- le modèle SHYPRE (Simulation d'HYdrogrammes en PRe-détermination), méthodologie qui se situe dans le prolongement de la méthode du Gradex et des méthodes anglo-saxonnes d'étude des crues de projet de fréquence rare ;
- la modélisation des écoulements mensuels, sur la base du modèle GR2M développé par la division Hydrologie du CEMAGREF, groupement d'Antony, qui a une application immédiate pour l'estimation régionale des débits de référence dans le cadre d'application de la loi sur l'Eau ;

Perspectives et souhaits pour l'avenir

La gestion d'un BVRE est coûteuse aussi bien en personnel, moyens logistiques et fonctionnement. Corollaire, les données élaborées doivent être valorisées au mieux, dans un schéma de recherche bien défini.

L'expérience de rassemblement d'équipes d'horizons thématiques différents au sein d'un Groupement d'Intérêt Scientifique présente de multiples avantages : approche multidisciplinaire par des équipes de sensibilité différente, masse critique de chercheurs autour d'un pôle et synergie qui permet d'affronter de grands projets de recherche : Europe par exemple. Il n'en demeure pas moins que les difficultés et les contraintes inhérentes à la gestion et à l'animation des activités de recherche est une charge continue pour le gestionnaire.

Une étape doit être franchie : la reconnaissance d'un BVRE comme un laboratoire lourd de recherche, avec la logistique et les crédits nécessaires à ce type d'opération. C'est un enjeu vital pour les BVRE et une des missions que le GIP Hydrosystèmes ne doit pas occulter.

De même, il apparaît que le GIP Hydrosystème doit jouer un rôle de pilote et de conseil pour les activités de recherche, en adéquation avec la demande sociale, afin de garantir efficacité et complémentarité des actions de recherche poursuivies sur l'ensemble des BVRE. Les passerelles entre les BVRE ne sont encore que trop peu nombreuses. Cela est avant tout le fait de la précarité des équipes de recherche, mais il n'est pas exclu qu'une certaine forme de rivalité tacite hante les pôles de recherche associés aux BVRE, qui peuvent être concurrents dans la recherche des crédits ou dans la reconnaissance de leurs activités.

Et en guise de conclusion, une allégorie homonymique : plutôt un BVRE repère(*) qu'un BVRE repaire(*) !

*) Définitions du Petit Larousse Illustré :

Repère : tout ce qui permet de retrouver quelque chose dans un ensemble.

Repaire : retraite de bêtes sauvages, de malfaiteurs.

Bibliographie 1991-1993

DAGAN V., MONESTIER P. (1991). Peuplements d'invertébrés benthiques de deux stations du Réal Collobrier. Rapport de stage CEMAGREF Aix-en-Provence, division Hydrobiologie et Université de Provence, 22 p. + annexes.

TAHA A. (1991). Modélisation de l'écoulement en milieu non saturé sur versant incliné soumis à la pluie. Mémoire de DEA, Université J. Fourier de Grenoble 1, 71 p + annexes.

MARTIN C., BERNARD-ALLEE Ph. et Collaborateurs (1991). Recherches sur les conséquences des incendies de forêt d'août 1990 dans le massif des Maures. Contribution de l'URA 903 et des Unités associés. (Hydrochimie et phénomènes d'érosion mécanique). GIS Réal Collobrier, 41 p.

MARTIN C., CHEVALIER Y. (1991). Premières conséquences d'un incendie de forêt sur le comportement hydrochimique du bassin versant du Rimbaud (Massif des Maures, Var, France). Hydrologie Continentale, vol. 6, n° 2, p 145-153.

PUECH Ch., LAVABRE J., MARTIN C. (1991). Les feux de forêts de l'été 1990 dans le Massif des Maures : cartographie à l'aide de l'imagerie satellitaire, premières conséquences sur le cycle hydrologique, recherches sur les phénomènes d'érosion, G.I.S. Réal Collobrier, 13 p, Sécheresse 1991, N° 2 : 175-181.

LAVABRE J., SEMPERE-TORRES D., CERNESSON F. (1991). Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Hydrologie Continentale, vol. 6, N° 2 : 121-132.

WENDLING J. (1992). Modélisation pluie-débit : comparaison d'approches conceptuelles / physico-déterministes, globales / semi-distribuées. Essai de prise en compte de la variabilité spatiale des pluies. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 390 p + annexes.

NEYRET-GIGOT J-M. (1992). Analyse de la variabilité de la fonction de transfert d'un bassin versant et étude de faisabilité d'un modèle conceptuel rustique paramétré à partir d'observations hydrologiques restreintes - Application au Réal Collobrier. Thèse de doctorat de l'Université Joseph-Fourier, Grenoble 1, 237 p. + annexes.

LE MEILLOUR F. (1992). Analyse spatiale et temporelle des apports à la rivière Réal Collobrier, Mémoire de DEA, Université J. Fournier, Grenoble 1, 48 p. + annexes.

BRETON C. (1992). Apport de la télédétection pour le suivi de zones incendiées et conséquences des feux sur le ruissellement : exemple de bassin versant du Réal Collobrier dans le massif des Maures, Mémoire de D.A.A., INA Paris-Grignon, CEMAGREF, groupement de Montpellier, Laboratoire commun de télédétection, 52 p. + annexes.

WEESAKUL U. (1992). Apports de la télédétection et de l'information géographique numérique à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 272 p. + annexes.

MARTIN C., MARC V., GIMENEZ H., DELGIOVINE A., CHEVALIER Y., MARTIN Ph. (1992). Hydrochemical measures on a little stream after a forest fire. XVIIème assemblée générale de l'European Geophysical Society (Edimbourg, 1992), présentation d'un poster, Annales Geophysicae, partie II, supplément II au volume 10, p. C 307. Article soumis à Catena.

MARC V., TRAVI Y. (1992). Traçages chimique et isotopique des composantes de l'écoulement sur un petit bassin versant méditerranéen (Réal Collobrier). Aspects méthodologiques et résultats préliminaires. Travaux URA 903, CNRS, N° XXI.

CERNESSON F., LAVABRE J., MASSON J-M. (1992). Flood simulation from rainfall/Runoff modelling, International Commission of large dams, 60è réunion exécutive, Grenade, 10 p.

DELAUNAY CH. (1992). Hydrogéologie d'un bassin versant dans un massif de roches métamorphiques : réflexions sur la localisation des sources. Mémoire de stage Université de Nice et CEMAGREF, Aix-en-Provence, division Hydraulique et Irrigation, 46 p. + annexes.

BEGUIN E. (1993). Les phénomènes d'érosion mécanique dans le bassin versant du Rimbaud après l'incendie de forêt d'août 1990. Mémoire de DEA, Aix-Marseille I.

MARTIN C., MARC V. (1993). Examen de la pluviométrie et des écoulements annuels après 25 années d'observation sur le bassin versant de recherche et expérimental du Réal Collobrier. Mélanges Frécaut, Presses Universitaires de Nancy, in press.

PUECH C. (1993). Caractérisation des états de surface par télédétection pour une approche spatialisée de la modélisation pluie débit application à des bassins sahéliens et méditerranéens, Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 214 p + annexes.

WEESAKUL U., PUECH C., VINE P. (1993). Estimation of annual runoff on the basis of satellite imagery and digital geographical information, IGARSS'93, Tokyo, 18-21/08/93.

NGUETORA (1993). Analyse multitemporelle des radiométries des zones brûlées en vue d'une cartographie de la végétation (cas du Réal Collobrier). Mémoire de DEA d'Hydrologie de l'ENGREF.

Actes du 1er workshop du projet de recherche Européen DM2E (1993), CEMAGREF Aix-en-Provence, 100 p.

LAVABRE J., SEMPERE-TORRES D., CERNESSON F. (1993). Hydrological consequences of fire: changes on the hydrological response of a little mediterranean basin a year after the fire, Journal of Hydrology, 142, pp 273-299.

CERNESSON F., (1993). Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 240 p + annexes.

TRAVI Y., LAVABRE J., BLAVOUX B., MARTIN C. (1993). Traçage chimique et isotopique (Cl⁻, 18O) d'une crue d'automne sur un petit bassin versant méditerranéen incendié. 13 p, accepté au Journal des Sciences Hydrologiques, AISH.

LAVABRE J., MARTIN C., BERNARD-ALLEE Ph., FOLTON N. (1993). Comportement hydrologique des sols d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie, premières analyses 2 cycles hydrologiques après incendie. Rencontres forestiers, chercheurs en forêt méditerranéenne, La Grande Motte, INRA, ed, 10 p.

LAVABRE J., BOENNEC J.M., CERNESSON F. (1993). Interception de la pluie par la canopée. Premiers résultats après 6 mois d'expérimentation, 6ème colloque international de climatologie, Université Aristote de Thessalonique, 10 p.

MORELLO E. (1993). Etude d'un écosystème aquatique temporaire méditerranéen. Bilan hydroécologique du Réal Collobrier, DESS, Université de Corse, Faculté des Sciences de Corte, 59 p + annexes,

GRESILLON J.M. (1994). Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crue sur les petits bassins versants - Approches numériques et expérimentales à différentes échelles. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches. Université Joseph Fourier de Grenoble, 158 p.

Les bassins versants de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht)

Bruno AMBROISE

Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques
(CEREG, URA 95 du CNRS), Université Louis Pasteur (ULP)
3 rue de l'Argonne, F 67083 STRASBOURG Cedex
Tél : (33) 88 45 64 41 - Fax : (33) 88 41 13 59

Laboratoires responsables (et principaux intervenants):

- le Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG, URA 95 du CNRS) de l'Université Louis Pasteur (ULP) de Strasbourg
(B. Ambroise, A.V. Auzet, M. Gounot, J. Humbert, G. Najjar, J.L. Mercier, P. Paul, D. Viville)

avec, pour le bassin du Strengbach:

- le Centre de Géochimie de la Surface (CGS, UPR 6251 du CNRS) de Strasbourg
(B. Fritz, A. Probst)
- le Laboratoire "Sols et Nutrition des Arbres Forestiers" (LSNAF/CRF-INRA) de Nancy-Champenoux (M. Bonneau, E. Dambrine, J. Ranger)

Présentation

Les bassins de recherche vosgiens, dont les principales caractéristiques et l'équipement disponible sont décrits en Annexe, sont bien représentatifs de la moyenne montagne tempérée. Ils sont constitués:

- du petit bassin *prairial* du **Ringelbach** (36 ha) à Soultzeren (68), équipé à partir de 1975 par le CEREG/ULP pour étudier le cycle de l'eau en moyenne montagne tempérée;
- du petit bassin *forestier* du **Strengbach** (80 ha) à Aubure (68), équipé à partir de 1985 par le CEREG/ULP et le CGS/CNRS, et à partir de 1986 par le CRF/INRA, pour étudier l'effet de la pollution atmosphérique sur un écosystème forestier déperissant.

Ces bassins élémentaires sont les plus petites unités d'une dizaine de bassins emboîtés disponibles dans le bassin de la **Fecht** (450 km²), qui sont étudiés depuis 1978 par le CEREG/ULP, en collaboration avec d'autres équipes, et en s'appuyant sur les réseaux de mesures climato-hydrologiques gérés par la DIRNE/Météo France, le SEMA-Alsace et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

L'ensemble constitué par les petits bassins du Ringelbach et du Strengbach et par les bassins emboîtés de la Fecht a été retenu comme **bassins de référence** par

le Conseil Scientifique et Technique des Bassins Versants de Recherche et Expérimentaux (CST/BVRE) créé en 1986 par le Ministère de la Recherche.

Historique

Les Laboratoires de Géographie Physique et d'Ecologie Végétale (ERA 569, puis RCP 741 du CNRS) de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg -intégrés en 1986 au Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (CEREG, URA 95 du CNRS)- ont créé à l'automne 1975 le petit bassin versant de recherche du Ringelbach (0,36 km²) à Sultzeren (Haut-Rhin) pour leur programme "*Géosystème et Ecosystème Prairial: Structure et Fonctionnement du Milieu Naturel en Moyenne Montagne Tempérée*": depuis lors, les recherches climato-hydrologiques menées dans ce bassin portent surtout sur la variabilité spatio-temporelle des composantes du cycle de l'eau en vue de sa modélisation.

En 1978, une Convention de Recherche du Ministère de l'Environnement permet une extension spatiale des études en complétant l'équipement climato-hydrologique du bassin de la Petite Fecht (12,5 km²) à Sultzeren. La mise en place du Programme **PIREN-Eau/Alsace** en 1980 -auquel participait aussi le CGS/CNRS- permet ensuite l'extension des recherches à l'ensemble du bassin de la Fecht (450 km²): en concertation avec la Météorologie Nationale, le SRAE-Alsace et l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse- le CEREG a alors densifié le réseau climatologique le long d'un transect Ouest-Est dans ce bassin où le SRAE-Alsace gérait déjà 8 stations limnigraphiques.

L'apparition brutale à l'été 1983 de symptômes inquiétants de dépérissement dans de nombreux peuplements forestiers des Vosges conduisit à la mise en place du Programme national **DEFORPA** "*Dépérissement Forestier attribué à la Pollution Atmosphérique*", dont le responsable M. Bonneau demanda au CEREG à l'automne 1984 de préparer un projet de recherche portant sur un petit bassin versant forestier dans les Vosges: il s'agissait d'analyser les effets sur les sols et la végétation des apports acides atmosphériques au moyen de bilans hydrogéochimiques détaillés. Ceci a abouti en septembre 1985 à la création du petit bassin de recherche du Strengbach (0,80 km²) à Aubure (Haut-Rhin) -inclus dans le bassin de la Fecht- sur un programme associant le CEREG/ULP et le CGS/CNRS -avec la collaboration de la Météorologie Nationale (SMIRNE) et de l'Association pour la Surveillance de la Pollution Atmosphérique (**ASPA**) de Strasbourg- ainsi que, à partir de 1986, le LSNAF du Centre de Recherches Forestières de l'INRA à Nancy.

Programmes scientifiques

Le thème général des recherches menées dans ces bassins est l'**étude quantitative des flux d'eau, de solutés et d'énergie, de leurs interactions avec les divers compartiments des écosystèmes, et de leurs interdépendances à l'intérieur de bassins versants de moyenne montagne, en vue de la modélisation dynamique et systémique de leur fonctionnement.**

Ces recherches ont un triple objectif:

- analyser et modéliser les transferts d'eau, de solutés et d'énergie dans le **système sol-plante-atmosphère** en milieu de moyenne montagne tempérée, à différentes échelles spatiales (station, versant, bassin élémentaire, bassin versant);
- étudier le rôle de la topographie et des types de sol, de végétation et de situation météorologique sur la **variabilité spatio-temporelle** des composantes du cycle de l'eau et des flux couplés d'énergie;
- déterminer et modéliser l'influence des types de sols, d'arènes et de roches sous-jacentes sur la **dynamique d'altération** et le contrôle de la chimie des eaux de surface.

L'approche spatialisée et à bases physiques adoptée pour modéliser ces fonctionnements à l'échelle du bassin versant conduit au développement de recherches pour quantifier les hétérogénéités spatiales, estimer la représentativité spatiale des mesures et en déduire des méthodes d'interpolation, élaborer des procédures de validation multi-critères des modèles, et analyser la transposabilité des résultats.

Ces recherches ont été et sont menées dans le cadre de plusieurs **programmes interdisciplinaires** français ou européens:

- Convention de Recherche 1977-80 du Ministère de l'Environnement
- Programme PIREN-Eau/Alsace 1980-93 (CNRS, Ministère de l'Environnement, Région Alsace)
- Programme DEFORPA 1985-91 (CEE-DG XII, Ministères Environnement et Recherche, Région Alsace)
- ATP PIREN/CNRS-INRA-ORSTOM-CIRAD "*Bilans Hydriques*" 1986-89
- Conventions CST/BVRE 1989, 1993
- Programme "*Bassins de Recherche Vosgiens*" 1990-93 (Ministère de la Recherche et de la Technologie)
- Action Incitative "*Eau-Sol-Plante*" 1990-94 (Programme Environnement du CNRS)
- Réseau ENCORE du Programme STEP 1991-94 (CEE DG XII)
- Programme "*Hydrologie et Télédétection en Moyenne Montagne Tempérée*" 1991-92 (PNTS 1990)
- Programme "*Eaux Continentales*" 1991-94 (Ministère de la Recherche et de la Technologie)
- Contrat Agence de l'Eau Rhin-Meuse 1991-93
- Programme "*Charges Critiques*" 1992- (ADEME, Ministère de l'Environnement)
- Programme Climatique Régional Transfrontalier REKLIP (Phase 2) 1993-95
- Programme "*Dynamique et Bilan de la Terre - Erosion et Hydrogéologie*" 1994-95 (DBT-2/INSU).
- Programme de Recherche en Hydrologie, 1994 (PRH/INSU)

Intervenants

Dans le cadre de ces programmes, les équipes ayant collaboré ou collaborant directement dans ces bassins appartiennent à une dizaine d'**Organismes de recherche** français et européens:

- le *Centre de Recherches et d'Etudes Eco-Géographiques* (CEREG/**ULP**, URA 95 du CNRS) de Strasbourg pour les aspects climatologiques, hydrologiques, géomorphologiques et écologiques,
- le *Centre de Géochimie de la Surface* (CGS/**CNRS**) de Strasbourg, pour les aspects hydrogéochimiques, géologiques et isotopiques,
- le *Centre de Recherches Forestières* (CRF/**INRA**) de Nancy-Champenoux, pour les aspects forestiers, pédologiques, biogéochimiques (Laboratoire Sols et Nutrition des Arbres Forestiers) et écophysiologicals (Laboratoire d'Ecophysiological et Bioclimatologie Forestières),
- le *Centre de Pédologie Biologique* (CPB/**CNRS**) de Nancy, pour les aspects pédologiques,
- le *Laboratoire de Science du Sol* (LSS/**INRA**) de Rennes, puis le *Laboratoire de Biogéochimie Isotopique* (BGCI/**UPMC-INRA**) de Paris, pour l'isotopie hydrologique,
- le *Laboratoire de Géochimie* (**UPS**, URA 67 CNRS) de Toulouse, pour les traceurs de l'altération et des écoulements par les éléments traces
- le *Service Géologique d'Alsace-Lorraine* (SGAL/**BRGM**) de Strasbourg, puis l'*Institut de Physique du Globe* (EOPGS/**ULP**) de Strasbourg et le *Centre de Recherches Géophysiques* (CRG/**CNRS**) de Garchy, pour les aspects géophysiques,
- le *Département de Bioclimatologie* de l'**INRA** à Grignon, pour les aspects micrométéorologiques,
- l'*Institut Paul Scherrer* (**PSI**) de Villigen (CH) et l'*Institut für Meteorologie und Klimaforschung* (IMK) de Karlsruhe (D.) pour les aspects aérodynamiques
- le *Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement* (LTHE/**INPG-UJF**, URA 1512 **CNRS**) de Grenoble, pour l'hydrodynamique des milieux poreux,
- la *Subdivision d'Agrométéorologie* (**Météo France**) de Paris, pour la modélisation hydrique,
- le *Laboratoire d'Hydrologie Mathématique* (LHM/**USTL**) de Montpellier, puis le *Centre for Research on Environmental Systems and Statistics* (CRES/**Lancaster University**, U.K.), pour la modélisation hydrologique,
- le *Groupement Scientifique de Télédétection Spatiale* (GSTS/**ULP**) de Strasbourg.

Ces équipes bénéficient du soutien d'autres équipes non directement impliquées dans ces bassins, à travers des collaborations dans le cadre de ces programmes (Groupe PIREN-Eau/Alsace,...) ou des **réseaux** européens auxquels ces bassins sont intégrés:

- le Réseau Euro-méditerranéen ERB de Bassins Représentatifs et Expérimentaux,
- le Réseau ENCORE "*European Network of Catchments Organized for Research on Ecosystems*" de la CEE-DGXII.

Elles bénéficient également des données recueillies par d'autres organismes gérant des stations de mesures dans ce secteur, et avec lesquels une concertation de longue date a été établie:

- la Direction Inter-Régionale du Nord-Est (DIRNE) de Météo France à Strasbourg,
- le Service de l'Eau et des Milieux Aquatiques (SEMA-Alsace) de la Direction Régionale de l'Environnement à Colmar,
- l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse à Metz,

- l'Association pour la Surveillance de la Pollution de l'Air (ASPA) de Strasbourg,
- l'Office National des Forêts (ONF).

Principaux résultats

Les principaux résultats obtenus concernent les points suivants (cf. bibliographie sélective):

- mise au point d'une typologie de situations météorologiques adaptée à la région
- élaboration d'une méthode de cartographie des précipitations annuelles et mensuelles en fonction du relief
- approche vectorielle et spatialisée des précipitations permettant d'estimer les "pluies hydrologiques" effectivement reçues sur les versants et bassins élémentaires
- détermination de l'interception des précipitations par le couvert forestier
- caractérisation hydrochimique et quantification des flux d'éléments dans les précipitations et les pluvio-lessivats, origine des éléments, tendances à moyen terme, relation chimie/type de temps, modélisation des dépôts hors couvert
- approche cartographique de l'évapotranspiration potentielle journalière et de ses composantes radiatives et advectives en fonction du relief
- détermination de la transpiration forestière par la méthode du flux de sève
- caractérisation de la structure des couverts forestiers
- caractérisation hydrodynamique (rétention, conductivité) des sols et formations superficielles, relation avec la texture et la matière organique, et variabilité spatiale intra- et inter-unités de sol
- caractérisation hydrobiogéochimique et quantification des flux d'éléments dans le sol et la végétation forestière
- effet de la sécheresse sur les cycles des éléments, effets d'apports acides provoqués sur le fonctionnement hydro-pédologique stationnel
- modélisation simplifiée du bilan hydrique stationnel en prairie et forêt
- approche géomorphologique et géophysique de la géométrie et de la structure des formations superficielles
- quantification du mouvement de reptation des horizons superficiels sur versant
- détermination des caractéristiques pétrographiques et pétrophysiques de la roche, de la minéralogie des minéraux primaires et secondaires et de leur évolution au cours de l'altération supergène et hydrothermale
- étude expérimentale des processus d'altération (arène, sols, roches, minéraux), modélisation géochimique des processus d'altération de la roche (à l'aide du Sr) sous l'influence des précipitations acides (modèle KINDIS)
- détermination du rôle climato-hydrologique des surfaces saturées en eau, comme zones contributives variables aux écoulements de surface
- identification des processus de genèse des débits par plusieurs approches couplées (hydrologique, géochimique, isotopique)
- caractérisation hydrogéochimique et quantification des flux d'éléments dans les sources et les ruisseaux
- quantification du rôle de la fonte nivale et du réseau de drainage dans la formation et l'évolution spatiale des écoulements dans les bassins emboîtés
- établissement de bilans hydriques, hydrologiques et hydrogéochimiques détaillés à différentes échelles de temps (mois, années) et d'espace (station, bassin)

- modélisation hydrologique spatialisée et à bases physiques: adaptation et validation du modèle TOPMODEL (Beven et al., 1984) et du modèle couplé à discrétisation spatiale (Girard et al., 1991)

Diffusion des résultats

Les résultats obtenus par ces équipes dans ces bassins ont déjà fait l'objet d'un important effort de **publication scientifique** (cf. bibliographie sélective):

- 120 articles scientifiques, dont 48 dans des revues ou actes de colloque internationaux,
- 63 communications non publiées à des colloques, dont 45 dans des colloques internationaux,
- 31 rapports de contrats de recherche.

Les bassins de recherche vosgiens ont été visités depuis leur création par environ un millier de chercheurs venant de très nombreux pays, notamment à l'occasion d'excursions scientifiques organisées dans le cadre de colloques nationaux ou internationaux:

- 1er Colloque de la Commission "*Expérimentation de Terrain en Géomorphologie*" de l'Union Géographique Internationale, Paris, 5/10/1978.
- *Journées de Climatologie* du Comité National de Géographie, Strasbourg, 13-15/11/1980.
- 7e Colloque de la Commission "*Expérimentation de Terrain en Géomorphologie*" de l'Union Géographique Internationale, Strasbourg - Heidelberg - Luxembourg, 19-25/08/1984.
- *Journées Hydrologiques* du Comité National de Géographie, CEREG - Université Louis Pasteur, Strasbourg, 16-18/10/1986.
- 8th *International symposium on Environmental Biogeochemistry*, Nancy, septembre 1987.
- Colloque International "*Thermodynamique des Processus Naturels*", Strasbourg, 25-28/07/1988.
- *Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux*.
- FERN Workshop "*Unification of European Forest Pattern Research*", European Science Foundation, Strasbourg, 24-26/4/1989.
- IUFRO Symposium "*Management of Nutrition in Forests under Stress*", Freiburg-Brigau (D), 18-23/9/1989.
- *STEP-ENCORE Meeting*, Strasbourg, 23-26/9/1991
- Comité du Réseau Européen ERB "*Experimental and Research Basins*", 22/4/1993.
- 5th Mapping Workshop on *Critical Loads*, Nancy, 14-18/3/1994

Activités de formation

Ces bassins de recherche contribuent largement à la **formation à/et par la recherche**. Ils ont déjà fait l'objet de:

- 17 Thèses de Doctorat (+ 4 en cours)
- 54 mémoires (DEA, maîtrise, diplôme d'ingénieur,...).

Ils servent également à la **formation universitaire et permanente**, non seulement en fournissant des exemples illustrant de nombreux enseignements de 2ème et 3ème cycle, mais aussi par des visites et stages de terrain annuels pour plusieurs filières de l'Université Louis Pasteur: Licence et Maîtrise de Géographie, MST Environnement, DEA "*Systèmes Spatiaux et Aménagements Régionaux*" et "*Mécanique et Ingénierie - Option: Sciences de l'Eau*", DESS "*Gestion de l'Environnement - Eau, Sol, Sous-sol*",...

Perspectives

Les recherches à développer dans les prochaines années dans les bassins de recherche vosgiens pourraient concerner plusieurs disciplines connexes et leurs interfaces:

- **hydrologie**, avec la modélisation spatialisée et à bases physiques du cycle de l'eau à plusieurs échelles spatiales, tenant compte de l'incertitude introduite par la variabilité spatiale des paramètres et des entrées,
- **météorologie**, avec l'étude et la modélisation des champs météorologiques et des flux de surface en fonction du relief -et notamment les précipitations, le vent et l'évapotranspiration,
- **(bio)géochimie**, avec l'étude et la modélisation du cycle des éléments dans l'écosystème et de la dynamique d'altération dans le sol et le sous-sol, ainsi que la recherche de traceurs géochimiques utilisables en hydrologie,
- **géophysique**, avec la caractérisation de la géométrie des milieux poreux et de leurs propriétés hydrodynamiques dans ce type de sol et de sous-sol,
- **écologie**, avec l'étude et la modélisation de la dynamique d'écosystèmes prairiaux et forestiers.

La poursuite de ces recherches, déjà amorcées dans les programmes en cours, pourrait être assurée dans le cadre de plusieurs grands programmes en cours d'élaboration:

- Programme de Recherche en Hydrologie (**PRH/INSU**), Programmes des GIP "*Hydrosystèmes*" et "*Ecosystèmes Forestiers*", Programme "*Environnement, Vie et Société*" du CNRS,....
- Programmes internationaux **WRCP/GEWEX** "*Global Energy and Water Exchanges*" et **IGBP/BAHC** "*Biospherical Aspects of the Hydrological Cycle*" sur les échanges d'eau et d'énergie à l'interface sol-plante-atmosphère à différentes échelles spatiales.

Enfin, il est envisagé d'étendre les recherches à un **transect Ouest-Est** recoupant à la latitude de Colmar et du bassin de la Fecht le Massif Vosgien, le Fossé Rhénan et la Forêt Noire -transect très intéressant par la diversité des milieux et des conditions climato-hydrologiques et par le nombre des dispositifs de recherche qu'il englobe sur une faible superficie (cf. Annexe). Elles seraient menées en collaboration avec les Programmes PIREN-Eau/Alsace et REKLIP et ceux de l'*Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'Environnement* (IFARE) de Strasbourg, concernant déjà tout ou partie de ce secteur et portant sur des thématiques complémentaires.

Conclusions

Avec leurs dispositifs de mesure à plusieurs échelles (station, bassin élémentaire, bassins versants emboîtés), les bassins de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht) assurent, depuis leur création, les 4 fonctions distinctes mais complémentaires de:

- **laboratoires de terrain**, pour la recherche et l'expérimentation sur les mécanismes et les fonctionnements,
- **observatoires de l'environnement**, par un suivi à long terme de la dynamique climato-hydrologique, géochimique et écologique de ce milieu de moyenne montagne tempérée,
- **sites de validation** de méthodes et de modèles, grâce à l'équipement et aux bases de données disponibles,
- **lieux de formation** universitaire (2ème et 3ème cycles) et permanente.

Le développement et la valorisation de ces outils, ouverts à toute collaboration scientifique, se heurtent cependant à plusieurs difficultés majeures:

- des moyens financiers de base encore insuffisants pour assurer dans de bonnes conditions ces recherches et la maintenance de tels dispositifs de terrain;
- et surtout, un manque flagrant de personnel permanent affecté à ces bassins de recherche, qui équivalent pourtant chacun à un **équipement "mi-lourd"** du CNRS.

C'est ce que soulignent d'ailleurs bien le CST/BVRE (1990) dans son "*Bilan d'Activité pour la Période 1985-1989*", ainsi que le "*Rapport d'Evaluation du Potentiel Français en Hydrologie*" présenté en février 1990 par P. Dubreuil aux Ministères de l'Environnement et de la Recherche.

Bibliographie sélective

Articles

(principales références sur les différents thèmes étudiés)

Adjizian-Gérard J., Ambroise B. (1989): Application d'un modèle trigonométrique à la mesure des précipitations sur pente dans le petit bassin du Ringelbach (Hautes Vosges, France). *Publ. Assoc. Int. Climatologie* 2:103-109.

Ambroise B. (1988): Interactions eaux souterraines - eaux de surface dans le bassin du Ringelbach à Soultzeren (Hautes Vosges, France): rôle hydrologique des surfaces saturées. In: Dahlblom P., Lindh G. (eds) "*Interaction between Groundwater and Surface Water*", Proc. Int. Symp. IAHR, Ystad (S), 30/5-3/6/1988, Univ. Lund (S), 231-238.

Ambroise B. (1990): Méthodes d'étude de la variabilité spatiale du cycle hydrique dans le petit bassin du Ringelbach. *IAHS Publ.* 193:327-334.

Ambroise B.: Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - Processus et modèles. In: P. Stengel (ed) "*Les Flux dans les Volumes*

Pédologiques et à leurs Limites: Approches à l'Echelle Spatiale du Bassin Versant, Les Colloques de l'INRA, INRA, 53 p. (à paraître)

Ambroise B.: Topography and the water cycle in a temperate middle mountain environment: the need for interdisciplinary research. *Agric. For. Meteor.* (à paraître)

Ambroise B., Auzet A.V., Humbert J., Mercier J.L., Najjar G., Paul P., Viville V. : le cycle de l'eau en moyenne montagne tempérée : apport des bassins versants de recherche vosgiens (Ringelbach, Strenbach, Fecht). *Annales de Géographie*, Numéro spécial "Les bassins versants, fonctionnement, aménagement", 1995/1 (soumis pour publication).

Ambroise B., Najjar G. (1983): Cartographie de l'évapotranspiration journalière en région montagneuse -Application au petit bassin du Ringelbach, Hautes-Vosges. *Les Colloques de l'INRA* 15:187-200

Ambroise B., Reutenauer D., Viville D. (1992): Estimating soil water retention properties from mineral and organic fractions of coarse-textured soils in the Vosges Mountains of France. In: M.T. van Genuchten, F.J. Leij, L.J. Lund (Eds) "*Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*", University of California, Riverside (Ca, USA), 453-462.

Ambroise B., Viville D. (1986): Spatial variability of textural and hydrodynamical properties in a soil unit of the Ringelbach study catchment, Vosges (France). *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd* 58, 21-34.

Auzet A.V., Ambroise B., Mercier J.L. (1986): Réalisation et test d'un capteur flexible à jauges d'extensométrie pour la mesure des profils de reptation et le suivi de leur évolution. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd* 60, 71-82.

Auzet A.V., Ambroise B. : Soil creep dynamics and soil moisture and temperature conditions in a forested slope of the granitic Vosges Mountains, France. *Earth Surf. Proc. Landf.* (à paraître)

Dambrine E., Bonneau M., Ranger J., Nys C.: Protons and nutrients cycling and budgets in conifer stands. In: G. Landmann, M. Bonneau (Eds) "*Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains*", Springer Verlag (à paraître)

Dambrine E., Cariséy N., Pollier B., Girard S., Granier A., Lu P., Biron P. (1992): Dynamique des éléments minéraux dans la sève xylémique d'épicéas de 30 ans. *Ann. Sci. For.* 49:489-510

Dambrine E., Granier A., Levy G.: Water regime and magnesium deficiency: manipulative experiments in young spruce stands. In: G. Landmann, M. Bonneau (Eds) "*Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains*", Springer Verlag (à paraître)

Dambrine E., Ulrich E., Cenac P., Durand P., Gauquelin T., Mirabel P., Nys C., Probst A., Ranger J., Zephoris M.: Atmospheric deposition in France and possible relation with forest decline. In: G. Landmann, M. Bonneau (Eds) "*Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains*", Springer Verlag (à paraître)

- Fritz B., Massabuau J.C., Ambroise B. (1984): Physico-chemical characteristics of surface waters and hydrological behaviour in a small granitic basin (Vosges massif, France): annual and daily variations. *IAHS Publ.* 150, 249-261.
- Granier A., Biron P., Köstner B., Gay L.W., Najjar G.: Comparisons of xylem sap flow and vapour flux at the stand level and derivation of canopy conductance for Scots Pine. *Agric. For. Meteor.* (à paraître)
- Humbert J. (1985): Genèse et développement des crues dans deux vallées vosgiennes (Fecht et Weiss): l'exemple des crues d'avril et mai 1983. *Mosella* tome XV, 67-125.
- Humbert J. (1986): Estimation et rôle de la fonte nivale dans l'écoulement de crue des rivières des Hautes-Vosges (bassin de la Fecht, Haut-Rhin). *Rev. Géogr. de l'Est* 26(1/2), 27-56.
- Humbert J. (1987): Prédétermination des volumes de crue sur bassins emboîtés en moyenne montagne (Bassin de la Fecht, Vosges centrales, France). In: Humbert J., Cloots A.R., Maire G. (eds) "*Crues et Inondations*", CEREG/ULP, Strasbourg, 93-114.
- Humbert J. (1990): Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. *Publ. AIHS* 193:373-380.
- Humbert J., Jaillot A. (1988): Evolution de l'utilisation de l'eau dans la vallée de Munster (Haut Rhin) entre 1950 et 1983. *Actes 113e Congrès National Sociétés Savantes. Section: Géographie*, Strasbourg, avril 1988, Ed. CTHS, Paris, 19-40.
- Humbert J., Najjar G. (1992): Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré - Analyse de la littérature francophone. *CEREG-ULP*, 85 p.
- Humbert J., Perrin J.L. (1993): Précipitations et relief: le cas des Hautes Vosges orientales. In: M. Griselin (Ed) "*L'Eau, la Terre et les Hommes - Ouvrage en Hommage à R. Frécaut*", Presses Univ. Nancy, 147-154.
- Le Goaster S., Dambrine E., Ranger J. (1990/91): Mineral supply of healthy and declining trees of a young spruce stand. *Water, Air and Soil Pollution* 54:269-280.
- Maire G., Wilms P. (1987): Transformation d'un système fluvial sous l'effet d'aménagements hydrauliques: les réajustements morphodynamiques successifs du cours moyen de la Fecht depuis deux siècles. In: Humbert J., Cloots A.R., Maire G. (eds) "*Crues et Inondations*", CEREG/ULP, Strasbourg, 295-324.
- Mercier J.L. (Ed.) (1982): Structure et Fonctionnement du Milieu Naturel en Moyenne Montagne - Bassins de la Petite Fecht et du Ringelbach (Vosges, France). *Rech. Géogr. à Strasbourg* 19/20/21, 276
- Oh K.S., Reutenauer D., Mercier J.L. (1987): Caractérisation micromorphologique et hydrodynamique des niveaux structurés par le gel quaternaire dans les formations superficielles du bassin versant de la Fecht (Vosges, France). *Catena* 14(6), 485-499.
- Paul P. (1986): Topoclimats et décroissance de la température avec l'altitude dans les Vosges et la Forêt Noire. *Freib. Geogr. Heft* 26, 293-304.

Paul P., Roussel I. (1985): Les précipitations exceptionnelles d'avril et mai 1983 à l'origine des fortes crues en Alsace et en Lorraine. *Mosella* tome XV, 3-29.

Perrin J.L., Ambroise B., Humbert J. (1990): Application du modèle couplé à discrétisation spatiale au bassin de la Fecht, Vosges (France). *IAHS Publ.* 193:615-622.

Probst A., Dambrine E., Viville D., Fritz B. (1990): Influence of acid atmospheric inputs on surface water chemistry and mineral fluxes in a declining spruce stand within a small catchment (Vosges massif, France). *J. Hydrol.*, 116, 101-124

Probst A., Fritz B., Ambroise B., Viville D. (1987): Forest influence on the surface water chemistry of granitic basins receiving acid precipitation in the Vosges Massif, France. *IAHS Publ.* 167:109-120

Probst A., Fritz B., Stille P. (1992): Consequence of acid deposition on natural weathering processes: field studies and modelling. In: Y.K. Kharaka, A.S. Maest (Eds), *Proc. 7th Intern. Symp. on Water Rock Interaction*, 13-18/7/1992, Park City (Utah, USA), Balkema Publ., Vol. 1, 581-584.

Probst A., Fritz B., Viville D.: Mid-term trends in acid precipitation, streamwater chemistry and element budgets in the Strengbach catchment (Vosges mountains, France). *Water, Air and Soil Pollution* (à paraître)

Probst A., Lelong F., Viville D., Durand P., Ambroise B., Fritz B.: Comparative hydrochemical behaviour and element budgets of the Aubure (Vosges Massif) and Mont-Lozère (Massif Central) spruce forested catchments. In: G. Landmann, M. Bonneau (Eds) "*Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains*", Springer Verlag (à paraître)

Probst A., Viville D., Fritz B., Ambroise B., Dambrine E. (1992): Hydrochemical budgets in a small granitic catchment exposed to acid deposition: the Strengbach catchment case study (Vosges massif, France). *Water, Air and Soil Pollution* 62:337-347.

Ranger J., Discours D., Mohamed Ahamed D., Moares C., Dambrine D., Merlet D., Rouiller J. (1993): Comparaison des eaux liées et des eaux libres des sols de 3 peuplements d'épicéa (*Picea abies* Karst) des Vosges. Application à l'étude du fonctionnement actuel des sols et conséquences pour l'état sanitaire des peuplements. *Ann. Sci. For.*, 50:425-444.

Reutenauer D., Ambroise B. (1992): Fitting the van Genuchten-Mualem model to observed hydraulic properties of coarse-textured soils in the Vosges Mountains of France. In: M.T. van Genuchten, F.J. Leij, L.J. Lund (Eds) "*Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*", University of California, Riverside (Ca, USA), 285-291.

Viville D., Ambroise B., Korosec B. (1986): Variabilité spatiale des propriétés texturales et hydrodynamiques des sols dans le bassin versant du Ringelbach (Vosges, France). *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl.-Bd 60, 21-40.

Viville D., Biron P., Granier A., Dambrine E., Probst A. (1993): Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). *J. Hydrol.* 144:273-282.

Walter J.M.N. (1993): Canopy geometry and the interception of PAR in a temperate deciduous forest: an interpretation of hemispherical photographs. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet (eds) "*Crop Structure and Light Microclimate*", Science Update, INRA, Paris, 373-384.

Thèses

Adjizian-Gérard J., 1994: La variabilité spatiale des pluies dans le petit bassin versant du Ringelbach (Hautes-Vosges) - Effet de la topographie et des types de temps. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 28/1/1994, 203 p.

Amiet Y., 1980: Méthode d'approche de la spatialisation des caractéristiques hydrodynamiques des formations superficielles - exemple du haut bassin de la Petite fecht (Haut-Rhin). Thèse 3è cycle en Géographie Physique, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 113 p.

Amiotte-Suchet P., 1994: Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transport vers les océans. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CGS/CNRS, Strasbourg, 8/4/1994, 172 p.

Auzet A.V., 1985: La reptation - Mesure in situ en relation avec les conditions hydriques et thermiques du sol (site forestier dans les Vosges granitiques). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 2/10/1985, 185 p.

Biron P., 1994: Bilans hydriques stationnels en forêt de moyenne montagne tempérée - Bassin versant du Strengbach à Aubure (Hautes-Vosges). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG/ULP-CRF/INRA, Strasbourg, 25/1/1994, 310 p.

Chekartchi H., 1984: Recherches sur la phénologie de quelques espèces végétales dans les Vosges. Thèse 3e cycle en Ecologie Végétale, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 127 p.

Geissert E., 1981: Mesure de la reptation dans le bassin versant de la Petite Fecht (Haut Rhin) - Elaboration d'un capteur à jauges de contraintes résistives. Thèse 3e cycle en Géographie Physique, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 170p.

Humbert J., 1977: Contribution à l'étude des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Thèse 3e cycle en Ecologie Végétale, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 194 p.

Lu P., 1992: Ecophysiologie et réaction à la sécheresse de trois espèces de conifères (*Abies alba* Miller, *Picea abies* (L.) Karsten et *Pinus sylvestris* L.) - Effet de l'âge. Thèse de Doctorat, Université Nancy I, CRF/INRA, 116 p. + illustrations

Metthey J., 1977: Modélisation des transferts hydriques dans un versant sous prairie. Thèse 3e cycle en Ecologie Végétale, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 160 p + ann.

Monnon J.L., 1989: Interactions entre sol, matière organique et eau - Illustration par l'étude de 4 sites forestiers de la vallée de la Fecht (Vosges, Haut-Rhin). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 200 p.

Najjar G., 1982: Méthode de cartographie de l'évapotranspiration journalière en moyenne montagne tempérée - Application au bassin versant du Ringelbach (Hautes Vosges). Thèse 3e cycle en Géographie Physique, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 168 p. (2e prix du Prix Henri Milon 1984 de la Société Hydrotechnique de France)

Oh K.S., 1985: Mise en évidence de structures cryogéniques quaternaires dans les formations superficielles de la vallée de la Fecht (Vosges moyennes cristallines). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 123 p. + ann.

Perrin J.L., 1991: Modélisation mathématique du fonctionnement hydrologique des bassins versants de la Fecht et de la Weiss (Haut-Rhin). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 22/11/1991, 242 p.

Reutenauer D., 1987: Etude de la variabilité spatiale des propriétés physiques et hydriques des sols et des formations superficielles du bassin de la Fecht, en amont de Turkheim (Haut-Rhin). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, nov. 1987, 270 p.

Richard L., 1993: Modélisation des signatures isotopiques dans les interactions eaux-roches. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CGS/CNRS, Strasbourg, 92 p.

Viville D., 1985: Variabilité spatiale des propriétés physiques et hydriques des sols dans le bassin versant du Ringelbach (Vosges granitiques). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, CEREG, Strasbourg, 8/11/1985, 158 p.

