

# Des bassins versants de recherche aux bassins opérationnels : quels bassins versants pour connaître et maîtriser les pollutions diffuses agricoles ?

Jean-Joël Gril<sup>a</sup> et Jean-Marcel Dorioz<sup>b</sup>

*Les bassins versants constituent depuis longtemps une échelle spatiale essentielle pour la recherche hydrologique, puis pour l'étude des pollutions diffuses. Au-delà de l'outil du chercheur, cette approche « bassin versant » est devenue aujourd'hui une échelle opérationnelle pour la maîtrise des régimes hydrologiques et des pollutions diffuses. Après un rappel du concept de bassin versant, les auteurs proposent ici un bilan des connaissances et des méthodologies acquises, appliquées au problème de la pollution diffuse agricole, du bassin versant de recherche au bassin versant opérationnel.*

Les pollutions agricoles diffuses des eaux résultent de l'entraînement vers les milieux aquatiques, par les écoulements s'organisant dans leurs bassins versants, de contaminants et de nutriments dispersés dans ou sur les sols. De nombreuses études et recherches concernant ce type de pollution s'appuient donc pragmatiquement sur des suivis hydrochimiques réalisés à l'exutoire de bassins versants, démarche souvent qualifiée d'« approche bassin versant ». En conséquence, le bassin versant est aussi un objet d'étude hors du champ traditionnel de l'hydrologie ; il fournit des références sur les flux et les mécanismes de transfert des polluants, à une échelle qui s'adapte bien aux objectifs concrets relatifs à l'évaluation et à la maîtrise de la pollution des eaux ou à la gestion de territoires sensibles.

L'approche bassin versant est donc devenue une démarche classique en matière de pollution des eaux. Ce succès résulte d'une assez longue maturation faite de rapprochements disciplinaires entre hydrologie, géochimie et agronomie. Il constitue aussi implicitement une reconnaissance que la pollution (diffuse notamment) est un problème qui se pose et se traite à l'échelle du paysage (Wang *et al.*, 2003).

En France, les premiers bassins versants impliqués dans le cadre d'études de pollution diffuse ont une vocation de recherche appliquée : mesure des flux de nitrates dans le bassin de l'Orgeval en

Seine-et-Marne dès 1975 (Belamie, 1980), puis dans le bassin de Naizin (Morbihan ; Beaumont, 1985 ; Cann, 1990), mesure des flux de phosphore dans le Redon (Haute-Savoie ; Pilleboue, 1987), etc. Ces préoccupations initiales trouvent rapidement des relais et des prolongations avec, dans les années 80, le développement de « bassins de recherche », voués aux nouvelles problématiques concernant la modélisation des transferts de polluants ou de nutriments, puis de « bassins opérationnels » destinés à tester des actions d'aménagement ou des bonnes pratiques agricoles. Bref, en près de trois décennies, nombre de bassins versants ont été instrumentés, avec des durées de vie plus ou moins longues, des objectifs plus ou moins liés soit à la recherche soit au développement, pour caractériser le transfert de la charge solide, de nutriments (azote, phosphore), de produits phytosanitaires ou récemment de contaminants biologiques.

Tous ces dispositifs de terrain sont (ou ont été) utilisés pour mesurer des signaux de sortie (débits et concentrations à l'exutoire) et tenter d'établir des liens entre ces signaux, des entrées (pluies, engrais...) et des caractéristiques du territoire concerné (modes d'occupation des sols, pratiques agricoles, états physiques). Cette démarche générale commune s'applique à une suffisamment grande diversité de problématiques et d'objectifs, pour que l'on puisse suspecter que les concepts mobilisés pour caractériser l'objet

## Les contacts

<sup>a</sup> Cemagref,  
UR Qualité des eaux  
et prévention des  
pollutions,  
3 bis quai Chauveau,  
CP 220, 69336 Lyon  
Cedex 09

<sup>b</sup> UMR Carrtel, INRA,  
75 avenue de Corzent,  
BP 511,  
74203 Thonon-les-  
Bains Cedex

1. Cet article est issu d'une communication présentée aux Journées du CORPEN, Clermont-Ferrand, 12-13 Mars 2002.

« bassin versant » soient eux aussi variables. Ceci amène les questions suivantes : quelles définitions et quelles représentations du bassin versant servent de référence ? Quelles sont les spécificités des bassins de recherche par rapport aux bassins à vocation opérationnelle ? Quelles sont les conséquences de la problématique spécifiquement associée à un bassin, en terme de stratégie d'étude, de moyens à mettre en œuvre et de choix des sites ?

Dans cet article<sup>1</sup>, nous aborderons ces questions avec l'objectif de contribuer à l'évaluation du savoir-faire acquis en matière de bassin versant et de pollution diffuse agricole.

## Le cadre conceptuel : le bassin versant, définitions et représentations

### Le bassin des hydrologues, une référence incontournable

Dans le cadre des études de pollution diffuse, les points de vue sur l'objet bassin versant et par conséquent les représentations de celui-ci, diffèrent selon la problématique traitée. Toutes se rattachent cependant aux références fournies par les hydrologues qui considèrent le bassin versant comme l'unité de base du cycle de l'eau et comme le cadre privilégié pour aborder les questions relatives à l'origine et au devenir de l'eau (d'où vient l'eau ? Où va l'eau ?) dans une perspective de gestion.

La définition de Roche (1962) traduit bien cette conception classique « **on appelle bassin versant en un point d'une rivière, l'aire limitée par le contour à l'intérieur duquel l'eau précipitée se dirige vers ce point** ». Le bassin versant est donc vu comme un complexe physique, de pentes, de sols et de roches, qui collecte les pluies, organise les écoulements et les transferts, grâce à des processus élémentaires tels que infiltration, ruissellement, évaporation, etc. La relation pluie-débit est le thème central de cette hydrologie des bassins versants. Dans certains cas, le bassin versant sert d'outil « expérimental » pour mettre en évidence, par exemple, l'effet des traitements forestiers sur le bilan de l'eau (cas de la *Fraser experimental forest*, Troendle *et al.*, 1987).

Bien entendu, les conceptions évoluent, notamment en relation avec les progrès de la modélisation hydrologique (Villeneuve *et al.*, 1996). Le bassin versant devient un « **système ouvert, non linéaire, non stationnaire** » qui opère une **transformation de la pluie (signal d'entrée) en**

**un débit (signal de sortie) et dont les composants sont organisés en « cascade »** (De Marsily, 1980). Il est alors représenté comme un ensemble d'unités constituées par :

1) des sous-bassins – définis comme « élémentaires » car exposés à des conditions météorologiques identiques et supposés donner des réponses hydrologiques et,

2) des biefs élémentaires à caractéristiques hydrauliques uniformes, assurant la connexion entre sous-bassins (Leite, 1986). Une attention de plus en plus grande est donc portée à la géométrie du système, à la distribution spatiale des phénomènes et notamment aux zones contributives et à la relation propriétés des sols-écoulements (Mérot, 1988).

Le bassin versant des hydrologues est aussi un « territoire », support d'écosystèmes et d'activités humaines. Dans ce territoire, l'eau, du fait de son aptitude à transporter et à dissoudre, acquiert lors de son transfert une composition chimique, voire une charge en polluants, qui dépend de son trajet et des conditions naturelles et anthropiques. Par conséquent, l'étude de la composition de l'eau à l'exutoire renseigne à la fois à l'amont sur le fonctionnement biogéochimique global des bassins versants et sur l'impact de ce fonctionnement sur les écosystèmes aquatiques aval, notamment sur leurs risques de pollution. C'est cette double opportunité qui explique le développement de l'approche bassin versant hors du champ strict des disciplines hydrologiques. Une telle évolution thématique s'accompagne évidemment d'une évolution du point de vue sur l'objet bassin versant.

