

L'influence humaine dans l'origine des crues



État de l'art et actes du colloque
Paris, 18 - 19 novembre 1996

HydrOsystemes



L'influence humaine dans l'origine des crues

État de l'art et actes du colloque

Paris, ministère de l'Environnement
18-19 novembre 1996

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 assure également la promotion de sites ateliers où les différentes disciplines peuvent réaliser des recherches complémentaires sur le long terme.

Photo de couverture (Oberlin G., Cemagref) : zone inondée en Lorraine, expansion de crue dans une zone peu vulnérable

"L'influence humaine dans l'origine des crues" État de l'art et actes du colloque Paris, ministère de l'Environnement, 18-19 novembre 1996.

Coordinateur scientifique : Étienne LEBLOIS. Coordination de l'édition : Julienne Baudel. Impression et façonnage : Ateliers Cemagref-Dicova. Vente par correspondance : Publi-Trans, BP 22, 91167 Longjumeau Cedex 9, Tél. 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires : Tec et Doc Lavoisier, 14, rue de Provigny 94236 Cachan Cedex. © Cemagref, ISBN 2-85362-509-5. Dépôt légal : 2^e trimestre 1999 -

Prix : 185 F (€ 28,20).

Colloque

L'influence humaine dans
l'origine des crues
Human influence on flood generation

Paris – ministère de l'Environnement
18-19 novembre 1996

Coordinateur scientifique

Étienne LEBLOIS

Gip HydrOsystemes

12, rue Cuvier

75005 Paris

tél. 01 44 27 65 96

fax.01 44 27 65 95

mel.mephane@ext.jussieu.fr

L'influence humaine dans l'origine des crues

Résumé

Les crues sont, comme beaucoup de manifestations naturelles visibles, des phénomènes intégrateurs qui ont pour origine des causes climatiques, hydrologiques, pédologiques, géologiques, morphologiques. Leur intensité et leur fréquence peuvent être modulées par la transformation des milieux par l'homme, que ces milieux soient à vocation agricole ou à vocation urbaine. Comme tout phénomène intégrateur le rapprochement que l'on est tenté de faire entre l'effet constaté et une des causes que l'on croit majeure n'est pas exempt de risque pour le bien fondé du raisonnement. Or, la soudaineté des événements et les circonstances dans lesquelles la plupart du temps les demandes d'explication sont posées, peuvent conduire la communauté scientifique à en chercher les raisons par des approches partielles, dispersées, en ne prenant pas toujours la précaution de remonter à l'ensemble des causes et de mesurer l'effet de leurs interactions. Il paraissait nécessaire d'entreprendre une réflexion mettant à contribution les principaux organismes concernés par l'analyse et l'explication des phénomènes, sans lesquelles il est illusoire de prétendre intervenir sur les milieux pour mieux gérer l'aléa.

The human influence on flood generation

Abstract

Like other natural phenomena, the venue of floods is a compound result of many climatic, hydrological, pedological and morphologic factors. Their magnitude and occurrence can be changed by human action on landscape, either in urban planning or countryside management. But first we have to understand what the human influence is. As a matter of fact, sudden events can induce too quick answers, too quick inferences : indeed, intricate causal networks can easily hide the right conclusions. So, the scientific community has a need to lay down a global reflexion about this phenomenon, so that the society should one day be able to manage it in a rather active but reasonable way.

Avant-propos

La première partie de ce document a été initialement rédigée en vue du séminaire organisé les 18 et 19 novembre 1996 par le GIP HydrOsystemes pour et avec l'aide du ministère de l'Environnement. Il s'agissait alors d'un document provisoire d'état de l'art, destiné à soutenir le séminaire et à encourager aux échanges.

Les auteurs naviguaient entre deux écueils : faire un manuel d'hydrologie, là où un rapport d'état de l'art est attendu ; ne donner que l'état de l'art, sans les bases nécessaires au lecteur même cultivé pour l'apprécier. D'où le recours à des encadrés isolant certains éléments explicatifs qui peuvent être éventuellement déjà connus.