Le Bassin Versant de Recherche du Ringelbach à Soultzeren (Haut-Rhin)

Laboratoire responsable: CEREG (URA 95 CNRS, ULP), Strasbourg

Date de création: octobre 1975

Situation:

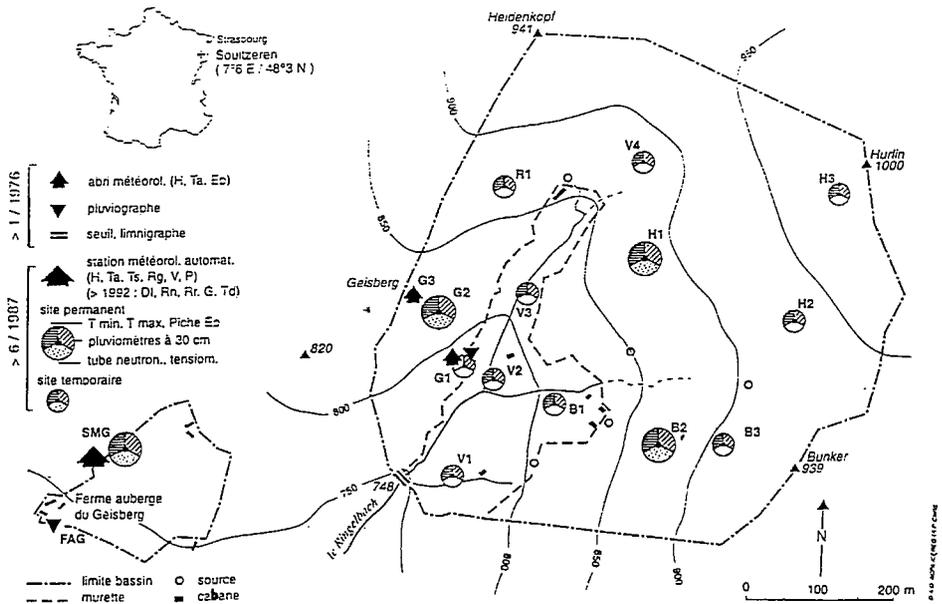
- versant oriental des Vosges. Sous-bassin de la Fecht. Commune de Soultzeren (68)

Caractéristiques physiographiques:

- superficie: 0.36 km²
- altitudes extrêmes: de 1000 m à 748 m
- gamme d'exposition: de SSE à WNW (bassin situé sur un vaste adret)
- substrat: granites (80 %), grès (20 %)
- climat tempéré océanique de montagne
- végétation: pelouses et landes pâturées (75 %), forêts et taillis (25 %)

Caractéristiques hydrologiques:

- précipitations moyennes annuelles: 1250 mm/an
- débit moyen annuel à l'exutoire: 8 l/s, soit 22.2 l/s/km² ou 700 mm/an
- régime pluvial océanique à "tendance évaporale" marquée



Le Bassin Versant de Recherche du Strengbach à Aubure (Haut-Rhin)

Laboratoires fondateurs: CEREG/ULP, Strasbourg; CGS/CNRS, Strasbourg; CRF/INRA, Nancy

Date de création: octobre 1985

Situation:

- versant oriental des Vosges. Sous-bassin de la Fecht. Commune d'Aubure (68)

Caractéristiques physiographiques:

- superficie: 0.80 km²
- altitudes extrêmes: de 1146 m à 883 m
- gamme d'exposition: de SW à NW
- substrat: granites à deux micas (95 %), gneiss (5 %)
- climat tempéré océanique de montagne
- végétation: forêts (98 %), pelouses paturées (2 %)

Caractéristiques hydrologiques:

- précipitations moyennes annuelles estimées : 1400 mm/an
- débit moyen annuel à l'exutoire: 20 l/s, soit 25 l/s/km² ou 790 mm/an
- régime pluvial océanique

Les Bassins Versants de Recherche de la Fecht (Haut-Rhin)

Laboratoire responsable: CEREG (URA 95 CNRS, ULP), Strasbourg
(bénéficiant des données des réseaux climato-hydrologiques gérés par la DIRNE/Météo France, le SEMA-Alsace et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse)

Date de création: octobre 1978

Situation:

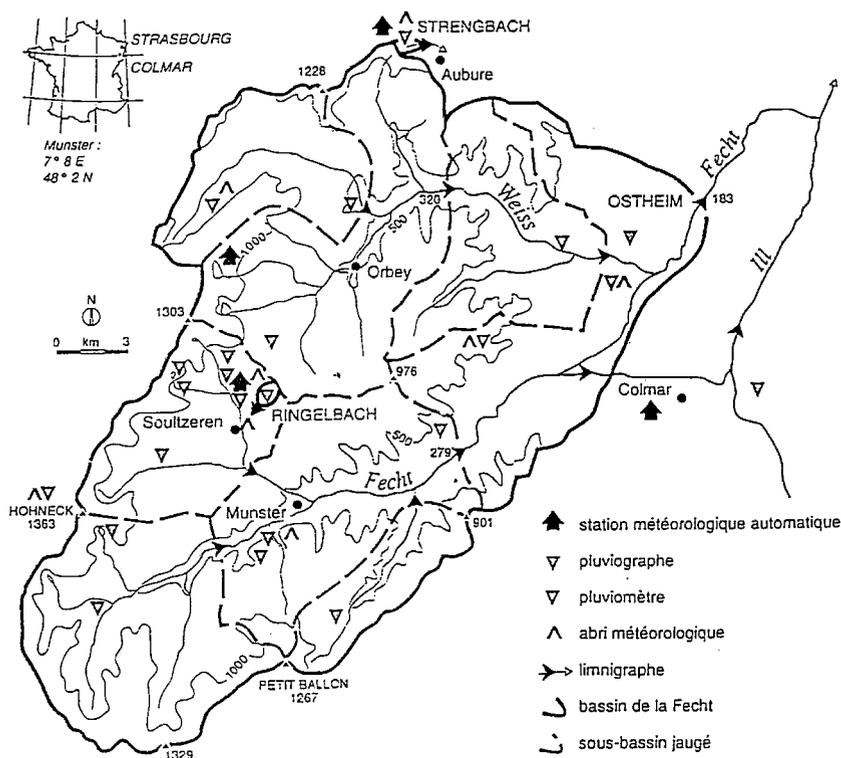
- versant oriental des Vosges, de la ligne de crête principale à la plaine d'Alsace
- sous-bassin de l'Ill, incluant les vallées de la Fecht, de la Weiss et du Strengbach

Caractéristiques physiographiques:

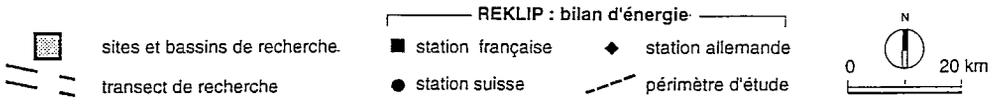
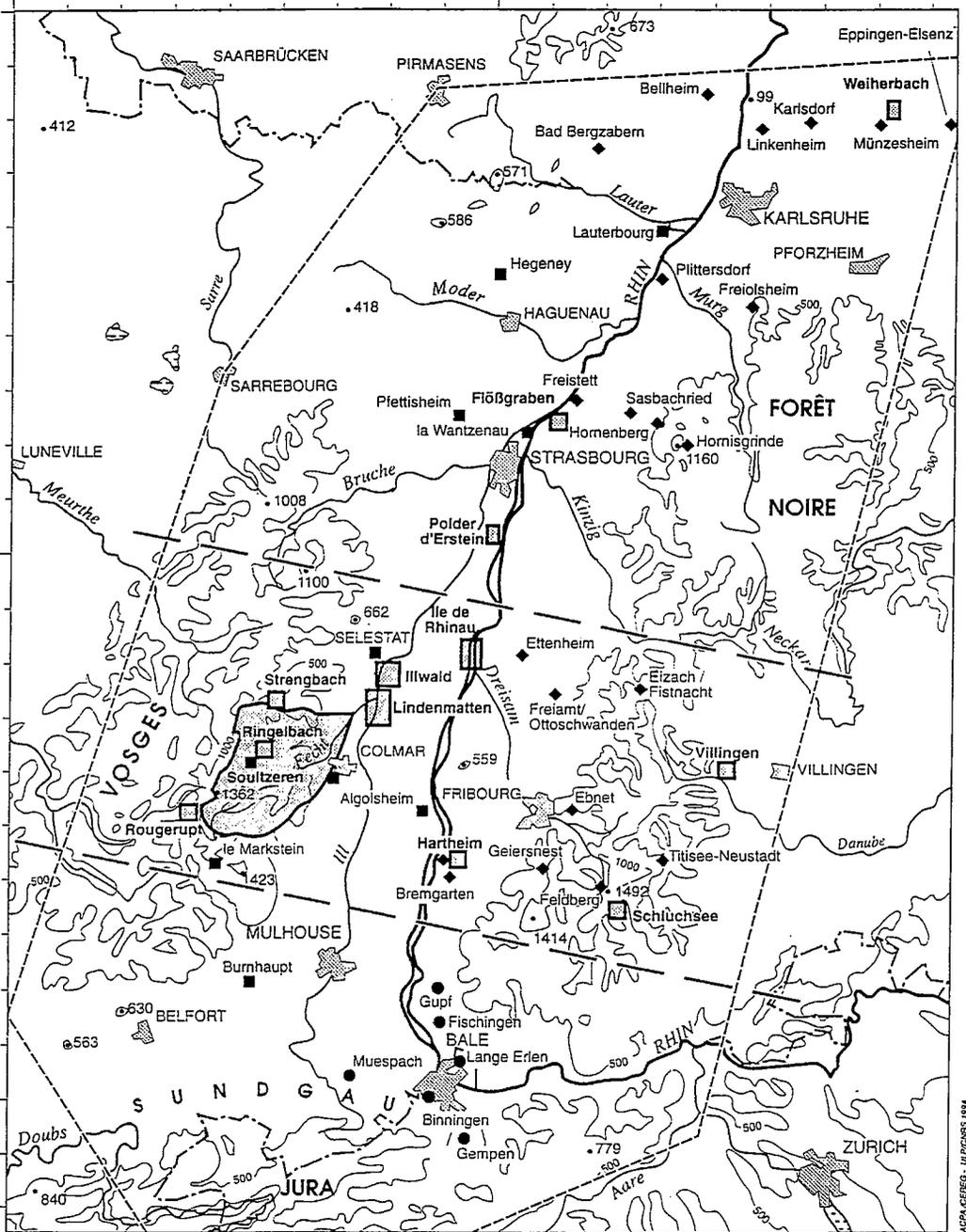
- superficie: 450 km² à Ostheim (sans le sous-bassin du Strengbach)
- altitudes extrêmes: de 1363 m à 190 m
- substrat: prédominance de roches cristallines et métamorphiques (granites, gneiss, schistes, grauwackes) localement recouvertes de grès triasique; dépôts alluviaux en plaine d'Alsace
- climat tempéré océanique de montagne, à fortes influences continentales en aval de Munster
- végétation: forêts (60 %), landes (10%), pelouses pâturées et prairies (20 %), cultures (10 %)

Caractéristiques hydrologiques:

- précipitations moyennes annuelles: de 2000 mm/an sur les crêtes à 550 mm/an en plaine
- débit moyen annuel à Ostheim: 5.6 m³/s, soit 12.4 l/s/km² ou 390 mm/an
- régime pluvial océanique



Principaux bassins et sites de recherche dans le fossé Rhénan



Le bassin versant du Coët Dan, Bretagne

Philippe MEROT

INRA Science du sol, 65 route de St Briec Rennes
Tél : 99 28 54 36 - Fax : 99 28 54 30

Charles CANN

CEMAGREF, 17 av. de Cucillé Rennes
Tél : 99 28 15 43 - Fax : 99 33 29 59

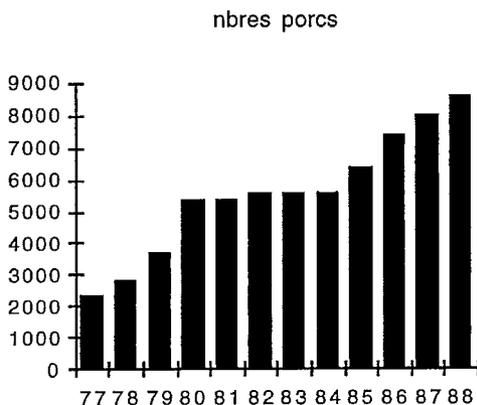
Le contexte environnemental et humain

Le développement continu de l'agriculture en Bretagne depuis trente ans a permis à cette région de se hisser au premier rang des régions agricoles françaises et européennes. Les conséquences d'un tel développement sur l'environnement ont été sous-estimées, et l'image de la Bretagne est ainsi passée de celle d'un "poumon vert" à celle d'une des régions agricoles les plus polluées d'Europe, sur le plan des sols et de l'eau, avec un développement parallèle des nuisances et du risque sanitaire.

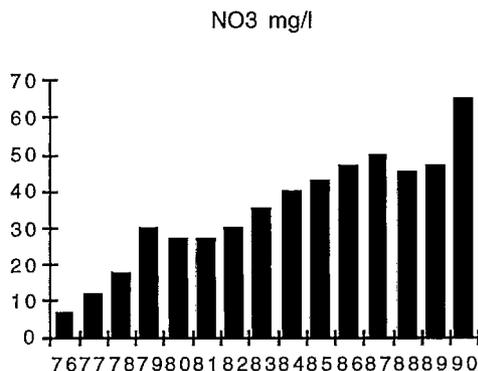
La situation et l'évolution actuelles sont telles qu'elles mettent en danger différentes activités économiques comme les activités aquacoles, le tourisme, l'alimentation en eau potable et même, par un retour de bâton, l'agriculture et la commercialisation des produits agricoles.

C'est dans ce contexte à la fois d'agriculture intensive et évolutive que s'inscrit le bassin versant de référence du Coët Dan à Naizin, dont l'organisme gestionnaire est le CEMAGREF de Rennes.

Il s'agit du bassin de référence le plus occidental, un des rares situé en zone agricole intensive, le seul en zone d'élevage intensif. Il subit depuis 20 ans de fortes évolutions, reflétant en cela les changements de l'agriculture bretonne : remembrement, arasement des talus, drainage agricole, changements d'occupation des sols (accroissement des surfaces en maïs, puis en légumes, disparition des prairies permanentes), augmentation des intrants, irrigation de complément, construction de bâtiments et d'aires bétonnées...

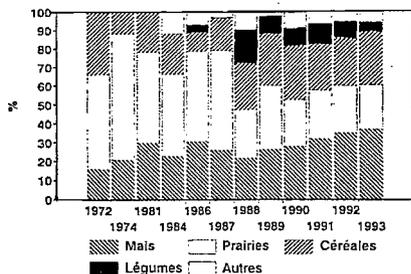


Nombre de porc présents sur le bassin



Augmentation de la teneur en NO₃ à Stimoës.

Répartition des cultures sur le bassin du Coët Dan à Naizin.



Situation géographique, présentation du bassin

Le bassin versant de référence du Coët Dan s'étend sur 12 km² en Bretagne centrale dans le département du Morbihan (coordonnées lambert : 215,8 et 2343,79). Il s'inscrit dans le bassin de l'Evel, lui-même affluent du Blavet. Le ruisseau s'écoule sur une longueur de 7 km du Nord au Sud, d'une altitude de 136 m jusqu'à la station de Stimoës, à 65 m d'altitude.

La partie haute, au nord est constitué d'un plateau avec des champs ouverts alors que la partie Sud correspond à un basculement des pentes, fréquemment supérieures à 5%, avec un bocage encore assez dense. La partie basse le long du ruisseau, à pente faible, très humide est occupée par des prairies permanentes, des bois et des friches.

Le sous-sol est constitué de schistes primaires briovériens plus ou moins gréseux. Le ruisseau coule au milieu d'alluvions modernes. Les sols sont constitués à partir d'un mélange de limons d'altération et d'apport éoliens. Les versants sont des sols bruns faiblement lessivés, passant brutalement à l'aval à des sols dégradés hydromorphes et des sols alluviaux. La pluviosité inter annuelle sur 22 ans est de 713,5 mm (+ ou - 125,5 mm), avec un écoulement de 305,2 mm (+ ou - 168 mm).

Les pluies supérieures à 20 mm par jour sont exceptionnelles (les intensités sont inférieures à 4 mm/h dans 80% des cas). La rivière s'assèche généralement en été.

L'équipement, les principales données récoltées

L'équipement du bassin s'est considérablement renforcé depuis sa création en 1971, notamment avec l'appui du CST BVRE.

L'état actuel de l'équipement permanent est présenté sur la carte du bassin; à l'exutoire principal du bassin, à Stimoës, les 4 préleveurs automatiques sont adaptés à la mesure des MES (flux et analyses physico-chimiques), des éléments majeurs dissous, des pesticides; un transect de 10 pluviomètres et évaporomètres Piche complète le dispositif climatologique; au niveau du sol, un 2^{ème} site de mesure en continu de l'humidité et des potentiels est en cours d'installation.

Par ailleurs de nombreuses campagnes de mesure focalisées sur tel ou tel point notamment le fonctionnement hydrique et géochimique du bassin donnent des informations complémentaires (dénitrification effective des sols...)

Les données disponibles dont la liste exhaustive existe dans un dossier de *fiches de trace de données brutes*, en cours de constitution, peuvent être brièvement résumées :

Caractéristiques permanentes : carte des sols (sous SIG) et carte des formations superficielles (acquises en 92 et 93); modèle numérique de terrain.

Caractéristiques de surface (occupation des sols...): toutes les photos aériennes existantes, images satellites, données radar ERS1, relevés culturaux annuels depuis 84 et enquêtes d'exploitation (3).

Caractéristiques physico chimiques et structurales du sol : de nombreuses mesures à partir de 800 sondages et de 200 échantillons (texture, perméabilités, courbes caractéristiques...)

Les flux : les pluies et les débits depuis 71 à une station (et à 2 autres depuis 92), le niveau de nappe dans 5 puits depuis 71; les transports solides les nitrates, l'ammonium et le phosphore depuis 75 (avec intensification de la fréquence de prélèvement depuis 87) et enfin les pesticides à Stimoës.

Statut, coût et financement

Un GIS est en court de montage sur le site du Coët Dan avec la participation de divers organismes de recherche et universités.

Le coût actualisé de l'ensemble des équipements présents s'élève environ à 2 MF (sans compter le matériel analytique et le matériel mobile : TDR, GPS...), avec une part importante apportée par le CEMAGREF, le CST BVRE et divers partenaires.

Les frais de fonctionnement ont connu une progression liée à l'accroissement de l'activité, du nombre d'équipes participantes et des données recueillies. En coût actualisé, on est passé de 100 Kf en 1986, 200 KF en 1990, à 950 KF en 1993.

L'installation et la maintenance du matériel, le recueil et le traitement de base des données ainsi que les contacts avec les agriculteurs et administrations locales sont assurés par 2,2 techniciens et 0,3 ingénieur (CEMAGREF et INRA).

Les programmes d'étude; les synergies entre équipes et institutions intervenant

Le caractère d'observatoire permanent du bassin du Coët Dan a permis d'accumuler de nombreuses données permettant de traiter différents problèmes correspondant aux priorités du moment : après un démarrage des études portant sur le rôle de l'arasement des talus associé au remembrement sur les flux d'eau , l'essentiel des travaux se sont centrés sur l'étude de l'impact de l'intensification de l'agriculture sur les flux de polluants, avec tout d'abord les nitrates, puis le phosphore et enfin les pesticides.

Actuellement, se développe un programme de caractérisation, d'observation et de modélisation des transferts de masse et d'énergie dans un système hydrologique en milieu agricole acide et à climat océanique dans le Massif Armoricaïn. Ce projet s'inscrit dans une étude plus vaste de l'impact des agrosystèmes sur l'environnement et son intérêt méthodologique dépasse donc le cadre strict de la région Bretagne. Il s'agit in fine d'acquérir un certain nombre de connaissances fondamentales et de construire les bases d'une mise en valeur écologiquement rationnelle des ressources en eau et en sol permettant un développement durable dans un environnement évolutif.

L'impact de l'activité agricole et de son évolution sur l'environnement suppose la mise en oeuvre de programmes scientifiques mobilisant des compétences fort diverses: hydrologiques, pédologiques, bioclimatologiques, agronomiques, biologiques, géographiques, en écologie du paysage, économiques.... Ces compétences sont mobilisées dans les différents organismes de recherche ou d'enseignement: INRA (science du sol, bioclimatologie Rennes; Microbiologie, Dijon), CEMAGREF (déchets solides Rennes; hydrologie Antony; télédétection, Montpellier), CNRS (Géosciences, Rennes, Caen), BRGM (Orléans), UNIVERSITES (Rennes 1; COSTEL (Rennes II), CRPE (Velizy), ENSAR (science du sol, Rennes), INAPG (agronomie, Paris), EPFL (Lausanne), ENSP (Rennes)...

On peut signaler 3 programmes fédérateurs menés ces dernières années :

Le programme BRETAL, financé par le CST BVRE, sur l'étude de la représentativité du bassin du Coët Dan (91-93).

Le programme Cormoran-INRA sur l'analyse du fonctionnement des zones humides, et particulièrement des prairies hydromorphes de bas-fonds, et la prise en compte de l'influence des divers agrosystèmes sur la ressource (sols et eau)(92-94 +).

Le programme du GDR CNRS agriculture environnement sur la caractérisation et le fonctionnement des écosystèmes humides sous influence agricole (93-96).

Des thèmes plus précis s'inscrivent dans ces programmes, par exemple :
- Alimentation et transfert des nappes profondes (BRGM).

- Utilisation de données satellitaires radar pour la caractérisation spatiale de l'humidité des sols (projets PNTS et CEE, en relation avec le CRPE : CEMAGREF Antony, Rennes, Montpellier, INRA Rennes, GEOSYS, Toulouse).
- Dénitrification profonde liée au cycle du soufre ou de surface, liée au cycle du carbone (BRGM, INRA).
- Transfert de nutriments (azote et phosphore) (CEMAGREF Rennes)
- Transfert des MES et sa modélisation (CEMAGREF Rennes, Antony, Bordeaux).
- Transfert de pesticides (AIP transfert de pesticide du CEMAGREF, CORPEP)
- Le programme répondant à l'appel d'offre du CNRS Méthodes, Modèle, Théorie sur la caractérisation de l'échelle pertinente de modélisation hydrologique (INRA, ENSAR, Univ. Hte Bretagne-COSTEL)(93-94).
- Le ruissellement, l'érosion et la dynamique des pesticides (INRA, Ecole nationale de la santé publique).
- La modélisation hydrologique distribuée (INRA, Univ. Rennes 1-Géosciences) et non distribuée (CEMAGREF).
- L'impact d'une retenue sur le transport des MES et des solutés (CEMAGREF, univ; Rennes 1).
- Le rôle du bocage sur les transferts d'eau (INRA) et sur les solutés (ITCF-IDF).

L'articulation nécessaire des programmes des différentes équipes des différents organismes est un cadre parfois contraignant - nécessité d'un contrôle et d'une élaboration des données mises à disposition, coordination des interventions sur le terrain...- mais qui fait l'objet d'une dynamique fructueuse. La complémentarité des équipes qui associent thématique forte de chacune et interrogations réciproques est un des éléments importants du bon fonctionnement d'une opération bassin versant. Cette structuration est particulièrement nette au niveau de l'échelle spatiale étudiée : certaines équipes sont focalisées sur l'échelle interne du bassin (caractérisation et fonctionnement des "zones actives", INRA), d'autres sur l'échelle du bassin (caractérisation et flux moyens, CEMAGREF), d'autres enfin sur l'échelle de la région environnante (COSTEL). D'autres exemples auraient pu tout aussi bien illustrer cela.

Quelques résultats récents

Résultats à l'échelle du bassin

La représentativité du bassin du Coët Dan.

Sur le plan agricole le bassin présente une agriculture largement plus intensive que la moyenne bretonne. Si l'on compare son évolution à celle de la région, il préfigure la situation qui tend à se répandre actuellement en Bretagne, qui se marque par une densification du cheptel, une augmentation des intrants en général avec une faible diminution des engrais minéraux, une diminution des prairies permanentes.

Sur le plan hydro-climatique, le bassin se situe sur une zone de fort gradient pluviométrique. Il est marqué par un déficit pluviométrique par rapport aux bassins environnants, mais par une bonne corrélation inter annuelle de la pluviosité. Le régime hydrologique intermensuel est comparable à celui des bassins situés sur un mélange de schiste et grès, de même qu'à celui des bassins de la Bretagne centrale et particulièrement de l'Evel, bassin dans lequel le Coët Dan est emboîté.

La mesure spatiale de l'humidité des sols par le radar ERS1 a été développée et validée, notamment en période hivernale, dans l'objectif d'intégrer ce paramètre dans des modèles hydrologiques globaux comme GR3 et distribués comme le top model. Des premiers essais d'extrapolation à d'autres bassins s'avèrent prometteurs.

Pour les transferts de polluants, l'intensification agricole mais également la pluie et les caractéristiques du bassin expliquent les principales variations de teneurs :

- *les bilans en azote* sont largement excédentaires. Cet excédent est lié principalement à l'aliment du bétail importé; une faible part de ces éléments s'échappe du bassin par l'eau, le reste étant stocké dans le sol ou se dissipant par volatilisation ou dénitrification.

- *les bilans en phosphore* le sont encore plus; le phosphore, stocké en surface, transporté par les matières en suspension (particules minérales, masse organique endogène ou exogène) où il est alternativement fixé et solubilisé, enrichit l'eau en excès. Le phosphore soluble est peu présent, de flux plus régulier et d'origine domestique.

- *les flux en pesticides* sont très variables en fonction des conditions hydro-météo, du type de pesticides (opposition du lindane lié au ruissellement, et de l'atrazine lié à l'écoulement dans le sol). Ces flux représentent de 5% (année humide) à 1 p.mille (année sèche) des apports.

- *des stratégies d'échantillonnage* du cours d'eau adaptées au type d'élément suivi (azote, phosphore, pesticides), ont été proposées et apparaissent indispensables pour avoir une estimation correcte des flux, particulièrement pour le phosphore et les pesticides.

- *l'augmentation interannuelle* des teneurs en nitrates et les *variations mensuelles* de concentration ont été reliées de façon significative à différentes variables rendant compte de l'intensification (nombre de porcs), du stock d'azote présent sur le bassin, et des conditions climatiques (pluie, température).

Résultats à l'échelle interne du bassin

Un modèle d'organisation spatiale de la couverture pédologique pour les sols limoneux du Massif Armoricaïn a été établi. Il s'agit d'un système pédologique, inscrit dans le paysage, constitué d'un nombre limité d'horizons dont les caractères et la topologie ont été définis. Ces horizons ont été regroupés en *blocs fonctionnels* sur la base de leurs propriétés hydrodynamiques. Cela permet un découpage de l'espace qui sera introduit dans la modélisation hydrologique distribuée et qui fournit des critères de transposition de cette modélisation.

Ce modèle a permis de porter un nouveau regard sur le problème de la *précision de la carte pédologique*. Une étude à trois niveaux de stratification croissants, unité cartographique, sous-groupe et groupe d'unités, a permis de quantifier l'erreur de prédiction de la carte pédologique à ces différents niveaux. On peut ainsi choisir le niveau de stratification de la couverture pédologique qui concilie une incertitude spatiale la plus faible possible à une description des propriétés morphologiques du sol suffisamment précise pour inférer ses propriétés physiques.

Le rôle prépondérant des zones saturées de bas-fond sur le contrôle hydrologique du bassin versant, dans les conditions climatiques du Massif Armoricaïn, a été

établi. La modélisation de l'extension de ces zones saturées est réalisée sur la base des indices morphométriques calculés à partir de modèles numériques de terrain (MNT). La relation avec l'extension des sols hydromorphes délimités par la carte pédologique est testée.

En *bioclimatologie*, une campagne de mesure du bilan d'énergie a permis de tester les possibilités d'application des différentes formules de calcul de l'ETR, dans les conditions régionales rarement étudiées. Une campagne aéroportée en IRT permet de tester un capteur récemment acquis et de contrôler spatialement les mesures locales.

La *sensibilité d'un modèle hydrologique distribué*, le Top model, *aux pas d'espace et de temps* a été déterminée. Ce modèle conceptuel est basé sur le concept de zone saturée contributive évoqué ci-dessus. Il apparaît qu'il existe un optimum de pas d'espace de 50 mètres pour un pas de temps de 2 heures et que la sensibilité du modèle est plus forte pour le pas de temps que pour le pas d'espace. Cet optimum, lié au climat tempéré océanique et aux caractéristiques topographiques des massifs schisteux anciens sur lesquels le test a été réalisé, définit la qualité des données requises pour une extrapolation du modèle dans le contexte armoricain.

En *hydrochimie et géochimie*, l'analyse de prélèvements in situ d'eau du sol à l'abri de l'oxygène de l'air et de la lumière a permis de déceler des dynamiques géochimiques fines faisant intervenir des formes métastables du soufre, ou encore des relations complexes entre formes du fer, silice et matière organique.

Vis à vis de la *dynamique de l'azote*: le potentiel de dénitrification des sols à Naizin est élevé, mais ce potentiel est en grande partie non réalisé par suite de courts-circuits hydrologiques; les teneurs en nitrates sont effectivement très faibles dès que l'eau est réellement en contact avec le sol dans les zones de bas-fond. La dénitrification est également effective dans les nappes, comme le montrent les forages profonds.

Conclusion

L'investissement lourd effectué ces dernières années sur le site du Coët Dan, tant en personnel qu'en équipement permet de valoriser les données déjà anciennes, de développer les fonctions de ce type de site : observation à long terme, études de processus, élaboration et validation de modèles, ainsi que des fonctions de diffusions de connaissance. De nouveaux programmes se préparent actuellement sur différentes problématiques : études des changements globaux, caractérisation de l'érosion à différentes échelles de temps et d'espace, dynamique des pesticides. Notons enfin que les résultats de ce bassin de référence sont utilisés actuellement dans d'autres recherches sur d'autres bassins, à caractère plus finalisées : pollution littorale, aménagement de bassins en vue du contrôle de la pollution, contrôle des crues, à la demande et en relation avec divers partenaires : organismes de recherche tel l'IFREMER, collectivités territoriales, structures de développement agricole...

Bibliographie partielle

BRUNEAU P., GASCUEL-ODOUX C., ROBIN P., MEROT PH., BEVEN K., The sensitivity to space and time resolution using digital elevation model. (*accepté dans Hydrol. Processes*)

CALVET R. ET WALTER C. 1993 - Variabilité spatiale des fonctions de transfert du sol et modélisation du devenir des pesticides dans le sol. Convention de formation par la recherche 90 132, INAPG, ENSA Rennes, Rapport final, 61 p.

CANN et al. 1993 - BRETAI :16 p. rapport final de contrat MRT.

CANN et al., 1993 Suivi de la qualité des eaux. Etude menée sur le BVRE du Coët Dan. Rapport du CEMAGREF Déchets solides de Rennes. 162 p. + annexes.

CANN C., VILLEBONNET C., COMLAN P., MAITRE V., NORMAND M., LOUMAGNE C., ANSART P., MEROT PH., CURMI P., BRUNEAU P., GASCUEL-ODOUX, P. ROBIN, CRAVE A., DURAND P., WALTER C., COURAULT D., LANGEVIN C., HRKAL Z., LEBRET P., SINAN M., STEEN HOUDT M., 1993 - Rapport final BRETAI, 16p. Ministère de la Recherche.

CURMI, P. TROLARD, F. & SOULIER, A. 000. Forms of iron in hydromorphic environment. Morphology and characterization by selective dissolution. In : A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys (Editors). *Proceedings of 9th International Working Meeting on Soil Micromorphology. Developments in Soil Science, 000. Elsevier, Amsterdam, pp. 000 - 000.*

DURAND, P. et GASCUEL-ODOUX, C., 1993 - Problèmes méthodologiques liés à la transposition ou à l'extrapolation des résultats d'études de B.V.R.E.. Communication à la journée d'étude "intérêt des B.V.R.E. pour concevoir une politique de maîtrise des rejets agricoles et de gestion de l'eau", G.I.P. Hydrosystèmes/CUB, Brest, oct. 1993.

GASCUEL C. ROBIN P., WALTER C. 1993 Quelle échelle est pertinente pour définir les paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif. Programme environnement, M.M.T, CNRS. 16 p.

LOUHALA S., NORMAND M., LOUMAGNE C., CHKIR N., VIDAL A., CANN C., VIDAL MADJAR D., OTTLE C., OLIVIER P., MEROT P., CRAVES A., COURAULT D. 1993 - Evaluation du bilan hydrique de petits bassins hydrologiques agricoles en utilisant des techniques de télédétection., *Colloque CNES-ESA, Paris, 10-13 Mai 93 Les applications de SPOT et ERS.*

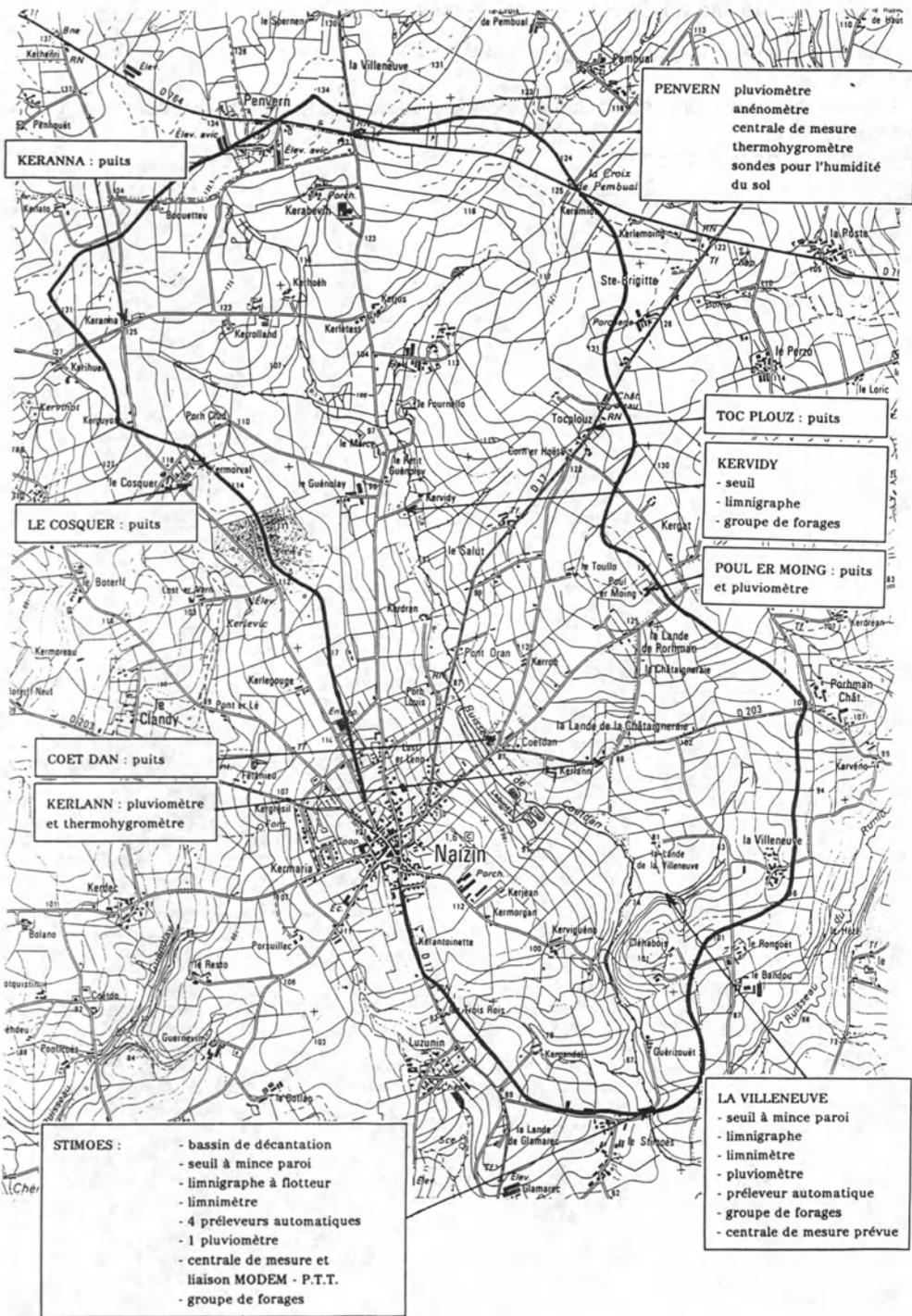
MEROT PH., CRAVE A., GASCUEL-ODOUX C., LOUHALA S., 1994- Effect of saturated areas on backscattering coefficient of the ERS1 SAR : first results. *Water Res. Res. sous presse*

TROLARD F., SOULIER A., CURMI P., -1993 Les formes du fer en milieu hydromorphe acide : une approche compartimentale par dissolution selective. *CR acad. Sci., Paris, t. 316, serie II, 1463-1468*

WALTER C., M. GOURRU, J.M. NICOLAS, 1993 - Carte pédologique de la partie amont du bassin-versant de Naizin à l'échelle du 1/10.000.

Depuis 1992, le site du Coët Dan a été le support de :

- 14 mémoires de fin d'études (DEA, DAA...),
- 8 thèses,
- 31 articles (la plupart dans des revues internationales) ou communications à des congrès,
- 6 rapports de fin de contrats.



Les bassins versants expérimentaux de Guyane Française (ECEREX)

Jean-Marie FRITSCH
ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

Ce document a été rédigé à partir de contributions de :
Bariac (1994 - contribution personnelle), Fritsch (1992), Fritsch (1994),
Fritsch et Sarrailh (1986), et Sarrailh (1990)

Première phase : ECEREX programme d'expérimentation pour le développement

Historique et déroulement du programme

La volonté d'accélérer le processus de développement de la Guyane Française débouche en 1975 sur l'initiative de grands projets papetiers. Conscient de l'impact environnemental de tels projets, les pouvoirs publics ont demandé à la recherche de mettre en place un programme d'étude et un dispositif d'observation près de Sinnamary en zone côtière centrale.

Ce programme a été financé par la DGRST qui a passé plusieurs contrats au cours de la période 1977-1979 avec les organismes de recherche suivants :

- l'ORSTOM : l'Institut Français de Recherche pour le Développement en Coopération
- le CTFT : Centre Technique Forestier Tropical, département du CIRAD, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- l'INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
- le Muséum d'Histoire Naturelle de Paris
- l'URA 689 du CNRS.

L'intitulé complet du programme était " Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais ", plus connu par son acronyme ECEREX (ECologie, ERosion, EXpérimentation).

Au terme de ces contrats incitatifs (1981), l'ORSTOM et le CTFT ont poursuivi seuls leurs recherches sur fonds propres. Plusieurs financements complémentaires (CORDET, contrat de programme MRT) ont permis de réaliser des études spécifiques portant généralement sur l'évolution des aménagements. Les charges constantes de maintenance du dispositif supportées par le CTFT ont conduit cet organisme à solliciter l'appui de la Région et des diverses collectivités locales. Les moyens dégagés à ce titre (FIDOM, Chantiers de développement) ont permis d'assurer l'entretien d'une partie des traitements agronomiques et sylvicoles jusqu'au début

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

de la décennie 90. Les bassins versants ECEREX ont également bénéficié des "crédits de jouvence" mis en place par le CST-BVRE pour le renouvellement de certains équipements.

ECEREX a bénéficié du label MAB 1 de l'UNESCO, (thème " *effets écologiques du développement des activités humaines sur les écosystèmes forestiers tropicaux et subtropicaux* ")

Méthodologie

Les activités requises pour la réalisation des objectifs ont été menées à deux niveaux :

- des études "diffuses" qui étaient réparties sur l'ensemble de la zone forestière du projet (inventaires floristiques, études d'anatomie et de physiologie de la forêt et études des relations plantes-animaux).
- des études "captives", nécessairement conduites sur des systèmes fermés - bassins versants ou parcelles expérimentales sur lesquels ont été reproduits les traitements prévus par le projet papetier, afin d'observer et de mesurer les impacts provoqués par le déboisement et les aménagements.

Ces bassins versants ont été choisis de concert par les hydrologues et les pédologues, de manière à intégrer la très grande variabilité du milieu naturel, que laissait prévoir une prospection pédologique fondée sur la dynamique de l'eau sur les versants. Le nombre de 10 bassins finalement retenu semblait adéquat, tant pour la connaissance exhaustive du milieu naturel, que pour tester pendant la phase d'expérimentation la plupart des scénarios d'aménagements prévus (figure 1).

Les observations ont débuté sur les 2 premiers bassins en janvier 1977 et les 2 derniers bassins ont été mis en service en décembre 1978. Le protocole prévoyait l'étude de chaque bassin versant sous forêt naturelle pendant au moins 2 saisons pluvieuses, avant de procéder au déboisement et à la mise en place du traitement. Le terme de la phase intensive de suivi des bassins versants était fixé à la fin de l'année 1984. Par la suite, un suivi léger et limité à un échantillon de bassins versants a été assuré jusqu'à 1990.

Après cette première phase de recherche essentiellement finalisée, ECEREX a été utilisé comme site atelier pour des problématiques de recherche de base, sur les mécanismes du cycle de l'eau et les processus de formation de l'écoulement (cf. partie 2)

Résultats acquis dans le domaine de l'hydrologie

Le Comité Scientifique et Technique des BVRE français, à la demande duquel a été préparé cette note, étant essentiellement concerné par les résultats acquis en hydrologie, on évoquera ici sommairement quelques résultats marquants dans ce domaine.

La variabilité de l'écoulement sous couvert forestier a pu être évaluée pendant une période initiale de deux années (1977-79) correspondant aux conditions originelles de végétation. Dans des conditions d'apports pluviométriques pratiquement identiques compte tenu de la proximité des sites, les écoulements de crues ont variés dans une proportion de 1 à 5 sur l'ensemble du dispositif, c'est à dire que ces écoulements ont représentés de 7,3% à 34,4% de la pluviométrie moyenne interannuelle sur la période. Cet écart considérable s'explique par la combinaison des descripteurs pédologiques.

Les traitements

Deux bassins versants (B et F) ont été sélectionnés pour assurer la fonction de témoin. Les traitements préliminaires qui ont été appliqués (exploitation forestière suivie d'un défrichement agricole) sont considérés comme caractéristiques des procédures d'exploitation forestière dans cette région. Les traitements suivants ont ensuite été appliqués sur les bassins expérimentaux.

Recru forestier naturel

- Recru naturel, après exploitation forestière simple sur le bassin E.
- Recru naturel, après exploitation forestière et défrichement agricole sur le bassin D.

Plantation d'espèces forestières à croissance rapide

- Pins (*Pinus caraiïbea*, var. *Hondurensis*) sur le bassin G.
- Eucalyptus (*E. grandifolia*, origine Florès) sur le bassin H.

Verger d'agrumes

Le bassin C présentant les conditions agro-pédologiques les plus favorables (sols profonds et bien drainés) a été voué à un essai de verger de pomelos.

Plantations fourragères

Le bassin A a été transformé en une prairie pâturée de *Digitaria swazilandensis*

Agriculture itinérante traditionnelle sur brûlis

Hydrologie des bassins en sol nu

Six des huit bassins se sont trouvés en situation de sol nu au début de la période d'expérimentation. Cette situation a constitué une opportunité pour comparer les réponses hydrologiques de bassins totalement défrichés et que l'on savait être à l'origine très différents au plan hydrologique.

L'année du défrichement, les écoulements ont augmenté de 244mm à 762 mm selon le bassin considéré. Mais ces gains d'écoulement ne sont pas comparables entre eux, car l'expérimentation n'a pas eu lieu la même année sur tous les bassins et la variabilité interannuelle vient donc masquer les effets du traitement. Par ailleurs, il faut attendre un certain temps pour voir apparaître une réponse stationnaire entre bassins témoins et bassin traités. Les résultats de l'analyse des données portant sur cette *période de réponse stabilisée* font l'objet du tableau 1.

Tableau 1 : Augmentation de l'écoulement de crue pour les bassins en sol nu pendant la période de *réponse stabilisée*

BASSIN VERSANT	C	D	A	J	G	H
Accroissement des écoulements après défrichement (en % de l'écoulement sous forêt)	199 %	149 %	114 %	97%	87%	66%

Evolution des écoulements pendant la phase de traitement

Les effets des traitements sur les écoulements de crue pendant les années qui ont suivi le déboisement sont présentés sur le tableau 2. La représentation graphique de ces chiffres fait l'objet de la figure 2. La colonne de gauche présente les traitements de type forestier et celle de droite les aménagements à finalité agricole ou pastorale.

Tableau 2 : Augmentation des écoulements de crue pendant les traitements, exprimée en % de l'écoulement sous forêt.