### Autres points de vue sur l'objet bassin versant

#### BASSIN VERSANT ET CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

Depuis les travaux de Likkens *et al.* (1977), le bassin versant sert de référence pour l'étude du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers. L'exutoire devient un point d'observation privilégié de la dynamique macroscopique et des bilans d'éléments, par exemple de nutriments (Likkens 1984). L'étude comparée de la variabilité des teneurs et des flux à l'exutoire (régime d'exportation) permet de révéler des fonctionnements clés, des couplages entre éléments et certains aspects de la compartimentation fonctionnelle de l'écosystème.

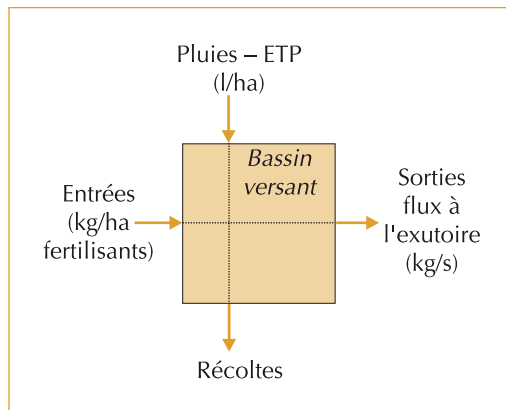
Les études ne se limitent pas aux systèmes peu anthropisés. Le bassin versant est aussi un outil d'évaluation de l'impact de perturbations locales telles que coupes, incendies, enrésinement, ou de perturbations externes comme les « pluies acides » (Dupraz, 1984 ; Durand, 1989 ; Lelong *et al.*, 1990 ; Probst *et al.*, 1995). Dans ces démarches, le bassin versant est considéré comme un « méga-lysimètre » permettant d'intégrer la variabilité spatiale et temporelle des écosystèmes et de comprendre la hiérarchie des processus impliqués dans les transferts.

#### BASSIN VERSANT ET GESTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Dans les années 70, l'émergence des problèmes de pollution des eaux liés à l'agriculture conduit les agronomes à sortir de leurs parcelles, pour s'intéresser à des bassins versants agricoles, territoires plus vastes correspondant à l'échelle où se manifeste l'antagonisme entre les pratiques agricoles et la qualité de la ressource en eau (« vraie grandeur » du problème de pollution). Le bassin versant permet aussi une caractérisation globale d'un phénomène de transfert dont les composantes présentent une extrême variabilité spatiale et temporelle (variabilité des bilans des apports, des connections...). Dans ce contexte, le bassin a d'abord fait l'objet d'une approche empirique se rapportant à un modèle de type boîte noire (figure 1).

L'objectif est de mettre en relation les entrées de fertilisants et de pluies avec les sorties à l'exutoire, de façon à définir des ratios entrées/sorties. Une telle démarche a été appliquée initialement par le CTGREF dans le bassin versant de l'Orgeval, (sous-bassin de Mélarchez ; Belamie, 1980). Il s'agit de fait d'une application du concept de bilan agronomique à l'échelle du bassin versant. Celui-ci est donc conçu comme une « méga-parcelle » qui transforme le signal d'entrée (kg) en signal de sortie (kg/s). La structure et le fonctionnement du bassin sont négligés, au moins dans un premier temps.

Ce modèle s'applique d'autant mieux qu'il s'agit d'éléments conservatifs et peu stockés lors de la migration dans le bassin. Il conviendrait parfaitement par exemple aux chlorures (mais ceci est rarement réalisé car il ne s'agit ni d'un polluant agricole, ni d'un traceur habituel de pollution). Dans certaines conditions et si l'objectif est une vue d'ensemble, il peut convenir pour l'azote, car



◀ Figure 1 – Le modèle bassin versant vu comme une boîte noire.

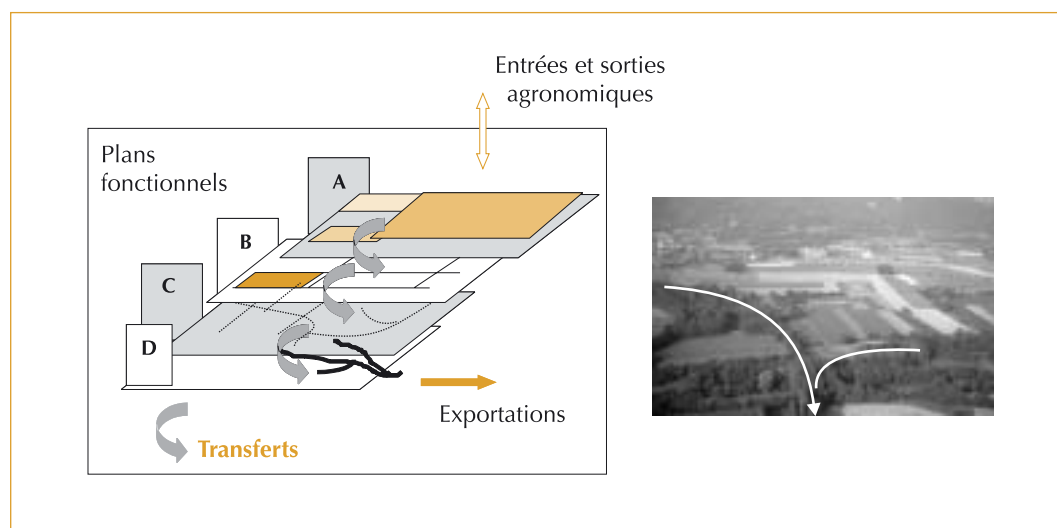
à l'échelle annuelle, entrées et récoltes pilotent le stock lessivable et globalement les sorties (flux exportés). Par contre, il n'est adapté ni pour des objectifs supposant à terme un zonage des risques de pollution, ni pour étudier le transfert diffus des composés dont les exportations dépendent beaucoup des conditions de migration dans le bassin versant, comme les formes de phosphore ou les produits phytosanitaires. La représentation adoptée doit alors tenir compte de l'organisation spatiale du bassin.

#### MODÈLE SPATIAL : LE BASSIN VERSANT « SYSTÈME DE TRANSFERT »

Les transferts de pollution diffuse ont une forte composante spatiale (Bouchardy, 1992). La représentation du bassin versant doit donc être complétée par une analyse des structures, des conditions de milieu et des activités, sans céder à la tentation de réaliser une description que les moyens techniques disponibles (SIG + télédétection), pourraient, en théorie, rendre quasi exhaustive. En fait, il s'agit d'aboutir à une simplification raisonnée de la complexité géographique de l'objet bassin versant qui respecte son organisation fonctionnelle.

Pour élaborer un modèle spatial satisfaisant à ces conditions, le bassin versant peut être conçu comme un « système de transfert » constitué par une série de stocks de contaminants potentiels répartis dans un territoire, et susceptibles d'être plus ou moins mobilisés sous l'effet des écoulements d'eau (Dorioz et Blanc, 2001). Les couplages stocks-écoulements déterminent une organisation en cascade, les stocks des sols alimentant, par exemple en phosphore, ceux du réseau hydrographique temporaire (érodats

► Figure 2 – Le bassin versant avec sa complexité, (à droite) vu comme un système de transfert ; (à gauche) organisation fonctionnelle pour le phosphore. Le concept de système de transfert est une représentation conceptuelle qui permet de raisonner l'indispensable simplification de la complexité géographique du territoire étudié.



accumulés dans les fossés...), ceux des zones tampons (macrophytes, sédiments), puis ceux des réseaux hydrographiques permanents (sédiments, biofilms...). Le territoire du bassin versant est alors réduit à quelques ensembles fonctionnels, organisés d'amont à l'aval et représentés dans la figure 2 par des « plans » qui décomposent le système en compartiments homogènes en terme de participation à la dynamique de transfert (Aqua 2004).