Cet état de l'art a été repris ensuite pour tenir compte d'un ensemble de suggestions et remarques faites lors du séminaire, notamment via les questions posées dans la salle, ou parvenues après, notamment à l'occasion d'une relecture externe effectuée par divers scientifiques et utilisateurs de la recherche. Ceci a amené à nuancer ou à préciser certains points.

On trouvera en fin de première partie la liste des auteurs et des principaux contributeurs.

La deuxième partie du document retrace les interventions et échanges qui ont eu lieu lors du séminaire proprement dit.

Première partie
État de l'art

Introduction

Les crues sont, comme beaucoup de manifestations naturelles visibles, des phénomènes intégrateurs qui ont pour origine des causes climatiques, hydrologiques, pédologiques, géologiques, morphologiques. Leur intensité et leur fréquence peuvent être modulées par la transformation des milieux par l'homme, que ces milieux soient à vocation agricole ou à vocation urbaine. Comme tout phénomène intégrateur le rapprochement que l'on est tenté de faire entre l'effet constaté et une des causes que l'on croit majeure n'est pas exempt de risque pour le bien fondé du raisonnement. Or, la soudaineté des événements et les circonstances dans lesquelles la plupart du temps les demandes d'explication sont posées, peuvent conduire la communauté scientifique à en chercher les raisons par des approches partielles, dispersées, en ne prenant pas toujours la précaution de remonter à l'ensemble des causes et de mesurer l'effet de leurs interactions. Il paraissait nécessaire d'entreprendre une réflexion mettant à contribution les principaux organismes concernés par l'analyse et l'explication des phénomènes, sans lesquelles il est illusoire de prétendre intervenir sur les milieux pour mieux gérer l'aléa.

L'intensité inhabituelle de certaines crues récentes est dans toutes les mémoires et pose aux services de l'Etat, mais aussi aux scientifiques et aux aménageurs, la question de savoir dans quelle mesure les pratiques humaines influencent de manière sensible l'aléa "cru". On conçoit en effet que s'il est possible de modifier les pratiques, on détient un des modes les plus accessibles de contrôle de l'aléa.

Le choix de poser la question sous cette forme a été guidé par le service de la Recherche et des affaires économiques du ministère de l'Environnement. C'est ainsi que le présent document veut l'aborder, avec le souci de poser les problèmes selon les termes d'une démarche scientifique. En outre, ce document voudrait situer le niveau des connaissances et des compétences scientifiques actuelles en matière d'analyse des phénomènes, en classant ces connaissances dans une séquence logique.

Le présent document a initialement constitué un support de séminaire, dans le cadre d'une consultation du monde la recherche visant à faire ressortir les lacunes dans la compréhension des phénomènes et, particulièrement, dans l'enchevêtrement des relations de cause à effet : comment bien les analyser ? Com-

ment mobiliser et où situer le plus judicieusement l'action des gestionnaires afin de modérer les effets directement dommageables pour l'homme et perdre le moins possible des avantages écologiques liés aux crues ?

Cette manière de faire avait deux objectifs : d'abord, amener les organismes de recherche à ajuster leur offre de recherche à une demande exprimée par un ministère, demande qui est la traduction d'une attente du corps social. Ensuite, conserver le caractère plurithématique du sujet, axé sur l'eau et les hydrosystèmes, ce qui fut fait en utilisant le relais d'une structure de coordination appropriée, le GIP HydrOsystemes.

Thierry Pointet
Président du groupe de travail
interorganismes sur les inondations.