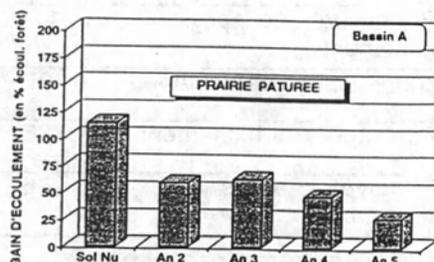
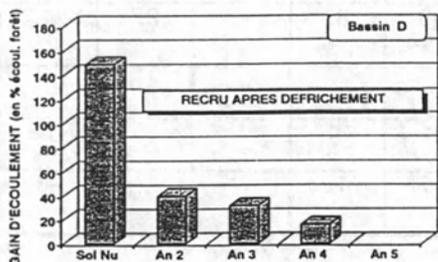
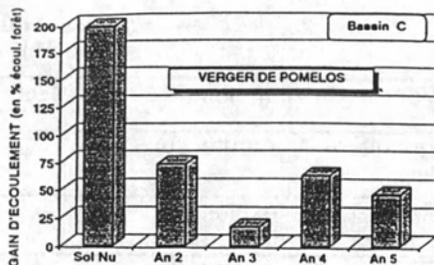
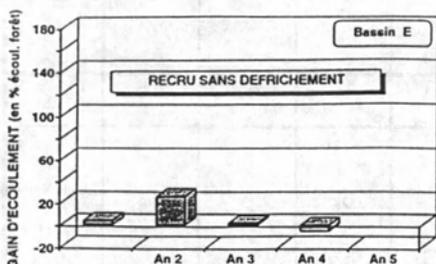
Bassin	Année 1 Sol nu (*)	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6
C Verger de pomelos	199	73	17	63	46	
I Agriculture itinérante sur brûlis		23	30			
E Recrû après exploitation forestière sans défrichement		4	26	2	-6	
D Recrû après exploitation forestière avec défrichement	149	40	32	16		
A Prairie pâturée après défrichement	114	59	63	47	27	
J Prairie après défrichement	97					
G Pins après défrichement	87	62	33			-12
H Eucalyptus après défrichement	66	47	12			-8

(*) : période de réponse stabilisée

D'autres résultats ont été mis en évidence concernant les effets des traitements sur l'érosion (Fritsch & Sarrailh, 1986), sur l'évolution des gains d'écoulement à l'échelle décadaire et sur les débits de pointe (Fritsch, 1992).

Animation, publications

- Les participants au programme communiquaient leurs premiers résultats au travers d'une publication grise, reproduite par procédé ronéo au centre ORSTOM de Cayenne et tirée à 200 exemplaires, le " *Bulletin de liaison du groupe de travail ECEREX* ". Dix numéros ont été réalisés entre 1977 et 1983. On y trouve les versions originelles de la plupart des publications éditées ensuite par les journaux scientifiques.
- Un séminaire scientifique s'est tenu en mars 1983 (" *Les Journées Scientifiques de Cayenne* "), au cours duquel les participants ont présenté l'ensemble des résultats acquis pendant la période 1977-1982, qui correspondait à celle de la manne budgétaire des crédits DGRST.
- Une réunion scientifique de clôture a eu lieu à Kourou fin 1989.
- Une publications de synthèse a été éditée en 1990 dans une collection de l'INRA, " *Mise en Valeur de l'Ecosystème Forestier Guyanais - Opération ECEREX* " (J.M. Sarrailh éditeur scientifique). Par suite de délais de réalisation extrêmement longs, cet ouvrage reprend essentiellement des contributions faites aux Journées de Cayenne de 1983, légèrement amendées.



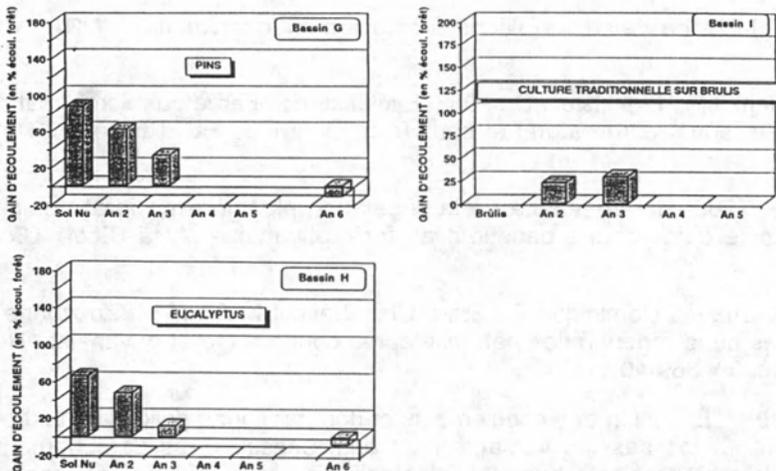


Figure 2 : Evolution des gains d'écoulement annuels pour différents aménagements

Colonne de gauche : traitements de type forestier (recru et plantations sylvoles)

Colonne de droite : traitements de type agricole (prairie, verger, brûlis traditionnel)

(Les échelles verticales ne sont pas identiques sur tous les graphiques)

Un grand nombre de publications de tous types ont été produites durant cette première phase du programme ECEREX. La liste fournie ci-après est une compilation non exhaustive des références des articles publiés dans l'ouvrage cité.

Bibliographie

Betsch J.M., Betsch-Pinot M.C., Mikhalevitch Y., 1981. Évolution des peuplements de microarthropodes du sol en fonction des traitements subis par une forêt dense humide en Guyane française. Acta Oecol., Oecol. Gen., 2, 245-263.

Boulet R., 1978. Existence de système à forte différenciation latérale en milieu ferrallitique guyanais : un nouvel exemple de couvertures pédologiques en déséquilibre. Sci. Sol., 2, 75-82.

Boulet R., Brugière J.M., Humbel F.X., 1979. Relation entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane française septentrionale. Conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. Sci. Sol, 1, 3-18.

Charles Dominique P., Atramentowicz M., Charles Dominique M., Gérard H., Hladick A., Hladick C.M., Prévost M.F., 1981. Les mammifères frugivores arboricoles nocturnes d'une forêt guyanaise : inter-relations plantes-animaux. Rev. Écol., Terre Vie, 35, 341-435.

Ducrey M., Guehl J.M., 1990. Fonctionnement hydrique de l'écosystème forestier. Flux et bilans au niveau du couvert et dans le sol. Influences du défrichement. In

Sarrailh Ed., " Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais ", INRA, 103-136.

Ducrey M., Guehl J.M., Finkelstein D., 1983. Évolution comparée du microclimat sur une coupe rase, sous recrû naturel et sous forêt. Journées ECEREX, ORSTOM, 327-340.

Foresta H. de, 1983. Hétérogénéité de la végétation pionnière en forêt tropicale humide : exemple d'une coupe papetière en forêt guyanaise. Acta Œcol., Œcol. Appl., 4, 221-235.

Foresta H. de, Charles Dominique P., Érard Ch., Prévost M.F., 1984. Zoochorie et premiers stades de la régénération naturelle après coupe en forêt guyanaise. Rev. Œcol., Terre Vie, 39, 369-400.

Fritsch J.M., 1983. Évolution des écoulements et des transports solides à l'exutoire et de l'érosion sur les bassins versants d'un petit bassin après défrichement mécanisé de la forêt tropicale humide. In "Hydrology of humid tropical region" (Symp. Hambourg, août 1983). Publ. AISH, 140, 197-214.

Fritsch J.M., 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Ed. Orstom, col. " Etudes et Thèses ", 352 p.

Fritsch J.M. 1993. Hydrological effects of deforestation and alternative land uses : a french experiment in the amazonian rain forest. In " Environment and Forestry Management ", Asian Productivity Organization, Tokyo, 1993, pp. 74-105

Fritsch J.M., 1994. The hydrological effects of clearing tropical rainforest and of the implementation of alternative land uses. Proceedings of IAHS Scientific Assembly, Yokohama, 13-15 July 1994, IAHS Publication No.216, pp.53-66.

Fritsch J.M., Sarrailh J.M., 1986. Les transports solides dans l'écosystème forestier tropical humide guyanais : effet du défrichement et de l'installation de pâturage. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XXII, 2, 209-222.

Guehl J.M., 1984 a. Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. Influence de la couverture pédologique. Ann. Sci. Forest., 41 (2), 195-236.

Kilbertus G., Rohr R., Schwartz R., 1982. Les pluviollessivats de la forêt tropicale humide (Guyane française). Variations saisonnières qualitatives et quantitatives des éléments figurés. Bull. Œcol., 13, 283-292.

Lescure J.P., Boulet R., 1985. Relationships between Soil and Vegetation in a Tropical Forest in French Guiana. Biotropica, 17 (2), 155-164.

Lescure J.P., Puig H., Riéra B., Leclerc D., Beekman A., Beneteau A., 1983. La phytomasse épigée d'une forêt dense en Guyane française. Acta Œcol., Œcol. Gen., 4, 237-251.

Maury-Lechon G., 1982 a. Régénération forestière sur 25 ha de coupe papetière en forêt dense humide de Guyane française. C.R. Acad. Sci. Paris, 294, III, 975-978.

Prévost M.F., Puig H., 1981. Accroissement diamétral des arbres en Guyane : observations sur quelques arbres de forêt primaire et de forêt secondaire. Bull. Mus. Hist. nat., Paris, sect. B, Adansonia, 2, 147-171.

Prévost M.F., 1983. Les fruits et les graines des espèces végétales pionnières de Guyane française. Rev. Écol., Terre Vie, 38, 121-141.

Puig H., 1979. Production de litière en forêt guyanaise : résultats préliminaires. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, 115, 338-346.

Riéra B., 1985. Importance des buttes de déracinement dans la régénération forestière en Guyane française. Rev. Écol., Terre Vie, 40, 321-329.

Roche M.A., 1982. Évapotranspiration réelle de la forêt amazonienne en Guyane. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 1, 37-44.

Roche M.A., 1982. Comportements hydrologiques comparés et érosion de l'écosystème forestier tropical humide à ECEREX en Guyane. 56 p. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 2, 81-114.

Sabatier D., 1985. Saisonnalité et déterminisme du pic de fructification en forêt guyanaise. Rev. Écol., Terre Vie, 40, 289-320.

Sarrailh J.M., 1980. L'écosystème forestier guyanais. Étude écologique de son évolution sous l'effet des transformations en vue de sa mise en valeur. Bois Forêts Trop., 189, 31-36.

Sarrailh J.M., 1984. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais. Opération ECEREX : résumé des premiers résultats. Bois Forêts Trop., 206, 13-32.

Sarrailh J.M., 1985. Les parcelles élémentaires d'étude du ruissellement et de l'érosion. Programme ECEREX. Synthèse après quatre années d'étude. C.R. Journées ECEREX, mars 1983, ORSTOM Guyane Ed.

Sarrailh J.M., 1990. Editeur de "Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais", INRA, CTFT, 273 p.

Deuxième phase : ECEREX site-atelier pour la recherche de base

Montage institutionnel

En 1992 et 1993, suite à un appel d'offre du programme PEGI, thème : "*Bilans hydriques et transferts dans le cycle forestation-déforestation*", une proposition de recherche émanant du Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, Université Pierre et Marie Curie, de l'INRA et de l'URA 196 du CNRS, intitulé "*Bilans hydriques, énergétiques, chimiques et isotopiques à l'échelle parcellaire et à l'échelle du bassin versant : le cas des bassins ECEREX, Guyane*" a été retenue. Thierry Bariac (CNRS) est le responsable scientifique du projet, qui compte avec les participations suivantes :

Groupe "Hydrologie" :

- Ecole des Mines de Paris, P. Hubert, H. Molicova
- UNESCO (Division Hydrologique) M. Bonell, J. Balek

Groupe "Sol" :

- ORSTOM, M. Grimaldi (ORSTOM -Versailles), M. Sarrazin, J.C. Bron, R. Bron.
- INRA - Département de Science du Sol - Montfavet : L. Bruckler, P. Bertuzzi, J.C. Gaudu, J. Horoyan, B. Bes

Groupe "Plante" et "Atmosphère" :

- INRA - Département de Bioclimatologie :
- Villenave-d'Ornon : Y. Brunet, J.M. Bonnefond
- Antilles-Guyane - Pointe- à-Pitre : R. Tournebize
- INRA - Département de Recherches Forestières :
- Antilles-Guyane - Kourou : T. Barigah
- Champenoux : A. Granier
- CTFT - CIRAD - Kourou : J.M. Sarrailh

Groupe "Géochimie de l'eau" :

- INRA - Département de Science du Sol - Versailles : C. Grimaldi
- URA 196 CNRS, Géochimie et Métallogénie, J. Boulègue, F. Jung
- DRED, Biogéochimie Isotopique, T. Bariac, A. Millet, J. Gonzalez-Dunia

Objectifs et méthodologie

De façon à appréhender ces deux approches complémentaires, une étroite collaboration entre différents organismes (ORSTOM, CTFT, CNRS, INRA, UPCM) devait permettre de réunir différents chercheurs spécialisés dans l'étude des bilans hydriques, énergétiques, chimiques et isotopiques à différentes échelles.

Deux bassins versants ont été retenus comme objet d'étude dans le cadre du programme PEGI : le bassin B (témoin en forêt naturelle) et le bassin A (prairie pâturée), avec pour objectifs spécifiques :

- une mise au point méthodologique de la décomposition géochimique de l'hydrogramme de crue,
- l'étude de l'influence de la déforestation sur les bilans géochimiques.

Des campagnes de terrain ont été réalisées du 12 au 23 janvier 1992, du 22 mai au 2 juin 1992, du 24 septembre au 14 octobre 1992 et du 7 au 25 mai 1993.

Résumé des conclusions

Les travaux menés au cours de cette première expérimentation ont montré que les teneurs en O^{18} et en H^2 des pluies évoluaient fortement dans le temps, mais peu dans l'espace, en raison de la faible superficie des bassins versants étudiés. Cette variabilité temporelle impose de ne pas utiliser une teneur isotopique moyenne lors du calcul de la contribution du pôle "eau nouvelle" à l'exutoire du bassin versant.

La présence d'un couvert forestier introduit un effet chaotique dans la structure régulière observée dans les précipitations du bassin planté en graminées.

L'étude des crues met en évidence le comportement différent des deux bassins :

- un volume d'eau écoulé à l'exutoire et un pic de crue plus important sur le bassin planté en graminées. Le rapport du volume écoulé aux précipitations est supérieur (41% pour le bassin en graminées contre 28% pour le bassin en forêt primaire).
- Au pic de la crue, la participation de l'eau issue de la zone intermédiaire, est nettement plus forte sur le bassin en graminées que sur le bassin en forêt primaire.

Ces différences peuvent s'expliquer par l'action de la végétation. En effet, le défrichement augmente le stock d'eau dans le sol et le volume des précipitations reçues sur le bassin s'accroît par la suppression des pertes dues à l'interception du feuillage.

Bibliographie

Bariac, T., Millet, A., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi C., Grimaldi M., Sarrazin, M., Hubert, P., Molicova, H., Bruckler, L., Bertuzzi P., Gaudu, J. C., Horoyan, J., Bes B., Boulègue, J., Jung, F., Bonell, M., Balek, J., Brunet, Y., Tournebize, R., et Granier, A. (1994).- Décomposition géochimique des hydrogrammes de crue : les bassins versants de la Piste Saint-Elie, Guyane. A paraître dans "*Colloques et Séminaires de l'ORSTOM*".

Bariac, T. (1993).- Hydrogrammes de crue et Géochimie. *Colloque "Grands Bassins Fluviaux"*, organisé par le CNRS, l'INSU et l'ORSTOM, Paris, 22-24 novembre 1993.

Bariac, T., Millet, A., Gonzalez-Dunia, J., Grimaldi C., Grimaldi M., Sarrazin, M., Hubert, P., Molicova, H., Bruckler, L., Bertuzzi P., Gaudu, J. C., Horoyan, J., Bes, B., Boulègue, J., Jung, F., Brunet, Y. et Bonnefond, J.J. (1993).- Hydrogeochemical balances of small forested and unforested amazonian catchments. Colloque "*European Geophysical Society*", XVIII General Assembly, Wiesbaden, 3-7 mai 1993.

Bariac, T. (1994).- Méthodologie géochimique et décomposition des hydrogrammes de crue : la variabilité spatio-temporelle des signatures isotopiques. Séminaire "*Les bassins versants de l'INRA*" organisé par l'INRA, Thonon-les-Bains, 8-9 février 1994.

Bariac, T., Millet, A., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi C., Grimaldi M., Sarrazin, M., Hubert, P., Molicova, H., Bruckler, L., Bertuzzi P., Gaudu, J. C., Horoyan, J., Bes, B., Boulègue, J., Jung, F., Bonell, M., Balek, J., Brunet, Y., Tournebize, R., et Granier, A. (1994). Décomposition géochimique des hydrogrammes de crue : les bassins versants de la Piste Saint-Elie, Guyane. Colloque "*European Geophysical Society*", XVIII General Assembly, Grenoble, 25-29 avril 1994 (présentation d'un poster).

Bariac, T. (1994).- Décomposition géochimique des hydrogrammes de crue : les bassins versants de la Piste Saint-Elie (Guyane). *Colloque "15 ième réunion des Sciences de la Terre"*, Nancy, 26-28 avril 1994.

Millet A. - Bilans hydriques et isotopiques à l'échelle du bassin versant : le cas des crues des bassins versants guyanais. Bourse MESR. Soutenance prévue décembre 1995.

Millet A. (1992) - L'hydrogramme de crue et le bilan isotopique (^{18}O) de l'eau : le cas des bassins versants "ECEREX" (Piste de Saint-Elie, Sinnamary, Guyane). DEA de Géochimie Fondamentale et Appliquée, Université de Paris VII, 24 pp.

Ladouche B. (1993) - Décomposition isotopique (^{18}O , ^2H) de l'hydrogramme de crue le cas des bassins versants "ECEREX" (Piste de Saint-Elie, Sinnamary, Guyane). DEA d'Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie, 30 pp.

Conclusions et recommandations : pour un site atelier en forêt tropicale française

Le très important dispositif d'observation hydrologique mis en place en Guyane française en 1977 répondait à des objectifs finalisés d'accompagnement du *Plan Vert*. Ce Plan ne s'est jamais concrétisé dans les faits, et les manipulations environnementales faites à ECEREX n'ont jamais été réalisées en vraie grandeur ... en Guyane française. Le programme de recherche associé à ce dispositif aura toutefois permis d'accroître de manière considérable la connaissance de l'écosystème forestier amazonien dans ses différents compartiments, biosphère, hydrosphère et géosphère, et de quantifier les impacts d'un certain nombre de traitements.

La pluridisciplinarité effective des équipes travaillant sur ce terrain, principalement celles dont les membres résidaient en permanence en Guyane mérite d'être soulignée. Sans elle un grand nombre d'acquis n'auraient pas pu être consolidés, principalement en ce qui concerne les interactions entre sols et eaux.

Toutefois, la taille et le nombre des bassins font d'ECEREX un dispositif bien spécifique, avec des conditions d'exploitation et de maintenance difficiles et coûteuses, dont la totale pérennité, éminemment souhaitable, était difficilement réalisable dans une perspective routinière des organismes de recherche concernés présents en Guyane (ORSTOM, CTFT). Cette pérennité n'a d'ailleurs pas pu être assurée pour la totalité des installations après 1990, mais 2 ou 3 bassins versants ont été réhabilités pour des périodes limitées en 1992 et 1993 dans le cadre des programmes PEGI.

De dispositif pérenne, qui n'avait son sens qu'à partir du moment où un suivi opérationnel permanent était assuré, ECEREX préfigure aujourd'hui une zone-atelier, destinée à être utilisée au coup-par-coup par des équipes fortes, explorant des problématiques susceptibles d'être résolues par des opérations "coup-de-poing".

La nécessité d'une zone atelier de recherche sur l'environnement en forêt équatoriale pour la recherche française, mais aussi européenne et américaine, ne fait aucun doute. A bien des égards, la Guyane française présente des conditions très favorables à un tel projet. On doit constater que ces conditions ne cessent de s'améliorer (progrès des télécommunications, amélioration transports aériens, en

fréquence et en coûts, en regard d'une péjoration des conditions dans beaucoup de pays équatoriaux...)

La question qui est aujourd'hui posée au repreneur du patrimoine du CST-BVRE, en l'occurrence le GIP *Hydrosystèmes*, n'est pas de savoir s'il est pertinent de se donner un site de recherche en Guyane française, mais bien :

Faut-il pérenniser ECEREX ou faut-il choisir un autre site en Guyane française ? ”.

Ce n'est qu'après avoir fait l'état des lieux et avoir défini les problématiques les plus structurantes du futur site atelier que l'on pourra répondre à cette question.

Système karstique du Baget

Alain MANGIN et Dominique D'HULST

Laboratoire Souterrain du C. N. R. S.
Moullis 09200 SAINT GIRONS
Tel 61 66 31 26 - Fax : 61 96 08 51

Situation et caractéristiques physiques du système.

Le système karstique du Baget appartient au bassin de la Garonne, à 100 km environ au sud ouest de Toulouse, dans la partie occidentale du département de l'Ariège. Il est situé aux abords même des Pyrénées, à 10 km à l'ouest de la petite ville de Saint Girons. Le Baget est un affluent du Lez, lui-même affluent du Salat à Saint Girons, ce dernier se jetant 30 km au nord dans la Garonne à Boussens.

La vallée du Baget débouche dans celle du Lez, à 4 km à l'ouest du Laboratoire souterrain de Moullis.

Le bassin d'alimentation du système du Baget s'étend pratiquement d'ouest en est sur 10 km de long et 1 km de large. Son étendue est de 13,25 km².

Il est situé dans la zone métamorphique qui est limitée par deux failles : au sud, la faille nord-pyrénéenne, au nord, la faille d'Alas. Sa structure est relativement simple : on peut schématiquement considérer les calcaires mésozoïques comme étant en structure monoclinale ; ils butent sur la faille d'Alas au nord, au contact de laquelle réapparaissent le Paléozoïque et le Trias, et disparaissent, au sud, sous les formations péliques argilo-gréseuses de l'Albo-Cénomaniens. Les calcaires sont très homogènes, cristallins et sans structure apparente par suite du métamorphisme. Leur porosité est en moyenne de 2 %.

Les terrains non calcaires, qui représentent près de 33 % de la surface totale du bassin sont le siège d'un ruissellement de surface, réparti en deux secteurs : dans la partie sud-est, sur les pélites argilo-gréseuses (ruisseaux de Cayssau et de Lasquert) ; dans la partie nord-centrale, sur les conglomérats d'âge Crétacé supérieur (vallée de Lachein).

La vallée de Lachein crée un sillon assez profond (près de 300 mètres) qui suit l'axe longitudinal du bassin. Les reliefs les plus importants sont situés dans la partie occidentale (Tuc de Graué 1417 m, Tuc aux Pentières 1321 m), alors que l'exutoire principal pérenne, Las Hountas, à l'extrémité orientale, est à une altitude de 498 m. L'altitude moyenne du bassin est de 923 m, l'altitude médiane de 930 m.

Outre l'exutoire principal de Las Hountas, il existe trois trop-pleins qui, d'aval vers l'amont, sont : le Moulo de Jaur, la Hillère, P15, respectivement à 600, 800 et 900 m de Las Hountas.

Le ruisseau de Lachein rencontre les calcaires à 4,5 km en amont de Las Houtas : en fin d'étiage, ses eaux s'enfouissent très rapidement au contact des calcaires ; en moyennes eaux, elles parcourent 2,5 km sur les calcaires avant que leur disparition sous terre soit totale ; en hautes eaux, elles progressent encore plus vers l'aval et atteignent la perte de la Peyrère. En très hautes eaux, le ruissellement de surface est continu jusqu'à Las Houtas la perte de la Peyrère fonctionne alors en émergence.

Les ruisseaux de Cayssau et de Lasquert, qui habituellement se perdent au contact des calcaires, constituent un ruissellement continu dès que le système est en crue.

Deux gouffres, Sainte-Catherine au nord, La Peyrère au sud, ainsi qu'une fissure (HR25) située à la Hillère, atteignent le karst noyé.

Equipements.

Hydrométrie.

L'équipement hydrométrique a été établi sur la base de 6 stations limnigraphiques, 7 stations limnimétriques, 2 capteurs de pression pour la piézométrie, 1 station de contrôle de l'infiltration.

1° La station B1 (avril 1968) rend compte de la totalité des débits du système.

2° La station B3 (avril 1968) contrôle l'ensemble des débits de trop-pleins.

Par différence entre B1 et B3, on obtient les débits du seul exutoire de Las Houtas.

3° La station du Moulo de Jaur (janvier 1970) permet de connaître les débits de ce trop-plein (arrêtée en 1984).

4° Le secteur de La Hillère est équipé de 4 stations limnimétriques qui permettent d'évaluer le débit de ce trop-plein. Il s'y ajoute un limnigraphe (septembre 1970), qui au niveau de la fissure (HR25), permet de suivre la piézométrie en ce point.

5° La perte de la Peyrère est équipée d'une échelle limnimétrique.

6° Plus en amont (P3) une station limnigraphique (octobre 1986) fournit des renseignements sur le ruissellement atteignant la perte de La Peyrère (arrêtée en 1990).

7° La piézométrie du karst noyé au niveau des gouffres de Sainte-Catherine et de La Peyrère a été surveillée par des capteurs de pression (octobre 1975 à décembre 1978).

8° Un dispositif d'enregistrement de l'infiltration dans le gouffre de Sainte-Catherine a été mis en place de mars 1976 à décembre 1978.

9° La source d'un aquifère épikarstique (source de Gers) a également été surveillée de septembre 1976 à décembre 1978.

Climatologie.

Trois stations climatologiques avec abris, pluviographe, thermographe complètent l'information fournie par la station synoptique du réseau de la météorologie nationale d'Antichan, située à une dizaine de kilomètres au NE, à l'altitude de 411 m ; ce sont les stations de Balagué à 660 m d'altitude, celle de Lachein à 830 m d'altitude (arrêtée en 1983), sur le bassin même du Baget, et celle de Maria Rouch à 900 m d'altitude et à l'ouest du Baget (arrêtée en 1986). A cette infrastructure s'ajoutent 10 pluviomètres et pluviographes répartis sur une trentaine de kilomètres carrés.

Mesures physico-chimiques.

La température et la résistivité de l'eau ont été enregistrées de façon continue à Las Hountas jusqu'en 1990. Les trop-pleins du Moulo de Jaur et de La Hillère, le piézomètre de La Peyrière et la station d'étude de l'infiltration équipés pour de tels enregistrements ne font l'objet que d'études ponctuelles réduites dans le temps.

Un échantillonnage périodique à des fins d'analyse est réalisé aux différents points d'eau du système (exutoires, regards sur le karst noyé, infiltration).

Caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

Les valeurs indiquées ci-dessus correspondent à une moyenne établie sur 25 ans d'observation.

Les précipitations représentatives de la fonction d'entrée du système sont de l'ordre de 1700 mm par an (variant de 1400 à 2300 mm). L'évapotranspiration est estimée à 540 mm environ.

Le débit moyen du Baget est de 0,480 m³/s ce qui représente une lame d'eau écoulee de l'ordre de 1140 mm.

68 % du volume total d'eau écoulee aux exutoires du système lors d'un cycle hydrologique proviennent de Las Hountas ; les trop-pleins du Moulo de Jaur et de La Hillère fournissent respectivement 14 à 13 %, celui de P15 étant négligeable. Le ruissellement de surface non absorbé par le karst correspond à près de 5 %.

Le trop-plein du Moulo de Jaur fonctionne en moyenne 110 jours par an, celui de La Hillère une cinquantaine de jours, celui de P15 une douzaine de jours.

Le débit maximal observé a été de 10,9 m³/s (4/10/92) ; il se décomposait de la façon suivante : 2,320 m³/s à Las Hountas, 0,854 m³/s au Moulo de Jaur, 3,620 m³/s à La Hillère et 1,765 m³/s pour le ruissellement de surface non absorbé par le karst.

Le débit minimal observé a été de 0,039 m³/s (31/08/89).

Les réserves de tarissement varient de 0,75 à 3,6 millions de m³. Du point de vue de la température les amplitudes observées à l'exutoire principal du système (Las Hountas) sont faibles, cette température oscille entre 9,3 °C et 10,8 °C avec une température moyenne de 9,8 °C. Notons que le karst noyé situé au sud, c'est-à-dire orienté au nord, a une température moyenne de 10 °C, le karst noyé situé au nord et donc en versant sud a une température moyenne de 11,5 °C.

La minéralisation de l'eau présente des fluctuations importantes au moment des crues ; à Las Hountas les valeurs extrêmes observées sont de 230 et 330 mg/l, avec les compositions suivantes exprimées en mg/l : 53,0 - 73,2 (Ca²⁺) ; 2,7 - 5,5 (Mg²⁺) ; 0,90 - 1,50 (Na⁺) ; 0,30 - 0,55 (K⁺) ; 165 - 208 (HC0⁻³) ; 7,0 - 40,5 (SO²⁻⁴) ; 1,20 - 2,25 (Cl⁻).

Les eaux du karst noyé ont généralement la même minéralisation, bien que celles situées au sud soient plus riches en sulfate. Le ruissellement de surface présente une minéralisation nettement plus faible.

D'un point de vue biologique, ce karst est assez riche en faune aquatique soit hypogée soit d'origine épigée mais transitant par le système. Par exemple, en ce qui concerne les harpacticides, on compte 8 espèces hypogées et 13 espèces épigées.

Statut, cout et financement

La mise en place du bassin expérimental du Baget a été réalisée à partir de 1968 dans le cadre des programmes de recherches en hydrogéologie karstique élaborés par le Laboratoire Souterrain. De ce fait, toute l'infrastructure et l'entretien ont été réalisés par le C. N. R. S. dans le cadre des crédits de recherche du Laboratoire Souterrain.

Le coût actualisé de l'ensemble de l'équipement est évalué à 0,5 MF et son entretien est estimé à 10 KF par an. N'interviennent pas dans ce coût toutes les analyses, dépouillements et traitement des données effectués au laboratoire. On peut compter qu'actuellement la maintenance et le traitement mobilisent 0,5 technicien.

Au cours de l'année 1991 une expérimentation a été réalisée sur le bassin, dans le goufre de la Peyrière, pour suivre les effets d'un pompage à gros débit (0,3 m³/s) sur une période de trois jours, opération qui a coûté 2,3 MF.

Programmes d'étude et synergie entre les équipes intervenantes

Le système karstique du Baget a été conçu et mis en place pour rendre compte de la structure et du fonctionnement des écoulements karstiques et il est, à ce titre, un bassin expérimental. Le deuxième objectif recherché consiste dans la mise au point des méthodes et des outils d'investigation pour l'étude des karsts.

L'hétérogénéité particulière des aquifères karstiques, avec une structure hiérarchisée des vides de l'amont vers l'aval a conduit à proposer des méthodes holistiques pour aborder son étude. C'est la raison pour laquelle un équipement a été réalisé pour suivre en fonction du temps les entrées (précipitations et ruissellement de surface) et les sorties (exutoire pérenne et exutoires temporaires de trop-plein). En complément, des investigations partielles ont été conduites sur la zone épikarstique (Gers) et sur l'infiltration (Sainte Catherine, Peyrère).

Cette démarche est fondamentalement pluridisciplinaire : hydrodynamique, hydrogéochimie, isotopique, hydrothermique et biologique.

C'est ainsi qu'ont participé aux recherches, outre le Laboratoire Souterrain du C. N. R. S. de Moulis, pour lequel le Baget constitue un important outil de travail, les Universités de Toulouse (en biologie), de Paris VI (isotopes), d'Orsay (isotopes), l'École des Mines de Madrid (lien avec la microstructurale et simulation).

En outre, le système expérimental du Baget a permis de mettre au point des méthodes particulières à partir d'actions ponctuelles : utilisation des techniques de traçage en milieu karstique (en relation avec le Centre d'Études Nucléaires de Grenoble) et l'exploitation de la zone noyée à partir du pompage à gros débit (en collaboration avec le B. R. G. M. et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne).

Quelques résultats

C'est à partir des données et des résultats acquis sur le Baget qu'a été proposée une représentation de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques sur la base de la notion de système, avec la zonation : zone épikarstique, infiltration rapide et retardée, drains et systèmes annexes au drainage. Le modèle conceptuel de l'organisation d'un karst, issu des travaux du Laboratoire Souterrain de Moulis, commence à se généraliser au niveau des équipes, tant françaises qu'étrangères (Espagne, Italie, Grèce, Suisse, Chine, USA...). Conjointement à la notion de système karstique, définie dans le domaine physique, la notion d'écosystème karstique, avec ses caractéristiques, ses limites, son fonctionnement et son évolution, a été également proposée par les biologistes, et tend elle aussi à l'heure actuelle à se généraliser.

Sur le plan des méthodes, l'approche est fondée sur la recherche opérationnelle, la réponse impulsionnelle (hydrogramme unitaire) permettant d'identifier correctement le type d'aquifère. Différentes techniques sont actuellement utilisables, en hydrodynamique : l'étude des débits et des pluies à partir des analyses corrélatoire et spectrale, de l'analyse des courbes de récession, de l'analyse descriptive des débits classés ; en structurale : l'établissement de la courbe de fréquence des directions d'écoulement (méthode Eraso) ; en géochimie : les courbes de distribution de conductivité, l'analyse descriptive des variations des différents éléments, les modèles d'équilibre calco-carbonique ; en géothermie : l'utilisation des réponses en température aux exutoires ; en biologie : l'étude des structures de population et leur évolution.

Une approche interprétative des distributions des temps de séjour lors d'opérations de traçage artificiel avec un catalogue de référence a été mis en place.

Enfin, l'interprétation du pompage à gros débit a permis de confirmer l'intense fragmentation de la zone noyée en systèmes annexes au drainage et a mis en évidence le rôle fondamentale de la position du drain verticalement par rapport au niveau piézométrique dans le mode d'exploitation des réserves en eau karstiques. En outre, cette expérience a montré que, lors de la karstification, si certaines fissures étaient agrandies pour constituer les vides karstiques, c'était au détriment des autres qui avaient tendance à être colmatées.

Bibliographie partielle

Astruc, J. G., Bakalowicz, M., Biscaldi, R., et Mangin, A. (1988) Le karst : des réserves en eau qu'il faut savoir utiliser. Application à la région Midi-Pyrénées. *Rev. Agence Eau Ad.Gar.* 40, 53-57.

Bakalowicz, M. (1986). De l'hydrogéochimie en karstologie. *Karst Euskadi* 86, 2, p.105-129

Bakalowicz, M. (1986). Les isotopes de l'environnement en hydrogéologie karstique. *Bull. Assoc. française Hydrologie, réunion de Limoges* 1986

Bakalowicz, M. (1990). The use of mass transfer in karst hydrology. *Internat. Conf. on Karst Hydrology*, Liuzhou, ed. by Geol. Survey of Guangxi, China

Barille, F., et Famin, P. (1993). Contribution à la modélisation du système karstique par réseau de neurones formels : application à la prédiction des débits d'eau souterraine, *Mémoire de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès*, 73 p.

Bertin, D., et Lambert, J. O. (1993). Contribution à la modélisation du système karstique par réseau de neurones formels : applications à la prédiction des débits d'eau souterrains, *Mémoire de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines d'Alès*, 103 p.

Cailhol, X., et Poirier, L. (1994). Contribution à la modélisation du système karstique par réseau de neurones formels : application à la prédiction des débits d'eau souterrains, *Mémoire . Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines. Alès*, 95 p.

Mangin, A. (1984) Ecoulement en milieu karstique;. *Annales des Mines* 5-6, 135-142.

Mangin, A. (1984) Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. Hydrol.* 67, 25-43.

Mangin, A. (1985) Progrès récents dans l'étude hydrogéologique des karsts. *Stylogologia* 1, 239-257.

Margrita, R., Guizerix, J., Corompt, P., Gaillard, B., Calmels, P., Mangin, A., et Bakalowicz, M. (1984). Réflexions sur la théorie des traceurs. Applications en hydrologie isotopique. *Coll. internat. sur l'hydrologie isotopique et la mise en valeur des ressources en eau*, Vienne, 12-16 sept.1983, IAEA-UNESCO, IAEA-SM-270/84, p.653-678

Rouch, R. (1984) Les structures de peuplement des Harpacticides dans l'écosystème karstique. *Crustaceana* (suppl. 7), p. 360-368.

Rouch, R. et A. Carlier (1985) Le système karstique du Baget XIV. La communauté des Harpacticides. Evolution et comparaison des structures du peuplement épigé à l'entrée et à la sortie de l'aquifère. *Stygologia*, 1, 1, p. 71-92.

Rouch, R. et A. Carlier (1985) Le système karstique du Baget. XV. Le peuplement des Harpacticides épigés. Analyse de prélèvements synchrones à l'entrée et à la sortie de l'aquifère. *Stygologia*, 1, 2, p. 224-238.

Rouch, R. (1988) *Parastenocaris vandeli* n. sp., nouveau Copépode Harpacticide psammique des Pyrénées. *Crustaceana*, 54, 2, p. 163-170.

Rouch, R. (1988) Sur la répartition spatiale des Crustacés dans le sous-écoulement d'un ruisseau des Pyrénées. *Annls Limnol.*, 24, 3, p. 213-234.

Rouch, R., Bakalowicz, M., Mangin, A. et D. D'Hulst (1989) Sur les caractéristiques chimiques du sous-écoulement d'un ruisseau des Pyrénées. *Annls Limnol.*, 25, 1, p. 3-16.

Rouch, R. (1991) Structure du peuplement des Harpacticides dans le milieu hyporhéique d'un ruisseau des Pyrénées. *Annls Limnol.*, 27, 3, p. 227-241.

Rouch, R. (1992) Caractéristiques et conditions hydrodynamiques des écoulements dans les sédiments d'un ruisseau des Pyrénées. Implications écologiques. *Stygologia*, 7, 1, p. 13-25.

Rouch, R. (1992) *Parastenocaris mangini* n. sp., nouvel Harpacticode (Copépodes) stygobie des Pyrénées. *Crustaceana*, 63, 3, p. 306-312.

Rouch, R. et F. Lescher-Moutoué (1992) Structure du peuplement des Cyclopidés (Crustacea : Copepoda) dans le milieu hyporhéique d'un ruisseau des Pyrénées. *Stygologia*, 7, 4, p. 197-211.

Rouch, R., Pitzalis, A. et A. Descouens (1993) Effets d'un pompage à gros débit sur le peuplement des Crustacés d'un aquifère karstique. *Annls Limnol.*, 29, 1, p. 15-29.

Le site atelier ALLEGRO, Languedoc

**Marc VOLTZ (1), Patrick ANDRIEUX (1),
Claude BOCQUILLON (2), S. RAMBAL (3)**

(1) Laboratoire de Science du Sol, INRA Montpellier Tel 67 61 23 40 / 67 61 23 09

(2) Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation, Université Montpellier II

(3) Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive, CNRS Montpellier

Le contexte géographique, environnemental et humain

Le milieu méditerranéen est connu pour sa fragilité du fait de sols souvent ingrats, de ressources en eau globalement limitées et soumises à une grande variabilité inter annuelle, et d'un régime pluviométrique à fortes intensités parfois générateur de crues dévastatrices. Cette fragilité s'exprime notamment dans le domaine naturel à travers les phénomènes de déforestation, incendies ou coupes claires, dont les conséquences hydrologiques restent mal définies. Elle apparaît également dans les transformations imposées aux agrosystèmes, consécutives des décisions politiques prises par la CEE en matière d'orientation agricole. Ainsi, dans la région languedocienne, une double évolution se produit: 1) une intensification des productions traditionnelles, telles que la vigne ou l'arboriculture en sec, dans les terroirs favorables, avec un recours accru à des pratiques agricoles potentiellement très polluantes dans un milieu à faibles ressources, 2) une politique d'arrachage des surfaces en vigne, suivie le plus souvent par un abandon des terres et parfois par une reconversion vers des cultures annuelles plus exigeantes en eau, et en tous cas par une modification importante des états de surface et des besoins en eau. Enfin, la fragilité du milieu méditerranéen dans son ensemble risque d'être accentuée dans le futur par les changements climatiques attendus. En l'état actuel des connaissances, ces changements produiraient sur le pourtour méditerranéen un accroissement des périodes de sécheresse.

Cela amène bien évidemment des interrogations fortes: Quelles sont les conséquences hydrologiques des perturbations et évolutions prévisibles? Comment mobiliser au mieux les ressources disponibles pour répondre aux évolutions? Comment préserver simultanément le milieu physique et biologique? Les réponses à ces questions restent très fragmentaires, notamment à cause de l'insuffisance de sites d'études hydrologiques en milieu méditerranéen. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner la répartition géographique des BVRE recensés au sein du réseau européen ERB des BVRE: peu figurent sur le pourtour méditerranéen et la plupart d'entre eux sont spécifiques des zones à végétation naturelle.

Ce contexte a conduit trois laboratoires montpelliérains (CEFE-CNRS, INRA Science du Sol, LHM Université de Montpellier II) à initier un site atelier d'une

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

centaine de kilomètres carrés, recoupant à l'aval le domaine cultivé viticole et à l'amont le domaine naturel de forêt sclérophylle. L'ambition du site est de contribuer à l'analyse du rôle de l'occupation du sol et de son évolution sur la ressource en eau et les flux de matière en zone méditerranéenne.

Description du site d'étude et de son fonctionnement

Le site atelier Allegro a été initié en 1990 et a démarré sur le plan expérimental en 1991. Son cadre général est le bassin versant de la Peyne (voir figure 1), affluent de rive droite de l'Hérault, arrosant la ville de Pezenas. Ce bassin versant (117 km², latitude 43°30'N et longitude 3°20'E) a été choisi pour sa représentativité des conditions pédologiques, d'occupation du sol et hydrologiques des agrosystèmes et écosystèmes de la plaine languedocienne. Il comprend une zone amont, occupée par un écosystème naturel (forêt sclérophylle méditerranéenne à chêne vert dominant), et une zone aval, cultivée principalement en vigne et fortement anthropisée. Les caractéristiques climatiques sont de type méditerranéen sub-humide à saison sèche prolongée, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 650 mm et une ETP annuelle moyenne de 1090 mm.

La démarche d'étude suivie dans Allegro procède de deux approches complémentaires: une approche par milieu sur bassin versant élémentaire et une approche d'intégration de la diversité à l'échelle du bassin versant global. L'organisation d'Allegro s'articule donc autour:

- d'**Allegro-Roujan** (gestionnaire INRA Science du Sol Montpellier), un bassin versant de 91 ha en zone cultivée fortement anthropisée, cultivé à 78% en 1993 (90% en 1992) en vigne;
- d'**Allegro-Ru de Fer** (gestionnaire CEFÉ-CNRS Montpellier), un bassin-versant de 23 ha en zone naturelle, couvert à 100% par la forêt sclérophylle;
- d'**Allegro-Peyne** (gestionnaire LHM Université Montpellier II), le bassin versant général de la Peyne .

Les laboratoires gestionnaires d'Allegro sont regroupés dans le cadre de Gerffeau*, groupement de laboratoires pour lequel Allegro constituera un site atelier. Par ailleurs, le bassin versant cultivé fait parti du réseau de bassins versants de l'INRA. Sur le plan financier, le fonctionnement d'Allegro a été assuré depuis 1991 par les soutiens suivants: AIP INRA Eau, CST BVRE, PIR Environnement CNRS, Plan Etat-Région, bourses de thèse (MRES, COFECUB, DGER Ministère de l'Agriculture), et par la mobilisation de fonds et d'équipements propres aux équipes intervenant sur le site. Sur le plan humain, l'installation, la maintenance des équipements et les traitements de base des données sont effectués directement par les équipes gestionnaires des bassins versants. Il n'y a pas à proprement parler de personnel exclusivement attaché à ces fonctions. On peut toutefois considérer qu'au total elles mobilisent à temps plein l'équivalent de 2,5 techniciens/ingénieurs.

L'organisation et la mise en synergie des recherches sur le projet se fait à deux niveaux: i) à l'échelle de l'ensemble du projet lors de réunions biannuelles entre les gestionnaires des trois bassins versants, ii) à l'échelle des bassins versants lors

* Groupement d'Equipes de Recherches et de Formation Fédératif sur l'"Eau" pour les régions méditerranéennes et tropicales

de réunions de définition des objectifs annuels et des protocoles prévus par toutes les équipes impliquées.

Programmes scientifiques et intervenants

Les programmes scientifiques menés dans Allegro se différencient en partie suivant les deux milieux représentés sur le BV de la Peyne: milieu viticole fortement anthropisé et milieu forestier spontané. En effet les processus déterminant le cycle hydrologique sont fondamentalement différents pour chaque milieu, et les problèmes environnementaux liés à l'occupation du sol le sont également (évolution des pratiques culturales, augmentation du recours aux produits phytosanitaires, mise en jachère des terres dans le milieu viticole, déforestation pour l'écosystème naturel). Néanmoins, les deux milieux ne sont pas disjoints car le milieu naturel amont peut constituer une ressource en eau pour le milieu cultivé aval. Une telle complémentarité amont-aval se manifeste fréquemment entre les zones marginales et les plaines cultivées et densément peuplées du pourtour méditerranéen. L'intégration des approches menées sur chacun des deux domaines et l'analyse de leurs complémentarités constituent les problématiques de base à l'échelle du BV de la Peyne.