Un premier compartiment (A sur la figure 2) assure le transfert initial sols-eaux à partir de stocks situés sur ou dans les sols (émission de la charge polluante) ; les modalités de ce transfert sont différentes selon la géochimie du polluant considéré (ruissellement ou/et lessivage) ; le support physique de ce compartiment est l'ensemble des parcelles agricoles émettrices ; la dynamique du stock mobilisable du sol dépend des pratiques agricoles et de régulations biogéochimiques ou biologiques (par exemple, mortalité pour les pathogènes, fertilisation pour P...). Il est souvent nécessaire de prendre aussi en considération l'émission de particules par les berges du réseau hydrographique.

Les autres compartiments (figure 2) contribuent au transport, phénomène qui, pour la plupart des polluants, est discontinu et s'accompagne de rétentions plus ou moins durables, voire de transformations (ex. : décomposition). Ces deux phénomènes – rétention et/ou transformation – permettent une certaine « atténuation » de la charge polluante ; ils mettent en jeu successive-

ment certaines parcelles « puits » (prairies de bas fonds par exemple, couche B) et certaines interfaces entre parcelles et réseau hydrographique (couche C, bandes herbeuses, haies...), les zones tampons de type marécages (couche D) et divers composants du réseau hydrographique.

Un telle représentation s'articule bien avec la compartimentation du système en sous-bassins et biefs élémentaires des hydrologues et, par ailleurs, recoupe en partie les niveaux d'organisation typique de la gestion du milieu rural, parcelle et parcellaire notamment. Elle peut donc faciliter l'organisation de la récolte, du traitement et de la synthèse des informations pluridisciplinaires, indispensables à l'analyse d'un problème de la pollution diffuse (Trevisan *et al.*, 1995 ; Dorioz et Trévisan, 2001). Enfin, elle peut aussi aider à raisonner la relation taille/représentativité.

### Intérêt et contraintes de l'approche bassin versant de la pollution diffuse

#### DEUX DIFFICULTÉS TECHNIQUES CLASSIQUES

Le signal de sortie est mesuré en un seul point, l'exutoire. Les difficultés de cette mesure sont liées à celles du prélèvement, de la mesure du débit et de la variabilité temporelle des flux et concentrations (Dorioz *et al.*, 1991 ; Dupraz, 1984 ; Balland, 1984).

Le signal d'entrée est souvent plus difficile à saisir (apports atmosphériques, apports anthropiques, altération) car la variabilité est double : temporelle et spatiale (Durand, 1989).

### L'EMBOÎTEMENT DES NIVEAUX D'ORGANISATION ET CHOIX D'UNE ÉCHELLE PERTINENTE

Les mécanismes élémentaires de la pollution diffuse se développent, s'enchaînent et se combinent aux différentes échelles d'organisation typiques des bassins versants.

**1) À l'échelle « station »** (m<sup>2</sup>), se manifestent des phénomènes « élémentaires », quasi ponctuels en terme d'étendue spatiale : la stabilité des agrégats, la perméabilité des sols, l'enracinement des plantes en sont des exemples, ou encore plus finement les échanges entre eau et matrice ou eau et suspensions.

**2) À l'échelle « parcelle culturale »** (un à quelques ha), qui représente un premier niveau d'intégration des interactions entre les caractéristiques du milieu et les pratiques culturales (apports d'intrants, travail du sol) avec un degré de complexité minimal.

**3) À l'échelle bassin versant « élémentaire »** (de la dizaine jusqu'à la centaine d'ha, ensemble limité de parcelles, *a priori* sans bâtiment), il se constitue un autre niveau d'intégration qui prend en compte une part de la diversité simultanée des cultures et des pratiques culturales, l'effet des interparcelles (talus, haies, fossés) et les zones tampons.

**4) À l'échelle « petit » bassin versant** (le millier d'ha), apparaissent les grands éléments structurant le paysage (la géomorphologie en particulier), l'habitat rural et ses sources de pollution ponctuelle, la diversité des exploitations agricoles.

**5) Enfin, à l'échelle « grand » bassin versant** (de la centaine au millier de km<sup>2</sup>), ce niveau incorpore les activités non agricoles, les zones urbaines avec l'imperméabilisation qui en résulte, et la demande en matière de ressources en eau et de gestion des écosystèmes aquatiques.

Même si les niveaux petit bassin versant ou bassin élémentaire sont privilégiés dans les études de pollution diffuse, la compréhension de ce phénomène complexe suppose d'acquérir et de maîtriser toute une gamme d'informations et de connaissances s'y rapportant, des niveaux d'organisation inférieurs aux niveaux plus englobants. Ainsi, les deux premières échelles (station, parcelle) fournissent des références incontournables pour interpréter les informations obtenues dans les bassins versants ou pour paramétrer les modèles. À l'autre extrémité, les grands bassins (et *a fortiori* les « très grands » bassins fluviaux)

ne permettent plus d'enregistrer clairement les phénomènes propres au territoire et à l'agriculture (le poids des interactions, des sources ponctuelles et des processus spécifiques à l'écosystème fluvial est trop fort). Mais ils constituent le cadrage en terme d'impacts et de socioéconomie. Dans le détail, la limite supérieure en taille de l'approche bassin versant dépend de l'objectif opérationnel visé, la limite inférieure étant quant à elle, fixée par le besoin de représentativité et par la nécessité d'enregistrer un signal de type débit/concentration.

### UN PROBLÈME CRUCIAL : LES LIMITES DU SYSTÈME ÉTUDIÉ

Quelle que soit la représentation choisie en fonction de l'objectif et du polluant, et quelle que soit la taille du bassin, le problème du tracé des frontières du système bassin versant se pose de façon récurrente. La délimitation en bassin topographique n'est vraiment satisfaisante que pour l'étude des transferts de polluants peu solubles à dynamique essentiellement superficielle (ruissellement, charge solide, phosphore, produits phytosanitaires à très forte capacité d'adsorption). Mais le tracé des limites est un exercice très délicat en terrain plat, où des écarts décimétriques insensibles se traduisent par des changements notables de surface des bassins. Marais, routes et fossés compliquent parfois le problème en créant un réseau de drainage « hésitant », variable selon l'intensité des événements pluvieux.

La situation se complique pour les substances très solubles, nitrates ou autres ; le bassin hydrologique est alors la référence bien qu'il soit souvent difficile de caractériser les échanges latéraux profonds ou écoulements de subsurface aux bornes du bassin. Dans ce contexte, même l'exutoire est sujet à caution : est-il significativement le seul point de contrôle des sorties du bassin ?

### Les bassins versants de recherche, quelques acquis dans le cadre des études de pollutions diffuses

#### Les fonctions des bassins de recherche

Ambroise (1991) indique que les bassins de recherche remplissent 4 fonctions distinctes et complémentaires, pouvant coexister ou non sur un même site :

– celle de **laboratoire de terrain** pour des recherches interdisciplinaires se complétant et

se valorisant mutuellement : établissement de bilans détaillés, étude des fonctionnements et des mécanismes, expérimentations ;

– celle de **d'observatoire du milieu**, pour observer et mesurer les flux et les paramètres qui les contrôlent, déceler d'éventuelles évolutions à long terme liées à des changements climatiques ou à des perturbations anthropiques ;

– celle de **site de validation** de méthodes et d'outils : tests et calibration de capteurs de mesures, « vérité terrain » pour la télédétection, constitution de jeux de données de référence pour tester différents types de modèles...