S o m m a i r e g é n é r a l

Première partie – État de l'art

La perception sociale de l'influence humaine sur le régime des crues Vazken ANDRÉASSIAN, Cemagref	15
Les cheminements de l'eau naturels et/ou influencés Anne-Véronique AUZET, CNRS - CEREG	19
Analyse de l'action de l'homme sur le comportement des bassins versants et le régime des crues Vazken ANDRÉASSIAN, Cemagref	47
Essai de synthèse en vue de l'action : l'influence humaine à travers les pratiques actuelles et futures de gestion des eaux dans leurs ver- sants et dans leurs réseaux Guy OBERLIN, Cemagref	67
Bibliographie, vocabulaire ; liste des auteurs	105

Deuxième partie – Actes du séminaire

Ouverture du séminaire Benoît LESAFFRE, ministère de l'Environnement	127
Quelques cas récents	131
Débat suite à l'exposé de Mme Anne-Véronique AUZET	142
Débat suite à l'exposé de M. Vazken ANDRÉASSIAN	151

Débat suite à l'exposé de M. Guy OBERLIN	156
Clôture de la première journée	...
Igino TONELLI, ministère de l'Environnement	162
Bilan et marges de progrès	
Daniel VIDAL-MADJAR, GIP HydrOsystemes	165
Table ronde	
sous la présidence de M. DUNGLAS, GIP HydrOsystemes	169
Clôture du séminaire	
Jean-Luc LAURENT, ministère de l'Environnement	193

Avertissement

Quelques termes seront très employés dans le présent ouvrage.

ALÉA

Le débit d'une rivière fluctue naturellement au cours du temps et parfois augmente assez brusquement ; cela peut amener la rivière à s'épancher dans son lit majeur* ; ce phénomène absolument banal dépend tout à la fois du climat et du bassin versant* de la rivière ; dans une vallée où les hommes ne seraient pas installés, cela ne poserait aucune espèce de problème. Cette succession plus ou moins irrégulière des crues dans le temps, traduction d'un régime hydrologique* sous-jacent relativement stable, est dénommée aléa.

VULNÉRABILITÉ

Les hommes n'aiment le plus souvent pas les inondations, c'est-à-dire avoir de l'eau dans leurs demeures (dans leurs champs, leurs usines..., etc.). Une inondation peut être supportée exceptionnellement, mais on ne la souhaite ni trop haute, ni trop longue, et pas trop fréquente. Cette sensibilité à l'intrusion de l'eau dans notre quotidien ne dépend pas de l'endroit où l'on est installé : une maison, un équipement ont la même sensibilité qu'ils soient situés en bord de rivière ou en haut d'une colline. Cette sensibilité aux inondations, intimement liée à l'occupation du sol et à l'activité humaine, c'est la vulnérabilité.

RISQUE

En tout lieu, aléa et vulnérabilité coexistent. La confrontation des deux permet de délimiter des zones qui se trouvent dans une situation de risque. On est en situation de risque si l'aléa est trop fort par rapport à ce que la vulnérabilité peut admettre. Sinon il n'y a pas de risque, mais au contraire une marge de sécurité. Pour réduire le risque, on peut certes tenter d'agir sur l'aléa, de le diminuer ou de le répartir différemment dans le fond de vallée ; mais on peut aussi réduire le risque en modifiant la vulnérabilité. Une gestion raisonnée et négociée du risque est évidemment plus aisée là où une culture du risque commune aux aménageurs, propriétaires et gestionnaires existe.

Le présent document, s'intéressant à l'influence humaine dans l'origine des crues*, s'inscrit essentiellement dans la recherche d'une meilleure connaissance de la formation de l'aléa.

* les termes, sigles, noms de méthodes suivis d'une astérisque (*) sont repris dans le vocabulaire, en fin de première partie

La perception sociale de l'influence humaine sur le régime des crues

Vazken Andréassian

Division Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques, Cemagref
Parc de Tourvoie
92160 Antony

Résumé

Cet exposé introductif vise à rappeler qu'une perception cohérente du régime des crues n'est pas chose spontanée, et que la discussion de l'influence humaine sur leur survenue ne date pas d'hier.

Abstract

This preliminary chapter just wishes to recall that the perception of floods is not simple and that spontaneous discussion of their causes and of the man's influence on them has already last long.

1. Une mémoire imparfaite

Etablir la chronologie des crues est un exercice difficile, mais nécessaire si l'on s'intéresse à l'étude des influences humaines sur le régime des crues. En effet, il est indispensable de chercher à savoir dans quelle mesure une augmentation de la fréquence des crues est un phénomène réel ou dû à l'inconstance de la mémoire humaine.