La démarche scientifique suivie dans les deux milieux est similaire. Elle repose:

- sur une analyse hiérarchique des processus à des niveaux successifs d'organisation: individu végétal, parcelle ou groupement végétal, bassin versant élémentaire, bassin versant complexe;
- sur la recherche de stratégies et de méthodes de découpage de l'espace en unités spatiales fonctionnelles;
- sur l'élaboration de modèles de fonctionnement à bases physiques de caractère local et distribué.

La diversité des processus hydrologiques en jeu (ruissellement, évapotranspiration, écoulement de nappe, transfert de matières en suspension et de polluants..) et la mise en oeuvre d'une approche pluri-échelle requiert la mobilisation de compétences dans des domaines diversifiés: hydrologie, physique du sol, bioclimatologie, agronomie, biogéochimie.. Un ensemble d'équipes appartenant à plusieurs organismes intervient donc sur Allegro. Outre les équipes gestionnaires des bassins versants, il s'agit des laboratoires de Biogéochimie Isotopique (UPMC-Paris), de Science du Sol (INRA Avignon), des Sols (INRA-INA Paris Grignon), de Génie Rural (ENSA Montpellier), de Viticulture (INRA Montpellier), de Phytopharmacie (INRA Avignon).

Les principaux programmes de travail sont:

a) sur le BV de Roujan:

- l'analyse et la modélisation de l'évapotranspiration d'un couvert discontinu à enracinement profond, la vigne (INRA Avignon et Montpellier; CEFÉ-CNRS Montpellier),

- l'analyse des flux de ruissellement et de pollution (par pesticides et métaux lourds) en fonction des itinéraires culturaux en vigne (INRA Avignon et Montpellier; INA PG; ENSA Montpellier),
- l'utilisation de marqueurs géochimiques et isotopiques pour le traçage des écoulements (INRA Avignon, UPMC Paris),
- la modélisation couplée des transferts à l'échelle parcellaire et au sein du réseau d'écoulement anthropisé (INRA Montpellier, LHM Université Montpellier II).

b) sur le BV du Ru de fer:

- l'analyse et la modélisation de l'évapotranspiration en couvert forestier complexe (CEFE-CNRS Montpellier, UPMC Paris),
- la modélisation et l'intégration du fonctionnement hydrologique à l'échelle du versant (CEFE-CNRS Montpellier).

c) sur le BV de la Peyne

- la recherche de stratégies de découpage en unités fonctionnelles, et de représentation de leurs interactions en cours de fonctionnement (LHM Université Montpellier II),
- les essais d'intégration spatiale par modélisation hydrologique distribuée (LHM Université Montpellier II),
- le test de scénarios de changements d'occupation du sol et l'analyse des complémentarités en termes de ressources en eau des zones forestières et cultivées (LHM Université Montpellier II, CEFE-CNRS Montpellier, INRA Montpellier).

Équipement et données disponibles

L'équipement général du site atelier Allegro est présenté sur la figure 1. Un réseau de 5 pluviographes (3 sur la haute vallée et 2 sur la basse vallée) et de 5 limnigraphes (2 sur la haute vallée et 3 sur la basse vallée) constitue l'équipement général de base du BV de la Peyne. Ces différentes stations sont gérées par Météo France, la BRL, la DDE, l'INRA, le CNRS et l'Université Montpellier II. Les données concernant la pluie sont disponibles en continu sur deux stations depuis 1961, sur une station depuis 1982 et sur deux stations depuis 1992. Les données concernant les débits sont disponibles sur une station (contrôlant 117 km²) depuis 1950, sur deux stations (contrôlant 23 et 29 km²) depuis 1982 et sur trois stations (contrôlant 107 km², 0,91 km² et 0,23 km²) depuis 1992. Une de ces trois dernières stations (107 km²) détruite par la foudre en 1993 va pouvoir être remplacée grâce à l'appui du CST-BVRE.

L'équipement propre à chaque sous-bassin versant est constitué par un équipement de base fixe et par des équipements dont l'installation et l'utilisation sont dépendantes de campagnes de mesure.

Dans la haute vallée de la Peyne (zone forestière), le bassin versant du Ru de Fer (23 ha) est équipé par du matériel de mesure hydrologique (station de mesure des débits citée ci-dessus), du matériel de mesures micro climatiques (tour d'observation de 10 m avec une station automatique de mesures à 5 capteurs

climatiques) et par des équipements permettant des mesures de flux à l'échelle de l'écosystème. Ces derniers équipements concernent: un dispositif de mesure des flux de sève (sur 10 arbres), des appareils de mesure écophysiological (poromètre et chambre à pression), des appareils de description de la structure des couverts végétaux ("plant canopy analyser" et "ceptometer").

Dans la basse vallée de la Peyne (zone cultivée), le dispositif expérimental du bassin versant de Roujan (91 ha) est constitué par des équipements hydrologiques (précipitations mesurées en continu à l'aide de 4 centrales pluviographiques et 9 pluviomètres, ruissellement mesuré en continu sur deux parcelles et de façon ponctuelle avec des pièges à ruissellement, mesures des hauteurs de nappe en continu sur 1 site et hebdomadaires sur 12 sites), des équipements permettant des mesures de suivis hydriques et de l'écophysiological de la vigne (mesures de croissance, mesures tensio-neutroniques hebdomadaires sur 7 sites, mesures de l'ETR sur 1 site lors de campagnes ponctuelles par différentes techniques: flux de sève, micro-lysimètres, micro météorologie). En termes de qualité des eaux, 3 sites sont équipés, ou en cours d'équipement, avec des préleveurs automatiques afin de suivre les teneurs en MES et pesticides. Des mesures quantitatives et qualitatives des flux hydriques en période de crue sont par ailleurs réalisées, à l'échelle de quelques épisodes, par des analyses géochimiques (chlorures, nitrates, Na...) et isotopiques (O^{18}) à l'exutoire du BV et sur plusieurs sites de prélèvements. Les données concernant ces différents équipements sont disponibles, pour la plupart d'entre elles, depuis 1992, et sinon depuis 1993.

Enfin, à l'échelle du BV de la Peyne et des sous-bassins versants, toute une série de données concernant les caractéristiques permanentes (carte des sols, caractéristiques structurales et physico-chimiques des sols, carte géologique, Modèle Numérique de Terrain) et les caractéristiques de surface (occupation des sols, photos aériennes et satellite Landsat) sont disponibles. Ces données sont pour la plupart d'entre elles accessibles à l'aide d'un SIG.

Résultats actuels

Sur le BV de Roujan

Sur le plan hydrologique, les suivis hydrologiques aux échelles parcellaires et du bassin versant ont mis en évidence plusieurs processus importants:

- *L'importance des phénomènes de ruissellement de surface et leur forte dépendance de l'état hydrique initial du bassin versant. Ils représentent à l'échelle du bassin versant de 5 à 50% de la pluviométrie en fonction de l'épisode. A l'échelle parcellaire, ils représentent de 1 à 70 % de la pluviométrie et varient du simple au double suivant l'itinéraire cultural: désherbage chimique sans travail du sol ou désherbage partiel avec labour périodique. Ceci illustre à la fois l'intensité des phénomènes de ruissellement en zone viticole méditerranéenne, leur variabilité temporelle et le déterminisme des pratiques culturales.*

- *Le rôle du réseau anthropique de fossés.* Il achemine directement les flux de ruissellement des zones génératrices vers l'exutoire, mais provoque simultanément en cas de conditions initiales sèches une alimentation par son lit de la nappe du bas-fond. Dans ce système fortement anthropisé, les représentations hydrologiques supposant l'existence d'une continuité hydrologique à l'échelle du versant ne s'appliquent pas.

- *La différenciation nette des dynamiques hydriques des sols* suivant les compartiments géomorphologiques du paysage. Elle est due aux différences des caractéristiques d'infiltrabilité des sols, et surtout à la position topographique des compartiments en relation avec le réseau d'écoulement concentré. Ainsi, les parcelles agricoles sur terrasses, fréquentes en milieu méditerranéen, présentent ici un déficit hydrique fort par l'effet conjugué d'une faible infiltrabilité et d'un réseau de fossés supprimant les arrivées d'eau de l'amont. En première analyse, le découpage en compartiments géomorphopédologiques apparaît un bon support pour la transposition des fonctionnements étudiés sur le bassin versant à l'ensemble de la zone cultivée de la Peyne.

Sur le plan des transferts de polluants, les premières analyses en 1993 révèlent la présence de *pollutions significatives des eaux de surface par des herbicides* (simazine, diuron, terbuthylazine). Par contre, aucune concentration significative de fongicides n'a pu être mise en évidence. Ceci s'explique soit à cause du faible dosage de certains des fongicides recherchés, soit à cause d'une persistance modérée de ces fongicides. *La pollution des eaux de surface par les métaux lourds*, notamment le cuivre issu des traitements fongicides, ne semble s'effectuer que sous *forme adsorbée* sur les matières en suspension.

Sur le plan méthodologique, deux résultats sont à noter:

- *L'identification de marqueurs chimiques des écoulements* permettant de tracer les contributions respectives de différents compartiments du bassin versant.

- *Le développement d'une procédure automatisée de découpage de l'espace* en unités fonctionnelles à partir du modèle numérique de terrain, du parcellaire, de la carte des sols et de la topologie du réseau anthropique de fossés.

Sur le BV du Ru de Fer

Sur le plan hydrologique:

- *Développement d'un modèle biophysique* de simulation des transferts d'eau au sein des écosystèmes forestiers.

- Réalisation d'une *synthèse sur les conséquences hydrologiques d'une perturbation majeure*, le feu.

- Mise en évidence de la faible sensibilité du bilan hydrologique mensuel ou annuel d'un grand bassin (29 km²) au nombre de versants retenus pour la simulation.

Sur le plan méthodologique:

- *Estimation satellitaire (Landsat-TM) de l'indice foliaire* des formations végétales spontanées à partir de calibrations-sol basées sur des transects géoréférencés (Plant canopy analyser).
- *Mise au point d'un générateur de climat* permettant l'extrapolation i) des rayonnement diffus et direct, et ii) de la température au point de rosée.

Sur le BV de la Peyne

- *Mise au point d'un algorithme de découpage d'un bassin versant à partir d'un schéma arborescent* issu du réseau de drainage: SIGNEAU. Cet algorithme a été mis en application sur le BV de la Peyne.
- *Mise au point d'un Système d'Information Géographique Hydrologique (SIGH)* de structure arborescente.
- *Structuration et constitution d'une banque de données géographiques descriptives du BV de la Peyne.* La banque est de type orientée objet.
- *Modélisation spatialisée* tenant compte des processus de transformations au sein des toposéquences à partir des processus élémentaires (végétation, infiltration, ruissellement). Les analyses de sensibilité de la modélisation sont en cours.

Rôle de formation

Les actions pédagogiques sur le site s'exercent à deux niveaux:

- dans le cadre de formations initiales, à savoir celles de la formation doctorale "Sciences de l'Eau et Aménagement" de l'université de Montpellier II, et celles de l'année de spécialisation "Génie Agronomique" des élèves ingénieurs de l'ENSA de Montpellier. Dans ce cas elles s'exercent soit par l'intermédiaire d'enseignements et de visites de terrain, soit lors de stages d'étudiants de DEA ou DAA sur des thèmes précis intégrés dans les problématiques de recherche développées dans Allegro.

Ainsi, 14 stages de DEA/DAA/DESS ont eu lieu sur le site dans la période 1992-1994, et 5 travaux de thèse sont en cours.

- dans le cadre de formations continues. Les actions pédagogiques sont alors plus variables que les précédentes. Elles consistent surtout en des présentations des programmes scientifiques développés dans Allegro et en des visites de terrain avec démonstration du fonctionnement des matériels. Ceci a par exemple été organisé en 1993 pour deux groupes d'ingénieurs en séjour de formation en France: l'un en année de formation continue au Centre National d'Enseignement Agronomique des Régions Chaudes et l'autre en séjour d'étude à l'ORSTOM Montpellier.

Bibliographie récente

Andrieux P., Bouzigues R., Joseph C., Voltz M., Lagacherie P., Bourlet M., 1993 - Le bassin versant de Roujan. Caractéristiques générales du milieu. INRA, UR Science du Sol, Montpellier, 57 pp.

Lacaze B., Rambal S., Winkel T., 1994 - Identifying spatial patterns of Mediterranean landscapes from geostatistical analysis of remotely sensed data. Int. J. Remote Sensing, in press.

Moussa R., Bocquillon C., 1994 - TrapPhyC-BV: hydrological Information System. Accepté dans Environmental Software.

Moussa R., Bocquillon C., 1994 - Algorithms for solving the diffusive wave equation. Soumis à Hydrological Processes.

Rambal S., 1991 - 2030: Conjecture sur la ressource en eau en languedoc karstique. La Météorologie, 38:2-7.

Rambal S., 1993 - The differential role of mechanisms for drought resistance in a Mediterranean evergreen shrub: a simulation approach. Plant, Cell and Environment, 16:35-44.

Rambal S., Lacaze B., Winkel T., 1990 - Testing an area weighted model for albedo or surface temperature for mixed pixels in Mediterranean woodlands. Int. J. Remote Sensing, 11:1495-1499.

Ribolzi O., Valles V., Barbiero L., 1993 - Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. Science du Sol, 31 (1/2) : 77-95.

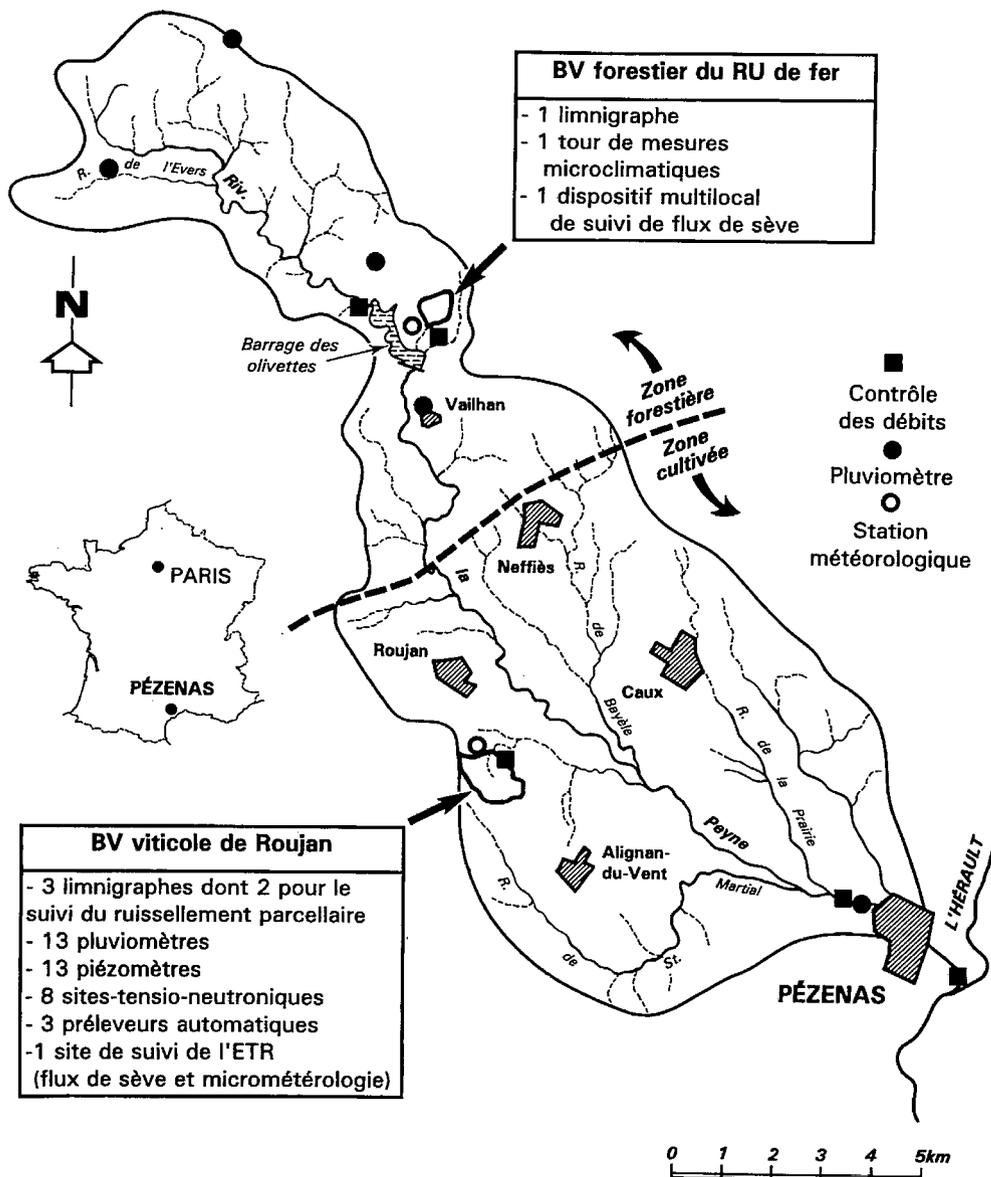
Voltz M. et Andrieux P. (coordinateurs), 1993 - Bilan des travaux 1992 et programme 1993 du projet d'étude de bassin versant Roujan-Allegro dans le cadre de l'AIP "Valorisation et protection des ressources en eau", 21 pp..

Voltz M. et Andrieux P. (coordinateurs), 1994 - Bilan des travaux 1993 et programme 1994 du projet d'étude de bassin versant Roujan-Allegro dans le cadre de l'AIP "Valorisation et protection des ressources en eau", 31 pp..

Conclusion

Le projet Allegro n'a que trois années d'ancienneté. Il est donc relativement jeune par rapport aux autres dispositifs de bassin versant présentés lors de ce séminaire. Néanmoins, la phase initiale de mobilisation des compétences, de coordination des programmes scientifiques, et de mise en place expérimentale est en voie d'achèvement. Bien que des résultats concrets aient déjà été obtenus, tous les programmes scientifiques menés dans Allegro sont en cours. La phase suivante doit voir l'aboutissement d'un certain nombre de ces programmes. Simultanément, le projet devrait se renforcer sur le plan des équipes impliquées (département hydrologie de l'ORSTOM).

ALLEGRO: Le bassin versant de la Peyne



Présentation des BVRE de Draix

Didier RICHARD
CEMAGREF Division Protection Érosion
BP 76 38402 St Martin d'Hères
Tél : 76 76 27 73 - Fax : 76 51 38 03

Contexte géographique et historique

Les BVRE de Draix sont nés en quelque sorte de la rencontre des souhaits en matière de recherche de la Division Protection contre les Érosions du CEMAGREF, et des préoccupations du Service de Restauration des Terrains en Montagne en matière de conception et de réalisation de travaux de correction torrentielle.

Ainsi, suite à une expérience malheureuse dans la région de Barcelonnette (1978-81), le CEMAGREF se lança à la recherche d'un nouveau site, se tournant pour cela vers les services RTM. Les terrains proposés alors par le service RTM de Digne (Alpes de Haute-Provence) semblaient correspondre aux enseignements tirés de la première expérience et furent retenus. Leur équipement débuta en 1983, après que la Division Protection contre les Érosions se fut assurée la collaboration de la Division Hydraulique Générale du CEMAGREF d'Aix en Provence pour la partie hydrométrie - hydrologie.

Les bassins versants actuellement équipés se situent à une quinzaine de kilomètres au Nord-Est de Digne, sur les territoires communaux de Draix et du Brusquet. Ils s'étagent entre 800 m et 1 200 m d'altitude environ. Ils sont situés sur les "terres noires", ces marnes du Bajocien à l'Oxfordien extrêmement sensibles à l'érosion, et qui posent tant de problèmes aux services RTM des Alpes du Sud. Leur représentativité dans ce contexte semblait donc acquise, et a d'ailleurs été récemment confirmée dans le système Durance - Étang de Berre (Brochet, 1993). Les terrains concernés sont également inclus en quasi-totalité dans des séries domaniales RTM, ce qui représente une facilité non négligeable pour la gestion. Enfin, des bassins versants très équivalents existent à proximité immédiate, qui ont été entièrement reboisés à la fin du siècle dernier. Ces bassins ouvrent la possibilité de comparaisons en fonction du couvert végétal. L'un d'entre eux (le Brusquet) a d'ailleurs été inclus dans le dispositif.

Présentation et conditions de fonctionnement

Le dispositif actuel est composé de cinq bassins de surfaces et de taux de végétation différents (cf. carte en annexe) :

Bassin	Surface (ha)	Taux de couverture (%)			
		végétale bois	compacte herbe	végétale clairsemée	terrain nu
Laval	86	21.7	7.8	2.7	67.8
Francon	73	42.9		13.4	43.7
Brusquet	108	87			13
Moulin	8	10.2	31.1	4.5	54.2
Roubine	0.133		21		79

L'organisation type des stations de mesures situées à l'exutoire de ces différents bassins est la suivante :

- * une plage de dépôts fermée par un barrage perméable pour piéger l'essentiel des transports solides à l'amont de la station de mesure,
- * un canal auto-jaugeur dans lequel opèrent deux appareils :
 - un limnigraphe (mesure de niveau ou de pression)
 - un préleveur d'échantillons pour évaluer les quantités de matières en suspension non piégées dans les plages de dépôts et qui transitent donc à ce niveau.

La mesure des précipitations est réalisée par 5 pluviographes à augets disposés en différents points du dispositif.

Programmes scientifiques

Idée directrice de la création des BVRE de Draix

Dès l'origine, ils ont été destinés à la mesure des crues et surtout à celle du transport solide véhiculé par les crues, dans le but de quantifier l'érosion sur des terrains très érodables (marnes et marno-calcaires à facies de bad-lands). Les conséquences sur l'instrumentation ne sont pas négligeables : pas ou peu de mesures climatologiques, appareillage de mesures des débits liquides délibérément axé sur la mesure des crues moyennes et fortes, ce qui signifie une mauvaise mesure des décrues et a fortiori des étiages. Par contre un effort important (et original) a porté sur la mesure des transports solides, représentant de fait un véritable programme de recherches.

Passé et présent

Les BVRE de Draix peuvent encore être considérés comme des BVRE de création récente, même si les premiers (Laval et Roubine) ont commencé à recevoir des mesures depuis 10 ans. Les programmes de recherches actuels sont en effet encore conditionnés par la poursuite d'une amélioration de l'instrumentation :

Recherches en instrumentation

- peu de choses pour la mesure des pluies, car l'adaptation à partir des pratiques utilisées pour le Réal Collobrier a rapidement fonctionné.
- par contre, les limnigraphes du commerce étant peu fiables pour des crues très chargées en sédiments, il s'est avéré nécessaire d'en étudier un spécifique, (Collaboration Laboratoire de Spectrométrie Physique, UJF, CNRS, Grenoble), qui a été breveté et qui est en passe d'être commercialisé (Sté Précis Mécanique).
- la mesure des transports solides est classiquement très délicate, et se fait de manière fruste : piège à sédiments grossiers (donc mesure globale et coût du curage très élevé) et préleveurs automatiques des matériaux fins (appareils de prélèvement au fonctionnement délicat lorsque le débit solide est important). Trois projets d'amélioration de la mesure des matériaux fins sont en cours : absorption des rayonnements Gamma d'une source de Césium (collaboration CEA), la rétro diffusion optique (collaboration Université de physique de Marseille), mesure de pression différentielle (collaboration ORSTOM).

Par contre, aucun projet d'amélioration de la mesure des matériaux grossiers ne semble se dessiner.

- une tentative très poussée de mesure directe de l'érosion (collaboration IGN, CNRS Meudon) a conduit à ne pas retenir les procédés de mesure "topographiques" (photogrammétrie au sol, et distancemétrie sans réflecteur), car il y a une zone non vue importante avec les mesures au sol, et les résultats de mesure à une année d'intervalle ont donné des écarts de 1 à 4 avec les mesures de transports solides, difficilement interprétables (zones cachées, différence de densité, précision de la mesure ?).

Recherches scientifiques

Elles ont consisté en une utilisation des résultats de mesures à trois niveaux :

- exploitation directe des données, notamment pour celles des transports solides, qui permettent de quantifier l'érosion sur des badlands des Alpes du Sud. Cette connaissance n'existait pas avant nos mesures et elles présentent un très grand intérêt pour le remplissage des retenues en aval de ces terrains (Escale, Sisteron, Berre). La confrontation de ces taux d'ablation entre bassins boisé et déboisé, permet de quantifier l'apport du reboisement à la lutte contre l'érosion. Une comparaison de même nature sur les crues donne l'ordre de grandeur de l'intérêt de la végétalisation dans la lutte contre les crues.

- mise en relation statistique des mesures d'érosion avec les paramètres de pluies (énergie cinétique et intensité) et de crues (débit de pointe et volume), pour chacun des bassins mesurés. La comparaison de ces relations entre bassins de même type "géographique" (géologie, géomorphologie et couverture végétale) mais de surface différente a permis d'étudier les facteurs d'échelle et de déterminer à partir de quel niveau spatial les processus de crue propres aux biefs interfèrent avec ceux du ruissellement et de l'érosion qui se produisent sur les versants et les sous bassins élémentaires.

L'étude de la transférabilité des résultats de mesures a également été faite.

- modélisation conceptuelle avec un modèle semi distribué (dit ETC, soit Érosion des Torrents en Crue), qui traduit les relations pluie-débit liquide sur les sous bassins (avec choix possible des modèles GR2 ou SCS ou linéaire à seuil), accepte en entrée des résultats de mesure d'érosion, et "route" le débit liquide et le débit solide sur les biefs. La première fonction de ETC (modèle pluie-débit liquide en crue) a permis de caler des paramètres ayant une signification physique et permet d'espérer qu'il sera possible à terme de construire un modèle de crue torrentielle, spécifique aux petits bassins de montagne. Le projet européen DM2E en cours, associant d'autres bassins méditerranéens, comporte une validation externe de ce modèle. La dernière fonction de ETC (routage des débits solides), très originale, a été testée globalement avec une fonction de dégradation des matériaux grossiers en matériaux fins, spécifique des matériaux marneux. Elle est en cours de tests à un niveau plus fin (mesures des dépôts et des érosions dans les biefs) dans le cadre du projet européen EROSLOPE.

- mesure sur ravines de l'effet du couvert végétal sur l'érosion : variation du coefficient de ruissellement en fonction de la pratique de la végétalisation, part des plantes dans la diminution de la lame d'eau ruisselée.

Avenir

Instrumentation

Il n'est guère possible de prédire si les projets actuellement lancés en instrumentation permettront de fournir une solution suffisante, ou s'il faudra continuer à chercher d'autres solutions, qui se traduiront inévitablement par des projets de recherche.

Recherches scientifiques

Les projets actuels de modélisation statistique sur les autres bassins (Moulin) et conceptuelle sur les débits liquide et solide avec ETC, vont se prolonger encore quelques temps.

Au delà, les suites prévisibles sont les suivantes :

- généralisation du modèle de crue de bassin versant torrentiel par calage sur d'autres crues, d'autres bassins de montagne (de façon à obtenir un outil utilisable en prédétermination, qui fait défaut à l'heure actuelle aux Services de terrain).
- étude plus fine de la formation du ruissellement sur le bassin dégradé du Laval (proposition en collaboration avec le LTHE).
- étude des modèles physiques de l'érosion existant et utilisation du "meilleur" d'entre eux pour des tests sur les BVRE de Draix.

Au point de vue "transport solide", les conditions d'obtention de données fines telles que la valeur des stocks dans les biefs étant très lourdes, l'avenir semble plus incertain : Draix représente pourtant un site idéal pour l'étude des écoulements hyperconcentrés en matériaux fins. Indiquons en effet qu'à plusieurs centaines de g/l de MES, l'hydraulique classique a de bonnes chances de ne pas

être applicable au niveau élémentaire et qu'elle constitue un sujet de recherches à l'étranger (Institut de Karlsruhe, Chine surtout).

Intervenants et répartition des rôles

Trois équipes sont impliquées depuis l'origine dans l'équipement et la gestion des BVRE de Draix :

- * CEMAGREF - Division Protection contre les Érosions - Grenoble -
- * CEMAGREF - Division Ouvrages Hydrauliques et Équipements pour l'Irrigation - Aix en Provence -
- * Office National des Forêts - Service de Restauration des Terrains en Montagne des Alpes de Haute-Provence - Digne -

Équipements et données disponibles

Les données recueillies sont les suivantes :

- * enregistrements pluviométriques (5 postes),
- * enregistrements limnigraphiques sur les 5 bassins,
- * prélèvements pour la mesure des concentrations des matières en suspension,
- * relevé des volumes de dépôts solides après chaque épisode de crue (4 bassins).

Des fichiers des valeurs journalières sont produits, ainsi que des fichiers par épisode (hyétogrammes, hydrogrammes, courbes de concentration des matières en suspension).

Les données limnigraphiques interprétées (banque HYDRO), et des pluies journalières (banque PLUVIO) sont disponibles sur demande auprès des Agences de l'Eau, serveurs de ces deux banques de données. Les autres données susceptibles d'intéresser des chercheurs dans les domaines de l'hydrologie et de l'érosion, peuvent être mises à leur disposition sur demande. Les modalités de leur délivrance sont définies cas par cas.

Résultats les plus significatifs

1) Obtenir des mesures fiables, même lacunaires de l'érosion sur des terrains parmi les plus érodables au monde, est déjà en soi un résultat important. La connaissance de cette valeur moyenne, la comparaison de ces moyennes entre bassins de surfaces différentes d'une part, entre bassins de même surface mais de taux de boisement différents, permet une quantification pour tous les bassins similaires des Alpes du Sud. Enfin, le nombre d'années de données va peut-être devenir suffisant pour permettre une analyse statistique aux niveaux annuel et événementiel.

2) Sur ravin élémentaire, le volume total érodé est bien expliqué par les paramètres pluviométriques, et l'explication décroît très vite si la distance avec le pluviographe croît. Sur les bassins de rang supérieur (donc présentant un réseau hydrographique et une pente plus faible), l'explication par les paramètres pluviographiques s'affaiblit. L'introduction du débit comme paramètre explicatif

supplémentaire ramène la corrélation à un coefficient de détermination supérieur à 0,9. Les modèles explicatifs ont été bien validés.

3) Le ruissellement et l'érosion sont des phénomènes à seuil. Aussi, l'érosion annuelle est mal expliquée par la pluie annuelle. L'utilisation des modèles événementiels statistiques permet par contre de reconstituer valablement l'érosion annuelle, avec toutefois un problème pour traiter les épisodes hivernaux.

4) Les débits liquides sont bien simulés par l'utilisation de trois sousmodèles : la courbe de la pluie limite qui donne la rétention initiale, la fonction de production du modèle SCS que l'on a modifiée en admettant que l'infiltration maximum dépend des conditions initiales comme la rétention initiale, et enfin, un hydrogramme triangulaire dissymétrique de transfert.

5) Le transport solide sur le bief du Laval (86 ha) est complexe car c'est un écoulement hyperconcentré d'une part, (rapport Q_s/Q_l qui se compte en %), et d'autre part, la proportion de matériau fin passe en moyenne de 15 % à l'amont à 60 % à l'aval (sur 800 m). Les formules empiriques de charriage hyperconcentré, permettent malgré tout d'en donner une bonne estimation, notamment lorsqu'on est loin du début de transport. La part de matériau fin étant très variable d'une crue à l'autre, son estimation est plus aléatoire. La nécessité de la mise au point d'une formule spécifique de début de transport découlera des travaux en cours qui étudient la variation des stocks des biefs lors de la crue.

Relations de type réseau

Un Groupement d'Intérêt Scientifique en projet.

Rôle de formation

Il est réduit ; quelques tournées et visites d'écoles, de chercheurs, d'élus, de services techniques.

Bibliographie sélective

Instrumentation

CAMBON J.P., MATHYS N., MEUNIER M., OLIVIER J.O., 1990. "*Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants de montagne*". Symposium : Hydrology in Mountainous Regions. Lausanne. AIHS Publ. No 194. 231-238

EGELS Y., KASSER M., MEUNIER M., MUXART T., GUET C., 1989. "*Utilisation de la photogrammétrie terrestre et de la télémétrie sans réflecteur pour la mesure de l'érosion de petits bassins-versants et comparaison avec les mesures de transport solide à l'émissaire*." La Houille Blanche No 3/4-1989, 183-187

OLIVIER J., PEBAY PEROULA J.-C., 1992. "*Mesures sur les écoulements : l'ELLAN, un limnigraphe adapté aux conditions difficiles*." Informations techniques du CEMAGREF No 87, note 1.

Études scientifiques

BORGES A.L., 1993. "*Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud*". CEMAGREF. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble. 205 p. +tab, fig.

BROCHOT S., 1993. "*Érosion de badlands dans le système Durance-Etang de Berre*". Cemagref-Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 269 p.

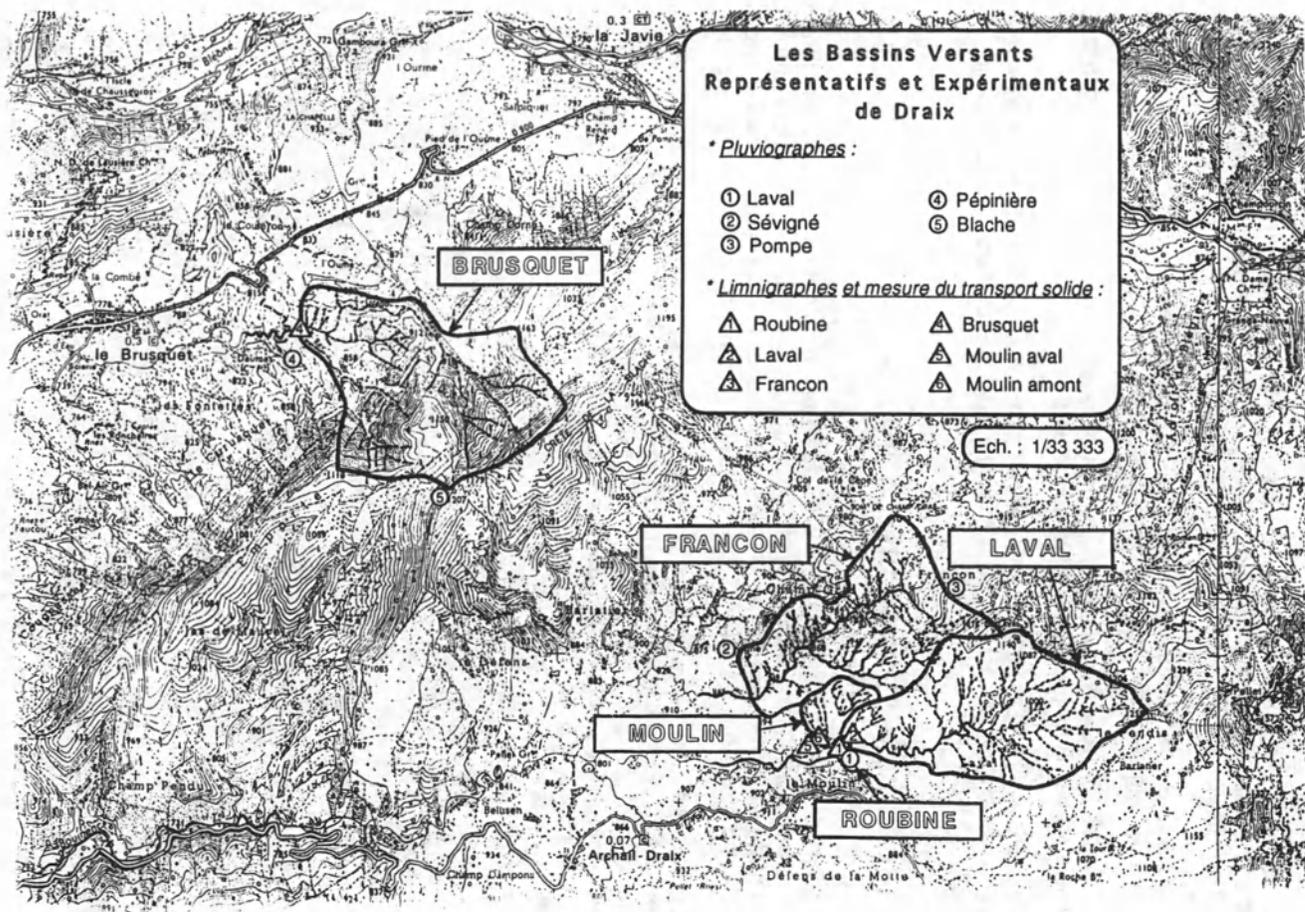
BROCHOT S., 1994. "*Érosion de bad-lands dans les Alpes du Sud*." CEMAGREF - Ministère de la Recherche et de l'Espace, à paraître.

BORGES A.L., BROCHOT S., MEUNIER M. "*Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du Sud*". Houille Blanche No 3/94. 71-80

Perspectives et souhaits pour l'avenir

Un souhait : que l'ensemble des BVRE de Draix soit reconnu comme un laboratoire de terrain bénéficiant d'une logistique garantissant son bon fonctionnement, la continuité et la fiabilité du recueil des données et les soustrayant aux aléas des contrats d'étude par lesquels l'essentiel du financement est actuellement assuré.

La matérialisation de ce souhait permettrait au gestionnaire de ne pas limiter son intervention au seul dépouillement en participant plus activement à l'exploitation des données au travers de programmes de recherche et d'études méthodologiques, notamment dans les domaines de l'hydrologie de montagne et des processus érosifs.



Le programme B.V.R.E. Mont-Lozere

François LELONG

Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne
6 Bd Gabriel 21000 Dijon
Tel : 80 39 63 51 - Fax : 80 39 63 87

Bernard GUILLET

URA 724 CNRS, Laboratoire de Géologie Organique 45067 Orléans
Tél : 38 41 72 13 - Fax : 38 41 72 08

Contexte historique et géographique

A l'origine des BVRE (Bassin-Versant de Recherche et Expérimental) du Mont-Lozère, il faut rappeler la recherche conduite par la DGRST puis par le CNRS, sur **"Les conséquences des monocultures résineuses"** sur le sol, recherches coordonnées par M. BONNEAU de 1976 à 1984.

Au moyen d'études stationnelles, en établissant des bilans d'altération comparatifs de sols identiques sous résineux et sous feuillus, on avait mis en évidence (BONNEAU 1983) des pertes supplémentaires en nutriments dans les horizons de surface sous résineux, pertes assez considérables (pertes de quelques Kg/ha/an pour Ca et Mg, et pouvant atteindre 200 Kg/ha/an pour K). Cette conclusion était préoccupante, et si elle ne résultait pas d'artefacts, comment pouvait-on l'interpréter? Les résineux aggravaient-ils les phénomènes de lessivage ou d'érosion chimique du sol ?

En 1980, je proposais à M. BONNEAU d'utiliser l'outil Bassin-Versant pour lever les incertitudes et avec l'aide du Parc National des Cévennes, de la Cellule Interparcs, de l'ENGREF et du CNRS, 3 petits bassins-versants similaires et voisins étaient sélectionnés et équipés, en vue de mesures comparatives et synchrones de l'érosion chimique sous trois couvertures végétales contrastées.

Présentation des bassins

Les trois B.V.R.E. du Mont-Lozère sont (Fig. 1) :

- le bassin A, La Sapine, de 54 ha, est couvert d'une hêtraie,
- le bassin B, La Latte, de 19,5 ha, était couvert d'un peuplement d'épicéas, il a été soumis à une coupe rase de 1987 à 1989, et il ne reste plus que 5% du peuplement initial avec des jeunes plans et repousses.
- le bassin C, La Cloutasse, de 81 ha, est couvert d'une pelouse avec quelques bouquets d'arbres.

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

Ils sont voisins et situés sur le versant sud du Mont-Lozère, entre 1100 et 1500 m d'altitude, à 80 km de la mer Méditerranée.

Le climat est de type méditerranéen montagnard, avec une température moyenne annuelle de 6°C, des précipitations moyennes annuelles de 1900 mm dont 10 à 40% sous forme de neige (valeurs extrêmes 1400 et 2700 mm), et de forts contrastes saisonniers. Les lames écoulées moyennes annuelles sont voisines de 1300 mm pour les bassins forestiers et 1500 mm pour le bassin de pelouse.

Le substrat commun est un granite calco-alcalin, très homogène (granite de Pont de Montvert) sur lequel se développent des sols gravelo-sableux, très filtrants, riches en humus et acides, peu épais (0,40 à 0,80m), appartenant à la série des sols désaturés, rankers à sols bruns ocreux (dystrochrepts). Les surfaces de zones basses alluviales ou marécageuses sont très minoritaires.

Jusqu'au début de ce siècle, l'évolution du couvert végétal et de son exploitation anthropique a probablement été très semblable dans les trois bassins versants (PILLET, 1981). A la fin du Néolithique, le Mont-Lozère est presque entièrement couvert par une hêtraie-sapinière. La principale phase de défrichement a lieu au Moyen-Age, et le maximum de population et de pression pastorale se situe autour de 1850. Une progressive déprise agricole commence peu après, et là intervient la différenciation entre les bassins versants étudiés ici : des taillis de hêtres semi-naturels colonisent lentement les zones les moins propices au pâturage (bassin-versant de la Sapine); des plantations de résineux sont réalisées ailleurs (bassin de la Latte); un pâturage extensif d'ovins transhumants, se maintient encore près des hameaux encore habités.

Équipement, données disponibles et coûts

Les principaux équipements en place sur les trois bassins sont localisés par la figure 1.

Ces bassins versants font l'objet d'un suivi climatique, hydrologique (précipitations et débits à l'exutoire) et hydrochimique (prélèvement et analyse des eaux de pluie et de rivières) en continu depuis 1981. Les pluvioloessivats et les eaux du sol ont aussi été mesurés et prélevés depuis 1988 grâce à des dispositifs installés dans les deux bassins forestiers (Fig. 1). Le pH, la conductivité, l'alcalinité et les concentrations en Ca, Mg, K, Cl, NH₄, SO₄, NO₃ et Si ont été déterminés par les méthodes classiques. Des descriptions détaillées de ces méthodes et des techniques de mesure sont données dans de précédentes publications (DUPRAZ, 1984; DURAND, 1989; LELONG *et al.*, 1990).

Les différents équipements réalisés de 1981 à 1994 représentent un total de 700 KF environ. Les frais de fonctionnement, hors personnel, s'élèvent actuellement à 160 KF/an contre 75 KF/an pendant les premières années du programme, où les installations étaient moins complètes et moins sophistiquées.

Intervenants et structure

Les sujets de recherche se sont progressivement élargis : au départ la problématique était hydrologique et hydrochimique; puis les aspects sol et plante ont été pris en compte, notamment pour comprendre les divers transferts de masses à l'intérieur de chaque écosystème et pour établir les cycles complets de l'eau et des éléments biogènes. Les aspects géomorphologiques ont été également développés, d'une part en vue de comprendre la dynamique érosive actuelle, d'autre part pour situer la part de l'occupation humaine dans le façonnement du modelé depuis le dernier épisode glaciaire.

Les équipes participantes aux programmes de recherche basés sur l'outil BVRE Mont-Lozère couvrent 5 champs disciplinaires :

Hydrologie

- Bilans hydrologiques, étude de la genèse des crues. Laboratoire de géographie physique de Meudon et URA 141 du CNRS.
- Modélisation des écoulements : application des modèles QdF et GR existants. Essai d'amélioration de ces modèles par la prise en compte d'une variable mesurant l'humidité du sol. CEMAGREF Lyon et Antony.

Géomorphologie

- Quantifications des processus actuels d'érosion solide de la ravine au bassin-versant.
- Interprétation par l'étude fine des modelés et au moyen de datations absolues de sédiments récents, du rôle de l'homme dans la dynamique géomorphologique.

Laboratoires de Géographie, Université de Limoges et de Clermont-Ferrand.

Hydrochimie et Pédologie

- Étude des processus de transferts d'eau et des éléments chimiques dissous aux différentes étapes du transit de l'eau à travers les bassins : pluies, pluviolessivats, eaux du sol, eaux de ruisseau... Définition de la dynamique évolutive actuelle du sol. Dynamique du soufre.

Laboratoire Géosol, Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne et Laboratoire de Géochimie organique (URA CNRS 724, Orléans).

Biogéochimie

Cycle biologique et géochimique des éléments biogènes
Centre CEFE CNRS Montpellier.

Géologie

- Bilans de proton, modélisation hydro et biogéochimique.

INRA Rennes (Sciences du Sol), Centre des Sciences de la Terre, Université de Bourgogne.