– celle de **lieu de formation** : formation à et par la recherche, apprentissage de techniques, « formation permanente... ».

L'énumération de ces fonctions permet bien d'identifier de quelle manière les travaux sur les bassins de recherche abordent leur objectif général d'étude des transferts d'eau et de substances.

### Les thèmes d'études

Les recherches sont organisées autour de thèmes d'études qui peuvent être ramenés à trois grandes catégories : les flux à l'exutoire, les mécanismes de transfert et la détermination des différentes sources contributives au transfert total.

#### LA QUANTIFICATION DES FLUX

L'acquisition des chroniques de débits et de concentrations à l'exutoire demeure l'activité fondamentale de l'outil bassin versant (Balland, 1984).

Une utilisation classique de ces chroniques est le calcul des flux de polluants ou contaminants exportés par un bassin. C'est l'indicateur le plus commode pour caractériser le transfert dans des conditions données, notamment de mode d'occupation des sols, pour établir des comparaisons ou suivre une évolution. C'est aussi fréquemment le mode d'expression des données hydrochimiques le plus pertinent pour rendre compte de l'impact sur un milieu aquatique récepteur. Le cas type est celui du transfert de phosphore vers des milieux sensibles à l'eutrophisation (retenues ou lacs ou océans) : la connaissance des flux apportés par le bassin versant annuellement ou de façon saisonnière, est indispensable pour évaluer la charge de l'écosystème

aquatique (par exemple, kg P/ha de plan d'eau). Dans le même contexte, on s'intéresse aussi à la contribution des divers types de modes d'occupation des sols (« flux spécifiques ») ou encore aux ratios sortie/entrée (Pilleboue, 1987). Ceci s'applique à d'autres types de polluants, notamment aux phytosanitaires, et sert fréquemment de base pour des évaluations empiriques.

Dans les problématiques d'eau potable ou d'écotoxicologie, les flux importent moins que les concentrations (moyennes, extrêmes...) par référence à des normes (dépassements de seuils) ou à des réactions des écosystèmes.

#### LA COMPRÉHENSION ET LA MODÉLISATION DES MÉCANISMES DE TRANSFERT

Le signal hydrochimique enregistré à l'exutoire résulte d'un ensemble de processus qui interagissent et s'enchaînent pour aboutir à un transfert dans le bassin versant. La compréhension et la modélisation de ce transfert nécessitent d'appliquer des méthodes et des concepts propres à des disciplines aussi différentes que l'hydrologie, la géochimie, l'agronomie.

L'enjeu est en particulier de combiner les connaissances relatives aux processus hydrologiques qui déterminent le cheminement de l'eau dans le bassin, avec les connaissances concernant l'évolution des substances étudiées (fixation, relargage, transformation, dégradation) au long de leur parcours. Ceci s'applique notamment au cas des produits phytosanitaires, dont le devenir entre leurs lieux d'application et le milieu aquatique est très largement conditionné par les propriétés des sols et la présence de singularités dans le paysage, comme les haies et talus, les fossés et les zones tampons (Gril *et al.*, 1999). En conséquence, la modélisation de leur transfert nécessite une modélisation hydrologique plus fine que celle qu'exige l'hydrologie strictement quantitative (Carlier *et al.*, 1996). Ce qui précède est également vrai pour la compréhension des transferts fortement associés aux écoulements de surface comme le phosphore (Jordan-Meille, 1998) et les matières en suspension (Boiffin, 1994). À l'inverse, dans le cas des nitrates, dont la migration est liée aux lessivages et aux écoulements de nappes, on peut généralement se contenter d'une approche hydrologique plus globale, sauf quand les processus de dénitrification prennent une importance significative, du fait de la présence de zones humides ou de ripisylves (Grimaldi *et al.*, 2004).

**LA DÉTERMINATION DES SOURCES CONTRIBUTIVES**

De nombreuses recherches portent sur l'identification, à diverses échelles, des sources contributives à la pollution diffuse. Il s'agit, en premier lieu, de distinguer la contribution des différents unités de « paysage » du bassin, unités complexes caractérisées par leur pédologie, leurs pentes, leurs organisations et occupation des sols. On procède en général en instrumentant quelques sous-bassins aux caractéristiques plus homogènes, complétés éventuellement par des études stationnelles.

Plus finement, le zonage peut chercher à différencier des unités fonctionnelles au plan hydrologique, en se basant sur le concept de « zones contributives ». Une telle approche a été appliquée aux nitrates en Bretagne (Bruneau et Mérot, 1990 ; Beaujouan, 2001), puis au phosphore dans les bassins lémaniques (Jordan-Meille, 1998). Elle repose sur des observations de terrain et des modélisations.

Il convient également de noter que l'origine de la pollution est le plus souvent à la fois diffuse et ponctuelle ; quelque soit le polluant, la pollution diffuse est rarement isolée, à part au niveau des têtes de bassin, en l'absence d'habitations et de sièges d'exploitation. Dès lors, la mise au point de méthodes de détermination de la contribution relative des sources diffuses et ponctuelles est un autre enjeu concret, et également théorique (interactions entre sources) de la recherche sur les bassins versants.

Actuellement, pour le phosphore, on dispose de démarches nécessitant une estimation des sources ponctuelles, le diffus étant calculé en général, par différence avec les flux exportés à l'exutoire. La contribution des sources ponctuelles est souvent estimée par enquêtes sur les rejets d'eaux usées et organisée par classes d'activités humaines (industrie, domestique...). Le résultat s'avère parfois imprécis, car seuls les rejets des égouts importants sont bien connus. Une alternative, en cours de mise au point, consisterait à déduire les apports ponctuels du bassin à partir de l'analyse des relations concentration en P-débit enregistrées à l'exutoire (Dorioz *et al.*, 2004).

**Les connaissances nécessaires à la caractérisation et au suivi des bassins**

Les mesures qui permettent de connaître les entrées et les sorties constituent un invariant des études sur les bassins versants.

**LES SORTIES À L'EXUTOIRE**

Elles sont réalisées selon un protocole susceptible de varier considérablement suivant l'objectif poursuivi, la nature des polluants, leurs dynamiques de variation dans le temps (Dupraz, 1984 ; Dorioz *et al.*, 1991) et... les moyens disponibles ! Par exemple, la détermination des flux annuels peut s'appuyer sur un nombre relativement limité de prélèvements effectués proportionnellement au débit. Inversement, la compréhension de la dynamique de transfert peut conduire à prélever un grand nombre d'échantillons pendant les crues pour suivre les variations de concentration. Le nombre de crues suivies peut être réduit si les variations de teneurs sont assez limitées (c'est souvent le cas des nitrates), ou être plus important si elles sont très contrastées (phosphore) ou encore limité par les moyens financiers, malgré une variabilité forte (produits phytosanitaires).

**LES INTRANTS**

L'eau et les apports agricoles sont pris en compte. Si le bassin versant est isolé hydrologiquement, la seule entrée d'eau est la pluie. Sa mesure est simple dans son principe, mais sa très grande variabilité spatio-temporelle doit être prise en compte quand les études exigent une connaissance fine de ce paramètre. À titre d'exemple, l'équipement en pluviographes mis en place sur le bassin de l'Orgeval était suffisamment dense pour permettre la réalisation de travaux sur l'épicentrage des pluies (Galéa *et al.*, 1983). La connaissance des apports d'engrais et de produits de traitement s'obtient par l'enregistrement annuel des pratiques des agriculteurs, des surfaces des différentes cultures, ainsi que l'usage par les activités non agricoles. Les apports atmosphériques doivent être mesurés également.