Peu de sources d'information sont disponibles. On pense tout d'abord aux mesures hydro-métriques* réalisées en continu par les services de l'Etat. Ce sont bien évidemment les mesures les plus directes, mais elles présentent cependant des limites : il faut bien réaliser que la seule mesure objective qu'il soit possible de réaliser lors d'une crue est une mesure de hauteur d'eau. Le débit - variable hydrologique pertinente d'évaluation d'une crue - doit être extrapolé sur la base d'une courbe de tarage. Cette dernière peut être affectée par une multitude d'événements : changement d'emplacement de l'échelle de mesure, évolution du lit naturel de la rivière (creusement, envasement), erreurs dues aux extrapolations pour les forts débits, caractéristiques hydrauliques du site (conduisant à une hystérésis dans la courbe de tarage : le débit réel de la rivière n'est pas le même, pour une hauteur d'eau donnée, à la montée ou à la descente de la crue), etc. Toutes ces particularités peuvent être à l'origine de tendances apparentes dans le régime des crues*, qui ne sont en réalité que des artefacts.

De plus la majeure partie des stations limnimétriques n'ont été mises en place que récemment, après la seconde guerre mondiale. La mémoire humaine est bien souvent la seule information dont nous puissions disposer pour les périodes antérieures. Mais cette mémoire est très subjective. Si les crues sont de plus en plus médiatisées, est-ce par ce qu'elles sont plus nombreuses et plus destructrices, ou tout simplement par ce que le flux d'information est plus important aujourd'hui que par le passé? Et dans le cas où les inondations seraient plus destructrices, est-ce forcément parce que les crues qui sont à leur origine sont plus fortes, ou bien parce que les implantations humaines sont plus vulnérables que par le passé ?

Pour tenter de préciser la perception que nous avons des crues, essayons à présent de voir comment quelques crues récentes ont été abordées par les journaux et ressenties par la population.

2. Les crues vues par les journalistes

Après chaque crue importante, la presse se préoccupe d'hydrologie pour tenter d'expliquer des phénomènes qui impressionnent fortement la population. Les inondations catastrophiques de Nîmes en 1989 (10 morts) et de Vaison la Romaine en 1992 (41 morts) sont encore dans toutes les mémoires. A cela, on peut rajouter les inondations de janvier 1995 en Bretagne et dans les Ardennes. Au delà des explications d'ordre météorologique, les journalistes - et l'opinion publique - cherchent souvent d'autres raisons, qui pourraient expliquer des crues qui paraissent toujours plus fréquentes. A côté d'explications détaillées avancées par des spécialistes confirmés, on trouve également régulièrement des théories avancées peut-être trop rapidement, sans fondement réel. Voici quelques phrases recueillies dans la presse :

"Les engrais chimiques imperméabilisent les sols ;

"La plantation de résineux aux racines superficielles en lieu et place des feuillus aux racines profondes aggrave les crues." (Le Point)

"La recrudescence de ces dernières années est étonnante". (Libération)

"Le remembrement constitue aux yeux des scientifiques (sic) la principale cause des crues actuelles"

"On a trop urbanisé";

"Il n'y a plus de haies" ;

"Après les incendies, on a replanté sans sous-bois". (Science et Vie Junior)

Où s'arrêtent les suppositions sans fondement? Où commence la vérité? Il semble que le public, avide de comprendre des phénomènes d'une ampleur exceptionnelle, soit bien désorienté. On trouve en effet dans la presse de nombreuses affirmations, parfois contradictoires, à la fois sur la nature des facteurs aggravant des crues et sur l'ampleur des "responsabilités" de chacun des modes d'artificialisation des sols.