- Évaluation des apports atmosphériques solides (poussières sahariennes...)
Laboratoire des Géosciences de l'Environnement, Marseille.

Ces différentes équipes représentent 15 chercheurs ou enseignants-chercheurs qui sont organisés depuis 1990 en un GIS. F. LELONG, de l'Université de Bourgogne, assisté de B. GUILLET (CNRS Orléans) et de J.F. DIDON, ingénieur d'étude CNRS à plein temps sur le terrain, est l'actuel gestionnaire des B.V.R.E. du Mont-Lozère.

Le GIS réunit ses membres une fois par an (un ou deux jours) et édite après chaque réunion un rapport qui rend compte des différentes activités du groupe de l'année.

Principaux résultats

Première phase (1981-85)

La thèse de C. DUPRAZ (1984) met au point une méthodologie précise d'établissement de bilans d'érosion chimique précis à l'échelle de ces bassins : flux chimiques entrant par les pluies - flux chimiques sortant par l'écoulement (Fig. 2). Ce travail prouve l'existence d'un différentiel modéré, mais significatif dans les pertes nettes en cations (Ca, Mg, K, Na) d'un bassin à l'autre : les pertes nettes s'élèvent en effet à 0,51 Ke/ha/an pour la pelouse, 0,14 Ke/ha/an pour la hêtraie et 0,69 Ke/ha/an pour la pessière. L'érosion chimique serait donc 1,5 à 4 fois plus forte pour cette dernière.

La poursuite de ces bilans, les années suivantes, confirment ce différentiel (Fig. 3). Par ailleurs, on remarque des bilans entrées d'érosion chimique sensiblement équilibrés pour Cl⁻, positifs pour N, nettement négatifs pour Si conformément aux tendances générales observées pour les bassins représentatifs de milieux naturels (FELLER et KIMMINS, 1979). Il semble bien établi que les 3 écosystèmes étudiés du Mont-Lozère stockent l'azote et le soufre.

Seconde Phase (1985-89)

A la suite des dépérissements forestiers observés dans certains peuplements notamment de résineux, le programme DEFORPA (Dépérissement Forestiers attribués aux Pollutions Atmosphériques) est lancé. Un BVRE est créé dans une pessière dépérisissante des Vosges (Bassin d'Aubure) et les trois BVRE du Mont-Lozère sont proposés et acceptés par ce programme pour servir de bassins de référence, représentatifs de régions réputées être à l'abri de fortes pollutions atmosphériques.

L'étude comparative ultérieure des niveaux de pollutions atmosphériques devait par la suite relativiser cette référence : les compositions chimiques moyennes annuelles des pluies mesurées au Mont-Lozère de 1981 à 1990 sont assez riches

en sels marins et relativement chargées en sulfates qui seraient d'origine mixte, variable selon les années: pollutions industrielles de SO₂ acidifiantes, apports de poussières sahariennes chargées en Ca SO₄. Le niveau d'acidité moyen est 25% inférieur à celui des Vosges, mais 8 fois plus fort que celui des pluies "naturelles".

La thèse de P. DURAND (1989) a permis de poursuivre les bilans chimiques d'érosion et, au moyen de mesures supplémentaires, de définir les processus biogéochimiques expliquant les différences de bilan d'érosion constatés. Pour cela la mesure des variations des flux dissous le long du transit de l'eau à travers les bassins est nécessaire : eau des précipitations incidentes, eaux pluviolessivées sous les frondaisons, eaux du sol à différentes profondeurs ... (Fig. 2).

P. DURAND met ainsi en évidence l'importance relative des dépôts atmosphériques secs et occultes, dépôts souvent très acides, préférentiellement captées par les végétations de résineux à feuillage persistant et divisé. Mais ces dépôts secs acides seraient 5 à 10 fois plus faibles en Lozère que dans les Vosges.

Flux d'ions (H[±]) atmosphériques (en Ke/ha/an)

	<u>Mont-Lozère</u>	<u>Vosges</u>
Précipitations humides	0,40	0,40
Précipitations sèches	0,1 à 0,2	0,60 à 1

TOTAL	0,5 à 0,6	1 à 1,4

Au total l'acidité atmosphérique incidente serait 2 à 3 fois plus intense dans les Vosges qu'au Mont-Lozère. P. DURAND souligne aussi l'importance des prélèvements de cations du sol par les biomasses sur les processus d'acidification du sol : chaque équivalent de cation absorbé libère en effet un proton dans la solution du sol. P. DURAND montre ainsi -, pour des prélèvements nets de cations estimés en fonction de la productivité des écosystèmes -, que la part de l'acidité interne au sol produite par ces prélèvements représenterait 30 à 40% de l'acidité atmosphérique pour la pelouse, 65 à 80% pour la hêtraie, et peut-être davantage pour la pessière. En outre par suite des rotations forestières plus fréquentes, l'épuisement du sol en ces nutriments serait plus rapide pour les peuplements de résineux.

Au total, on comprend pourquoi les bilans d'érosion chimique donnent des pertes nettes de cations plus fortes sous peuplement de résineux que sous les autres peuplement et plus fortes dans les Vosges qu'en Lozère (Fig. 4) et que, à la faveur d'apports atmosphériques sensiblement moins acides qu'en Europe septentrionale les bilans chimiques soient moins négatifs en Lozère que pour la moyenne des 31 bassins-versants tempérés et boréaux étudiés (AVILA et RODA, 1988).

Les profils de concentrations chimique de l'eau au cours de son transit à travers les écosystèmes (Fig. 5 et 6) révèlent les différences de processus selon les niveaux d'acidité : au Mont-Lozère, pour la bassin de la Hêtraie, où les niveaux d'acidité sont assez faibles, la mobilisation chimique des cations prélevés sur la réserve du sol est modérée. Dans les Vosges à Aubure, cette mobilisation est 5 à 10 fois plus forte et la disponibilité en cations du sol devenant insuffisante, le pH s'abaisse

d'où la libération d'ions Al^{3+} , signe de dégradation du sol et source de toxicité pour les peuplements végétaux terrestre et animaux aquatiques.

Troisième phase (1990-1994)

Les trois BVRE du Mont-Lozère sont intégrés dans le réseau européen de 35 bassins versants, du Programme E.N.C.O.R.E. (European Network of Catchments Organized for Research upon Ecosystems), visant dans le cadre de STEP (Scientific and Technology Environment Programm) financé par la CCE, l'étude fine du suivi des effets des pollutions atmosphériques sur le fonctionnement des écosystèmes : établissement de bilans hydrochimiques (entrées atmosphériques - sorties hydrologiques), identification et comparaison des processus, essais de modélisation de ceux-ci.

L'une des originalités du Mont-Lozère, mises en évidence par les bassins-versants, réside dans la dynamique du soufre. Au lieu d'être plus ou moins négatif, comme cela est observé dans la plupart des bassins versants, le bilan du soufre est positif au Mont-Lozère, d'où un stockage de cet élément dans les bassins versants. Ce stockage intervient pour une part notable (10 à 40% ?) dans la neutralisation des sources d'acidité. La thèse VANNIER (1992) menée sous la direction de B. GUILLET fut donc focalisée sur l'identification des formes de stockage du soufre et leur localisation à différents niveaux de profondeur du sol : stockage surtout biologique dans les horizons supérieurs du sol, stockage physico-chimique dans les horizons profonds et sans doute dans les arènes où transitent les eaux souterraines. Les questions pratiques posées étaient : quelle est la capacité maximale de rétention du soufre dans les bassins du Mont-Lozère, quels sont les mécanismes de rétention et les conditions de saturation voire de réversibilité de ces mécanismes avec les risques acidification liés au relargage du soufre ? La réponse à ces questions fondamentales nécessiterait une recherche complémentaire sur les modalités de stockage du soufre dans le sous-sol.

Au cours de la même phase ont été lancés, avec un faible soutien financier de la Région Languedoc-Roussillon, un DEA puis une thèse, sous la direction de M. RAPP, pour chiffrer aussi précisément que possible les stocks et les flux d'éléments chimiques impliqués dans les biomasses forestières et en particulier dans celles de la hêtraie (thèse de A. HANCHI en cours). A l'aide de mesures stationnelles intensives (mesures des pluviollessivats, des chutes de litières, de la vitesse de minéralisation de celles-ci, flux chimiques percolant dans le sol...), on peut établir les cycles biologiques, internes dans le système sol plante, et les cycles géochimiques externes à ce système, ouverts sur l'atmosphère et l'hydrosphère.

Ces données et notamment celles relatives aux cations et au soufre servent à caler les modèles biogéochimiques conceptuels qui, à partir de la connaissance des flux chimiques incidents et avec un nombre limité d'équations physicochimiques permettent de calculer la composition chimique des eaux écoulées des bassins moyennant l'introduction de certains paramètres mesurés ou supposés (tels l'épaisseur du sol, sa capacité d'échange cationique, les taux de cations échangeables du sol...). DURAND *et al.* (1992) ont pu ainsi appliquer le modèle MAGIC (Model of Acification of Groundwater In Catchments) aux bassins de Lozère et calculer une baisse graduelle probable du pH des eaux écoulées du bassin de pessière jusqu'à des valeurs inférieures à 5 dans une cinquantaine d'années, si

les flux acides incidents ne sont pas abaissés. On sait qu'une telle acidité des eaux de surface peut compromettre la survie de certaines espèces comme les salmonidés (MUNIZ, 1991). Mais ce type de modèle ne peut pas prétendre rendre compte des variations hydrochimiques à court ou moyen terme et de celles liées aux variations des stocks organiques du sol.

Au cours des seconde et troisième phases de programme BVRE du Mont-Lozère, les hydrologues et géographes associés à ce programme (B. VALADAS, C. COSANDEY et P. BERNARD-ALLEE) ont utilisé les dispositifs de ces bassins et des dispositifs complémentaires (fosses à sédiments, mesure des débits et des transports solides à l'échelle locale de micro-bassins...) pour expliquer la genèse des crues, pour tenter de quantifier les phénomènes d'érosion mécanique actuels et pour situer la part de ceux dans l'histoire de l'évaluation du modelé au cours du Quaternaire. La coupe à blanc de la pessière, intervenue en cours d'étude, a permis d'estimer le rôle hydrologique de la forêt, tant du point de vue de l'intensité des crues que du bilan annuel d'écoulement. Les transports solides apparaissent très discontinus dans l'espace et dans le temps, liés à des ruissellements exceptionnels, de courte durée et localisés. Les taux de matières solides, ponctuellement considérables, entraînées par ceux-ci, diminuent très vite par effet d'intégration spatiale grâce à de nombreuses aires de dépôts (colluvions de versants, alluvions de chenaux et de thalweg) où ces matières sont piégées.

Ces travaux sanctionnés par de nombreuses publications débouchent sur des pistes de recherches nouvelles visant à quantifier l'influence des phénomènes d'échelle en vue de la prévision des risques liés aux crues.

De leur côté, les hydrologues du CEMAGREF (G. GALEA, D. BARBET) ont utilisé une modélisation débits-durée-fréquence (QdF) des régimes de crues pour les trois entités végétales présentes sur les 3 bassins, afin de tenter de quantifier l'impact de la coupe forestière faite sur l'un des bassins.

Réseau et rôle de formation

Les Bassins-Versants du Mont-Lozère appartiennent au réseau B.V.R.E., dont le gestionnaire est le CEMAGREF de Lyon, et au réseau européen E.R.B. (European Network of experimental and Representative basins). Depuis 1990, dans le cadre du programme STEP, les bassins-versants du Mont-Lozère ont été intégrés dans le réseau de 37 bassins européens organisés pour la recherche sur les écosystèmes (réseau E.N.C.O.R.E.).

Les B.V.R.E. du Mont-Lozère ont servi d'outil de recherche pour de nombreuses thèses : une thèse de docteur ingénieur qui a été primée Médaille d'or par la Société hydrotechnique de France, 3 thèses de 3ème cycle, 3 thèses de doctorat de l'Université d'Orléans, 1 thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne. Une vingtaine de stages de DEA ont directement utilisé cet outil de recherche qui a également permis d'accueillir et de former de nombreux stagiaires de courte durée. La production scientifique se chiffre à une centaine de références (articles, rapports, mémoires, communications) dont une trentaine dans des revues d'audience internationale.

Les B.V.R.E. du Mont-Lozère servent aussi de vitrine scientifique au Parc National des Cévennes, au coeur duquel ils sont implantés, et font l'objet de très nombreuses visites guidées (tourisme scientifique).

Perspectives d'avenir

Plusieurs points relevant de la valorisation des données acquises et de nouvelles pistes de recherches découlent du travail accompli pendant treize ans :

1) La mise au net des données hydrologiques et hydrochimiques accumulées depuis 1981 et leur édition sous forme d'annuaires utilisables par les chercheurs et les gestionnaires doivent être menées à bien, comme cela vient d'être réalisé pour les données climatiques.

2) La synthèse des effets hydrochimiques dus à la coupe forestière et notamment la quantification des pertes en nutriments liés à cette coupe nécessite la poursuite du suivi des flux chimiques écoulés quelques mois encore après la grande sécheresse des années 1989 à 93.

3) Le prolongement des recherches sur les conditions de stockage du soufre, notamment dans les couches profondes du sol (arènes) et dans les fractures du granite altéré, serait absolument nécessaire pour évaluer la capacité totale de stockage des bassins versants vis-à-vis du soufre et les risques de déstockage donc d'acidification des eaux écoulées.

4) Un projet de recherches sur les risques hydrologiques liés aux crues et de l'érosion associée est déposé auprès de l'INSU (sous la responsabilité de C; COSANDEY) et une réponse à l'appel d'idées pour le P.R.H. (Programme de Recherche en Hydrologie) est en cours d'élaboration sous notre responsabilité.

Enfin, les deux vocations distinctes mais non contradictoires dévolues aux BVRE :

* observatoire de l'environnement à long terme

* laboratoire de terrain et lieux d'expérimentations

doivent être mieux séparées, en termes de moyens humains et financiers nécessaires, pour que le gros investissement accompli soit valorisé au maximum.

Plusieurs grandes questions scientifiques en suspens seraient à terme bénéficiaires de cette distinction : définitions de charges atmosphériques critiques pour les écosystèmes, effets d'éventuels changements climatiques, impacts sur les stocks organiques du sol (compartiment le moins étudié) de nouveaux modes de gestion ou d'utilisation du sol, dynamique du carbone et de l'azote dans le sol et les sous-sol dans les vastes espaces ruraux soumis à la déprise agricole.

Références

AVILA, A. & RODA, F. (1988) - Export of dissolved elements in an evergreen oak forested watershed in the Montseny Mountains (N.E Spain). Catena, suppl. 12, 1-11.

BONNEAU, M. (1983) - Consequences de monocultures résineuses et alternatives possibles. Rapport Sci. final., PIREN, CNRS, ATP Ecosystèmes, 67 p.

DUPRAZ, C. (1984) - Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins-versants comparatifs à végétation contrastée. Thèse Doc. Ing. Univ. Orléans, 363 p.

DURAND, P. (1989) - Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France). Thèse Doc. Univ. d'Orléans, 192 p.

FELLER, M.C. & KIMMINS, J.P. (1979) - Chemical characteristics of small streams near Haney, in southwestern British Columbia, *Water Research*, 15, 2, 247-258.

LELONG, F., DUPRAZ, C., DURAND, P. & DIDON-LESCOT, J.F. (1990) - Effets of vegetation type on the biogeochemistry of small catchments (Mont-Mozère, France). *J. of Hydrology*, 116, 125-145.

MUNIZ, I.P. (1991) - Freshwater acidification : its effects on species and communities of freshwater microbes, plants and animal. Proceed of the Royal Soc. of Edimburgh, 97-B, 227-254.

PILLET, P. (1981) - Recherches sur l'organisation et l'évolution des unités écologiques du Parc National des Cévennes. Rapport P.N.C., Florac, 110 p.

VANNIER, C. (1992) - Les modalités de la rétention du soufre dans les sols de deux bassins-versants forestiers du Mont-Lozère. Thèse Doc. Univ. Orléans, 113 p.

Sélection des publications du GIS-B.V.R.E. Mont-Lozere 1990 - 1994

1990

COSANDEY, C., BOUDJEMLINE, D., ROOSE, E. & LELONG, F. (1990) - Etude expérimentale du ruissellement sur des sols à végétation contrastée du Mont-Lozère. *Z. für Geomorphol. N.F.*, 34, 1, p. 61-73.

LELONG, F., DUPRAZ, C., DURAND, P. & DIDON, J.F. (1990) - Effects of the vegetation upon the biogeochemistry of small watersheds (Mont-Lozère, France). *J. of Hydrology*, 116, p. 125-145.

1991

BERNARD ALLEE, Ph. , VALADAS, B., COSANDEY, C., MUXART, T. & GODARD, A. (1991) - Forest harvest geomorphic effects in a sub-mediterranean granitic middle mountain; "Z. für Geomorphologie", Suppl. Band 83, 1-8, Berlin-Stuttgart, Aug. 1991.

VALADAS, B. & BERNARD-ALLEE, Ph. (1991) - Les unités morphologiques du Mont Lozère. *Bull. Assoc. Géogr. fr.*, 1, p. 79-88.

DURAND, P., NEAL, C., LELONG, F. & DIDON-LESCOT, J.F. (1991) - Hydrochemical variations in spruce, beech and grassland areas, Mont Lozere, Southern France. *J. Hydrol.*, 129, p. 57-70.

1992

DURAND P., LELONG, F. & NEAL, C. (1992) - Comparison and significance of annual hydrochemical budgets in three small granitic catchments with contrasting vegetation (Mont Lozere, France). *Environmental Pollution*, 75, p. 223-228.

DURAND, P., NEAL, C. & LELONG, F. (1992) - Anthropogenic and natural contributions to the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes National Park (Mont Lozere, Southern France). *J. Hydrol.*, 130, 71-85.

DURAND, P., NEAL, C. & LELONG, F. (1992) - Effects of land-use and atmospheric input on stream and soil chemistry : field results and long term simulation at Mont Lozere (Cevennes National Park, Southern France). *Sci. Tot. Envir.*, 119, p. 191-209.

DURAND, P., ROBSON, A. & NEAL, C. (1992) - Modelling the hydrology of submediterranean mountain catchments using TOPMODEL : initial results. *J. Hydrol.*, 139, p. 1-14.

GALEA, G. & BARBET, D. (1992) - Influence de la couverture végétale sur les crues du BVRE du Mont-Lozère. *Hydrologie Continentale*, 7, (1), 33-49.

COSANDEY, C. (1992) - Influence de la forêt sur le cycle de l'eau. Conséquences d'une coupe forestière sur le bilan d'écoulement annuel. - *Hydrologie Continentale*, 7,(1),13-22.

1993

DURAND P. , M. NEAL & C. NEAL - Variations in stable oxygen isotopes and major elements concentrations in three submediterranean catchments. *J. Hydrol.*,144, 283-290.

DURAND, P. - Compared hydrochemistry of a humid temperate site (Plynlimon Wales) and of a montane mediterranean site (Mont-Lozère, France); implications for acidification study and modelling. Commun à Biogeomon, Symposium on ecosystem behaviour, Prague, 18-20 Sept. 1993, soumis à *Revue Water, Air and Soil Pollution*.

VANNIER, Ch., DIDON-LESCOT, J.F., LELONG, F. & GUILLET, B. (1993) - Distribution of sulphur forms in soils from beech and spruce forest of Mont-Lozère (France). *Plant and Soil*, 154, 197-209.

1994

VANNIER Ch, GUILLET B. (1994) - Sulphur in the organic fractions of an upland forest soil (Mont Lozère- France). *Soil Biology Biochemistry*,26,(1), 149-151

VANNIER C., FROSSARD E. & GUILLET B. (1994) - Effets de la végétation et des constituants du sol sur l'immobilisation du soufre dans les sols forestiers (pessière-hêtraie) du Mont Lozère. *Acta Oecologica* (accepté)

GUILLET B., VANNIER Ch. & LELONG F. (1994) - Sulphur stored in soils and the relative importance of organic and inorganic forms. Examples at the Mont Lozere. in " Forest decline and air pollution effects in the french mountains." G. Landmann et M. Bonneau eds., Springer Public., (accepté), 7 p.

PROBST, A., LELONG, F., VIVILLE, D., DURAND, P., AMBROISE, B. & FRITZ, B. (1994) - A comparative hydrochemical behaviour and elemental budgets of the Aubure (Vosges Massif) and Mont-Lozère (Massif Central) spruce forested

catchment. in "Forest decline and air pollution effects in the french mountains". G. Landmann et M. Bonneau eds., Springer Public., (accepté), 21 p.

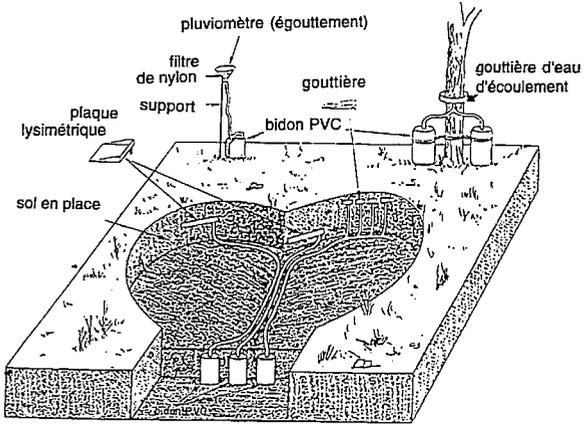
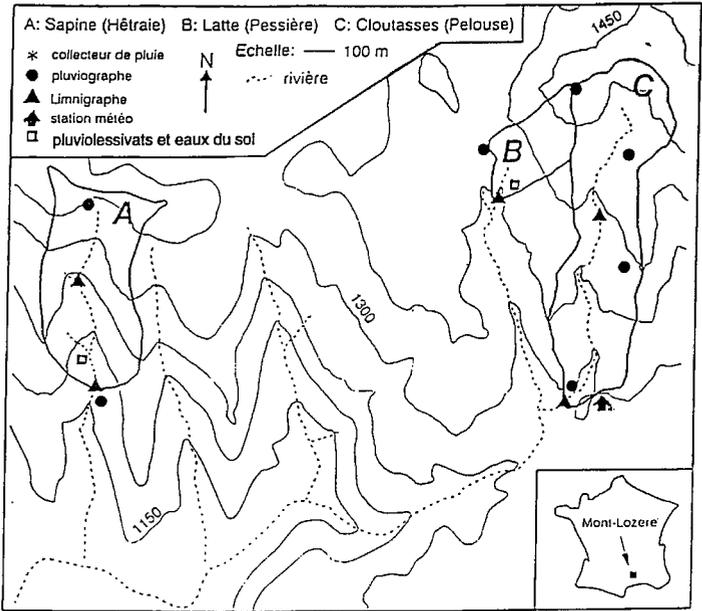


Fig. 1 - Les trois bassins versants du Mont Lozère et leurs équipements. La figure du bas illustre les dispositifs de mesure et de collecte des pluviollessivats et d'eaux du sol installés sur les bassins A et B.

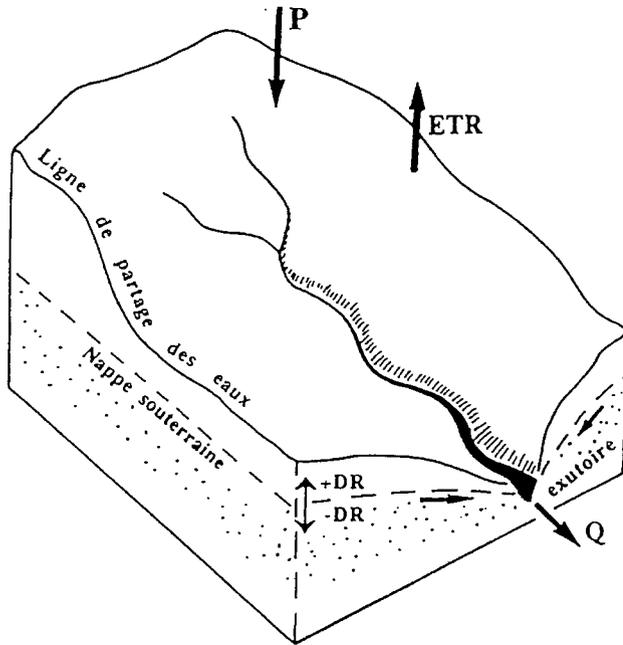


Fig. 2 - Définition des flux chimiques entrant et sortant (Précipitations P, écoulement Q) dans un bassin versant

Bilans moyens 1981-86 (kg.ha⁻¹.an⁻¹)

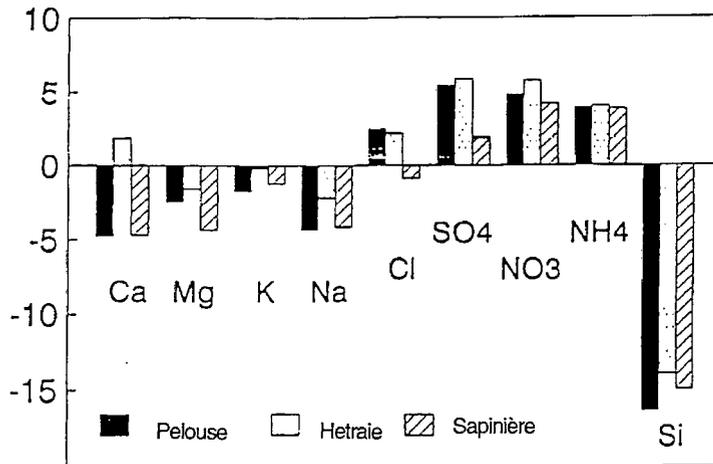
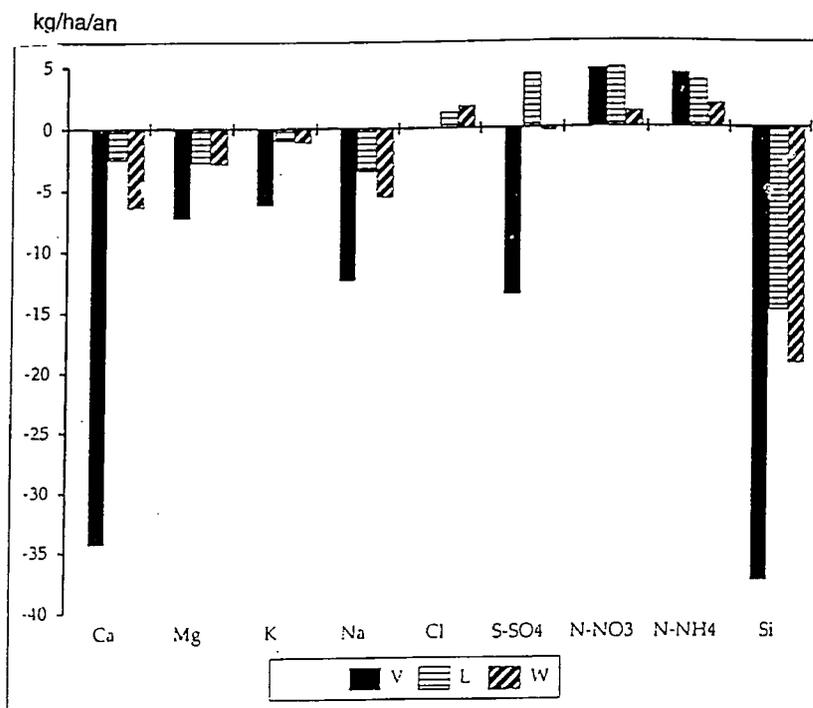


Fig. 3 - Bilans d'érosion chimiques (entrées atmosphériques - sorties hydrologiques) pour les trois bassins versants du Mont-Lozère.



V : Sapinières des Vosges 1986-1987 (Probst et al., 1989)

L : Peuplement diversifié Mont Lozère (3 végétations) 1981-1986 (Durand et al., 1990)

W : Forêt de type boréal et tempéré (Avila and Rodà, 1988)

Fig. 4 - Comparaison de bilans d'érosion chimiques de divers petits bassins versants de régions humides.

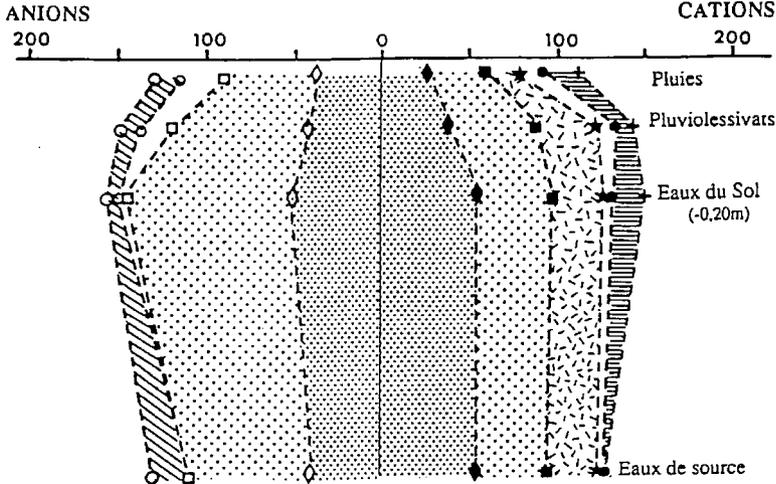


Fig. 5 - Profils de concentrations chimiques cumulées: valeurs moyennes pour le cycle 1987-1988 (en µeq/l). Bassin versant de la Sapine, couvert d'une Hêtraie, Mont-Lozère (d'après DURAND, 1989, modifié).

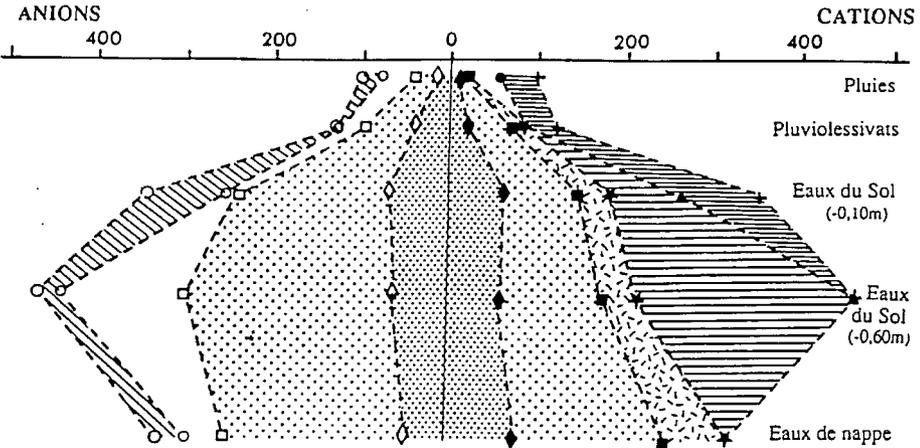
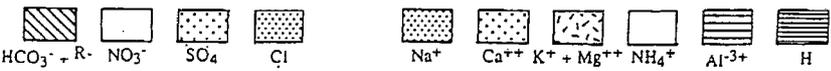


Fig. 6 - Profils de concentrations chimiques cumulées: valeurs moyennes pour 14 jours d'hiver (en µeq/l). Bassin versant d'Aubure, couvert d'une forêt d'épicéas, Vosges, (d'après PROBST et al. 1990, modifié).



**Les BVRE
au service des thématiques
sur les hydrosystèmes**

Les processus de surface et l'interaction avec l'atmosphère

Daniel VIDAL-MADJAR

CNRS/UVSQ-CETP 10/12 Avenue de l'Europe, 78140 Vélizy
Tél : 39 25 48 18 - Fax : 39 25 48 22

Introduction

Les processus d'interaction entre les surfaces continentales et l'atmosphère forment le point commun entre les deux composantes du cycle de l'eau que sont ses phases atmosphérique et continentale. En particulier, ils interviennent de façon primordiale d'une part dans le contrôle du volume d'eau entrant dans l'hydrosystème (par l'intermédiaire des précipitations et de l'évaporation) et d'autre part en régulant l'ensemble des flux d'énergie vers l'atmosphère (chaleur latente et sensible). Avec l'amélioration de notre compréhension de la physique de l'atmosphère, il est maintenant indispensable d'inclure dans les modèles de simulation de la circulation atmosphérique à toutes les échelles une paramétrisation réaliste, simple et robuste du comportement de cette interface qui tienne compte non seulement des flux vers l'atmosphère mais également des pertes par ruissellement et drainage. La construction de modélisation hydrologique de plus en plus fondée sur la physique des processus de transferts de l'eau impose également que les flux vers ou de l'atmosphère soient décrits aussi complètement que possible. C'est ce qui explique l'émergence de ce thème dans les réflexions sur l'usage des bassins versants de recherche.

Cette courte note ne prétend pas aborder cette question de façon exhaustive. On y trouvera seulement quelques pistes qui devront être approfondies dans les prochains mois afin de converger vers des propositions d'équipements pour les BVRE.

II - Les processus de surface

Pour identifier les processus de surface ayant un intérêt pour les deux phases du cycle hydrologique, on peut partir des termes du bilan en eau d'un BV :

$$\Sigma(\text{pluies-évaporation}) = \Delta(\text{stockage sol}) + \Delta(\text{stockage profond}) + \Sigma(\text{débits à l'exutoire})$$

Vu de l'atmosphère, il est nécessaire de pouvoir avoir un suivi réaliste de l'eau disponible pour l'évaporation puisque ce flux contrôle en partie les échanges énergétiques entre le sol et la couche de surface atmosphérique. Pour cela, il faut bien connaître le ruissellement de surface et l'infiltration vers le sous sol. L'ampleur de ces deux processus dépend fortement des conditions locales liées au relief, aux propriétés du sol ou encore à la nature de la couverture végétale. Il serait donc

illusoire de prétendre que l'on arrivera à trouver des paramétrisations suffisamment robustes pour que l'on puisse se passer de tout étalonnage. Cependant, il est absolument nécessaire de mieux comprendre la physique de ces mouvements, en relation avec les états de surface et les mouvements dans la zone non saturée. Des BVRE correctement équipés et suivis sur une période assez longue devraient pouvoir aider à identifier les paramètres importants et à développer les modélisations adaptées. Ces modèles devront, bien entendu, être aussi simples que possible et surtout s'appuyer sur des grandeurs mesurables sur le terrain ou par l'observation à distance (à partir d'avions et de satellites).

Vu du bassin versant, il s'agit essentiellement de la gestion des flux entrants (ou sortants) : pluies et évaporation. Pour ce qui concerne les pluies, les questions sont liées à l'estimation de la répartition spatiale. Au delà d'une mesure correcte de ces champs (qui n'est pas toujours acquise sur les BVRE), il est nécessaire de mieux comprendre la physique à l'échelle fine liée aux caractéristiques topographiques et la encore aux états de surface. Pour l'évaporation, on doit accentuer l'effort sur la mise au point et surtout les tests de modèles simples décrivant les interactions entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Il est en particulier primordial de s'assurer de la robustesse des schémas proposés en fonction des conditions climatiques et de la nature des surfaces.

Dans ce que l'on vient d'exposer rapidement, on voit apparaître deux exigences. La première est liée à l'équipement en mesures pertinentes. La deuxième est la nécessité d'observations à long terme qui est la seule méthode permettant d'assurer que les modélisations développées supportent bien les changements de conditions climatiques. On donne dans le paragraphe suivant deux exemples qui chacun assurent une des deux conditions (observation à long terme et mesures adaptées) mais pas l'autre.

Deux exemples : l'expérience Hapex-Mobilhy et le BVRE de l'Orgeval

Il s'agit tout d'abord de la masse de mesures accumulées sur le BVRE de l'Orgeval depuis maintenant près de 30 ans. Sur ce bassin, en plus des classiques enregistrements des pluies et des débits, on a équipé une parcelle de référence d'un site de mesure d'un humidimètre neutronique pour établir le bilan hydrique de la partie supérieure du sol. Depuis 8 ans, ces mesures sont même réalisées avec un pas de temps journalier. Grâce à cette base de données, on a pu (programme mené en commun par la Division Hydrologie/Hydraulique du CEMAGREF et le CETP) construire un modèle pluies/débits théoriquement capable de simuler la variation de deux couches de sol (surface et zone racinaire). La validation de cette capacité et de la robustesse de l'algorithme vis à vis des conditions climatiques a été possible par comparaison des sorties du modèle avec les mesures de contenu en eau de la parcelle de référence pendant les dernières années (figure 1) et pendant les premières années de mise en place des sondages à neutrons (figure 2).

Sur ces deux figures, on voit qu'on a tout lieu d'être satisfait du résultat puisque la simulation est bien corrélée aux mesures quelque soit l'année de la mesure. Par contre il aurait été extrêmement intéressant de comparer également le flux

d'évaporation calculé par le modèle avec des flux réels. Malheureusement, aucune mesure de ce genre n'a jamais été faite sur le bassin ou sur la parcelle de référence. On est ainsi privé d'un autre moyen de validation de la justesse des paramétrisations physiques utilisées. Certes, la mesure des flux dans la couche de surface n'est pas une chose facile. Cependant, il n'existe pas non plus de mesures fiables des paramètres atmosphériques classiques. On a donc une base de données qui ne peut pas être utilisée pour aller plus loin que la simple analyse pluies/débits.

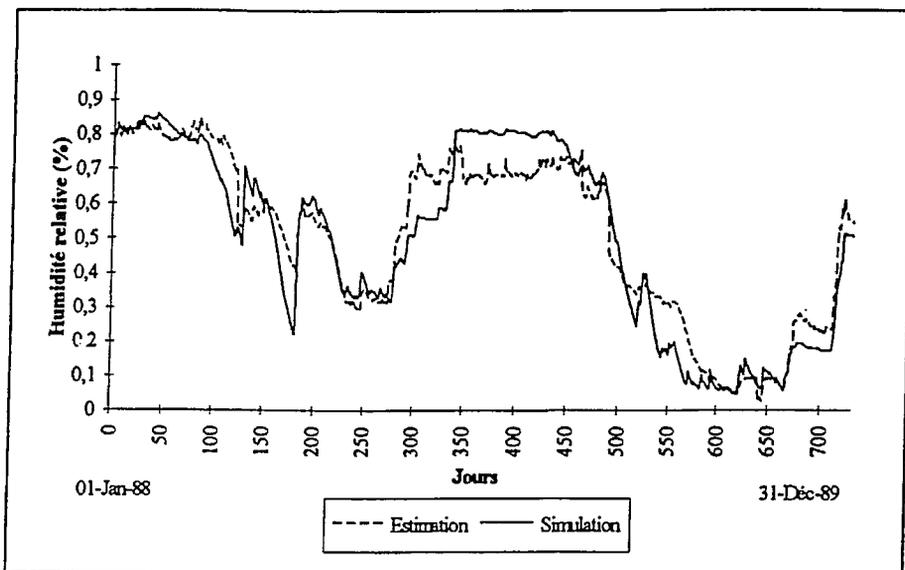
Le deuxième exemple concerne l'expérience Hapex/Mobilhy. Cette expérience a été conçue par des météorologistes et des physiciens du climat. Elle a permis le recueil d'un ensemble de données exceptionnel allant des bilans hydriques des sols sur un grand nombre de parcelles à la mesure des flux spatialisés par avion. Malheureusement, toutes les mesures n'ont pas été faites sur la même période de temps. On ne dispose de la totalité des mesures atmosphériques et hydrologiques que pendant environ trois mois. Un modèle hydrologique simulant les variations de l'humidité de la zone racinaire a été mis au point à cette occasion. Le contenu en eau de cette zone ayant été mesuré pendant à peu près 2 ans, on a pu comparer les sorties du modèle avec l'état hydrique de la zone (figure 3). Grâce aux mesures atmosphériques, on a pu également, mais sur seulement trois mois, vérifier que la nouvelle paramétrisation proposée permettait réellement de mieux représenter les flux d'évaporation (figure 4, où l'on voit que le modèle tenant compte des interactions avec l'atmosphère améliore nettement la comparaison avec les mesures de l'évaporation moyenne mensuelle). Cependant, l'ensemble de cette expérience n'ayant duré que deux ans et seulement trois mois pour les mesures de flux, on ne peut rien dire quand au comportement du modèle dans d'autres conditions climatiques.

On voit donc, à travers ces deux exemples, qu'aujourd'hui on dispose soit de très longues séries de mesures mais qui ne portent pas sur l'essentiel des paramètres pertinents pour les interactions entre les surfaces et l'atmosphère, soit d'opérations "coup de point", certes complètes mais sur des durées trop courtes pour pouvoir réellement prendre en compte la variabilité climatique.

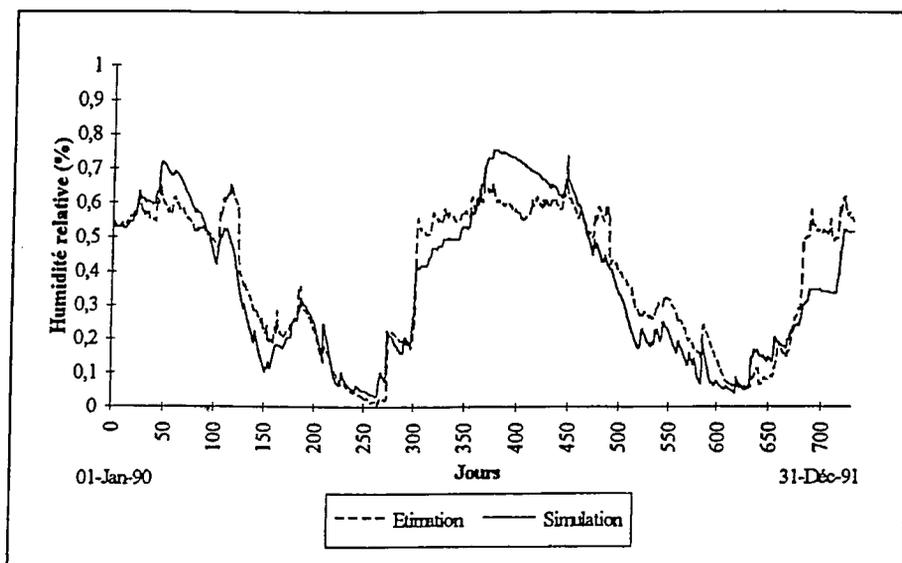
Ce qu'il faudrait mettre en place

Il est bien clair que nous avons besoin de renforcer les équipements en place au moins sur certains bassins pour la mesure des flux d'évaporation. Il faudrait prévoir des mesures en routine des flux dans la couche de surface, ce qui n'est pas simple et demande une maintenance importante. Une estimation représentative des bilans en eau de la zone non saturée est nécessaire sur un pas de temps journalier. On pourrait à cette occasion lancer une opération pour le développement de capteurs automatiques mieux adaptés à ce type de mesures que la classique sonde à neutrons (méthodes TDR, diélectrique ou d'autres). Enfin, une caractérisation pertinente de la couverture végétale et des sols et de leurs évolutions manque cruellement aujourd'hui dans la plupart des bases de données des BVRE. Un suivi régulier de ces paramètres doit être mis en place le plus tôt possible. On devrait y inclure une caractérisation hydrodynamique des sols et de sa dépendance en fonction des pratiques culturales.

Pour ce qui concerne les pluies, la question est de se mettre en situation de mieux comprendre la physique des précipitations à très petite échelle. Il s'agit plutôt d'une question pour les physiciens de l'atmosphère. Certains BVRE, s'ils sont assez grands et suffisamment hétérogènes, pourraient être proposés comme sites de test des futurs modèles de simulation. L'ouverture plus grande qu'elle ne l'est actuellement vers la météorologie est nécessaire.

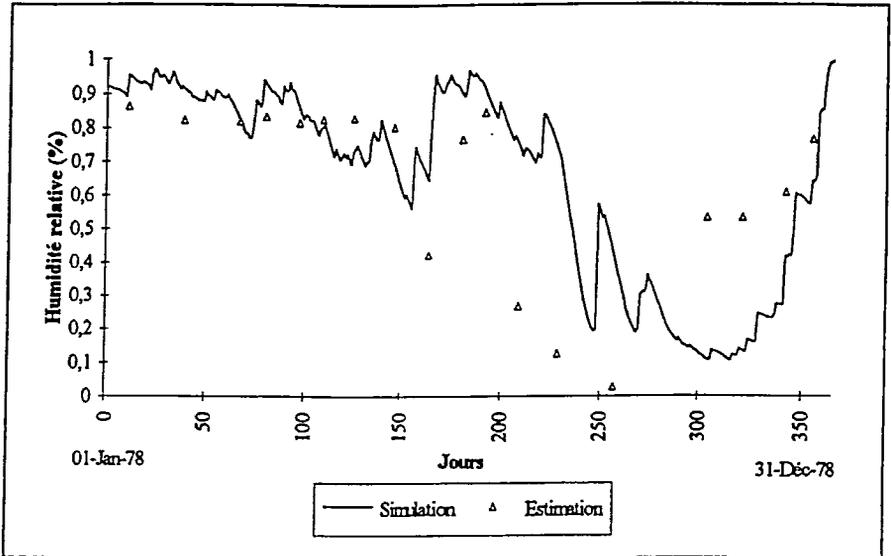


Assimilation des humidités globales par relation de corrélation saisonnière-Période de calage-Années 1988-1989.