**LES AUTRES PARAMÈTRES**

Il s'agit pour l'essentiel des paramètres définissant les sorties hors exutoire et l'état du bassin. La nature des mesures varie avec les objectifs des programmes, la précision des enregistrements avec la variabilité spatio-temporelle. Parmi les plus classiques, on peut citer les suivants :

- la climatologie ; à côté de la pluviométrie, les principaux paramètres sont la température et l'évapotranspiration qui conditionnent le bilan et les mouvements de l'eau ;
- la géologie et surtout l'hydrogéologie, en particulier pour évaluer le degré d'étanchéité du bassin ;

– la couverture pédologique et la caractérisation du fonctionnement hydrodynamique des sols (le traçage isotopique et l'ensemble des techniques géochimiques peuvent contribuer à identifier les cheminements de l'eau) ou les mécanismes de transformations des polluants, la dénitrification ;

– la caractérisation de l'activité agricole va au-delà de la simple connaissance des intrants (système d'exploitation, itinéraires techniques...) et de la récolte ; l'étude des transferts peut être couplée avec approches socioéconomiques sur les bassins de recherche les plus grands.

### La représentativité de bassins versants et les bassins emboîtés

#### LA NOTION DE REPRÉSENTATIVITÉ DES BASSINS VERSANTS

La notion de « représentativité » d'un bassin versant est une question cruciale pour justifier le recours à ce type d'outil et la portée des résultats. Pourtant, si le « R » de BVRE<sup>2</sup> a longtemps signifié « représentatif », il a fini par glisser vers les sens de « recherche », ou de « référence » : ce glissement sémantique semble bien traduire la difficulté à trouver une signification claire à cette notion. De Marsily (1990) lui préfère la notion de « transposabilité » qui « doit consister à pouvoir connaître (modéliser et prévoir) le fonctionnement d'un autre bassin versant, éventuellement d'échelle différente, à partir de la connaissance d'un nombre bien plus réduit de données ». Sans procéder ici à une discussion approfondie de cette question complexe, on se contentera de donner quelques exemples qui illustrent les différentes réalités que recouvre cette notion :

– la représentativité des caractéristiques d'un territoire de surface restreinte par rapport à celles d'un territoire plus vaste. Il s'agit alors, en quelque sorte, d'une question de qualité de l'échantillonnage : par exemple, géologie ou occupation des sols ;

– la représentativité des processus dominants qui se produisent sur le bassin versant, par rapport à ceux qui se produisent sur un bassin versant d'ordre supérieur. Meybeck (1994) cite quelques exemples de processus qui ne peuvent pas être extrapolés correctement d'une échelle à l'autre : le transfert de sédiments produits par l'érosion des sols, l'influence sur la qualité des eaux des échanges nappes-rivières, etc.

Il s'agit là de questions de représentativité spatiale. Il existe aussi un problème important de représentativité temporelle d'une période d'étude par rapport à une plus longue période, du fait des variations auxquelles sont soumis certains facteurs, tout particulièrement le climat et l'activité agricole.

#### LES BASSINS EMBOÎTÉS

Le souci de réduire l'hétérogénéité du bassin, pour ne pas compliquer excessivement sa caractérisation et l'analyse des processus pousse à limiter sa superficie. Le souci d'une représentativité satisfaisante présente une exigence inverse et, de même, la prise en compte de processus qui ne se produisent qu'à partir d'une certaine échelle.

En pratique, le compromis entre ces exigences contradictoires est le petit bassin versant, tel qu'il est défini ci-dessus. Cependant, une solution fréquemment employée pour contourner cette difficulté consiste à réaliser simultanément des mesures sur un ou des sous-bassins inclus dans le bassin versant qui constitue le principal support des études ou, inversement, à lui associer un bassin plus étendu qui l'inclut :

– l'instrumentation de sous-bassins versants élémentaires peut se révéler être un complément intéressant quand il existe des zones bien différenciées à l'intérieur du périmètre d'un petit bassin (lithologie, occupation des sols...) : ce peut être l'occasion également, par exemple, de concentrer les moyens destinés à l'étude de processus particuliers ou d'aborder la problématique du changement d'échelle sur un bassin versant ;

– l'association avec un bassin versant plus vaste permet d'aborder de nouvelles problématiques liées à des niveaux d'organisation élevés ; elle est également opportune quand la finalité des travaux de recherche est d'apporter une contribution à un problème posé à l'échelle d'un grand bassin (protection d'une ressource en eau).

Cette pratique des bassins emboîtés est fréquemment pratiquée sur les sites de recherche. Citons quelques bassins concernés par les pollutions diffuses qui fonctionnent ou ont fonctionné ainsi, mais avec des modalités d'association très diverses suivant les contextes :

– le couple L'Orgeval (104 km<sup>2</sup>)/Mélarchez (7 km<sup>2</sup>) ;

– le Coët-Dan (12 km<sup>2</sup>) et son sous-bassin de Kervidy (4 km<sup>2</sup>) ;

## 2. Bassins versants représentatifs et expérimentaux.



- le bassin versant de Roujan (1 km<sup>2</sup>) associé au bassin versant de la Peyne (117 km<sup>2</sup>) ;
- le Redon (33 km<sup>2</sup>), associé au sous-bassin de Perrignier (1 km<sup>2</sup>).

### Les spécificités des bassins versants opérationnels

Sur tous les points évoqués ci-dessus, les similitudes sont nombreuses entre les bassins versants de recherche et les bassins versants opérationnels. Toutefois, la différence d'objectifs se traduit par un certain nombre de spécificités de ces derniers.

### Les fonctions

Les bassins versants opérationnels ont pour fonction l'évaluation et la promotion des actions destinées à améliorer la qualité des eaux. Ils n'ont pas *a priori* vocation à être de simples observatoires : dans le domaine opérationnel, cette fonction est celle des réseaux de surveillance. Toutefois, une phase d'observation peut suivre la mise en place d'actions correctives, dans un but d'évaluation. Ils ne sont pas non plus des laboratoires de terrain ou des sites de validation de méthodes expérimentales et de modèles : ils ont pour vocation de tester à la fois la faisabilité technique et socio-économique de pratiques et d'aménagements et d'en vérifier l'efficacité pour limiter la pollution des eaux. Comme, en pratique, cette efficacité est attendue d'un ensemble de solutions correctives et non d'une seule, c'est cet ensemble que l'on cherche à mettre en œuvre sur le bassin versant de la manière la plus exhaustive possible. Dès lors, il n'est jamais possible de faire la part de chacune de ces techniques dans le résultat obtenu. Selon la terminologie du développement agricole, il s'agit plus d'essais de démonstration que d'expérimentations au sens strict.

La fonction de formation est aussi importante pour les bassins versants opérationnels que pour les bassins versants de recherche, mais concerne des publics différents : plutôt universitaire dans le premier cas, plutôt technique dans le second. Toutefois, en pratique, cette distinction n'est pas très nette. Enfin, la fonction d'information, corollaire de la formation, est un objectif important des bassins versants opérationnels et vise l'ensemble des acteurs du bassin versant : au premier chef, les agriculteurs et le développement agricole, mais aussi les élus, les techniciens de l'eau, etc. Ce rôle de « vitrine » n'est pas étranger aux bassins versants de recherche, mais n'y présente certainement pas un caractère aussi essentiel.