3. Un sujet qui ne date pas d'hier

Le sujet des crues n'est pas nouveau, l'extrait ci-dessous pourra en persuader le lecteur :

« Etude sur les inondations de la Meuse à Verdun et sur les travaux qui ont été exécutés pour en diminuer la fréquence et l'intensité » par M. Petitot-Bellavène (mémoires de la société philomatique de Verdun, Tome VII, 1872, imprimerie de Ch. Laurent, Libraire, 1 rue des Gros-Degrés, pages 179 et suivantes ; référence aimablement communiquée par M. Langenfeld, Agence de l'Eau Rhin-Meuse).

« La Meuse déborde très souvent et les crues les plus ordinaires la font sortir de son lit. La ville de Verdun et ses fortifications, qui barrent la vallée et arrêtent au passage les hautes eaux de la rivière, les forcent à refluer et à se répandre dans la prairie en amont de cette ville. Quelques orages ou plusieurs jours de pluie dans le bassin supérieur suffisent pour produire ce résultat. En hiver on admire sans regret cette belle nappe d'eau qui apporte la fertilité et fait la richesse du pays ; mais trop souvent, les crues surviennent en été, et alors, les foins souillés par le limon ou emportés par les eaux sont le triste effet du régime capricieux de la rivière.

Quand on compare le peu d'étendue du bassin de la Meuse au-dessus de Verdun avec ceux, beaucoup plus vastes, de grandes rivières dont le cours régulier ne se dérange qu'à longs intervalles, on s'étonne de l'inconstance de celui de la Meuse, et on a d'autant plus de peine à en comprendre la cause, que cette irrégularité se manifeste dans la partie supérieure du fleuve et à peu de distance de son origine.

Le bassin de la Meuse est, à la vérité, très resserré dans notre département, à tel point qu'il se réduit, pour ainsi dire, au faite des coteaux qui bordent la vallée ; mais en amont, il s'évase tout à coup, et la rivière se trouve formée par trois cours d'eau : la Meuse supérieure, le Vair et le Mouzon qui s'écartent comme les branches d'un éventail, et se partagent à peu près également les eaux pluviales qui tombent dans le bassin supérieur. Le sol de ce bassin est partout ondulé, d'une nature imperméable et médiocrement boisé, et les champs cultivés, qui en occupent la plus grande partie, accélèrent l'écoulement des eaux tant par leurs pentes que par les moyens que les cultivateurs emploient pour assainir leurs propriétés. Ces eaux se portent rapidement dans les trois rivières ; et celles-ci se réunissant presque au même point, les précipitent toutes à la fois dans le lit unique qu'elles forment par leur jonction. »

Dans le texte cité, on notera la mise en cause des cultivateurs. L'auteur de ce texte était cependant très conscient de faits autrement plus importants :

- 1) que les crues résultent de l'interaction entre un régime pluviométrique et un bassin versant qui a sa propre dynamique, tant dans les versants que dans les réseaux hydrographiques ;
- 2) les crues ne sont pas un problème en soi, loin s'en faut : régime des crues et occupation des sols sont à examiner conjointement dans l'évaluation de la gêne que les événements peuvent occasionner.

Nous souhaitons que les chapitres suivants puissent aider à préciser et à débrouiller la question, au bénéfice de tous.

Les cheminements de l'eau naturels et/ou influencés

Natural and influenced flow paths

Anne-Véronique Auzet

CEREG ERS1747 CNRS
Université Louis Pasteur
3 rue de l'Argonne
67083 Strasbourg Cedex

tél : 03 88 45 64 21

fax : 03 88 41 13 59

mel: auzet@geographie.u-strasbg.fr

Résumé

Ce chapitre présente d'abord, sous l'angle de leur contribution dans la formation des crues, les principaux processus hydrologiques actifs dans les bassins versants : échanges avec l'atmosphère, avec le rôle déterminant de l'interface sol - végétation - atmosphère et donc du couvert végétal ; processus de formation du ruissellement ; effets du transfert dans les réseaux hydrographiques. Les principaux facteurs de contrôle de ces processus sont évoqués, ainsi que le rôle potentiel de l'action humaine. Dans une deuxième partie, l'auteur procède à une revue des outils dont disposent les chercheurs pour aborder les nombreuses questions en suspens : données hydrologiques, capteurs nouveaux (radars, satellites,...), méthodes issues de la géochimie isotopique, modèles numériques de terrain, modèles hydrologiques, modèles hydrauliques, typologies fonctionnelles.