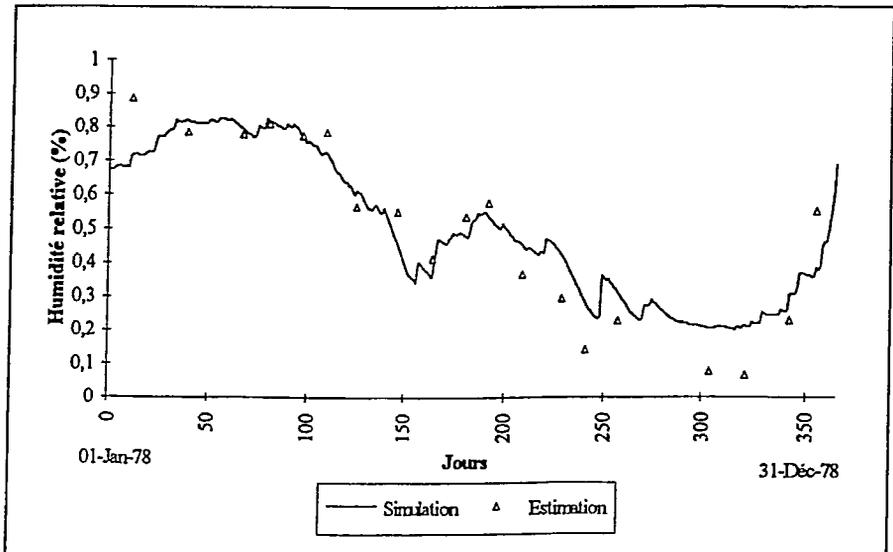


Assimilation des humidités de surface par relation de corrélation saisonnière.

Fig. 1 - BVRE de l'Orgeval



Assimilation des humidités de surface sur l'année 1978.



Assimilation des humidités globales sur l'année 1978.

Fig. 2 - BVRE Orgeval

VICQ (SAMER 8)

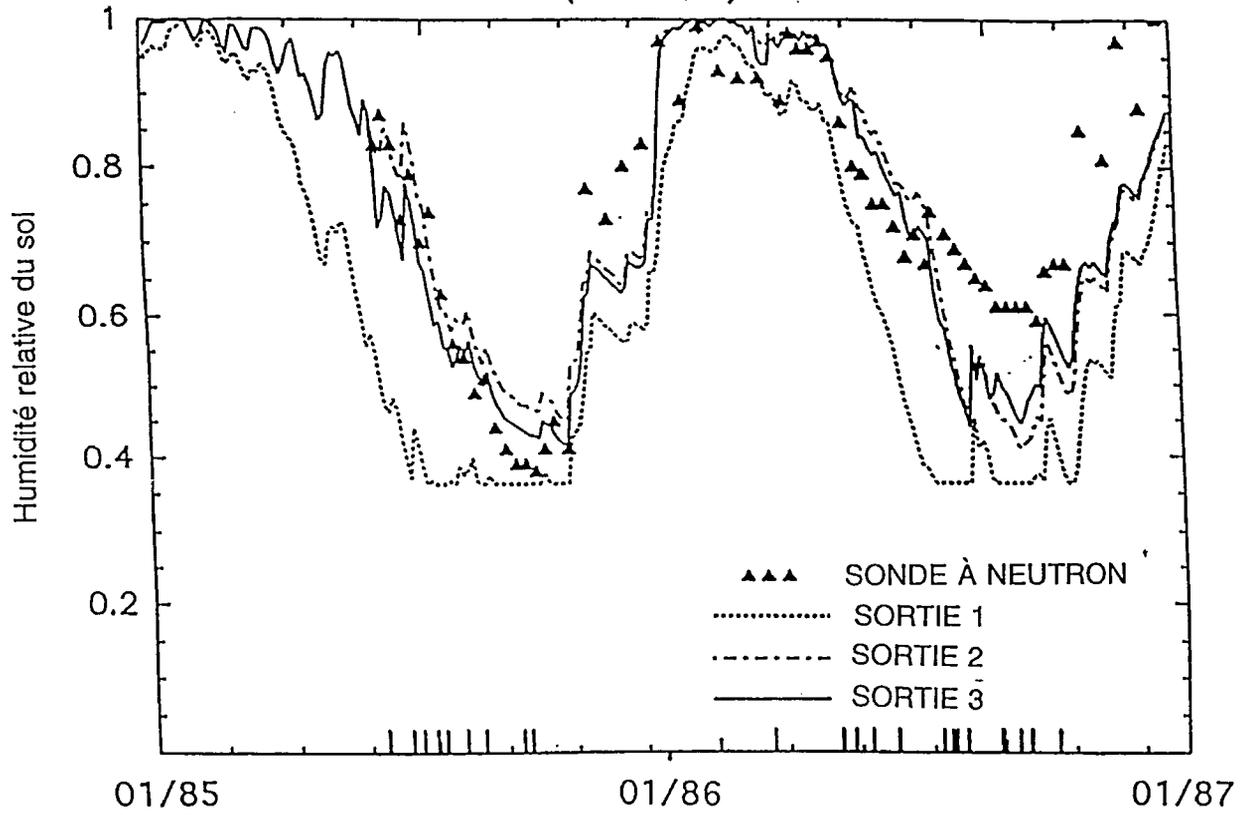


Fig. 3 - Hapex - Mobilty

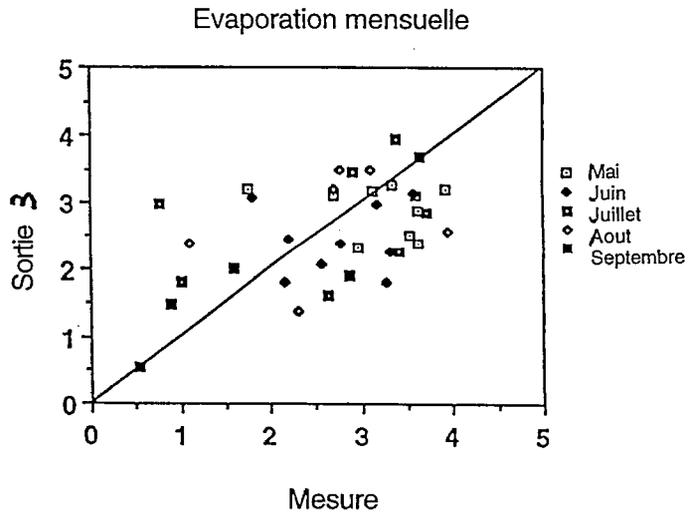
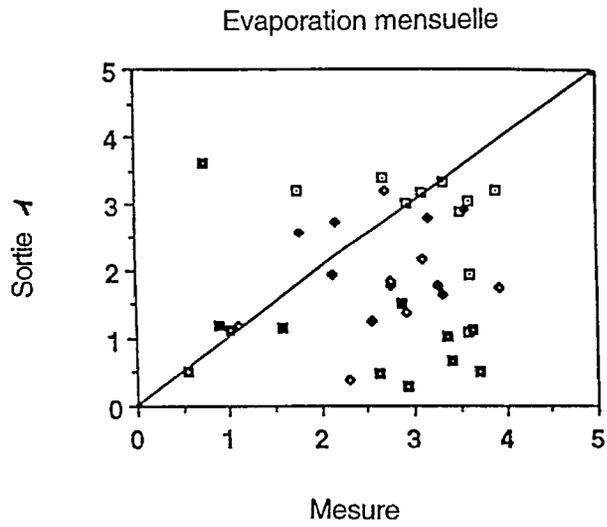


Fig. 4 - Hapex - Mobilhy

Modélisations hydrologiques et BVRE

Michel VAUCLIN

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
(CNRS URA 1512, UJF, INPG)
BP 53 - 38041 Grenoble Cedex 9

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants reste à l'heure actuelle assez mal connu, même si les études in-situ menées depuis une trentaine d'années, notamment sur les petits bassins de Recherche ont contribué de façon significative à apporter des éléments de réponse à deux des questions fondamentales qui se posent à l'hydrologie :

- *que deviennent les précipitations ?*
- *d'où provient l'eau des ruisseaux, rivières et fleuves ?*

Un examen des revues bibliographiques réalisées ces dernières années à travers de nombreuses polémiques, voire confusions en grande partie liées à la complexité et à la variété des situations rencontrées montre notamment :

- une évolution lente des connaissances basiques,
- une clarification progressive de la terminologie et de la formalisation,
- un développement pléthorique de modèles mathématiques, grandement favorisé par le développement des moyens informatiques disponibles pour traiter les données hydrologiques.

Dans le cadre de cette brève communication, il est évidemment exclu et prétentieux de prétendre traiter l'ensemble de ces aspects dans toute leur généralité. On se propose de faire un point sur la modélisation mathématique (il en existe d'autres !...) en liaison avec l'outil expérimental BVRE.

Un modèle est considéré comme une image schématique (et non comme un exemple à suivre, ou pire comme un code numérique) d'une réalité complexe. Dans la mesure où un BVRE est une boîte plus ou moins noire, soumise à des contraintes et des évolutions, il sera susceptible de se mettre sous la forme générale suivante :

$$Y = F(X_i, a_j) + e$$

où X_j et Y sont les vecteurs des variables d'entrée et de sortie respectivement, a_j les paramètres et e l'erreur commise en assimilant l'objet d'étude à son image. Elle permet une classification (il en existe d'autres) des modèles :

- un modèle conceptuel (de type mécaniste ou fonctionnel) correspond à une fonction F fondée sur une certaine connaissance (et pas nécessairement certaine) des processus impliqués,
- lorsque F résulte d'expériences, il s'agit d'un modèle empirique,
- quelle que soit la nature de la fonction F , assimiler les variables d'entrée et/ou les paramètres à des Fonctions Aléatoires conduit à un modèle stochastique. Dans le cas contraire, il s'agit d'un modèle déterministe.

Le choix de la relation F dépend de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci, on peut citer

- "la paire de lunettes" avec laquelle le concepteur du modèle perçoit la réalité,
- sa formation,
- la disponibilité des données,
- les objectifs cognitifs ou opérationnels.

Il me paraît nécessaire ici de rappeler le rôle important et multiforme joué par la modélisation des processus hydrologiques qui ne doit pas être développée pour elle-même et indépendamment des études expérimentales (attention à ne pas développer une "hydrologie massivement parallèle : l'une noble : le modèle et l'autre humble : la mesure !).

En effet, un modèle est intégrateur des connaissances (rôle structurant de la démarche scientifique), donc par voie de conséquence un révélateur des lacunes (rôle d'incitation au développement de nouvelles recherches ou à la réalisation de nouvelles expérimentations), un médiateur disciplinaire (l'hydrologue ne peut prétendre résoudre seul l'ensemble des problèmes complexes auxquels il est confronté), un outil d'aide à la décision ou à l'analyse de scénarii (rôle socio-économique de l'hydrologie) sans oublier son rôle de générateur de publications ! A cet égard, un examen de la littérature spécialisée montre que seuls les modèles qui "marchent bien" (bonne adéquation entre observations et calculs, obtenue souvent après une phase de calage d'autant plus facile à réaliser que le nombre de paramètres est important) sont publiés. Un recueil des échecs serait tout aussi, sinon plus instructif !

Cette remarque me conduit à aborder l'aspect calage et validation d'un modèle hydrologique. Quel que soit son degré apparent ou réel de sophistication (du plus simple, les réseaux neuronaux, au plus compliqué, les équations aux dérivées partielles) tout modèle hydrologique (global, distribué, semi-distribué) fait appel à

des paramètres dont la connaissance est souvent incertaine en raison notamment de la variabilité spatio-temporelle du milieu, du caractère souvent stationnel de leur détermination et de leur coût d'acquisition. Deux situations doivent être envisagées :

- les phénomènes observés ou facilement observables (i.e. états et écoulements de surface),
- les phénomènes difficilement ou pas observables (i.e. écoulements souterrains).

Dans le premier cas, la ségrégation d'une série chronologique de données en deux parties permet au moins en théorie, de réaliser successivement le calage (identification des paramètres par minimisation d'une fonction objectif) puis la validation dont le degré de satisfaction est apprécié par des critères différents selon l'objectif de modélisation recherché. Comme le souligne G. De Marsily (1993) cette procédure s'apparente à la tragédie grecque : pour être pertinente, elle doit satisfaire aux contraintes d'unité de lieu, d'action et de temps. L'extrapolation du modèle au-delà du domaine sur lequel il a été calé puis validé suppose l'hypothèse d'émergence totale. Les paramètres a_j ont atteint leur valeur asymptotique, invariante avec l'échelle, donc représentative. Or, la variabilité du milieu notamment des sols conduit à la remise en cause de cette hypothèse, notamment pour les lois de Darcy et de Fick. L'outil BVRE (sous réserve que R est pour Recherche et non représentatif), surtout avec un emboîtement de bassins est pertinent pour étudier les émergences partielles, en liaison avec le pseudo-concept d'aire élémentaire représentative. Il constitue également une opportunité à saisir pour étudier les relations phénoménologiques entre les paramètres décrivant le fonctionnement hydrologique et ceux relatifs à la description de la géométrie du milieu, de son organisation dans l'espace. Il s'agit là d'une solution alternative au problème de l'extrapolation spatiale d'un modèle, dans la mesure où il s'agit de rechercher des relations quantitatives et robustes entre structure du milieu et fonctionnement.

Il est trivial de mentionner que toute modification de l'action à modéliser (nature et dimensionnalité des écoulements, nature des substances chimiques susceptibles de migrer, etc...) condamne le modèle calé à la réclusion à perpétuité. De même, tout changement climatique et/ou anthropique va engendrer des modifications du milieu qui font que l'hypothèse d'invariance des paramètres calés relèvent de l'acte de foi. Là encore, le BVRE vu comme un observatoire à long terme, est un outil indispensable pour étudier les non stationnarités et apprécier la capacité des modèles à les pronostiquer.

Dans le cas des phénomènes pas ou difficilement observables (i.e. écoulements souterrains actuels, comportement des hydrosystèmes dans le futur,...) les paramètres du modèle ne peuvent plus par essence même être inférés par calage, ou apprentissage. Il faut donc être capable de décrire le fonctionnement hydrologique du système indépendamment (ou presque) des observations. Le

travail de modélisation s'inscrit à l'amont de celle-ci. Plusieurs pistes peuvent être suggérées :

- géométrisation du réel consistant en une description quantitative du milieu (forme, organisation des objets et ou des unités à étudier) aussi fidèle et précise que possible et, conduisant à une représentation stochastique qui permet la génération d'un grand nombre de réalisations du milieu "réel". Leur variabilité est une mesure de l'incertitude qu'il est possible de réduire par un conditionnement à quelques observations locales, si elles sont disponibles.
- déglobalisation des processus.

Alors que la démarche naturelle de la modélisation hydrologique est la globalisation (notamment par la paramétrisation des processus se produisant à une échelle inférieure à celle du fonctionnement du modèle), il s'agit ici de la tendance inverse : la descente aux enfers des mécanismes élémentaires. Cette démarche, évidemment lourde, est cependant la seule qui soit scientifiquement fondée. Le BVRE, vu comme un Laboratoire de terrain, ou un site d'accueil à des expérimentations bien conçues, peut jouer un rôle important en complément à des études de laboratoire intra-muros.

Il paraît clair que le BVRE est un **outil** privilégié pour l'étude des systèmes complexes, non émergents et non stationnaires. Il a vocation à rechercher et à représenter les émergences partielles pouvant être modélisées pour simuler tout ou partie du cycle hydrologique, vu comme un intégrateur spatio-temporel des flux d'eau et des flux associés.

En dehors d'un manque de connaissance sur certains aspects, il me semble qu'une grande partie des verrous actuels vient de la propension des communautés scientifiques concernées par cette problématique, à limiter leur domaine d'investigation et de visions à leur propre discipline.

A cet égard, une approche pluridisciplinaire apparaît indispensable même si elle doit bousculer la sacro-sainte classification d'A. Comte ! Là encore, le BVRE vu comme une zone atelier peut contribuer à cette approche. Une tâche importante à ne pas négliger pour autant est l'application des résultats de la recherche aux problèmes concrets de la gestion des ressources en eau et en sol, en vue d'une meilleure protection de notre environnement, qu'il soit local ou global. Trop peu de modèles sont réellement confrontés à des réalités de terrain. Dans cette optique, trois points au moins doivent mériter toute notre attention :

- l'impérieuse nécessité de développer d'une part des techniques d'observations et d'analyse performantes, d'autre part des expérimentations bien conçues en vue de déterminer les paramètres pertinents et d'obtenir des données pour qualifier ces modèles en fonction des objectifs poursuivis.

- l'établissement de critères quantitatifs de validation des modèles prenant en compte leurs incertitudes et qui soient clairement identifiés et universellement reconnus. Ce dernier aspect apparaît important afin notamment de conduire des comparaisons objectives des performances des différents modèles. Là encore, l'outil BVRE est pertinent.

- alors que le nombre de modèles et de codes numériques croît de façon quasi-exponentielle, il est temps de se poser la question suivante : *la Communauté Scientifique doit-elle continuer à développer des modèles de plus en plus sophistiqués (voire spécifiques) ou doit-elle mettre l'accent sur les expérimentations de terrain ?* La réponse n'est pas anodine pour le futur. En effet, les coûts informatiques ne cessant de décroître et ceux liés aux activités expérimentales devenant prohibitifs, on constate une tendance mondiale à "observer les transferts d'eau et de substances chimiques au travers d'écrans d'ordinateurs !". Les modélisateurs doivent avoir conscience que sans des estimations fiables des paramètres et des validations bien conduites, leurs modèles apparaîtront plus comme un jeu intellectuel d'intérêt académique, que comme des outils d'aide à la compréhension et à la prise de décisions.

Lever les barrières entre expérimentation et modélisation, entre praticiens et théoriciens, entre les différentes disciplines devrait être une impérieuse obligation dans les années à venir.

Le lecteur intéressé, mais frustré par la concision de ce résumé a la possibilité de se reporter pour plus de détails à de nombreux articles de synthèse. Parmi ceux-ci (liste non exhaustive) :

AMBROISE B., 1994. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieux tempérés. Processus et modèles. Séminaire INRA - Actes à paraître (200 références).

BOWLES D.S. et O'CONNEL P.E., 1991. (Editeurs) Recent advances in the modeling of hydrologic systems. NATO, ASI Series, vol. 345 (667 pages).

VAUCLIN M., 1994. Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol : revue et état de l'art. Revue des Sciences de leau, vol. 7 : 81-102.

Actes du Séminaire "Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes", Paris, 1993. Ministère de l'Environnement/DRAEI, Ed. J.P. CARBONNEL (275 pages).

La prise en compte des eaux souterraines dans les BVRE

Thierry POINTET

BRGM, BP 6009 45060 Orléans cedex 05

Tel : 38 64 36 09 Fax : 38 64 39 90

Quel est l'apport des **Bassins versants de recherches expérimentaux** à la connaissance des eaux souterraines, comment les eaux souterraines sont-elles prises en compte lors de l'équipement d'un BVRE, sont les questions qui inspirent ces courtes réflexions.

Les expérimentations en vraie grandeur sur les eaux souterraines.

Il existe en France un potentiel important de bassins et sites ponctuels équipés de façon durable ou provisoire qui ont fait ou qui font l'objet d'expérimentations sur les eaux souterraines. Ces expériences portent sur les eaux et les substances transportées par l'eau. La seule présentation des sites avant la dimension d'un bassin et observant le milieu souterrain, réalisée à l'initiative du BRGM en 1992 (G. SISTRAC - BRGM - Éléments pour une stratégie en matière de sites expérimentaux et de métrologie) en a recensé 64. Le réseau des BVRE en est une partie. Il s'y ajoute un assez grand nombre de sites de démonstration ou d'essais, créés par les organismes de recherche et par les laboratoires universitaires qui entendent disposer de lieux de démonstration, de recherche ou de validation d'équipements de mesure.

Ce qui distingue les bassins qui entrent dans le réseau des 15 BVRE français est la disponibilité de chroniques de mesures longues et des approches multicomposantes.

Si les premiers bassins de recherche étaient essentiellement orientés vers l'hydrologie superficielle, il est reconnu depuis plusieurs années que la composante "eaux souterraines" des bilans d'eau, par les temps de réaction différents ou par la grande capacité des systèmes récepteurs, ne peut être ignorée. Si "l'hydroschizophrénie" a été enfin banni par les gestionnaires de l'eau-ressource, si elle est dénoncée par la loi sur l'eau depuis 1992, l'étude de l'eau sous tous ses régimes dans les BVRE en est le reflet.

Les particularités qui s'attachent au transit souterrain de l'eau.

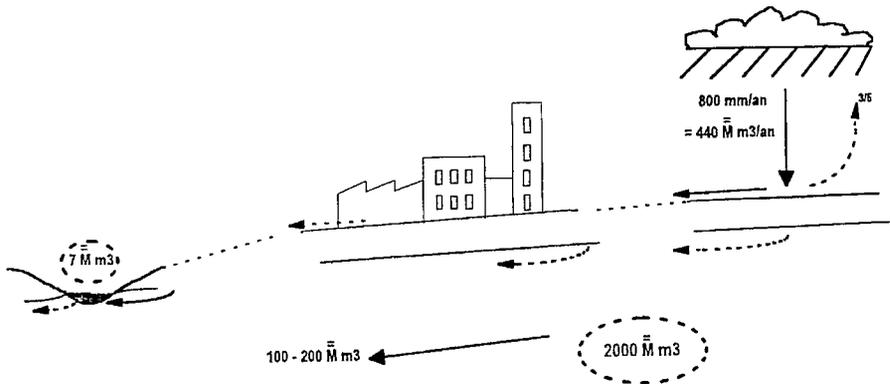
Les premières observations relatives à la composante souterraine du bilan d'eau consistent à reconnaître la distribution spatiale des masses, à en comptabiliser les flux et à en examiner la place dans le cycle de l'eau. Elle peut être étudiée pour elle-même en tant qu'eau ressource, en tant qu'eau-menace, susceptible d'accumuler et de véhiculer des pollutions. La destination de l'eau arrivée au sol soit vers la profondeur, soit vers la surface, fait partie de ces premières observations. Elle peut être l'objet d'interventions qui visent à déplacer les équilibres et modifier la répartition naturelle : on utilisera les eaux souterraines pour soutenir les étiages des cours d'eau, et l'on sait stocker en profondeur une eau ressource qui s'écoulerait trop abondamment en surface.

La première étape de l'écoulement des eaux en sub-surface est la percolation depuis le sol vers un milieu qui, n'étant pas saturé d'eau, laisse libre cours à trois sollicitations qui peuvent s'exercer sur chaque particule : la gravité, une certaine forme de dispersion et la suction capillaire. Les circulations s'y établiront de préférence verticalement. Une fois atteint le milieu saturé, les circulations seront contrôlées par la géométrie de la roche-magasin et surtout par le gradient hydraulique car l'état de saturation implique une transmission des pressions qui n'existe pas sous cette forme dans le milieu non saturé. Les circulations seront à dominante horizontale.

Ces écoulements en nappe ont pour exutoire une autre nappe, la mer, ou le plus souvent un ou une famille de points bas de la topographie donnant naissance à une source voire un sous-écoulement dans un cours d'eau déjà établi.

Cette étape occulte du trajet de l'eau est intimement liée au régime des eaux de surface puisque souvent elle en est l'origine. C'est chimiquement un milieu très réactif. Trois phases sont présentes dans la zone non saturée : solide, liquide, gaz, avec un développement intense des surfaces de contact. Cette réactivité contribue à l'évolution de la qualité -en bien ou en mal- de l'eau, mais aussi de la qualité chimique du proche sous sol. On mesure ce qu'en termes de transferts, de pollutions et d'emmagasinerments de substances introduites ceci veut dire

Le schéma ci-dessous est une évaluation sommaire des ordres de grandeur de ce que représente en France le transit souterrain de l'eau comparativement aux autres termes du cycle (les chiffres en m³ représentent les quantités d'eau présentes un instant donné et les m³/an suggèrent les flux, toutes valeurs étant cumulées à la dimension du territoire).



La circulation de l'eau sous le sol (zones non saturée et nappe) représente une composante lente du bilan d'un bassin. Il est en général difficile d'en saisir les particularités à l'échelle du bassin dans un temps compatible avec la durée d'une étude. C'est pourquoi l'étude à une échelle intermédiaire entre le modèle de laboratoire et le bassin est des plus avantageuse, d'où le grand intérêt de recourir à des sites expérimentaux de dimensions intermédiaires.

Les nouveaux axes d'intérêt.

Les questions récentes qui sont ou qui pourront être abordées par le biais d'expérimentations sur des bassins pilotes touchent surtout à la qualité de l'eau et à l'intégrité du bâti rocheux aquifère. Certaines relèvent de thématiques, d'autres s'expriment par leur finalité mais toutes gagnent à être étudiées sur des sites de dimension réduite, ainsi :

- la préservation de la qualité de l'eau,
- l'approche conceptuelle des phénomènes de pollution / dépollution et en particulier l'études des phénomènes à seuil : seuil à partir duquel un polluant n'est plus fixé : déclenchement d'une pollution, "bombes à retardement",
- les capacités d'échange dans les systèmes triphasiques,
- la réactivité chimique, de l'échelle du grain à l'échelle de la formation,
- la gestion d'une pollution, comment contrôler le flux de polluants, comment contrôler et restituer la qualité du milieu hôte.

Les BVRE orientés "Eaux souterraines".

Plusieurs projets ont justifié que l'on procède à un suivi du régime des eaux souterraines et plusieurs BVRE ont été équipés en conséquence. A titre d'exemple, le cas de Naizin en Bretagne a été conduit de la façon suivante. Le site de Naizin jouit d'une particularité : les schistes briovériens qui en constituent le substratum rocheux contiennent des quantités appréciables de pyrite qui sont à l'origine d'un processus de dénitrification naturelle, jouant sur les eaux qui percolent dans le milieu rocheux et plus spécialement dans l'horizon en cours d'altération qui

surmonte la roche saine. Ce processus joue aussi et surtout sur les eaux usées qui s'infiltrent à la proximité des élevages de porcs.

Si l'on parvient à bien diagnostiquer ce phénomène, il peut-être mis à profit pour mieux utiliser les capacités dénitrifiantes des terrains. Un certain nombre de questions reste à résoudre : quels horizons choisir, quelle est la position vis-à-vis de la séquence d'altération, quelles sont les conditions chimiques qui contrôlent le processus (conditions oxydo-réductrices, pH...)?

Le site de Naizin a fait l'objet d'un équipement approprié pour bien décrire les circulations des eaux, puis suivre les variations de composition chimique des eaux et les relations eau-roche. une approche pétrographique permettra d'aborder l'étude de la réactivité de la matière rocheuse. Le projet débouchera sur une proposition méthodologique en vue de tirer le meilleur parti des capacités naturelles des terrains et des propriétés liées aux eaux souterraines dans le cadre des plans d'occupation des sols.

Dynamique hydrogéochimique

Bertrand FRITZ

Centre de Géochimie de la Surface (CGS - CNRS)

1, rue Blessig 67084 Strasbourg Cedex

Tél : 88 35 85 39 - Fax : 88 36 72 35

Introduction

C'est l'existence de **bassins versants représentatifs et expérimentaux (BVRE)** qui a permis de développer en France, comme à l'étranger, des thématiques de recherche très variées sur les hydrosystèmes. Dans ce séminaire, les présentations d'introduction et les descriptions des principaux BVRE français actuellement en activité le montrent bien. S'il est un domaine où leur nécessité est apparue très clairement, c'est bien celui de la caractérisation de la **Dynamique Hydrogéochimique**, que l'on cherche à cerner dans les études du cycle de l'eau. Ce bref exposé tentera d'en rappeler les enjeux et les perspectives en cernant les principales questions.

Quels sont les enjeux de ces études ? Pour la société, les enjeux sont évidemment liés (1) au problème des *quantités* d'eau disponible et le risque naturel peut être l'excès d'eau comme le manque d'eau, et (2) au problème de la *qualité* de cette eau, et le risque lié aux pollutions est évidemment toujours présent. Dans tous les cas ces risques, conjugués ou non, ne peuvent être analysés, compris, prévus que par une approche scientifique de la dynamique hydrogéochimique, à différentes échelles dans les systèmes naturels forcément très complexes.

Le cycle de l'eau

Dynamique physique et chimique dans le milieu géologique

Les études du cycle de l'eau dans les conditions de sub-surface constituent un enjeu à toutes les échelles, du micro milieu, pour les processus réactionnels, au plus global pour les grands bilans. Cet enjeu est aussi bien scientifique et fondamental pour la compréhension des phénomènes, qu'économique pour tous les problèmes liés à la gestion de l'eau. A toutes les échelles, dans les hydrosystèmes, les systèmes eaux-sols-roches de subsurface sont en **déséquilibre physique** (l'eau circule) **et chimique** (l'eau réagit). Il y a donc deux moteurs pour une dynamique, physique et chimique, qu'il faut comprendre si l'on veut être à même de prévoir, en les modélisant, les fonctionnements futurs face à des perturbations nouvelles, ou les évolutions favorables lors de la résorption de perturbations actuelles, désormais maîtrisées.

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

Peut-on envisager de bien comprendre comment l'eau circule dans les systèmes naturels en étudiant très précisément sa variation de composition entre son entrée et sa sortie du système dans l'espace et dans le temps ? C'est pour répondre à cette question, entre autres, que les BVRE se sont avérés indispensables, ont été utilisés et ont montré toute leur efficacité.

Cycle naturel et cycle anthropique

La première approche des scientifiques sur ces problèmes a été dominée par l'approche physique du cycle de l'eau, approche hydrologique, guidée en cela par la nécessité de maîtriser les aspects liés à la quantité d'eau disponible dans des hydrosystèmes de collecte de l'eau, si possible peu perturbés par des effets anthropiques. Il s'agissait de bien comprendre et décrire les phénomènes de transport dans le milieu naturel fissuré ou poreux, sans réaction avec cet encaissant. Dans le même temps le développement de l'approche géochimique des mécanismes en jeu dans les hydrosystèmes s'est faite essentiellement en vision statique : étude géochimique des réactions chimiques dans le milieu naturel sans prise en compte du déplacement du fluide réactionnel. Ces approches peuvent paraître un peu caricaturales, mais le développement des modèles dits "couplés" de transport et réaction est relativement récent.

Pour comprendre la dynamique de l'eau dans les nappes, sa disponibilité dans les sources puis son transfert dans les cours d'eau, l'hydrochimie est venue compléter l'hydrologie pour étudier, dans l'espace et dans le temps, la formation d'un flux d'eau instantané et son évolution. A ce stade les éléments chimiques détectés (isotopes ou non) sont surtout utilisés comme des traceurs d'origine de l'eau : l'eau de pluie infiltrée a "vu" des roches carbonatées, silicatées ou salines, différents réservoirs se sont formés avec des caractéristiques propres en raison de ces différences minéralogiques dans l'encaissant géologique.

Le traçage chimique associé aux bilans hydriques permet une première approche hydrogéochimique du cycle de l'eau. Il permet d'isoler en particulier le message chimique d'origine anthropique par rapport aux données du système "naturel", ainsi que les diverses composantes d'un flux hydrogéochimique. Encore faut-il pouvoir montrer qu'un élément est un traceur de réaction ou de transport, selon les systèmes.

Le BVRE comme outil privilégié de cette approche

L'unité morphologique : réacteur naturel dans le cycle de l'eau

Pour mesurer, quantifier les dynamiques hydrogéochimiques, il faut définir des unités morphologiques sur lesquelles on peut étudier les phases solides et fluides en présence et leur interaction en système ouvert (où l'eau circule), tout en quantifiant cette circulation. Les BVRE ont été progressivement installés, équipés et exploités dans cette optique. Ils ont donné jusqu'à présent de très nombreux et importants

résultats dans un domaine qui va essentiellement de l'échelle métrique (parcelle expérimentale) à celle de quelques dizaines de kilomètres (bassins versants fluviaux "amont") si l'on reste dans le domaine des systèmes de relative homogénéité géologique. On n'évoquera pas ici les très grands bassins, à l'échelle continentale.

Dans ces systèmes, l'équipement de terrain a permis de mieux comprendre comment se fabrique la chimie des solutions de subsurface à partir de celle des eaux de pluie, par interaction avec les minéraux des sols et des sous-sols, et en présence de matière organique, liée au cycle de la végétation. Comprendre ces évolutions à partir des mécanismes géochimiques, c'est se préparer "en retour" à expliquer comment se fabriquent les flux d'eau dans les systèmes. L'utilisation de traceurs identifiés et validés, passe par une compréhension du comportement d'un certain nombre d'éléments chimiques-clés, à définir, contenus dans les solutions entrant dans les systèmes ou acquis au cours des évolutions par interaction eau-roche dans les différents réservoirs.

Les intérêts scientifiques et les approches méthodologiques des géochimistes et des hydrologues sont donc forcément intimement liés dans ces études combinées : les uns doivent comprendre comment les différents réservoirs d'eau se mélangent pour former un flux d'eau de sortie (origine de l'eau dans les nappes, les sources et les cours d'eau), les seconds, doivent identifier quels sont les traceurs de la contribution de ces différents réservoirs (origine des éléments chimiques dissous). Ils ne peuvent le faire qu'ensemble.

En résumé, on peut dire que les BVRE sont des observatoires naturels de terrain qui permettent de progresser (1) dans la connaissance du fonctionnement du cycle de l'eau (quantité) dans le domaine pluie - nappes - sources - cours d'eau, entre l'atmosphère, les sols et le sous-sol, et (2) dans la compréhension des mécanismes chimiques d'évolution de la qualité des eaux, qu'elles aient subi ou non une perturbation d'origine anthropique.

Exemple d'études : Les BVRE Vosgiens (voir présentation complète par B. AMBROISE)

Les études menées depuis près de dix ans à Aubure (Strengbach) et à Soultzeren (Ringelbach) illustrent bien les résultats que l'on peut obtenir par cette approche combinée entre l'hydrologie et la géochimie. Les résultats sont comparés à ceux obtenus en France plus méridionale au Mont Lozère et en Europe Centrale, en Bohême dans une sorte de "transect" à effet de pollution atmosphérique croissant.

C'est à l'échelle du BVRE que l'on a pu mettre en évidence des phénomènes très nets d'anthropisation dans le cycle de l'eau (PROBST et al. , 1987,1992) et montrer comment les systèmes naturels répondent à ces perturbations :

- les apports des retombées atmosphériques aux eaux de surface sont essentiellement dûs, en zone forestière, aux pluviollessivats qui collectent les éléments polluants captés par le couvert forestier: NO₃⁻, SO₄⁼, H⁺ ...

- les bilans d'altération des roches traduisent bien une réaction forte au flux de protons imposé par les conditions d'anthropisation (retombées acides). Le sol joue un rôle complexe de mobilisation d'éléments nutritifs (Ca, Mg) ou de poisons pour la végétation (Al...), mais transmet ce flux acide, sans l'avoir neutralisé, à l'arène granitique qui le neutralise à ses dépens (départ Ca, Si, Na, K ...);

- la perturbation indirecte, par l'effet des retombées acides, de la dynamique hydrochimique d'altération des roches est fortement croissante, lorsque l'on compare les flux d'altération des BVRE du Mont Lozère, des Vosges et enfin de Bohême, et se traduit par une exportation plus forte des cations basiques, nutritifs pour la végétation forestière;

- le bilan "normal" de l'altération des roches silicatées :

*Roches + CO₂ (atmosphère + sol) + acides organiques
= Cations + Silice + alcalinité inorganique (HCO₃⁻,
CO₃⁼, OH⁻...) + alcalinité organique.*

évolue plus ou moins nettement vers un bilan lié à la perturbation :

*Minéraux + Acides forts
= Cations + Silice + anions d'acides forts (SO₄⁼, NO₃⁻ ...).*

et les solutions résultantes sont de moins en moins alcalines et peuvent devenir neutres à acides.

Ces phénomènes sont en cours de modélisation et ont été à l'origine d'un développement original dans la modélisation géochimique, avec la prise en compte des signatures isotopiques du strontium dans l'interaction eau-roche. Le signal isotopique se construit dans les divers compartiments du système en fonction du temps de réaction et du type de minéraux, par échange ionique et par dissolution, puis par mélange de solutions. Au terme de ces travaux, l'utilisation du rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr comme traceur du réservoir d'altération des silicates pourra être validée.

Quelle perspective pour les BVRE ?

Toutes les études menées dans divers BVRE ont montré que l'on ne peut pas garantir l'accès aux bilans et aux dynamiques hydrogéochimiques sans grands risques d'erreurs, dans des études ponctuelles ou de courte durée.

Il faut étudier les systèmes dans la durée : c'est après cinq à dix ans selon les aléas climatiques à court terme de la période de référence que l'on commence vraiment à comprendre le fonctionnement du système, et que l'on est à même de discerner les réelles tendances d'évolution, les perturbations durables, les amortissements par régulations naturelles, les dépassements de seuils critiques etc...

Cet investissement à long terme sur des sites ateliers, qui parfois rebute le chercheur et l'investisseur, ne risque pas d'évoluer vers un suivi de routine si l'on combine au maximum les approches pluridisciplinaires complémentaires (hydrologie, géochimie, pédologie, biologie...) et si l'on s'oblige à aller vers une modélisation de la dynamique hydrogéochimique, seule façon de dépasser, à terme, la problématique spécifique à un BVRE donné.

Il faut aujourd'hui "croiser" les méthodes en combinant les approches chimiques "classiques" et isotopiques :

- isotopes stables ^{18}O , ^2H , en particulier, pour le traçage des circuits et mélanges d'eaux;
- isotopes radiogéniques ($^{87}\text{S}/^{86}\text{Sr}$ par ex.) pour le traçage des réactions d'interaction eau-roche et l'identification des signatures isotopiques spécifiques dans les divers réservoirs d'un hydrosystème.
- éléments traces (par analyse ICPMS) pour la caractérisation fine des contributions minérales à la chimie des fluides.

Ces études doivent permettre d'aboutir en particulier à la séparation des composantes de l'écoulement des eaux par couplage des traçages éléments majeurs - isotopes (stables, radiogéniques) - éléments traces.

Il faut également renforcer la modélisation des phénomènes de réaction-transport dans ces systèmes ouverts en s'appuyant, pour leur validation, sur des BVRE très bien étudiés sur tous les plans (géologie, géophysique, pédologie, hydrologie, minéralogie,...), et pour lesquels la pérennité de l'étude sera assurée ou prolongée sur un temps suffisamment long. C'est cette pérennité qui permettra de **lancer des études en coopération entre équipes** en France sur quelques sites adaptés à ce type d'étude et si possible déjà largement instrumentés.

Il faut utiliser ces BVRE comme base de sites plus larges et la notion de site atelier régional peut être envisagée, avec si possible, la notion de réseaux à l'image de celui lancé par la CCE - DG XII, dans le programme STEP-E.N.C.O.R.E.. Ce sont des stations pilotes d'observation du fonctionnement hydrogéochimique du milieu naturel, où l'on peut suivre l'impact de perturbations d'origine anthropique régionale, ou provoquées à titre de test. **Ce sont des ateliers de validation de modèles qui seront ensuite exportables**, à condition que l'on ait pu y développer une démarche très complète : par la pluridisciplinarité scientifique, et par la combinaison des approches de terrain, d'expérimentation complémentaire au laboratoire et sur le terrain, et finalement de modélisation théorique.

En conclusion.

On peut dire que les importants enjeux de société liés aux perturbations du cycle de l'eau, sur les aspects quantité et qualité, justifient largement un effort significatif des chercheurs sur le plan fondamental pour des recherches en coopération sur les nombreux problèmes qui restent à résoudre. A l'inverse, c'est cette dynamique de recherche fondamentale, qui nous permettra de justifier les investissements

nécessaires et le coût du suivi ultérieur, pour maintenir et développer des BVRE-sites ateliers nationaux.

Références

Les travaux à la base de cette réflexion, et dont provenaient les illustrations de l'exposé, sont référencés par AMBROISE (cet ouvrage, chapitre...) dans la présentation des BVRE Vosgiens, et par LELONG (cet ouvrage, chapitre...) pour le BVRE du Mont-Lozère. On verra en particulier FRITZ B. et al. (1984, *IAHS Publ.* 150:249-261; PROBST A. et al (1987, *IAHS Publ.* 167: 109-120; 1992, *Water Air and Soil Pollution*, 62:337-347) et l'ouvrage collectif par G. LANDMANN et M. BONNEAU (Eds): *Forest Decline and Air Pollution Effects in the French Mountains*, Springer Verlag (1994, à paraître).

Collaborations

On ne peut pas mieux illustrer le propos sur la nécessité multidisciplinaire dans ces recherches, qu'en rappelant que les résultats évoqués ont tous été obtenus en collaboration interdisciplinaire et inter-organismes, au niveau régional et national.

Pour les bassins vosgiens la coopération impliquait en particulier : le Centre d'Études et de Recherches Eco-géographiques (CEREG, ULP-CNRS, Strasbourg), le Centre de Géochimie de la Surface (CGS,CNRS,Strasbourg), le Centre de Recherches Forestières (CRF,INRA, Nancy), l'Association pour la Surveillance de la Pollution Atmosphérique (ASPA, Strasbourg), le Service Météorologique Inter-Régional du Nord-Est (SMIRNE, Strasbourg-Entzheim), l'Office National des Forêts (ONF, Ribeaupvillé).

Transfert des fertilisants et des produits phytosanitaires

Jean Joël GRIL,
CEMAGREF, Division Qualité des Eaux 3 bis quai Chauveau
69336 Lyon cedex 09
Tél : 72 20 87 13 - Fax : 78 47 78 75

Les BVRE constituent un des outils indispensables aux recherches menées sur les pollutions diffuses d'origine agricole. Depuis deux décennies ou presque pour certains, les transferts de fertilisants (azote, phosphore) font l'objet d'investigations sur un certain nombre de bassins. Plus récemment, des investigations concernant le transfert des produits phytosanitaires ont été entreprises sur quelques sites. Cette note présente succinctement l'intérêt et le rôle présentés par les BVRE dans ce type d'étude, après en avoir rappelé quelques spécificités.

Spécificités des travaux concernant les transferts de fertilisants et de produits phytosanitaires

Objectifs

L'objectif ultime est la réduction de la contamination. On peut distinguer des objectifs intermédiaires qui constituent des étapes permettant d'atteindre ce but :

- l'estimation des niveaux de contamination
- l'évaluation de l'impact de cette contamination sur la ressource superficielle
- l'identification et le classement des sources de contamination
- la recherche de solutions curatives adaptées.

Multiplicité des compétences nécessaires et des acteurs

L'étude des pollutions d'origine agricole exige l'intervention de nombreuses disciplines, en particulier : hydrologie, pédologie, agronomie, chimie, écotoxicologie, hydrobiologie...

Par ailleurs, les travaux dans ce domaine intéressent et impliquent également de nombreux acteurs (locaux, régionaux, nationaux et internationaux) :

- la profession agricole
- les collectivités
- les fabricants d'engrais et de produits phytosanitaires
- les traiteurs d'eau
- les gestionnaires de l'eau (État, Agences de l'Eau)
- les législateurs nationaux et internationaux (CEE).

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

Aspects liés à la nature des intrants agricoles

Pour mener à bien des recherches sur le transfert des substances, il est nécessaire de connaître les pratiques agricoles les concernant : nature, quantités et dates d'application.

Cette connaissance ne peut être acquise avec la précision requise que par voie d'enquête : de ce point de vue l'échelle des BVRE reste accessible à un coût raisonnable.

Les produits phytosanitaires présentent de ce point de vue une difficulté particulière : sur les quelques 450 matières actives homologuées en France, on en rencontre aisément une cinquantaine appliquées annuellement sur un petit bassin de quelques km².

Il convient de signaler, sans insister ici, une autre particularité propre à ces dernières substances : le coût des analyses et les problèmes délicats qu'elles posent (quantification et même identification des substances).