### Les thèmes d'étude

#### LE DIAGNOSTIC

Les bassins versants opérationnels sont le support privilégié de l'adaptation aux conditions locales des méthodes de diagnostic préalable à la mise en œuvre d'un plan d'actions correctives. Ils n'ont pas pour vocation l'étude des mécanismes de transfert : les études qu'ils supportent s'appuient en revanche sur les connaissances acquises sur les bassins versants de recherche (ainsi que sur d'autres travaux scientifiques) pour identifier les principales sources qui contribuent à la formation des flux à l'exutoire, en tentant d'en hiérarchiser l'importance. Cette analyse peut porter sur différents objets : des périodes, des portions du territoire, des activités, qui sont hiérarchisées en termes de risque<sup>3</sup>.

Les modalités du diagnostic phytosanitaire ont été en particulier étudiées et formalisées par les groupes de travail du CORPEN<sup>4</sup> (CORPEN, 1996, 1999, 2001 ; Gouy *et al.*, 2001) et concernent les trois échelles de l'exploitation agricole, du bassin versant et de la région. Pour les nitrates, une méthode de diagnostic a été mise au point dans le cadre des opérations Fertimieux (Lanquetuit *et al.*, 1997). Pour le phosphore, une réflexion est disponible autour du cas du bassin lémanique (Trévisan *et al.*, 1995 ; Dorioz et Trévisan, 2001).

#### L'EFFICACITÉ ET LA FAISABILITÉ DES PRATIQUES ET DES AMÉNAGEMENTS CORRECTIFS

L'examen des chroniques de concentrations et la quantification des flux à l'exutoire contribuent à l'élaboration du diagnostic (CORPEN, 1995) et à l'évaluation de l'efficacité des actions correctives proposées à partir du diagnostic. L'évaluation de la faisabilité (technique et socioéconomique) de ces dernières est une spécificité des bassins versants opérationnels. Elle est étroitement liée à la formation et à l'information des agriculteurs et de leur encadrement technique.

La multiplication des plans d'action conduit à se préoccuper des moyens d'établir des bilans de ces actions aux échelles régionale ou nationale, ce qui implique de définir un cadre commun d'évaluation (degré de mise en œuvre et efficacité des actions) Un groupe de travail du CORPEN propose une batterie d'indicateurs adaptés à cette problématique (Maurizi *et al.*, 2002 ; CORPEN 2003).

3. « Risque » : terme consacré par l'usage et pris ici au sens de « probabilité d'exposition » (ou encore « potentialité de transfert vers les eaux ») et non au sens le plus rigoureux de combinaison « exposition X effet ».

4. Comité d'orientation pour les pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

#### LA CONNAISSANCE DES PRATIQUES AGRICOLES

Les bassins versant opérationnels visant la mise en œuvre d'actions correctives, la connaissance des pratiques des agriculteurs (et des autres acteurs concernés) sera habituellement plus fouillée que dans le cas des bassins versants de recherche et ne pourra se limiter à la simple connaissance des intrants. L'évaluation de la faisabilité de l'introduction de contraintes environnementales dans les pratiques des agriculteurs implique une bonne connaissance préalable de leurs systèmes de production et des contraintes techniques et socioéconomiques auxquelles ils sont confrontés.

#### LE CHEMINEMENT DE L'EAU

Il ne s'agit pas dans ce cas de s'intéresser aux mécanismes du transfert, mais d'identifier, dans le cadre du diagnostic, si la mise en œuvre d'aménagements (talus, zones tampons) est appropriée et, le cas échéant, de permettre de les localiser là où ils seront efficaces.

#### La question de la représentativité

Elle se pose dans les mêmes termes quelque soit le type de bassin. On insistera ici sur le problème posé par la représentativité temporelle pour les bassins versants opérationnels. En effet, les contraintes financières et sociales qui pèsent sur ces bassins versants limitent le temps disponible d'une part, pour l'obtention d'une chronique à l'exutoire permettant d'évaluer l'état avant la mise en œuvre des actions (« état zéro ») et d'autre part, pour l'obtention d'une chronique après mise en œuvre des actions pour évaluer leur efficacité.

La forte variabilité inter-annuelle peut en effet masquer, ou au contraire amplifier l'effet des pratiques traditionnelles ou de celles mises en œuvre dans le cadre du plan d'action, ce qui peut poser de sérieux problèmes de communication. Il convient d'être donc très prudent et d'éviter les conclusions trop hâtives, malgré l'inévitable pression sociale.

#### Quelques éléments concernant le choix d'un bassin versant opérationnel

##### LE CHOIX DU SITE

À notre connaissance du moins, les sites des nombreux bassins versants qui ont été mis en place dans les dernières décennies n'ont généralement pas été retenus en appliquant une méthode rigoureuse et formalisée : le choix est le fruit du couplage d'une expertise qualitative

concernant la représentativité du milieu physique et anthropique avec des considérations d'opportunité, dont l'importance pratique est évidente : volonté politique et intérêt (ou au moins bonne acceptation) du projet par les acteurs locaux et les habitants, validité et commodité d'accès des points de mesure, proximité du siège des équipes gestionnaires, etc.

La réalisation d'un diagnostic, à l'échelle de la région ou du grand bassin versant, doit néanmoins permettre de fonder le choix d'un bassin versant d'étude sur une analyse suffisamment fine et objective de sa représentativité, à la fois en terme de milieu naturel que d'activité humaine.

##### LES DIMENSIONS DU BASSIN VERSANT

Dans le cas des bassins opérationnels, les moyens restent généralement limités. Par contre, il est important de couvrir assez largement la variabilité des activités agricoles. De ce fait, le bassin versant principal est souvent plus grand que dans le cas des travaux de recherche. Le recensement des bassins versants mis en place par les groupes régionaux phytosanitaires (ministères de l'Agriculture et de l'Écologie, 2004) fait ainsi état de 208 bassins, d'une superficie moyenne de 226 km<sup>2</sup> ; 47 000 km<sup>2</sup> et 78 000 exploitations sont couvertes par ces bassins.

Il s'agit de superficies assez importantes, ce qui traduit bien le souci de couvrir un nombre significatif d'exploitations agricoles, avec l'objectif de tester des changements de pratique, action qui est la plus fréquente actuellement. Par contre, comme cela a été signalé ci-dessus, il s'agit de superficies probablement trop importantes pour traiter le cas des aménagements de l'espace (zones tampons, haies...), ce qui conduit à mettre en place des sous-bassins.

Bien entendu, il n'est pas possible de définir des superficies optimales d'une manière absolue : la superficie moyenne des exploitations et des parcelles d'un côté, la plus ou moins grande hétérogénéité du milieu de l'autre, conduisent à des variations très importantes. Ainsi, le même rapport cite comme extrêmes le bassin de l'Oudon en Pays de la Loire (1 490 km<sup>2</sup>) et le bassin de la Riscle en Midi-Pyrénées (0,5 km<sup>2</sup>). En pratique le raisonnement doit tenir compte des différents objectifs poursuivis et de leur degré de priorité ; et, plus que sur la superficie, il faut sans doute se fonder sur le nombre de sièges d'exploitation et sur le nombre de parcelles.

## Conclusion

L'étude des transferts diffus de polluants à l'échelle du paysage pourrait et parfois peut reposer sur une démarche analytique : les processus « élémentaires » sont ou seraient étudiés indépendamment les uns des autres, l'enchaînement théorique étant reconstitué *a posteriori* par modélisation (Leite, 1990). Ce type d'approche, pour certains types de polluants agricoles, se heurte à deux difficultés :

- la variabilité spatiale et temporelle (des mécanismes physicochimiques ou microbiens, des états, des apports, des connexions hydrauliques...);
- l'émergence de processus nouveaux lors des changements d'échelle (érosion des berges, absorption par les macrophytes...).