Intérêt et rôle des BVRE

Outre l'intérêt général des BVRE pour approfondir les connaissances sur le cycle de l'eau et les cycles biogéochimiques, leur contribution à ces investigations spécifiques se révèle précieuse à plusieurs titres.

Le BVRE, support des collaborations

- ils constituent un support privilégié des actions pluridisciplinaires : mesures et expérimentations sur le site même, travaux complémentaires en laboratoire, voire sur d'autres sites.
- ils constituent également un support concret des actions concertées entre les partenaires cités ci-dessus :
 - harmonisation des thèmes de recherches en évitant des répétitions inutiles, mais en prenant en compte les particularités régionales.
 - mise en place de références régionales, moteurs de la prise de conscience des problèmes et de la mise en oeuvre de techniques de correction.

Appréciation de l'importance effective des problèmes posés

- vis à vis d'une norme (nitrates, pesticides)
- vis à vis d'un impact sur le milieu aquatique

Contribution à la compréhension des mécanismes de transfert

La technique de base est l'échantillonnage dans le milieu aquatique (de surface ou souterrain) ainsi que dans le ruissellement et le milieu non saturé, induisant des expérimentations in situ ou en laboratoire.

Acquisition de données pour la modélisation

La description des sites et les données de qualité sont nécessaires à la modélisation par rapport au double objectif qu'elle vise :

- la modélisation comme outil de compréhension des mécanismes
- la modélisation comme outil d'aide à la décision et de gestion, permettant de prendre en compte différents scénarios, éventuellement en s'appuyant sur des moyens cartographiques.

Connaissance du milieu

Cette connaissance est nécessaire à la mise en place du suivi, à l'interprétation des résultats de mesures et à la définition des expérimentations complémentaires. Elle apporte également une double plus-value :

- une connaissance du terrain et une vision réaliste des contraintes auxquelles sont soumis les acteurs locaux (agriculteurs, collectivités,...)
- la capacité d'identifier et de proposer des solutions curatives pertinentes, en allant si possible jusqu'à la participation à leur mise en oeuvre effective : le site atelier devient alors site de démonstration.

Dynamique des écosystèmes intérêt des bassins versants

Maurice BONNEAU

INRA Nancy Unité Microbiologique Champenoux 54280 Seichamps
Tél. : 83 39 40 75 - Fax : 83 39 40 69

Introduction

Le fonctionnement dynamique d'un écosystème est d'abord une de ses caractéristiques à court terme (pas de temps saisonnier ou annuel). D'autre part les écosystèmes sont en évolution continue sous l' influence du changement des conditions naturelles et des conséquences des activités humaines. Nous avons intérêt à comprendre leur état actuel et à prévoir leur évolution pour en évaluer les conséquences et y remédier si nécessaire.

La connaissance des flux d'éléments qui traversent les écosystèmes constitue un des moyens importants de percevoir leur dynamique. C'est cet aspect qui sera pris en considération dans ce qui suit et plus particulièrement dans le cas des écosystèmes forestiers. Il y a plusieurs échelles possibles d'étude de cette dynamique:

- l'échelle "placette": on étudie l'écosystème sur une petite surface qu'on estime représentative;
- l'échelle "bassin versant": on s'intéresse aux entrées et aux sorties d'éléments intégrées sur une surface beaucoup plus vaste, de l'ordre de quelques dizaines d'hectares;
- l'échelle d'une petite région géographique: dans ce cas, plusieurs types d'écosystèmes coexistent.

L'objectif se situe au niveau du sol et du peuplement végétal

Ce qui intéresse le chercheur c'est le plus souvent une évolution de la fertilité du sol, c'est à dire la différence à long terme entre les gains (apports atmosphériques, altération des minéraux contenus dans le sol et à la base du sol) et les pertes (immobilisation dans le bois et pertes par drainage) (Figure 1).

Dans une telle problématique on peut penser que l'échelle "bassin versant" n'apporte rien. En fait on gagne beaucoup à ce que la placette étudiée se situe dans un bassin où se déroulent des recherches associées; ceci pour plusieurs raisons.

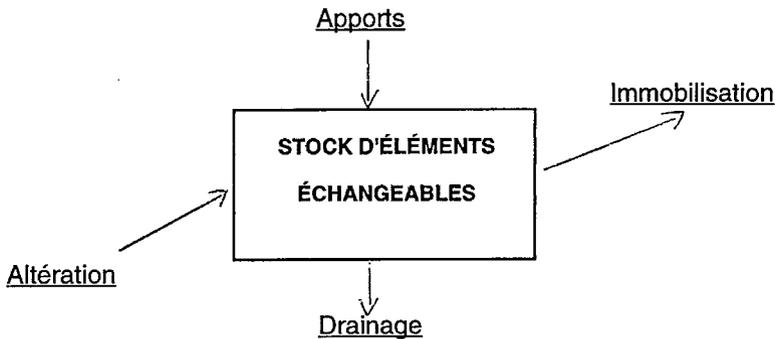


Figure 1

A) Les systèmes habituellement employés pour évaluer le drainage sont ponctuels: il s'agit souvent de plaques lysimétriques sans tension qui permettent d'obtenir correctement la composition de l'eau drainée (à la différence des bougies poreuses qui extraient une eau sous tension dont la composition est plus ou moins différente de celle de l'eau gravitaire). Mais ces plaques ne donnent qu'une idée très erronée de la quantité drainée.

Si on veut accéder à cette quantité au niveau de la placette, il faut faire la différence entre:

- pluie + apports occultes (brouillards,...);
- évapotranspiration réelle.

La pluie se mesure assez facilement, les apports occultes plus difficilement, par l'intermédiaire des pluviollessivats qui sont répartis de manière très hétérogène. Pour l'ETR on a recours à des modèles qui ne sont pas forcément bien adaptés aux conditions locales, notamment en montagne où les apports occultes, les mouvements d'air liés à la topographie peuvent modifier beaucoup la transpiration.

Si la placette se situe dans un bassin versant on a au contraire un flux de drainage exact intégrant tous les phénomènes (en acceptant l'hypothèse que le drainage à l'exutoire est égal au drainage à la base du sol). Ainsi DURAND (1969), dans la hêtraie du Mont Lozère, estime que la mesure et la modélisation des pluies sous couvert conduisent à une forte sous-estimation.

L'échelle "bassin versant" est un complément indispensable de l'échelle "placette"

B) Lorsque la placette se situe dans un bassin versant, on se demande évidemment si les résultats qu'elle fournit sont en concordance avec ceux du bassin. Généralement on s'aperçoit que la placette choisie n'est pas représentative de l'ensemble des peuplements et, pour mieux comparer les deux échelles, on va créer d'autres placettes. On va ainsi enrichir considérablement la connaissance du fonctionnement local des écosystèmes.

Exemple du bassin du Strengbach à Aubure : au début on n'avait instrumenté qu'un vieux peuplement de 85 ans. le souci de mieux faire cadrer les résultats "placette" et

les résultats "bassin" ont conduit à créer deux autres placettes dans une pessière de 30 ans et dans une pessière de 10 ans. Et on s'est aperçu grâce à cela que le fonctionnement de l'écosystème "Epicea" était très différent suivant l'âge du peuplement (Tableau I)

	Ca		Mg	
	85 ans	30 ans	85 ans	30 ans
Apports	8 à 8,5	6,1 à 6,9	1,5 à 1,8	1,4 à 1,5
Altération	0,4 à 1	0,4 à 1	0,4 à 0,5	0,4 à 0,5
Immobilisation dans le bois	4,2	9,9	0,4	1,2
Drainage	11,5	2,6	2,4	1,3
Bilan	-6,1 à -7,3	-4,6 à -6,0	-0,5 à -0,8	-0,5 à -0,7

Tableau I Flux et bilans de Ca et Mg dans deux pessières de 85 et 30 ans à Aubure, en kg/ha/an en fourchette d'incertitude pour les apports et l'altération.

On voit que , si le bilan global varie peu avec l'âge, la quantité de cations transmise à l'aval diffère au contraire beaucoup entre le peuplement jeune et le peuplement âgé. Ceci montre que, dans les milieux pauvres, on doit considérer comme totalement erronée l'idée que la quantité de cations drainés est surtout fonction de la chimie du sol et du climat

L'objectif de la recherche se situe au niveau du bassin versant

On veut connaître par exemple l'influence du type de couvert végétal sur l'érosion chimique, la composition des eaux qui alimentent les cours d'eau...

Dans ce cas, l'échelle "placette" ne convient pas et fournirait des résultats totalement erronés (Tableau II).

	pH	Ca	Mg	K	Al	N(NO3)	S(SO4)
Drainage -60cm	4.0	11.5	2.4	11.0	11.6	21.2	26.0
<i>(micro-eq)</i>	-	<i>(69)</i>	<i>(24.7)</i>	<i>(33.9)</i>	<i>(171)</i>	<i>(184)</i>	<i>(164)</i>
Débit au ruisseau	6.0	35	6.9	8.3	0	5.9	32.3
<i>micro-eq</i>	-	<i>(182)</i>	<i>(60)</i>	<i>(22)</i>	<i>(0)</i>	<i>(36)</i>	<i>(218)</i>
Bilan à -60cm	-	-6.5	-0.7	-9.8	-11.6	-18.5	-4.1
Bilan total	-	-37.1	-7.4	-7.5	0	-0.8	-10.4

Tableau II Flux et bilans à Aubure (Strengbach) à - 60 cm dans le peuplement et à l'exutoire, en kg/ha/an (d'après A. PROBST et E. DAMBRINE in BONNEAU, 1991).

Le bassin perd globalement beaucoup de calcium et de magnésium et beaucoup moins d'azote nitrique que ne le laisseraient apparaître les résultats à la base du sol, si on se limitait à eux.

Réciproquement, si on ne considérait que l'échelle "bassin", on aurait une image trop optimiste du fonctionnement du peuplement forestier: une forte perte de cations et une perte nulle d'aluminium nous feraient croire que les racines fonctionnent dans une ambiance chimique très favorable, alors que c'est l'inverse; elles sont au contact d'une solution de sol très acide et très alumineuse qui est défavorable à l'alimentation en calcium et en magnésium et le peuplement subit donc un stress chimique important.

Ici encore le couplage "placette"- "bassin" est riche d'enseignements:

- importance primordiale des phénomènes d'échange et d'altération qui se déroulent dans les arènes, pour la qualité des eaux en aval;
- mise en évidence de phénomènes de résorption des nitrates, certainement par dénitrification. Un vaste champ de recherche est donc ouvert pour savoir à quel niveau dans le bassin se situe cette dénitrification: au cours du transfert de l'eau le long des versants, à une profondeur de 60cm à 1 ou 2 mètres?, dans les sédiments accumulés en bas de versant? Sous quelle forme est réémise l'azote?

Le bassin versant "pessière" du Mont Lozère nous montre qu'on n'a pas toujours de si grandes différences entre les eaux gravitaires à la base du sol et les eaux du ruisseau (Tableau III)

	pH	Ca	Mg	K	Al	(NO3)N	SO4
Station 5	4.46	27.8	13.2	4.7	49.9	31.2	131.2
Station 1	4.3	170.4	58.7	46.9	102.9	384.1	112.2
Émissaire	5.7	149.6	86.2	8.9	tr.	202.5	56.4
<i>(Aubure ruisseau)</i>	<i>(6.0)</i>	<i>(186)</i>	<i>(60.2)</i>	<i>(22.5)</i>	<i>(tr.)</i>	<i>(35.7)</i>	<i>(218)</i>

Tableau III Composition des eaux à -40cm dans deux stations du bassin "pessière" du Mont Lozère (station 5 dans la coupe à blanc dans la partie haute du bassin et

station 1 sous un peuplement dépérissant de 60 ans, dans la partie basse) et à l'exutoire, en micro-équivalents par litre (GUILLET, communication personnelle)

Comme au Strengbach, l'eau est neutralisée à l'exutoire.. Mais, elle reste au contraire très chargée en nitrates et sa teneur en Ca et Mg n'est pas plus élevée au ruisseau que dans les eaux de drainage de la station la plus basse.

Ici on voit que ce n'est pas le trajet dans l'arène qui change la composition. C'est le transfert oblique des eaux qui est responsable de leur charge progressive en nitrates et en cations. La dénitrification en fond de bassin reste limitée. On peut cependant présumer que c'est à cette dénitrification, ainsi qu'à la disparition des sulfates, qu'est liée l'élimination de l'aluminium (par précipitation,). Si le résultat est le même qu'à Aubure, le schéma de fonctionnement est sensiblement différent.

Ces deux exemples nous montrent aussi que, vis-à-vis d'un changement de dynamique des écosystèmes, il existe deux types de bassins: des bassins fortement tamponnés, type Strengbach, qui ne peuvent réagir que faiblement aux changements survenus dans le sol et le peuplement; des bassins au contraire très réactifs, type Lozère. Le tableau IV montre dans ce dernier cas la forte réactivité à la coupe à blanc du peuplement d'Épicéa qui induit à l'exutoire une composition des eaux très différente de celle de la hêtraie, alors qu'à l'origine les compositions étaient peu différentes (les nitrates à l'exutoire de la pessière, bien qu'un peu plus élevés avant la coupe que sous la hêtraie, n'excédaient pas 30 m.eq. par litre).

	pH	Ca	Mg	K	Al	(NO ₃)N	SO ₄
Ppt -60cm	4.99	26.0	30.0	14.0	8.0	2.6	99.0
Ruisseau	5.85	47.0	26.0	4.0	tr.	1.3	66.0
<i>(Pessière) (exutoire)</i>	<i>(5.7)</i>	<i>(149)</i>	<i>(86.0)</i>	<i>8.9)</i>	<i>(tr.)</i>	<i>(202)</i>	<i>(56.4)</i>

Tableau IV Bassin "hêtraie " du Mont Lozère: composition des eaux à -60cm dans le peuplement et à l'exutoire, en micro-equivalents par litre (GUILLET, communication personnelle).

L'objectif de la recherche se situe au niveau régional

Dans ce cas, ni l'échelle "placette", ni l'échelle "bassin" ne suffisent. Il y a généralement, dans l'ensemble d'un massif montagneux, une grande hétérogénéité de situations. Pour la saisir, il faut multiplier les points d'investigation tout en simplifiant les procédures, pour des raisons de coût.

Exemple: Chimie des ruisseaux dans l'ensemble du massif vosgien (Figure 2). Il y a un grand nombre de ruisseaux acides (acidifiés) avec des taux élevés d'aluminium interdisant la vie des poissons. Cette situation est due essentiellement:

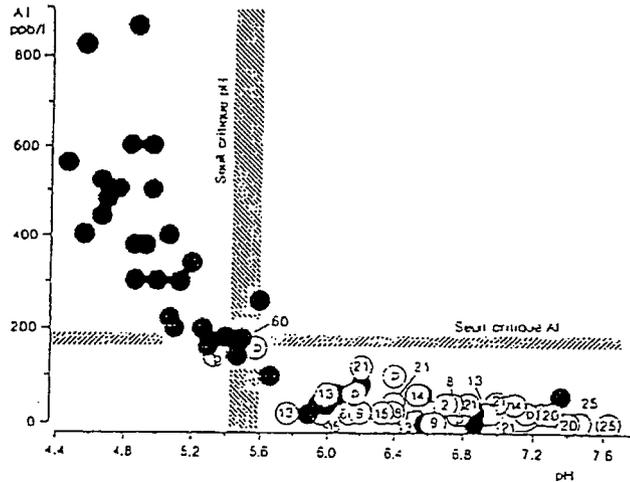


Fig. 2 : Relation entre pH et aluminium total dissous dans les eaux des ruisseaux des Vosges, pour les deux périodes de prélèvements (étiage et fonte des neiges). Les ronds noirs représentent les ruisseaux sans truites; les ronds blancs, les ruisseaux peuplés : on a indiqué le nombre de truites pêchées sur 50 m de ruisseau ("p" signifie présence); en hachuré les seuils de toxicité apparents (tirée de PROBST et al., 1990).

-à des situations géologiques: dans les bassins sur grès les arènes ne contiennent probablement pas assez de cations pour recharger les eaux (DAMBRINE *et al* 1994)

-à des situations pédologiques: horizons indurés stoppant l'infiltration profonde (GRAS, communication personnelle)

On pourrait citer aussi les résultats très différents obtenus dans les deux bassins forestiers de Forêt Noire: le bassin du Schluchsee laisse écouler des quantités relativement importantes d'azote, car la pessière, à enracinement superficiel, ne prélève plus l'azote en profondeur comme le faisait la hêtraie qui la précédait; le bassin de Villingen, où des prélèvements importants de litière ont eu lieu dans le passé, retient au contraire l'azote; au lieu d'être "saturé en azote" comme le Schluchsee, il reconstitue son capital (FEGER *et al*, 1992).

Conclusion

1° Un seul bassin versant ne peut pas être représentatif d'un ensemble régional: il ne peut l'être que d'ensembles dont l'homogénéité géologique et pédologique a été contrôlée auparavant.

2° Les flux mesurés à l'exutoire ne rendent pas forcément compte du fonctionnement des peuplements végétaux du bassin. Une eau très acide et chargée d'aluminium à l'exutoire traduit certainement des sols acides, dont le complexe absorbant cède prioritairement de l'aluminium. Mais, réciproquement, une eau neutre, non alumineuse, peut correspondre aussi bien à des sols fortement saturés qu'à des sols désaturés. Elle signifie seulement que, à un niveau quelconque du bassin, à déterminer, il y a des zones de libération importante de cations

3° Certains bassins, où l'eau acquiert surtout sa composition dans les arènes, sont peu réactifs à un changement de fonctionnement du sol et du peuplement végétal

4° De la même façon l'étude d'un écosystème, à l'échelle d'une ou plusieurs placettes, ne permet aucune prévision de la composition de l'eau des cours d'eau en aval qui est profondément influencée par les trajets que peut suivre l'eau avant de gagner l'exutoire du bassin. Il faut donc étudier ces trajets pour comprendre ces processus.

5° L'étude combinée de plusieurs peuplements végétaux à l'échelle du bassin, est par contre très riche d'enseignements: d'une part elle incite les biologistes à diversifier leurs études en fonction des types de peuplements représentés dans le bassin,; d'autre part cette combinaison renseigne sur la nature et dans une certaine mesure sur la localisation des transformations que subit l'eau après son contact avec les racines et le sol des peuplements végétaux. Enfin en montrant que, à partir d'une roche-mère homogène, se sont différenciées des couches de chimisme très différent, elles alertent les hydrochimistes sur les risques de modification des eaux à long terme, en fonction de l'approfondissement du "front d'acidification", et les incite à localiser ce front et à chercher à prévoir l'évolution de sa profondeur.

C'est de toute évidence cette étude conjointe qu'il faut privilégier dans la mesure du possible: elle permettra de mieux comprendre la manière dont est acquise la chimie des eaux dans le bassin; elle permettra de détecter les processus de fonctionnement qui sont encore à élucider.

Bibliographie

BONNEAU M. , 1991 .Effets de la pollution atmosphérique par l'intermédiaire du sol. 2^{ème} rapport DEFORPA. ENGREF Nancy, 95_109.

DAMBRINE E., BONNEAU M., RANGER J., MOHAMED A. D., NYS C., GRAS F., 1994 Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norwau Spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). In "*Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in french mountains*". Springer Verlag.

DURAND P. 1989. Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pessière, hêtraie, pelouse) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France). *Thèse de doctorat de Sciences de la Terre de l'Université d'Orléans*, 78 pages +tableaux et figures

FEGER K.H., BRAHMER G., ZÖTTL H.W., 1992. Projekt ARINUS.-Stickstoff-umsatz und Auswirkungen der experimentelle Ammonsulfatgaben. In "*8 Statuskolloquium des P.E.F.*". Kernforschungszentrum Karlsruhe, März 1992.199-211

PROBST A., MASSABUAU J.C., PROBST J.L., FRITZ B., 1990. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides: rôle de la végétation et du substratum, conséquences pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges. *C. R. Acad. des Sciences Paris, t. 311, Série II*, p.405-411.

Les crues rapides

Bernard CHOCAT

INSA Méthodes 304 69621 Villeurbanne cedex

Tél. : 72 43 81 89 - Fax : 72 43 85 21

Définition.

Une crue peut-être définie comme l'augmentation plus ou moins brutale du débit d'un cours d'eau due à une précipitation. Elle est caractérisée par son hydrogramme, courbe représentant les variations du débit en fonction du temps.

Selon la rapidité d'évolution du phénomène, on distingue souvent les crues fluviales et les crues torrentielles (ou crues rapides), même si le passage d'un type de crue à l'autre est continu.

- les crues fluviales affectent des cours d'eau importants, alimentés par des bassins versants de grande dimension. Elles sont dues à des précipitations abondantes et de longue durée. La montée des eaux est lente, la crue se prolonge parfois plusieurs jours après la fin des précipitations. Les dégâts matériels causés par ce type de phénomène sont souvent considérables, en revanche la lenteur de la montée des eaux permet souvent d'évacuer les personnes exposées et limite les risques d'entraînement et de noyade.

- les crues torrentielles (ou crues rapides, ou crues subites, ou crues éclairs) peuvent apparaître sur n'importe quelle partie du réseau hydrographique (permanente ou non), et leurs conséquences peuvent devenir dommageables même pour de tout petits bassins versants (quelques dizaines d'hectares). Elles sont causées par des pluies convectives affectant parfois seulement une partie du bassin versant et sont caractérisées par une très grande rapidité d'évolution. La montée des eaux est très brutale et ne laisse que peu de temps pour alerter les riverains.

Ce sont les crues rapides qui, dans les pays développés, sont les principales responsables des mortalités par noyade. C'est également ce type de crue qui caractérise le fonctionnement des réseaux d'assainissement pluviaux.

Les conséquences des crues rapides.

De 1947 à 1967, 173 170 personnes ont péri par suite d'inondations, 269 635 du fait de toutes les autres catastrophes naturelles.

Si on se limite aux crues subites, et sans parler d'événements français encore dans toutes les mémoires, l'histoire récente est jalonnée de catastrophes :

- 14 juin 1903 - Heppner (Oregon) : 247 morts sur 1400 habitants ;

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

- 15 août 1952 - Lynmouth (Devonshire, GB) : 150 mm en 5 heures - 34 morts ;
- 17 août 1954 - Farahzad (Iran) : plus de 1000 morts ;
- janvier 1967 - Rio de Janeiro : 864 morts ;
- février 1967 - Rio de Janeiro : plus de 300 morts ;
- 19/20 août 1969 - Comté de Nelson (Virginie) : 800 mm d'eau en 6h sur une station, 457 mm en moyenne sur le comté - 125 morts, 215 km de routes détruites sur 750 km ;
- 12 septembre 1977 - Kansas City : 25 morts ;
- etc...

Sur un autre plan, généralement moins dramatique, les phénomènes pluviaux courts et violents affectent les bassins versants urbains drainés par des réseaux d'assainissement sont également responsables de dégâts importants :

- Soit des dégâts matériels dus aux débordements du réseau à l'intérieur de la zone urbaine (Communauté Urbaine de Bordeaux en 1984, Banlieue nord de Paris en 1992, ville de Marseille en 1993, etc...);
- Soit des dégâts écologiques et environnementaux dus à des rejets massifs d'effluents urbains pollués dans les milieux naturels.

L'origine des crues rapides : les phénomènes convectifs.

Les crues rapides sont, sous nos latitudes, dues de façon presque exclusive à des phénomènes convectifs. Ces phénomènes ont pour origine un réchauffement localisé du sol, associé à un profil thermique instable de l'atmosphère. La première étape du processus est l'apparition de tourbillons thermiques se développent sous la forme de cellules convectives juxtaposées et plus ou moins indépendantes les unes des autres, matérialisées par des cumulus. Si la vitesse d'élévation est suffisante et si la quantité d'humidité est importante, il se forme un cumulo-nimbus qui peut atteindre des altitudes très grandes (10 à 12 km); les gouttelettes d'eau vont alors s'agglomérer, souvent sous forme de grêlons. La troisième étape du processus est une averse intense, courte (quelques dizaines de minutes), précipitée sur une surface faible (quelques dizaines de km²). Les pluies de ce type sont souvent accompagnées d'éclairs, de coups de tonnerre et de vent (orage).

Isolés, ces événements ne produisent généralement pas de conséquences catastrophiques, mais il arrive parfois que les différentes cellules convectives, au lieu de vivre chacune leur vie propre, s'organisent et provoquent des précipitations beaucoup plus durables affectant des surfaces plus importantes. Les causes provoquant ce type de situation climatique sont multiples. Un cas courant est par exemple celui d'un front froid très actif (ligne de grains) s'enroulant sur lui-même, susceptible de générer juste avant son arrivée des cellules convectives qu'il pousse devant lui et piège à l'intérieur d'une sorte de goutte d'air froid.

L'analyse des crues rapides : l'importance du phénomène pluvieux.

Que loin s'intéresse aux phénomènes extrêmes, sur des bassins versants urbains ou ruraux ou aux phénomènes plus courants sur des bassins versants urbains, l'analyse des crues rapides part du même principe : la prépondérance du phénomène pluvieux sur les autres facteurs dans l'explication de l'évolution des débits.

Deux raisons justifient cette approche :

- les bassins versants sont très petits et les précipitations (du moins leur phase active) sont courtes : seul le ruissellement direct est à considérer ;
- les intensités sont très importantes, et on peut considérer que le coefficient de ruissellement des parties du bassin versant qui contribuent directement au ruissellement devient assez rapidement voisin de 1 (pour les bassins versants urbains, les surfaces directement connectées au réseau d'assainissement sont presque toujours imperméables).

La difficulté principale pour l'hydrologue est donc de bien connaître la pluie.

L'observation des phénomènes convectifs.

L'observation des phénomènes pluvieux convectifs est difficile. Il s'agit en effet de phénomènes très rapidement évolutifs dans le temps et dans l'espace, présentant de plus deux particularités notables :

- d'une part les variations spatiales et temporelles des intensités sont liées entre elles ;
- d'autre part elles dépendent à la fois du phénomène pluvieux lui-même des caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant (altitude, pente et exposition des versants, albédo du sol, etc...).

Malgré ces difficultés, il est nécessaire de bâtir des modèles permettant de déterminer l'évolution des lames d'eau précipitées au cours du temps de manière la plus fine possible. Ceci impose de disposer d'instruments de mesure.

Les instruments de mesure utilisables appartiennent à deux familles différentes :

- les réseaux de pluviomètres au sol ;
- les radars météorologiques.

Les radars météorologiques.

Les radars météorologiques utilisent le fait qu'un champ de pluie est partiellement transparent aux ondes électromagnétiques centimétriques. Un faisceau radar émis en direction d'une précipitation va donc être réfléchi par les différentes couches que le faisceau va rencontrer au cours de son trajet. Comme de plus il existe une relation entre la réflectivité et l'intensité de pluie, l'analyse du signal retour va permettre de donner des indications sur le champ de pluie.

La Météorologie Nationale a installé un réseau couvrant la majorité du territoire français. Associé à des radars installés dans des pays voisins et à des

observations faites depuis des satellites, ce réseau permet de bâtir une image composite fournissant un ordre de grandeur de l'intensité moyenne de précipitation sur des carrés de 2 x 2 kilomètres, et sur des durées de 15 minutes. Ces échelles de temps et d'espace sont suffisantes pour de nombreuses applications.

Le radar météorologique, même s'il apporte des informations très utiles pour la connaissance des phénomènes pluvieux d'origine convective n'est cependant pas suffisant, et ceci pour différentes raisons :

- de nombreuses zones sont masquées et ne peuvent correctement être explorées par les faisceaux radars (échos de sols dus à la présence de reliefs) ;
- l'échelle de réflectivité utilisée par la Météorologie Nationale ne contient pas assez de classes pour les intensités fortes qui correspondent aux phénomènes que nous voulons étudier, le radar manque donc de sensibilité ;
- la relation entre réflectivité radar et intensité de pluie n'est pas constante et la valeur d'intensité obtenue est très imprécise.

Les réseaux de pluviomètres au sol.

Les pluviomètres les plus utilisées sont dotés d'un système de réception de la pluie de 400 à 1000 cm², c'est à dire extrêmement faible devant la dimension couverte par la précipitation. Il s'agit donc d'une mesure totalement locale du champ de pluie.

Si l'on souhaite utiliser ce type d'appareillage pour travailler sur la répartition spatio-temporelle des pluies, il faut organiser les points de mesure en réseau, c'est à dire installer un grand nombre de postes identiques, dans des conditions comparables, en les répartissant intelligemment sur le territoire d'étude et en dépouillant les données selon une procédure commune.

Le choix de la densité des postes, de leur répartition (régulière ou non) et de la surface échelonnée doit être adapté au phénomène étudié.

L'intérêt d'un BVRE dédié à la connaissance des précipitations à l'échelle fine de temps et d'espace.

L'acquisition de connaissances précises sur les phénomènes pluvieux convectifs responsables des crues rapides paraît aujourd'hui indispensable. Ce type de données peut-être utile pour l'étude des crues, mais aussi pour beaucoup d'autres applications.

Or il s'agit d'une démarche coûteuse, et surtout de longue haleine, principalement si on s'intéresse à des phénomènes rares.

Disposer d'un site dédié à ce type d'étude est donc d'un intérêt certain, même si un tel site ne correspond pas à la définition habituelle d'un BVRE.

Place des bassins versants expérimentaux dans les études sur l'érosion hydrique des sols

Jean Boiffin

INRA, Département d'Agronomie
Rue Fernand Christ, BP 101 - 02004 Laon cedex
Tél : 23 23 64 91 - Fax : 23 23 04 86

Selon le type de nuisance qui est privilégié, les études relatives à l'érosion hydrique des sols se rattachent à deux catégories de problématiques. La plus traditionnelle s'intéresse à l'érosion en tant que facteur de dégradation des sols vis à vis de leur utilisation agricole, ce qui amène à évaluer les nuisances en quantifiant les pertes en terre des parcelles cultivées. Cette problématique est évidemment prédominante dans les régions de forte érosion et où la disponibilité en eau et éléments nutritifs est fortement limitante de la production végétale.

Dans les régions d'agriculture fortement imbriquée avec les zones d'habitat, les voies de circulation et le réseau hydrographique, où l'érosion est en général plus modérée, on s'intéressera plutôt à ce phénomène en tant que source de sédiments et de substances polluantes susceptibles d'engendrer des nuisances en aval des zones érodées : inondations boueuses et pollution des eaux superficielles par les matières solides en suspension, et par le phosphore ou certains produits phytosanitaires fixés sur les particules solides.

Dans les deux cas, l'objectif général des études relatives à l'érosion sera de quantifier les flux de sédiments, et de prévoir leurs variations en fonction des différents facteurs. Mais, on n'exigera pas la même précision sur les différents flux, et on ne cherchera pas à avoir la même représentation de leur distribution chronologique et spatiale. Au total, on peut être amené à développer des stratégies de recherche assez différentes selon l'optique retenue, et la nécessité d'un recours accru à l'outil "Bassin Versant Représentatif et Expérimental" (BVRE) dans les études où l'érosion tient tout particulièrement à l'importance croissante de la problématique "nuisances aval" en France et dans les régions du Nord-Ouest de l'Europe.

Processus et formes de l'érosion hydrique

L'érosion est, par définition, le transfert irréversible de matière solide entre des zones de départ de terre et des zones de dépôt bien distinctes dans l'espace. Dans le cas de l'érosion hydrique, ce transport à longue distance est assuré exclusivement par le ruissellement et s'effectue en suspension, ce qui implique au préalable l'intervention d'un processus de détachement mobilisant des particules solides de petite taille à partir de la surface du sol.

Ce détachement, lui, peut être assuré :

- soit par l'impact des gouttes de pluies. Dans ce cas, il s'opère sur toute la surface du sol exposée aux pluies. L'importance du flux de détachement est principalement contrôlée par l'énergie cinétique des gouttes de pluie, elle-même fortement corrélée à l'intensité pluviale et dépendante du taux d'interception de la pluie par le couvert végétal;

- soit par la force tractrice des écoulements. Dans ce cas, on voit apparaître des incisions d'allure linéaire, plus ou moins espacées, que l'on appelle selon leurs dimensions griffes, rigoles ou ravines. L'importance du flux de détachement est alors contrôlée à la fois par les caractéristiques des écoulements - vitesses, débits unitaires - et par la résistance du sol à l'arrachement.

Dans l'espace, ces processus de détachement et de déplacement s'associent de façon extrêmement diverse, donnant naissance à des formes très variées qui peuvent être schématiquement classées en quatre grands types :

- l'érosion diffuse, qui se caractérise par une sorte de décapage uniforme mettant en saillie les éléments grossiers. Dans ce cas, l'agent de détachement principal est la pluie, le ruissellement n'intervenant que pour transporter.

- l'érosion de type "rill-interrill", qui se caractérise par la juxtaposition de rigoles parallèles, assez peu profondes, mais très nombreuses si on se rapporte à l'unité de surface. Le détachement de matière solide est assuré à la fois par le ruissellement, au niveau des rigoles, et par les gouttes de pluie, au niveau des interrigoles. C'est le type d'érosion principalement étudié dans tous les travaux américains réalisés depuis la fin de la dernière guerre, et auquel s'applique l'équation de prévision des pertes en terre de WISCHMEIER et SMITH.

- dans les conditions du Nord-Ouest de l'Europe, nous aurons plus souvent affaire à un autre type d'érosion qui est l'érosion par ruissellement concentré. Elle se manifeste par l'existence d'incisions profondes et larges mais très espacées et localisées de façon systématique dans des chenaux de collecte du ruissellement d'origine topographique ou agraire, par exemple des fourrières situées en contrebas d'une parcelle. Dans ce cas, le détachement est assuré presque exclusivement par le ruissellement et ses effets secondaires (mouvements de masse sur les bordures des rigoles).

- enfin, dans des conditions assez particulières on peut rencontrer de l'érosion "de talus," essentiellement liée aux mouvements de masse, engendrés par le franchissement d'un dénivelé important par un ruissellement concentré en amont.

Selon le type d'érosion considéré, les principales nuisances associées, les facteurs de risque et les moyens de prévention diffèrent. A la base, les méthodes d'étude et en particulier la dimension des dispositifs expérimentaux ne sont pas les mêmes. L'identification des formes d'érosion que l'on veut inclure dans le champ d'investigation est donc un préliminaire essentiel au choix de méthodes d'étude appropriées.

Quelques considérations sur les méthodes d'étude

Le choix de l'échelle de travail

La nécessité d'appréhender l'érosion au niveau du bassin versant s'impose à partir du moment où les talwegs constituent des zones particulièrement actives, non seulement vis à vis des dépôts et dépôts de sédiments, mais aussi en tant que collecteurs assurant de façon plus ou moins efficace la connexion entre les sources de sédiments et les zones réceptrices. Beaucoup moins évident est le choix de la procédure qu'il convient d'appliquer pour délimiter des bassins versants de façon pertinente vis à vis des études d'érosion. D'un point de vue expérimental, on a intérêt à réduire la complexité de l'entité spatiale étudiée, c'est à dire le degré de ramification du bassin versant. On peut à la limite ne considérer qu'un seul axe de concentration principal, ce qui revient à se situer au niveau des ramifications ultimes, vers l'amont, du réseau des vallons secs. Dans le contexte géomorphologique de la partie Nord du Bassin Parisien, la surface des bassins versants ainsi définis est de l'ordre de quelques dizaines d'hectares. Mais on n'échappe pas, de toutes façons, à un certain nombre de choix plus ou moins arbitraires impliquant de définir des procédures conventionnelles pour, par exemple, distinguer le talweg principal des lignes de concentrations secondaires, ou définir l'exutoire.

Les variables et relations à quantifier

Dans les études d'érosion, les principales variables à expliquer sont bien entendu les flux de matières en suspension. On ne peut alors se contenter de la mesure des exportations à l'exutoire, car la seule connaissance de cette donnée ne permet ni de localiser les zones sources de sédiment (ce qui est très important pour évaluer les risques de pollution associée), ni a fortiori d'évaluer la nuisance "perte en terre" que subissent les parcelles agricoles constituant ces zones sources. L'analyse des bilans de sédiments internes aux bassins versants montre qu'une fraction très variable, parfois très importante, des sédiments érodés est déposée avant l'exutoire des bassins versants, en bas de versant ou en fond de vallon. L'exportation nette de matières solides est ainsi la résultante de flux internes de départ et de dépôt, d'ordre de grandeur comparable, et qui obéissent à des déterminismes largement indépendants. Il serait donc peu réaliste d'espérer prédire les variations de cette résultante par une démarche de type boîte noire, sans en distinguer les composantes antagonistes. Sur le plan méthodologique, cela implique :

- d'identifier à l'intérieur du bassin différentes zones fonctionnelles et d'évaluer leur contribution à l'érosion totale : une décomposition minimale est par exemple de distinguer talwegs et versants, et au sein de ces derniers rigoles et inter-rigoles;
- de mettre en oeuvre des dispositifs de recueil de sédiments (et bien entendu de mesure du ruissellement) adaptés à cette partition - c'est à dire correspondant à différents niveaux d'organisation spatiale "emboîtés".

Il n'est pas concevable d'interpréter les flux de matières en suspension sans connaître les flux de ruissellement aux mêmes niveaux d'organisation spatiale et avec une résolution temporelle identique, voire plus fine. Là encore, c'est aux caractéristiques des écoulements **internes aux bassins** qu'il faut accéder, ce qui est bien entendu plus difficile que de mesurer ou modéliser l'hydrogramme de crue à l'exutoire.

Cette difficulté porte non seulement sur l'aspect strictement hydrologique (comment mesurer et modéliser des écoulements intermittents, très ramifiés et de relativement faible débit ?) mais aussi, en amont, sur les modalités de caractérisation appropriée du bassin, tout particulièrement dans le cas de zones cultivées dont les états de surface sont soumis à une dynamique d'évolution très importante. Cette caractérisation doit s'attacher à identifier et décrire d'une part les circuits de collecte du ruissellement, d'autre part la distribution spatiale et l'évolution dans le temps des états et propriétés physiques des surfaces qui constituent les bassins versants, en fonction des événements climatiques et des interventions culturelles.

Expérimentation et modélisation

Le schéma classique d'expérimentation sur l'érosion à l'échelle du bassin versant repose sur la sélection d'un couple de bassins aussi proches que possible dans l'espace, et de caractéristiques initiales aussi voisines que possible. Pendant une première période, on les étudie en parallèle, puis on modifie l'un d'entre eux en introduisant un aménagement, ce qui permet ensuite de procéder à un certain nombre de comparaisons soit entre bassins, soit entre périodes. Il n'est pas besoin d'insister sur la lourdeur et les imperfections d'une telle démarche, dont il ressort clairement la nécessité d'associer à ce type d'expérimentation une démarche de modélisation. Dans l'idéal, celle-ci permettrait non seulement de compléter par simulation les comparaisons, et de les mener "toutes choses égales par ailleurs", mais aussi d'étudier les effets d'un nombre a priori illimité de variantes d'aménagement, sous réserve que l'on sache traduire ces aménagements par les valeurs appropriées des paramètres et variables d'entrée du modèle.

On est à l'heure actuelle en présence de deux générations de modèles d'érosion. La première, toujours largement utilisée par les services de protection des sols, est dérivée plus ou moins directement de l'Équation Universelle des Pertes en Terres (USLE) conçue et mise au point aux USA par WISCHMEIER et SMITH entre 1950 et 1960. Cette équation empirique prédit la perte en terre à partir d'un produit de termes caractérisant l'érosivité de la pluie, l'érodibilité du sol, la longueur et l'inclinaison de la pente, l'influence des systèmes de culture et celle des aménagements. Cette approche présente, entre autres limites, celle de ne s'appliquer qu'à des portions de versants homogènes et isolées hydrauliquement de leur environnement. Elle est disqualifiée dès que le ruissellement se concentre. Un autre limite fondamentale de l'USLE est d'englober dans une même "boîte noire" des processus aussi différents que ceux de genèse du ruissellement, de détachement et de transport. Un nombre considérable d'"USLE modifiées" ont vu le jour dans l'espoir de remédier à ces défauts tout en bénéficiant de l'énorme capital de références expérimentales accumulées pour documenter l'USLE. Aucune de ces tentatives n'a abouti à un modèle largement accepté et utilisé internationalement.

Depuis 1980, on a vu apparaître aux USA une nouvelle génération de modèles qui prennent en compte de façon explicite les processus de base, et présentent une structure générale commune constituée de trois modules portant respectivement sur le fonctionnement hydrologique, le détachement de matière solide et les processus de transport-dépôt. Une partie d'entre eux s'appliquent à l'échelle du bassin versant, avec des modalités de discrétisation spatiale variées, mais de toutes façons une difficulté majeure d'utilisation qui est la multiplicité des

paramètres, et donc la lourdeur des procédures de calage. On trouve dans la littérature quelques analyses de sensibilité, mais un très petit nombre de tentatives de validation. Il semble qu'un des principaux points faibles communs à tous les modèles de ce type en cours d'élaboration ou de mise au point est, au niveau du module hydrologique, la mauvaise prise en compte de la variabilité spatiale et surtout temporelle de la structure des horizons de surface des sols cultivés, et de ses effets sur les caractéristiques hydrodynamiques du terrain : infiltrabilité, détention superficielle, rugosité hydraulique, trajet des écoulements.

Conclusion

En raison de leur imbrication croissante avec la thématique "pollution", les recherches sur l'érosion sont confrontées à des exigences de précision et de finesse de résolution spatio-temporelle beaucoup plus fortes qu'auparavant. Elles ne pourront y satisfaire qu'en résolvant un certain nombre de problèmes cruciaux qui font actuellement obstacle au progrès de la modélisation de l'érosion. Dans cette perspective, on peut suggérer un effort accru dans 3 domaines d'investigation, impliquant dans tous les cas un recours obligatoire à l'outil "BVRE" :

- l'étude de la dynamique des états de surface et de leurs effets sur les propriétés hydrodynamiques et mécaniques du sol en relation notamment avec les interventions culturales;

- la poursuite et le développement des travaux visant à mieux caractériser et prendre en compte la structure hydrologique interne des bassins versants; en s'intéressant là aussi à l'effet des structures d'origine anthropique, souvent temporaires;

- l'étude plus spécifique du couplage érosion-pollution et tout particulièrement de l'acquisition et de l'évolution de la charge polluante des sédiments. Une attention privilégiée devrait sans doute être portée à l'étude des périodes critiques qui suivent les périodes d'épandage d'engrais ou de produits phytosanitaires, et c'est tout particulièrement pendant ces périodes que l'exigence de précision évoquée précédemment est très forte pour les modèles d'érosion.

Les progrès issus de ces recherches à orientation physique ne déboucheront sur une meilleure maîtrise de l'érosion et des nuisances associées que si, en parallèle, est menée une analyse approfondie de la compatibilité entre mesures de protection et pratiques de mise en valeur, notamment agricoles, des sites concernés. Cela nécessite une recherche originale, à caractère technico-économique, qui elle aussi devra obligatoirement se situer au niveau du bassin versant, tout en identifiant les problèmes nés de la discordance entre les unités spatiales hydrologiques et les unités spatiales décisionnelles que sont les parcelles et exploitations agricoles. Il n'est pas besoin d'insister sur l'opportunité de telles recherches, dans une période où sont en cours d'élaboration de nombreuses mesures et réglementations dites agri-environnementales.

Le cycle de l'eau en conditions tropicales

Pierre Chevallier
Centre ORSTOM de Montpellier
B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex 1
tél. : 67 61 75 44 - fax : 67 41 18 06

Introduction

Dans le cadre de ce Séminaire National sur les BVRE, il est intéressant et utile de montrer combien l'étude de BVRE dans la zone tropicale revêt une grande importance pour l'étude du cycle continental de l'eau. Nous ne pouvons ici que faire une brève présentation et renvoyer aux innombrables travaux de l'ORSTOM et plus récemment du CIRAD, pour ne parler que des acteurs français.

Nous ne nous placerons ici que sous les aspects de bilan des différents termes du cycle de l'eau et, avant de présenter quelques exemples de résultats obtenus sur des BVRE, nous nous proposons de voir rapidement ce qui caractérise plus particulièrement le cycle de l'eau en conditions tropicales.

Caractéristiques du milieu tropical

Les grandes différences du milieu tropical avec le milieu tempéré, que nous connaissons en Europe du Sud, résident pour le cycle de l'eau dans les forçages atmosphériques (évaporation, précipitation) et dans la nature du milieu récepteur (sol, végétation, occupation de l'espace).