De ce fait, l'extrapolation à l'aval du système plante-sol est difficile et nécessite de multiples calages plus ou moins empiriques. À l'extrême, il en résulte une pénurie de modèles déterministes fiables en matière de caractérisation de certaines pollutions diffuses. Le bassin versant reste alors un outil incontournable pour permettre une intégration spatiale des processus et pour replacer toute étude de processus, toute mesure de flux, dans un contexte « global », c'est-à-dire une dynamique macroscopique représentative, vis-à-vis des impacts et des durées de transferts.

Mais la pollution est avant tout un problème à résoudre ; de ce point de vue, le bassin versant représente souvent une maille territoriale privilégiée où s'organise l'action locale ou régionale. Le choix des bassins versants comme objet d'étude est donc aussi celui de développer

des recherches à une échelle qui représente la « vraie grandeur » pour la gestion des pollutions, au risque de la complexité des phénomènes biophysiques (sources, interactions, impacts...) et des phénomènes humains (conflits d'acteurs, modes de négociations).

Le bassin versant, originellement instrument de recherches hydrologiques, est donc devenu l'outil fédérateur des travaux concernant les pollutions d'origine agricole. Le bassin de recherche et le bassin opérationnel représentent deux utilisations complémentaires de cet outil, à associer pour élaborer des réponses aux questions scientifiques, techniques et socioéconomiques que pose la recherche de solutions efficaces pour réduire ces pollutions.

L'application de la Directive cadre sur l'eau pourrait conduire à renforcer et à renouveler le recours à l'outil « bassin versant » pour diagnostiquer les états de références, les effets de l'anthropisation sur la qualité de l'eau et évaluer les différentes actions qui sont et vont être mises en œuvre pour atteindre les objectifs visés. Ces actions (pratiques agricoles et aménagements), que par ailleurs l'orientation actuelle de la politique agricole commune favorise, souffrent à la fois d'être fondées sur une connaissance encore incomplète des mécanismes de transfert des polluants, d'un manque de validation en vraie grandeur des modèles et des systèmes d'indicateurs, et d'un manque de recul concernant leur efficacité pratique, dans les situations extrêmement variées du territoire agricole français. Tout ceci souligne l'urgence de mettre en réseau les bassins versants agricoles servant de référence aux divers chercheurs et praticiens. □

### Résumé

De longue date, les bassins versants constituent un instrument essentiel pour l'hydrologie et pour les travaux de recherche sur les pollutions diffuses, notamment celles d'origine agricole. Depuis les premiers bassins versants « représentatifs et expérimentaux » (BVRE) consacrés aux mesures hydrologiques et hydrochimiques, les concepts se sont enrichis, les stratégies d'études perfectionnées. Le recours de plus en plus fréquent à « l'approche bassin versant » dans le cadre de travaux à visée opérationnelle, constitue une retombée de ces recherches.

Cet article vise à établir un bilan des connaissances en matière d'« approche bassin versant », appliquée au problème de la pollution diffuse agricole. Après avoir rappelé brièvement l'historique du concept de bassin versant et son apport dans les travaux sur les pollutions diffuses, nous présentons les principaux acquis méthodologiques et leurs adaptations opérationnelles, dans le cadre des actions mis en œuvre pour maîtriser la pollution. Les spécificités des dispositifs opérationnels ainsi que quelques éléments concernant le choix de leur implantation, sont également abordés.

### Abstract

The watersheds have been for a long time an essential tool both for hydrology and research works on diffuse pollution, mainly production from agriculture. Since the first «representative and experimental» watersheds (BVRE), devoted to hydrological and hydro-chemical measurements, the concepts improved and the study strategies become more sophisticated. The increasing recourse to « the watershed approach » within the framework of operational purposes, constitutes a consequence of this research.

This article aims at establishing an assessment of the knowledge on the watershed approach, applied to the problem of agricultural diffuse pollution. After a brief history of the concept of watershed and its contribution to the works on diffuse pollution, the main methodological assets and their operational adaptations are presented, within the framework of the actions implemented to control pollution. Specifications of the operational devices as well as some elements concerning the choice of their setting up, are also dealt with.

### Bibliographie

AQUAE, 2003, *Effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers et dissous et sur la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage*, action structurante INRA-CEMAGREF « AQUAE », Rapport INRA-CEMAGREF, 28 p.

AMBROISE, B., 1994, Du BVRE, bassin versant représentatif et expérimental, au BVR, bassin versant de recherche, in *Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales*, Paris, 10-11 mai 1994, Cemagref Éditions, Antony, p. 11-24.

BALLAND, P., 1983, L'utilisation de relations concentrations-débits pour le calcul de flux de matières en rivière, *Physio-Gèò*, n° 9, p. 5-13.

BEAUJOUAN, V., 2001, *Modélisation de transferts d'eau et d'azote dans les sols et les nappes. Application à de petits bassins versants agricoles*, ENSAR Rennes, 154 p.

BEAUMONT, A., 1985, *Évolution de la qualité des eaux d'une petite rivière en région de polyculture et d'élevage intensif (1975-1985)*, CEMAGREF RENNES GRRE, ENITRTS Strasbourg, 140 p.

BELAMIE, R., 1980, *Influence des pratiques culturales et des facteurs hydrologiques sur les variations en nitrates des eaux de surface d'un bassin versant représentatif du bassin parisien (France)*, communication présentée au colloque international sur l'influence de l'homme sur le régime hydrologique avec référence particulière aux études sur les bassins représentatifs et expérimentaux, Helsinki, FIN, 23-26 juin 1980, 10 p.

BOIFFIN, J., 1994, Place des BVRE dans les études sur l'érosion hydrique des sols, in *Séminaire national Hydrosystèmes : du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales*, p. 197-202.

BOUCHARDY, J.-Y., 1992, *Méthodologie pour la spatialisation des zones sensibles à la pollution diffuse agricole par le phosphore, à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (S.I.G.)*, thèse université de Grenoble, 200 p.

BRUNEAU, P. ; MEROT, P., 1990, *Modélisation conceptuelle de l'écoulement appliquée au transfert des nitrates en Bretagne : application de l'indice de Beven*, coll. « Nitrates et agricultures, eau », Paris, 5 p.

CANN, C., 1990, Transfert de nutriments dans une région d'élevage intensif, International conference hydrological research basins and the environment, Wageningen, NLD, 24-28 september 1990, in *Hydrological research basins and the environment*, HOOGHART J.-J., POSTHUMUS C.-W.-S., WARMERDAM P.-M.-M., 1990, p. 311-318.

CARLUER, N. ; GOUY, V. ; GRIL, J.-J., 1996, Contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires et modélisation, *Ingénieries-EAT*, n° 6, p. 19-30.

CORPEN, 1996, *Qualité des eaux et produits phytosanitaires : propositions pour une démarche de diagnostic*, 120 p.

CORPEN, 1999, *Désherbage : éléments de raisonnement pour une maîtrise des adventices limitant les risques de pollutions des eaux par les produits phytosanitaires*, 161 p.

CORPEN, 2001, *Diagnostic de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires : bases pour l'établissement de cahiers des charges des diagnostics de bassins versants et d'exploitations*, 34 p.

CORPEN, 2003, *Indicateurs*.

DE MARSILY, 1990, *Rapport sur le programme « Les bassins versants représentatifs et expérimentaux »*, Cemagref, commission spécialisée ressources en Eaux, 12 p.

DORIOZ, J.-M. ; BLANC, P., 2001, Maîtrise de la charge externe en phosphore des plans d'eau et fonctionnement des bassins versants, In *L'eau dans l'espace rural : vie et milieux aquatiques*, NEVEU A., RIOU C., BONHOMME R., CHASSIN P., PAPY F. (eds.), universités francophones, Paris, INRA Éditions, 284 p., p. 113-132.

DORIOZ, J.-M. ; ORAND, A. ; PILLEBOUE, E. ; BLANC, P., coll. tech. Colon M. et Bosse J.-P., 1991, Prélèvement et échantillonnage dans les petits bassins-versants ruraux, *Rev. Fr. Sci. Eau*, 4, p. 211-238.

DORIOZ, J.-M. ; QUETIN, Ph. ; LAZZAROTTO, J. ; ORAND, A, 2004, Dynamique du phosphore dans un bassin versant du lac Léman : conséquences pour la détermination de l'origine des flux exportés, 30 p., *Revue des Sciences de l'eau (sous presse)*.

DORIOZ, J.-M. ; TREVISAN, D., 2001, Transfert de phosphore des bassins versants agricoles vers les eaux de surface : l'expérience du bassin Lémanique et sa portée générale, *Agrosol*, IRDA, vol. 12, n° 2, Québec.

DUPRAZ, C., 1984, *Bilans de s transferts d'eau et d'éléments minéraux dans 3 bassins comparatifs à végétation contrastée*, thèse doc Ing Orléans, 363 p.

DURAND, P., 1989, *Biogéochimie comparée de 3 écosystèmes de moyenne montagne granitique (Mont Lozère, France)*, thèse, université d'Orléans, 185 p.

GALEA, G. ; MICHEL, C. ; OBERLIN, G., 1983, Maximal rainfall on a surface. The epicentre coefficient of 1 to 48 h rainfall, *J. Hydrology*, 66, p. 159-167.

GOUY, V. ; GRIL, J.-J., 2001, Diagnostic de la pollution diffuse par les produits phytosanitaires et solutions correctives, *Ingénieries EAT*, n° spécial 2001, p. 81-90.

GRIL, J.-J. ; CARLUER, N. ; GOUY, V., 1999, Processus de transfert superficiel des produits phytosanitaires, de la parcelle au bassin versant, *La Houille Blanche*, n° 5, p. 76-80.

GRIMALDI, C. ; DORIOZ, J.-M. ; POULENARD, J. ; GASCUEL, C., 2004, *Évolution des zones actives et du système de transfert de la pollution dans des petits bassins versants en zone d'élevage*, colloque Bassin Versant, Vannes 2004, 4 p.

JORDAN MEILLE, L., 1998, *Mode de transfert du phosphore d'origine diffuse dans un petit bassin rural lémanique*, thèse EPFL-INRA-Paris VI, 256 p.

LANQUETUIT, D. ; SEBILLOTTE, M., 1997, *Le guide Ferti-Mieux pour évaluer les modifications des pratiques des agriculteurs*, ANDA, 179 p.

- LEITE, L.-A., 1986, *Contribution à la modélisation des pollutions diffuses agricoles. Étude comparative des principaux modèles évaluant l'impact de ces pollutions sur les eaux superficielles*, univ. Paris Val-de-Marne ENPC, 51 p. + annexes.
- LEITE, L.-A., 1990, *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole*, thèse doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 342 p. + annexes.
- LELONG, F. ; DUPRAZ, C. ; DURAND, P. ; DIDON-LESCOT, J.-F., 1990, Effects of vegetation type on the biogeochemistry of small catchment, *J. Hydrol*, 116, p. 125-145.
- LIKENS, G.-E., 1984, Beyond the shoreline: a watershed ecosystem approach, *Verh Internat. Verein Limnol*, (22), p. 1-22.
- LIKENS, G.-E. ; BORMAN, F.-H. ; PIERCE, R.-S. ; EATON, J.-S. ; JONHSON, M.-N. *et al.*, 1977, *Biogeochemistry of a forested ecosystems*, Springer Verlag, New York, 146 p.
- MAURIZI, B. ; VERREL, J.-L., 2002, Des indicateurs pour les actions de maîtrise des pollutions d'origine agricole, *Ingénieries EAT*, n° 30, juin 2002, p. 3-14.
- MEROT, P., 1988, Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation, *Hydrol continen.*, vol. 3, n° 2, p. 105-115.
- MEYBECK, M., 1994, Place des BVRE dans les études sur l'érosion hydrique des sols, *Séminaire national Hydrosystèmes : du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales*, p. 215-220.
- Ministères chargés de l'agriculture (DGAL et de l'Écologie (DE), 2004, *État d'avancement des travaux des groupes régionaux chargés de la lutte contre la pollution des eaux par les produits phytosanitaires ; bilan 2003*, rapport, 32 p. + annexes.
- PERRET-SANDRAL, I. ; FAGOT, M., 2001, *État d'avancement des travaux des groupes régionaux chargés de la lutte contre la pollution par les produits phytosanitaires. Actions 1999, 2000, 2001*, MAPA-DGAL et MATE-DE, 43 p. + annexes.
- PILLEBOUE, E., 1987, *Origines, bilans et mécanismes de transfert du phosphore et de l'azote d'un bassin vers un lac*, thèse univ. Paris VI, 521 p.
- PROBST, A. ; LELONG, F. ; VIVILLE, D. ; DURAND, P. ; AMBROISE, B. ; FRITZ, B., 1995, Comparative hydrochemical behaviour and éléments budgets of Aubure and Mont Lozère Norway spruce forested catchments, *in Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains*, Springer Berlin, Heidelberg, New York, p. 201- 225.
- RIOU, C. ; BONHOMME, R. ; CHASSIN, P. ; PAPY, F. (eds.), universités francophones, Paris, INRA Éditions, 284 p., p. 113-132.
- ROCHE, M., 1962, *Hydrologie de surface*, Gauthier-Villard, Paris, 428 p.
- TREVISAN, D. ; VANSTEELANT, J.-Y. ; PERRON, L. ; DORIOZ, J.-M. ; ROYBIN, D., 1995, *Activités agricoles et qualité des eaux de surface dans le bassin lémanique français*, C.R. final, contrat Agence RMC/GIS Alpes du Nord, 90 p.
- TROENDLE, C.-A. ; KAUFMANN, M.-R. ; HARME, R.-H. ; WINOKUR, R.-P., 1987, *Management of subalpine forests Building on 50 years of research*, USDA Report RM 149.
- VIAUD, V. ; MEROT, P. ; BAUDRY, J., 2004, *Hydrochemical buffer assesement in agricultural landscapes from local to catchement scale*, Environnement Management.
- VILLENEUVE, J.-P. ; HUBERT, P. ; MAILHOT, A. ; AUROUSSEAU, P., 1998, La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau, *Rev. Fr. des Sc. de L'eau*, n° spécial, p. 19-39.
- WANG, D. ; DORIOZ, J.-M. ; TREVISAN, D. ; BRAUN, D.-C. ; WINDHAUSEN, L.-J. ; VANS-TEELANT, J.-Y., 2003, Using a landscape approach to interpret diffuse phosphorus pollution and assist with water quality management in the basin of Lake Champlain (Vermont) and Lac Léman (France), *in T.O. Manley and P.L. Manley (eds.) Lake Champlain in the New Millennium, Water Science and Application*, vol. 2., American Geophysical Union.