Forte évapotranspiration

Les régions tropicales présentent une forte évapotranspiration potentielle. Elle varie entre environ 1 000 mm/an dans les régions forestières équatoriales (Abidjan, Brazzaville ou Manaus) à plus de 2 000 mm/an dans les régions semi-arides du Nordeste brésilien ou du Sahel africain. On atteint des valeurs maximales proches des 3 000 mm dans les régions subdésertiques aux confins du Sahel. Dans ces zones à fort potentiel évapotranspiratoire, on observe des valeurs maximales journalières fréquemment supérieures à 10 mm.

Volume, forme et distribution spatiale et temporelle des précipitations

Les précipitations de la zone tropicale présentent une très grande variabilité dans l'espace et dans le temps. Cela va de la zone équatoriale où les précipitations

annuelles dépassent souvent plusieurs mètres par an distribués sur toute l'année à la zone subdésertique où l'on observe annuellement quelques précipitations au cours d'une saison des pluies bien concentrée dans le temps. Les grandes caractéristiques des régimes pluviométriques sont étroitement liées avec les caractéristiques du milieu récepteur (Figure 1).

Milieu récepteur

Le milieu récepteur tropical est considéré comme fragile. La végétation naturelle possède une grande complexité mise en péril par une exploitation récente, désordonnée et souvent destructive. Ce milieu est très sensible aux déséquilibres climatiques (variation de température, d'humidité). Les sols tropicaux se sont formés dans des conditions de chaleur et d'humidité qui les rendent également plus sensibles aux agressions naturelles ou anthropiques.

On classe habituellement les grandes zones hydrologiques selon les grands systèmes végétaux (Figure 1) :

- forêt
- savanes humides à sèches
- régions arides ou subarides
- grandes cultures
- milieux urbains

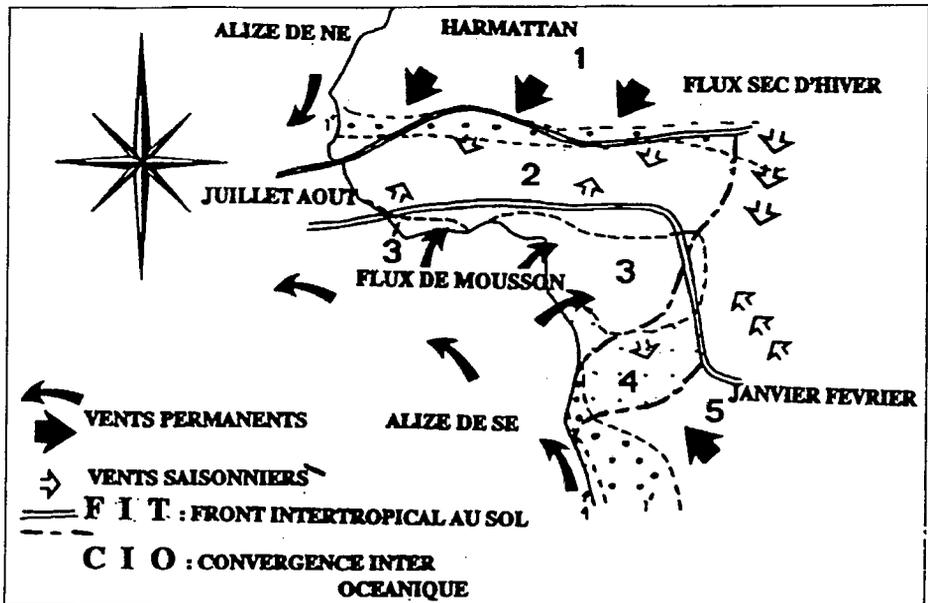


Figure 1 : Climat et végétation en Afrique de l'Ouest et Centrale. 1 : désert et régions arides ; 2, 4 et 5 : savane ; 3 : forêt dense (d'après Mahé, 1993)

BVRE en milieu tropical

Environ 350 *bassins versants représentatifs ou expérimentaux* ont été étudiés par l'ORSTOM depuis 1951 sur des durées allant de quelques mois (une saison des pluies) à plus de 10 ans (Dubreuil, 1985 et 1986). Cette collection de BVRE concerne principalement l'Afrique, mais aussi l'Amérique Latine et l'Océanie.

Jusque vers 1975 la motivation essentielle de ces études concernait l'évaluation des crues de projet dans un contexte de pays en développement où la priorité était donnée au dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (ponts, retenues, périmètres irrigués, etc...). A partir du catalogue des résultats acquis sur ces bassins, diverses méthodes d'estimation des crues de projet ont été mises au point dans la lignée du travail réalisé par Rodier et Auvray en 1965 - la fameuse *méthode Rodier-Auvray*, bien connue des aménagistes ruraux africains.

Même si des préoccupations de compréhension des mécanismes du cycle hydrologique n'étaient pas absentes dans ces premières études, ce n'est qu'à partir des années 70 que de véritables *bassins versants de recherche* ont commencé à être exploités dans les régions tropicales. Nous allons présenter dans la suite de cette exposé quelques uns des grands traits de ces bassins pour les zones hydrologiques de savane et du Sahel. Pour la zone forestière, on trouvera un exemple détaillé dans ce volume avec la présentation des bassins versants Ecerex de Guyane Française (Fritsch).

Exemples en savane (Côte d'Ivoire)

Bilan sur la période d'étude

La Figure 2 présente un exemple de la répartition de la précipitation entre le ruissellement (R, écoulement rapide de crue), l'écoulement de base (E-R), et le reste (P-E) qui se répartit entre la reprise évapotranspiratoire et les fuites par infiltration profonde ou par écoulement souterrain latéral pour quatre petits bassins de savane humide en Côte d'Ivoire. On note la très faible part des écoulements de crues devant la prépondérance absolue de la quantité (P-E) que l'on peut majoritairement attribuer à l'évapotranspiration. Il s'agit ici de valeurs annuelles moyennes sur les durées de fonctionnement des bassins versants (comprises entre 4 et 10 ans).

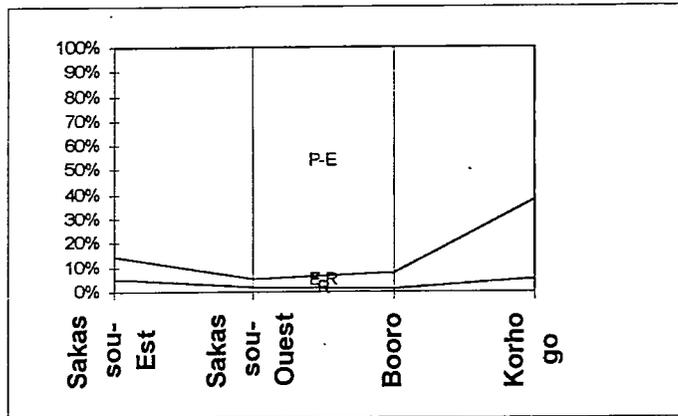


Figure 2 : Redistribution des précipitations (moyennes interannuelles sur les périodes d'étude) sur quatre petits bassins de savane humide en Côte d'Ivoire (d'après Chevallier, 1988)

Bilans hydrologiques mensuels

Lorsqu'on passe à une échelle de temps mensuelle on met en évidence une alternance de périodes hydriques déficitaires, pendant lesquelles le volume d'eau évapotranspirable dépasse le volume d'eau précipité, avec des périodes excédentaires. Durant les périodes déficitaires, on peut considérer que la quasi totalité des précipitations est reprise par évaporation ou transpiration dans les jours qui suivent. Ce n'est que pendant les périodes excédentaires qu'un stockage durable de l'eau dans le sol est possible. La Figure 3 donne une illustration de ces bilans sur le bassin versant de Booro-Borotou entre 1984 et 1988. On notera que les périodes excédentaires se réduisent aux quatre mois de l'année qui correspondent à la période centrale de la saison des pluies.

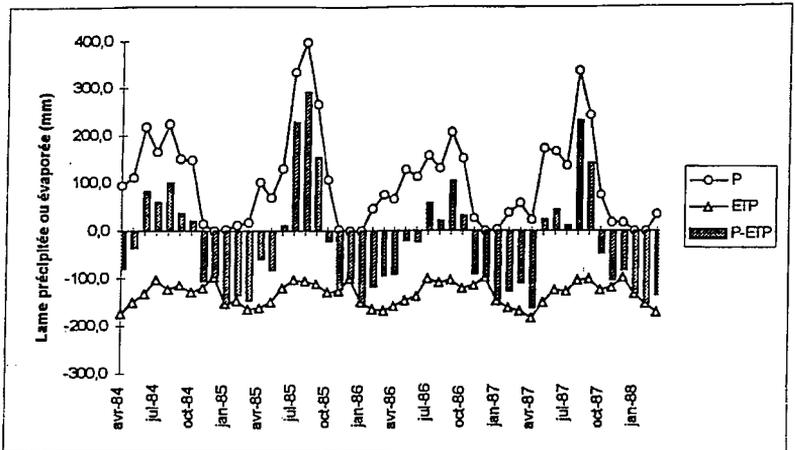


Figure 3 : Bilans hydrologiques (précipitation / évapotranspiration potentielle) mensuels sur le bassin versant de Booro-Borotou en Côte d'Ivoire (d'après Chevallier, 1988)

Complexité des mécanismes sur le versant

On observe enfin une grande diversité de mécanismes de circulation de l'eau sur le bassin versant où, selon les circonstances, on peut identifier des *chemins de l'eau* très divers : infiltration totale, ruissellement de surface, écoulement rapide subsuperficiel, infiltration de la lame ruisselée, ruissellement sur surface saturée, échanges rapides nappes/rivière et rivière/nappe, etc.. La Figure 4 illustre ces mécanismes sur un versant typique du bassin de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Cette complexité n'a, jusqu'à présent, guère été retrouvée sur les BVRE européens où généralement un mode de fonctionnement prédomine largement sur les autres.

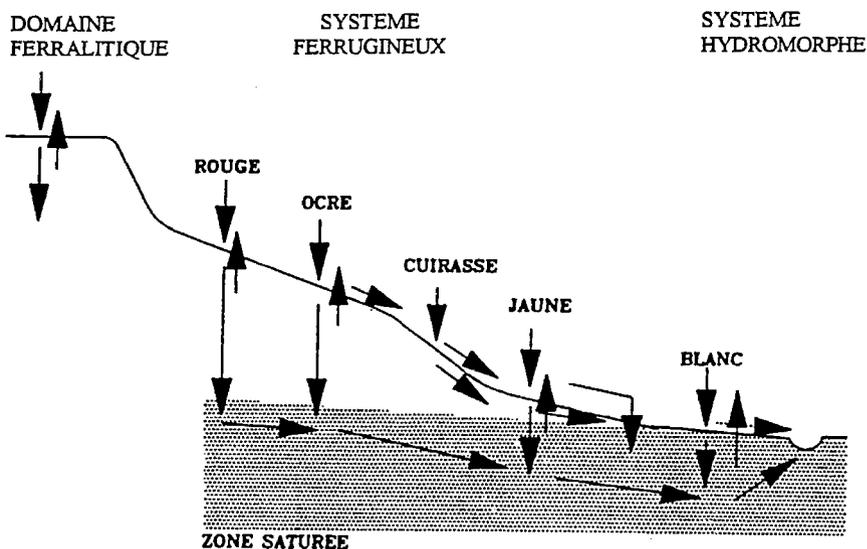


Figure 4 : Représentation schématique des chemins de l'eau sur un versant typique du bassin versant de Booro Borotou en Côte d'Ivoire (d'après Équipe Hyperbav, 1990)

Exemples au Sahel

Les états de surface

Dans les régions sahéniennes, que l'on peut définir comme celles où la précipitation moyenne interannuelle est comprise entre 200 mm et 600 mm, les mesures réalisées au cours des quinze dernières années ont montré l'importance fondamentale de *l'état de surface* du milieu récepteur dans les processus de redistribution de la précipitation. On entend par *état de surface* l'horizon superficiel du sol (limité à ses premiers millimètres), l'activité biologique qui s'y trouve associée et la végétation qui le couvre éventuellement. Un *catalogue* des caractéristiques hydrologiques (Casenave, Valentin, 1989) des principaux états de surface rencontrés au Sahel a pu être établi à l'aide d'expérimentations systématiques faites avec un petit simulateur de pluie sur 9 BVRE de la zone.

Mare d'Oursi (Burkina Faso) : bilans hydrologiques mensuels

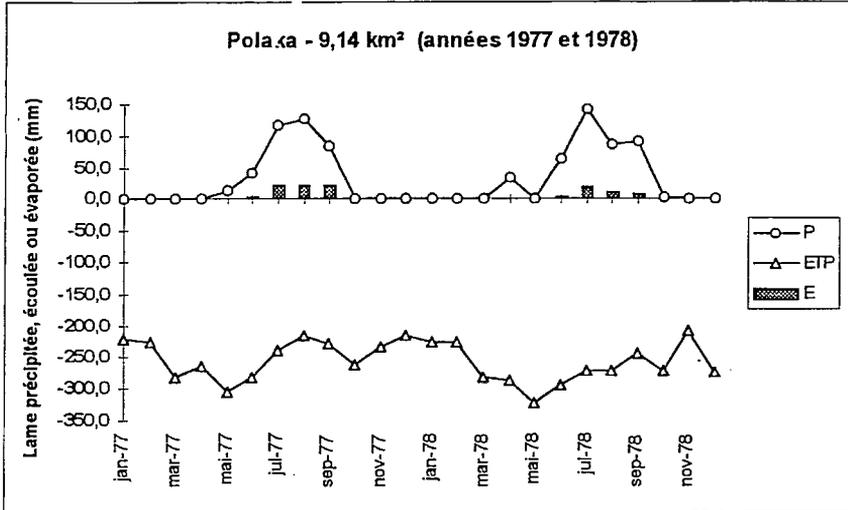


Figure 5 : Bilan hydrologique mensuel (précipitation, évapotranspiration potentielle, écoulement) sur un petit bassin versant de la région de la Mare d'Oursi au Burkina Faso (d'après Chevallier et al., 1985)

Sur cette Figure 5 (que l'on pourra comparer à la Figure 3), on note la disproportion entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations, d'une part, et, d'autre part, la faible volume proportionnel des écoulements, qui sont tous ici des écoulements de crues dans un réseau hydrographique qui reste actif sur un substratum cristallin précambrien.

Mares de la région de Niamey (Hapex-Sahel, 1991/93)

Dans une situation géologique un peu différente, celle de dépôts sédimentaires de la fin du tertiaire (continental terminal), on observe en rive gauche du Niger dans la région de Niamey une dégradation très rapide des réseaux hydrographiques primaires, qui se limitent à des ravines de versant, et un paysage de vallées fossiles qui ne sont pas hydrologiquement actives. Toutes les dépressions topographiques servent de réservoirs temporaires (mares) et sont des points privilégiés d'infiltration profonde comme l'ont montré les récentes études menées dans le cadre du programme Hapex-Sahel. La Figure 6 en présente une illustration particulièrement éloquent.

On conçoit facilement que dans un tel contexte la notion de "bassin versant" devienne rapidement futile !

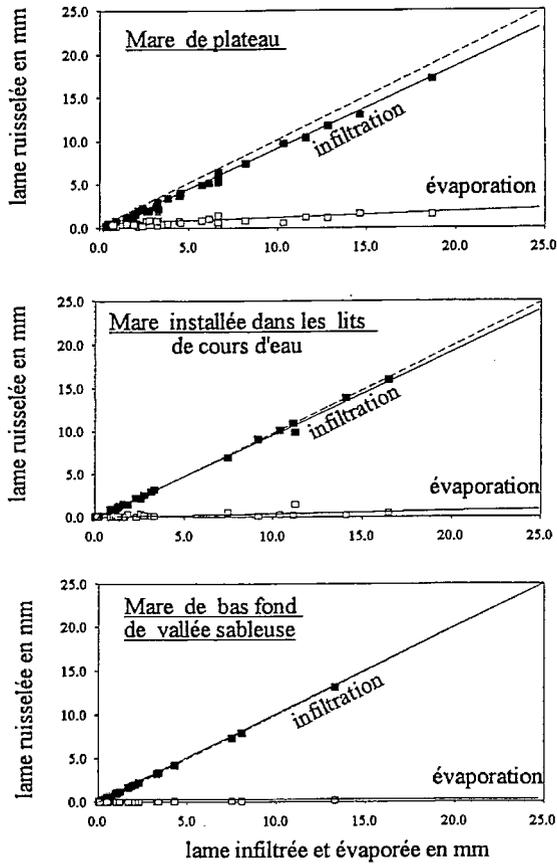


Figure 6 : Infiltration et évaporation sur trois types de mares de la région de Niamey au Niger (d'après Desconnets, à paraître)

Conclusion

Pour conclure cette rapide présentation, il faut encore une fois insister sur l'importance fondamentale de l'étude du cycle de l'eau sur des BVRE tropicaux et cela pour plusieurs raisons :

- c'est la zone où se produit la plus grande part des échanges hydriques (précipitation, évaporation) et thermiques continentaux ;

- il s'agit d'un milieu naturel fragile ;
- la pression anthropique s'y trouve particulièrement déséquilibrée dans des conditions socio-économiques défavorables.
- l'exacerbation de certains phénomènes observés en milieu tropical apporte un nouvel angle d'appréhension des mécanismes en milieu tempéré où ils se trouvent souvent estompés.

Références bibliographiques

Casenave A., Valentin C., 1989. - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris, coll. Didactiques, 230 p.

Chevallier P., 1988 (édition définitive en 1990). - Complexité hydrologique du petit bassin versant. exemple en savane humide : Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). ORSTOM, Paris, coll. Études et Thèses, 332 p + cartes hors-texte.

Chevallier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A. 1985. - Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (Burkina Faso) (1976-1981). ORSTOM, Paris, coll. Travaux et Documents, n°190, 252 p + 2 cartes hors-texte

Desconnets, à paraître. - Typologie et caractérisation hydrologique de quelques systèmes endoréiques en milieu sahélien (région de Niamey, Niger). Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, à soutenir en 1994.

Dubreuil P., 1985. - Review of field observations of runoff generation in the tropics. J. Hydrol., 80:237-264.

Dubreuil P., 1986. - Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics. J. Hydrol., 80:201-222.

Équipe Hyperbav, 1990. - Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide. Journées hydro-pédologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 12-13 septembre 1989 (5èmes journées hydrologiques de l'ORSTOM). ORSTOM, Paris, coll. Études et Thèses, 308 p.

Mahé G., 1993. - Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. ORSTOM, Paris, coll. Études et Thèses, 438 p.

Rodier J.A., Auvray C., 1965. - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM/CIEH, Paris, 46 p.

Rodier J.A., Ribstein P., 1988. - Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants couvrant de 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 133 p.

**Quel avenir,
quelles perspectives
pour les BVRE ?**

Des "BVRE" aux milieux aquatiques : problèmes d'échelles illustrés par la qualité des eaux.

Michel Meybeck
Université Paris VI
Laboratoire de Géologie Appliquée
4 place Jussieu BP 123
75252 Paris cedex 05
Tél. : 44 27 51 48 - Fax : 44 27 51 25

La plupart des Bassins Versants dits Représentatifs et Expérimentaux sont relativement petits, le plus généralement de quelques ha à quelques km², et concernent donc les cours d'eau d'ordre hydrographique un ou deux. Si beaucoup sont situés sur des milieux peu ou pas anthropisés (forêt, pelouse alpine) quelques uns comprennent des activités agricoles, élevage ou culture. Les résultats obtenus sur les BVRE, touchant tant à la qualité qu'à la quantité des eaux, sont-ils transposables facilement à des cours d'eau d'ordre supérieur, voire à des grands bassins ? Cette question sera plus particulièrement abordée ici pour la qualité des eaux.

Les études spécifiques de qualité des eaux des BVRE ont démarré il y a plus de 25 ans dans quelques bassins américains comme le Hubbard Brook (Likens et al. 1977) et se sont progressivement développées tout en restant longtemps un domaine secondaire dans des études focalisées sur la seule hydrologie. En France c'est sans doute le bassin de l'Orgeval (Belamie 1980) qui lança le premier des suivis d'exportation de nitrates puis de phosphates. Aujourd'hui les études géochimiques se sont largement développées tant en France qu'à l'étranger dans les domaines suivants :

- a. mécanismes d'altération chimique (Vosges, Réal Collobrièr, Mont Lozère)
- b. transferts d'éléments des pluies à la canopée et cycle dans la forêt (Vosges, Mont Lozère)
- c. exportation de produits liés à l'agriculture, azote, phosphore, pesticides (Naizin, Orgeval, Allegro, Beaujolais etc...)
- d. hydrologie isotopique (Ecerex, Baget)
- e. impact des changements d'occupation des sols (Mont Lozère)
- f. érosions des sols (Orgeval, Draix)

Les approches sont multiples et comprennent des suivis à long terme (>10 ans), des manipulations du bassin en grandeur nature comme des coupes à blanc de forêt ou des changements de pratiques agricoles, ou des comparaisons de bassins appariés (Ecerex, Réal, Lozère, Draix...), voisins (Vosges), ou emboîtés (Roujan, Orgeval, Réal, Naizin, Baget, Vosges).

Dans leur très grande majorité les BVRE sont homogènes quant à la lithologie du substrat.

Dans le réseau des 47 BVRE européens décrits par Hornung et al (1990), il y a environ 3/4 de bassins situés sur des roches plutoniques et métamorphiques, 1/4 de bassins sur des roches sédimentaires et aucun bassin sur roche volcanique. En France cette proportion est presque inverse, ce qui prend bien en compte notre distribution générale des types de roches. Il n'est pas sûr toutefois que le dispositif français des BVRE pour la qualité des eaux ait toujours été bien représentatif pour d'autres critères (agricole/non agricole; bassins atlantiques/méditerranéens; distribution des altitudes etc...) encore qu'on assiste depuis quelques années à un rééquilibrage vers la Méditerranée, les bassins agricoles et les bassins sédimentaires.

De part leur nature les BVRE sont implantés dans des têtes de bassins, homogènes, ils sont soumis à des impacts humains minimum ou bien ciblés et étudiés. L'extrapolation des résultats acquis sur des cours d'eau plus grands pose donc de multiples problèmes. Le premier est d'identifier si le processus dominant à l'échelle du petit bassin l'est encore aux ordres supérieurs.

Citons quelques exemples :

a. les processus de dénitrification dans les écotones nappe-rivière ne peuvent pas toujours être mis en évidence sur de tout petits bassins alors qu'ils peuvent être fondamentaux aux ordres 3 et 4.

b. le développement des végétaux aquatiques dans des réseaux hydrographiques est surtout observé aux ordres 3 et 4 pour les macrophytes et aux ordres 5 et plus pour le phyto plancton; le contrôle des nutriments (dont SiO₂) et de l'oxygène dissous qui en résulte à l'échelle des bassins ne peut, bien sûr, être étudié sur des BVRE.

c. l'érosion des sols étudiée sur les BVRE ne peut donner une mesure directe à l'exutoire des grands bassins du transport des matériaux particulaires ainsi libérés : ceux-ci sont en grande partie stockés sur les bas de pentes, les plaines d'inondation, les lacs voire les réservoirs, ainsi seulement de 1 à 10% de ces matériaux sont effectivement transportés (Walling 1983)

d. le ralentissement des cours d'eau vers l'aval permet le dépôt de matériaux fins (sablons et argiles) entre les grosses crues; les processus biogéochimiques liés à ces milieux réducteurs, comme la dénitrification, peuvent avoir une influence importante sur le "métabolisme" général du cours d'eau (Chesterikoff et al 1992).

Les principales interactions s'exerçant sur les milieux aquatiques, schématisées à la figure 1, ne sont pas les mêmes à toutes les échelles. A l'échelle des BVRE strictement forestiers (ordre 1, parfois 2) dominent les facteurs hydrologiques (précipitations, infiltrations, ruissellement), les facteurs géochimiques (dissolution et altération, néogénèse) et les facteurs biogéochimiques liés à l'écosystème terrestre (cycle du carbone, utilisateur des nutriments, évapotranspiration...). A l'échelle des BVRE agricoles (ordre 2, parfois 3) le poids des facteurs socio-économiques et en particulier des agrosystèmes peut devenir dominant (intrants agricoles et exportations des récoltes, érosion des terres arables etc...). A l'échelle des plus grands bassins (ordre 4 et plus), l'influence relative des agrosystèmes chute alors que d'autres systèmes apparaissent importants comme les villes

(imperméabilisation et ruissellement urbain, collecte et rejet des eaux usées), les cours d'eau aménagés pour la navigation ou les usages industriels de l'eau (canalisation, diversion et transfert, stockage, rejets d'eaux usées). D'un hydrosystème naturel on est alors passé à un hydrosystème largement modifié et partiellement contrôlé (crues, étiages) par la société : les facteurs socio-économiques sont alors largement dominants, le Rhône et la Seine en sont chacun un exemple spécifique.

Le deuxième problème est le non recouvrement éventuel des 4 types d'échelles pertinents aux bassins versants.

On peut distinguer :

- échelles de variabilité des processus : elles correspondent à l'échelle optimale d'étude et prennent en compte la variabilité spatio-temporelle. Ainsi la signature isotopique des pluies peut changer tous les 1/4 d'heures, la composition chimique du pluvio lessivage change en s'éloignant du tronc, l'infiltration dans le sol peut changer en quelques mètres, etc...

- échelles des méthodes d'études : elles dépendent des moyens techniques et financiers et sont souvent très différentes des échelles réelles des processus en particulier des échelles spatiales. Les signaux recueillis sont souvent intégrés dans l'espace (par exemple les débits à l'exutoire) ou dans le temps (échantillons d'eau composés par prélèvement automatique). Il est en général impossible d'obtenir des échelles d'études adéquates très proches de celles des processus sauf à des périodes très courtes de surveillance intensive (cas des études isotopiques sur Ecerex) ou pour certaines variables (enregistrement en continu de la conductivité par exemple).

- échelles des influences anthropiques : elles concernent les apports de matière diffuses (pollution atmosphérique, pollution agricole) ou ponctuelles (de la ferme aux grandes cités), et leur rétention mais aussi les modifications anthropiques des réseaux hydrographiques (canalisations, endiguements, diversions et transferts, réservoirs etc...)

- échelles des données disponibles : à l'extérieur des BVRE dans le "monde réel", la densité des données hydrologiques et/ou de qualité des eaux chute d'un facteur 100, la fréquence des observations d'un facteur 10 à 100. Les données économiques nécessaires à la compréhension et à la gestion des cours d'eau d'ordre 3 et plus sont la plupart du temps agrégés à l'échelle de la commune, du canton, des Petites Régions Agricoles ou du département.

De même que les méthodes d'études ne sont en général pas appropriées aux échelles de variabilité des processus, de même les données de base nécessaires à l'extrapolation aux ordres supérieurs sont souvent inadaptées lorsqu'elles sont comparées aux échelles des influences anthropiques qu'elles sont censées décrire. Une limitation naturelle des approches globales sur l'ensemble du bassin, est donc la qualité et la densité des informations nécessaires, tant sur le milieu aquatique lui-même que socio-économiques. Comment passer du BVRE de 1 km² où "tout est étudié tout le temps", au bassin de 1 000 ou 10 000 km², ou même plus, où les informations sont fragmentées, intégrées, quelquefois peu spatialisées ? En matière de qualité des eaux on disposera à terme sur l'ensemble de la France d'environ un BVRE pour 50 000 km² et à peine plus pour l'hydrologie pure !

Enfin une autre limite de l'utilisation des BVRE est l'existence de hyatus ou de discontinuités dans les bassins qui vont produire des changements brusques des flux, des concentrations, ou des variabilités temporelles. Les hyatus hydrologiques sont les confluences majeures où le cours d'eau change d'ordre, des lacs et des réservoirs, des pertes ou des résurgences importantes (en milieu karstique) de cours d'eau, déversions ou d'apports etc... Les hyatus liés à la qualité des eaux peuvent être naturels (changement brusque de lithologie du bassin) ou anthropiques (rejets d'eau usées). Les lacs et les réservoirs induisent également des hyatus des flux, des concentrations et de leurs variabilités. La plupart de ces hyatus peuvent être inventoriés et cartographiés à des échelles suffisantes souvent en dessous du 1/25 000 ième, et il est donc possible d'en tenir compte dans le fonctionnement général des bassins.

Plusieurs outils de changement d'échelle peuvent être utilisés comme la télédétection, la typologie, la modélisation. La première permet d'obtenir des données spatialisées sur tout le bassin à des pixels de 100 à 10 000 m². Toutefois les informations spectrales recueillies doivent être très largement validées par des données terrain avant d'être transcrites en types d'occupation des sols, états hydriques etc..., de plus seules quelques images par an sont réellement exploitables, il en résulte que cette méthode est très difficile à appliquer à l'échelle d'un grand bassin mais peut être utilisée dans des zones spécifiques et/ou des périodes particulières (plaine d'inondation). La typologie consiste à déterminer, sur des bassins sélectionnés pour cela, les facteurs de contrôle de la variable considérée, en particulier l'occupation des sols. En matière de qualité des eaux la typologie peut ainsi permettre d'établir des relations strictes entre la lithologie de bassins homogènes et la composition chimique de leurs eaux (Meybeck 1986), ce qui peut être ensuite utilisé pour estimer l'origine des flux naturels sur de grands bassins anthropisés ou non. La typologie croise ainsi des informations obtenues sur un réseau de bassins (250 bassins mono-lithologiques français étudiés dans le cas précédent) et des informations de base connues par ailleurs, telles que cartes de l'écoulement de surface, cartes lithologiques et pédologiques, informations socio-économiques etc...

La modélisation des grands bassins n'est pas encore aussi sophistiquée que celle réalisée sur les BVRE pour toutes les raisons évoquées précédemment : la quantité d'information nécessaires devient énorme. Mais des modèles répondant à des questions bien spécifiques comme la propagation d'une crue, sont déjà utilisés, avec toutes les limites d'emplois nécessaires (les relations nappe-rivière sont souvent encore mal connues). Sur le plan de la qualité des eaux les modèles d'ensemble de bassin ne prennent pas encore en compte la distribution spatiale, mais des modèles statistiques non distribués existent pour l'eutrophisation et simulent l'azote, le phosphore, le carbone organique et l'oxygène dissous moyen par ordre de cours d'eau (ordres de Strahler) (Billen et al.1994). Sans toutefois prédire la chlorophylle pour tel point particulier ces modèles ont été validés statistiquement sur la Seine jusqu'à l'ordre 7. Sur des tronçons de rivière particuliers le couplage en cours de modèles hydrodynamiques spatialisés et de modèles biogéochimiques, dans lesquels sont "injectés" les apports ponctuels et diffus, permettra d'effectuer des simulations spatialisées et en régime non-stationnaire.

Les BVRE tels qu'ils existent, ne peuvent répondre que partiellement aux questions posées par les grands bassins en particulier parce que leur taille ne leur permet

pas de prendre en compte les multiples facettes de l'anthropisation. Mais le concept fondateur des BVRE, peut encore être appliqué au milieu urbain. En France les BVRE commencent à se développer (agglomération Nantaise, banlieue parisienne, projets à Paris). Ils pourront répondre à certaines questions posées, par exemple les flux issus du ruissellement. Pour d'autres problèmes la connaissance devra être apportée par des études spécifiques qui n'auront pas nécessairement le cadre du bassin défini, propre au concept de BVRE, mais une portion de celui-ci : bief, amont-aval d'un réservoir, confluence, écotone, sans oublier les nappes phréatiques (eaux souterraines) trop peu prises en compte jusqu'ici par les BVRE, à l'exception du bassin karstique du Baget dans les Pyrénées. Les recherches en ce sens sont largement entamées en particulier dans le cadre du Programme Environnement du CNRS (Piren Seine, Piren Alsace, programmes Garonne et Rhône) et sur des bassins moyens à grands, par l'INRA (Redon) et le CEMAGREF (Charente).

D'une façon générale, il faut remarquer que les petites rivières (bassins de quelques 10 km² ou 100 km²) sont les moins bien connues : elles sont trop grandes pour être homogènes et donc être qualifiées pour des BVRE, et ne sont guère surveillées tant en débit qu'en qualité des eaux (la plupart des réseaux de surveillance commencent plutôt aux ordres 4). Par contre les portions en aval des grands fleuves, surtout lorsqu'elles sont naviguées (ordre 6 et plus) sont l'objet de nombreuses études de leurs utilisateurs. Il y a donc une lacune relative de connaissance aux échelles intermédiaires que certaines études (Vosges, Grand Morin) ont déjà entrepris de combler.

Références

Belamie R. 1980. Influence of cropping practices and hydrological factors on the variation of nitrate in the discharges from a representative basin in the Paris basin, France. *Int. Ass. Hydrol. Sci. Publ.* 130, 171,176.

Billen G., Garnier J., Hanset P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : the Riverstrahler model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia* in press.

Chesterikoff A., Garban B., Billen G., Poulin M., 1992. Inorganic nitrogen dynamics in the river Seine downstream from Paris. *Biogeochemistry*, 17, 147, 164.

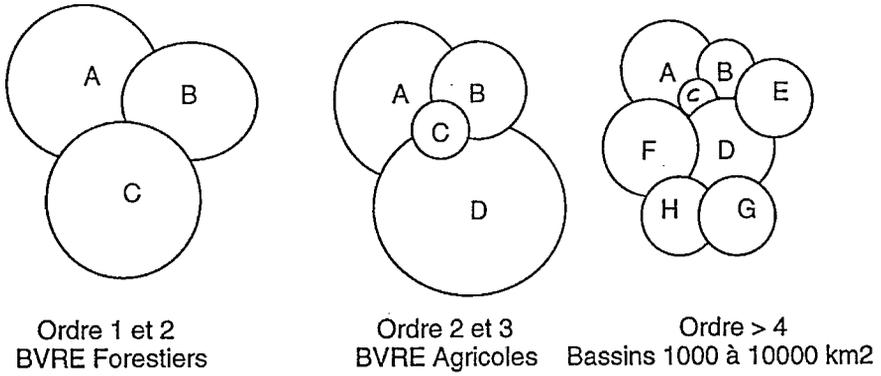
Hornung H., Roda R., Langan S.J., (eds), 1990. A review of small catchment studies in western Europe : producing hydrochemical budgets. *Air Pollution Report Series* 28, *Env. Res. Progr. CEC DG XII*, 186 p.

Likens G.E., Borman F.H., Pierce R.S., Eaton J.S., Johnson N.M., 1977. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer Verlag, 146 p.

Meybeck M. 1986. Composition chimique naturelle des ruisseaux non pollués en France, *Sci. Géol. Bull. Strasbourg*, 39,378

Walling D.E. 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrol.*, 65, 209-237.

Figure 1 : Interactions dominantes contrôlant la qualité des eaux dans les milieux aquatiques (concentration, flux, variabilité).



- A. Hydrologie
- B. Géochimie
- C. Ecosystème terrestre naturel
- D. Agrosystème

- E. Ecosystème aquatique
- F. Milieu urbain
- G. Aménagement du lit fluvial
- H. Milieu industriel

La dimension internationale des Bassins Versants représentatifs et expérimentaux

Pierre Hubert
École des Mines de Paris
CIG 35 rue de St Honoré 77305 Fontainebleau

Le besoin d'échanges au niveau international concernant les bassins de recherche qui avaient été créés et exploités un peu partout à travers le monde est apparu il y a une trentaine d'années. Il s'est concrétisé par l'organisation, sous l'Égide de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH), de plusieurs conférences internationales tenues à Budapest (Hongrie) en 1965, à Wellington (Nouvelle-Zélande) en 1979 et à Helsinki (Finlande) en 1980, conférences qui ont donné lieu à la publication de quatre volumes de comptes rendus (AISH, 1965; 1970, 1973, 1980). Un guide international des BVRE devait également être publié dans le cadre des activités du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO (Toebes et Ouryvaev, 1970).

C'est un peu plus tard, dans le cours des années quatre-vingts, qu'une importante coopération régionale s'est mise en place, avec la création du réseau euro-méditerranéen de bassins représentatifs et expérimentaux (BVRE/ERB). Ce réseau doit beaucoup à l'action de Pierre Dubreuil qui en fut le coordinateur de 1986 à 1991, et auquel succéda Hans Keller tragiquement disparu l'an dernier. L'objectif de ce réseau est de faciliter les relations entre les Équipes qui gèrent les bassins de recherche grâce à des Échanges d'informations et Également de mettre en place des opérations de recherche d'intérêt commun. Outre la tenue d'assemblées bisannuelles (Aix-en-Provence, 1985; Perugia, 1988; Wageningen, 1990; Oxford, 1992; Barcelona, 1994) le réseau publie un bulletin trimestriel bilingue (BREVE/ERB News) qui en est à son neuvième numéro. Le réseau a mis en place et nourrit une base de données ICARE (Inventory of the CAtchments for Research in Europe) gérée par le CEMAGREF de Lyon, rassemblant les caractéristiques des différents bassins de recherche ainsi que la nature des mesures qui y sont faites et des recherches qui y sont menées.

A côté des projets FRIEND Nord-Ouest et FRIEND-AMHY, le réseau européen des BVRE est une manifestation de la vitalité de la recherche hydrologique européenne qui apprend à mettre en commun ses moyens et a su inventer des modes de coopération originaux.

AISH (1965) Représentative and Experimental Areas, Symposium de Budapest, Publication AISH 66.

AISH (1970 et 1973) Symposium on the Results of Research on Representative and Experimental Basins, Symposium de Wellington, Publications AISH 96 et 97.

AISH (1980) The Influence of Man on the Hydrological Regime with Special Reference to Representative and Experimental Basins, Proceedings of the Helsinki Symposium, Publication AISH 130.

Toebe C., Ouryvaev V. (1970) eds, Representative and Experimental Basins; an International Guide for Research and Practice, Unesco Studies and Reports in Hydrology, 4.

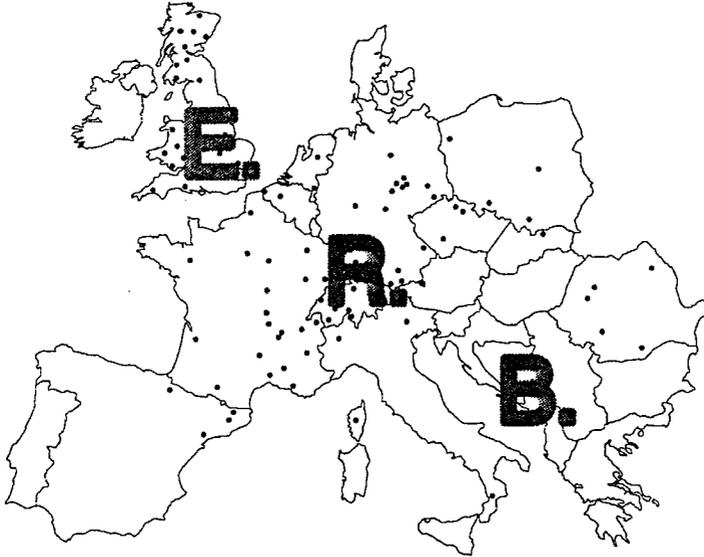
Inventory of the CATCHments for Research in Europe

I.C.A.R.E.

E R B

*European Network of Experimental and
Representative
Basins*

Information on basin
research across Europe



THE AVAILABLE DATA :
on the Inventory, July 1993

RECORD
CLASS

AIR PARAMETER
DISCHARGE PARAMETER
EROSION PARAMETER
EVAPORATION PARAMETER
LEVEL OF AQUIFER PARAM.
RADIATION PARAMETER
RAINFALL PARAMETER
RIVER NETWORK PARAMETER
SNOW PARAMETER
SOIL PARAMETER
WATER QUALITY PARAMETER

THE GENERAL RESEARCH OBJECTIVES:
on the Inventory, July 1993

AIR QUALITY
CLIMATOLOGY
DATA BASE
ENVIRONMENT
EROSION
EVAPOTRANSPIRATION
GENERAL HYDROLOGY
GLACIOLOGY
GROUNDWATER HYDROLOGY
HUMAN INFLUENCES
HYDRO-CHEMISTRY
HYDROBIOLOGY
HYDROMETEOROLOGY

HYDROMETRY
INFILTRATION
MODELLING
OTHER
POTAMOLGY
PUBLICATION
REMOTE SENSING
SEDIMENT TRANSPORT
SOIL
STATISTICS
SURFACE WATER HYDROLOGY
URBAN HYDROLOGY
WATER MANAGEMENT
WATER QUALITY

**E.R.B. : A TOOL OF RESEARCH
FOR CONTINENTAL ECOSYSTEMS**

Leaflet prepared by D. Barbet, CEMAGREF Lyon, under E.R.B. Committee control.

and edited with the french M.E.S.R. / C.S.T.-B.V.R.E. funds

 CEMAGREF

CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GENIE RURAL
DES EAUX ET DES FORETS

Élément de synthèse et de conclusion.

Christian LEVEQUE
GIP Hydrosystèmes
12 rue Cuvier 75005 PARIS
tél : 44 27 65 97 - fax : 44 27 65 95

Le GIP HydrOsystèmes a été mis en place pour développer les actions communes entre les organismes de recherche. Les BVRE sont un bon exemple de moyens communs susceptibles de rassembler des équipes pour acquérir des connaissances et bâtir des méthodologies de gestion intégrée des milieux aquatiques.

Grâce au CST BVRE, il reste un réseau de sites bien sélectionnés qui est de mieux en mieux connu et utilisé par les chercheurs. Un gros travail de remise à niveau et d'animation a été réalisé. Ce n'était pas facile car les objectifs et les finalités étaient multiples. Il faut à la fois se donner les moyens d'étudier les processus élémentaires et d'analyser plus globalement les impacts de l'activité humaine, suivre précisément des événements exceptionnels (crues) et assurer des observations de longue durée, couvrir la variété du territoire français et s'élargir au milieu tropical. Des lacunes importantes subsistent; ainsi il y a très peu de BVRE sur la façade atlantique. Mais un bon état des lieux a été dressé et les conditions sont réunies pour qu'une programmation coordonnée des recherches se développe entre tous les organismes membres du GIP Hydrosystèmes.

Quelles perspectives dégager de l'ensemble des exposés et des débats de ces deux journées ?

Tout d'abord, il en ressort une volonté générale d'ouvrir les BVRE à de nouvelles thématiques et à de nouvelles disciplines (biologie, sciences de l'homme et de la société). Cette ouverture doit être l'occasion d'une collaboration renforcée entre les équipes et entre les organismes de recherche.

Il apparaît nécessaire de pérenniser quelques BVRE fortement instrumentés pour assurer des chroniques de longue durée qui seules permettront de rendre perceptibles les évolutions sur le long terme; il faut mettre en évidence "le présent invisible". Mais il faut également garder de la souplesse et être capable de vérifier rapidement certaines hypothèses scientifiques par des expérimentations bien délimitées dans l'espace et dans le temps. Géographiquement, il conviendrait de prendre pleinement en compte les DOM-TOM.

D'un point de vue plus technique, il faut poursuivre les efforts engagés en métrologie, en envisageant peut-être de soumissionner sur ce thème au prochain PCRD de l'Union Européenne. Il faut assurer sur les BVRE la présence de personnel technique et cela justifierait une politique concertée entre tous les organismes de recherches concernés. Enfin il faut organiser en commun la mise à disposition des données en en facilitant l'accès et l'utilisation par le développement de bases de connaissances; la valorisation des données doit être double puisqu'elle intéresse à la fois les scientifiques et les gestionnaires.

Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris, 10 et 11 Mai 1994.

Pour finir, le CST BVRE apparaît comme étant toujours plus d'actualité. Sa mission devrait même se trouver élargie dans la mesure où ses liens avec le GIP Hydrosystèmes vont lui permettre de jouer un rôle d'animation renforcé. Dans cette perspective, il serait intéressant d'envisager une recomposition du CST avec un élargissement à de nouveaux partenaires afin de mieux couvrir l'ensemble du champ de compétence du GIP HydrOsystemes. Cet élargissement serait un atout pour nous aider à avancer dans la définition et la mise en place de zones ateliers susceptibles de mieux rassembler des chercheurs de disciplines différentes ou de mieux correspondre aux échelles d'intervention des gestionnaires (grands bassins fluviaux).

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 92.53.17.00
Dépôt légal : 940 — Décembre 1994
Imprimé en France

Séminaire parrainé par



MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE



9 782853 624008

CEMAGREF Éditions 1994
ISBN 2-85362-400-5
Prix : 200 F TTC