Abstract

This section first presents the main hydrological processes acting in catchments, focusing on their contribution to flood generation : atmospheric exchanges - a determinant part of the SVAT system -, vegetation cover, runoff generation processes, transfer in the hydrological network. Then it summarises the main factors controlling these processes, with an emphasis on possible human impact via land use. The last part is a short review of the main tools, methods and data available to researchers for addressing open questions : hydrologic series, new probes like radar or satellites, isotopic tracers, digital elevation and terrain models, hydrological and hydraulic models, typologies.

1. Introduction

Ce chapitre concerne principalement la genèse des débits, et non les effets des crues. Son principal objectif est de faire le point sur les différents processus et leurs facteurs de contrôle, sur les théories et les outils disponibles en la matière. En plus de la bibliographie, il s'appuie sur les contributions de nombreux collègues. Certains doivent être particulièrement remerciés pour leur apport à ce texte : Bruno Ambroise, qui nous a permis de reprendre largement la synthèse faite en 1991 et celle à paraître prochainement dans la Revue des Sciences de l'Eau, Thierry Bariac, Claude Cosandey, Joël Humbert, Jean-Michel Gréssillon, Gérard Maire, Philippe Mérot, Charles Obled et Daniel Viville qui nous ont fourni documents et précieuses remarques.

La crue d'un cours d'eau est une augmentation du débit liquide dans son lit, qui provoque une montée significative du niveau et éventuellement, suivant l'importance de la crue et la géométrie du lit, des débordements. Cet accroissement de l'afflux d'eau peut se produire plus ou moins brutalement, affecter tout ou partie d'un réseau hydrographique et se propager selon diverses modalités de l'amont vers l'aval. Il s'accompagne très généralement d'un accroissement du débit solide:

L'origine de l'afflux d'eau est d'abord climatique : il est dû aux pluies, dans certains cas à la fonte des neiges, parfois à la conjonction des deux. La crue traduit la réponse non seulement du cours d'eau, mais aussi du bassin versant à cet apport, à ce « forçage externe » du système.

La manière dont l'eau parvient au cours d'eau va dépendre des cheminements de l'eau entre l'atmosphère et les talwegs* : entre l'apport des précipitations et les débits en un endroit particulier ou le long du réseau hydrographique, un certain nombre de processus en interaction vont influencer les flux d'eau. Leur description est l'objet de ce chapitre.

Les processus qui affectent la redistribution de l'eau précipitée, son stockage éventuel et son transfert vers les cours d'eau ont leur siège dans un bassin versant. Celui-ci est un système complexe à trois dimensions, bien différent d'un simple *impluvium** topographique. Il est décomposable en plusieurs domaines, depuis la partie aérienne occupée généralement par la végétation ou les zones urbanisées jusqu'au substrat géologique (sol et sous-sol) et en plusieurs unités fonctionnelles des versants jusqu'au lit mineur (figure 1)

Certains processus conditionnent l'arrivée de l'eau au sol ; d'autres assurent le transfert en surface — le ruissellement — ou en profondeur, dans le sol, les formations superficielles et les substrats rocheux — infiltration, écoulement hypodermique, drainage vers les zones saturées, les nappes et les cours d'eau —. Ces processus ont nécessairement un caractère spatial : ils se produisent en un endroit déterminé et peuvent générer des effets bien plus en aval. Par ailleurs leur occurrence, leurs interactions et finalement l'importance de leur contribution aux crues est dépendante, pour un bassin donné, de son état au moment des apports générateurs de crues (les « conditions initiales »). De ceci découle que la relation entre pluies et débits pour un cours d'eau donné sont loin d'être univoques. Cette dépendance entre le comportement hydrologique d'un bassin versant et l'état initial du milieu récepteur — en particulier des conditions hydriques — est illustrée par la figure 2.

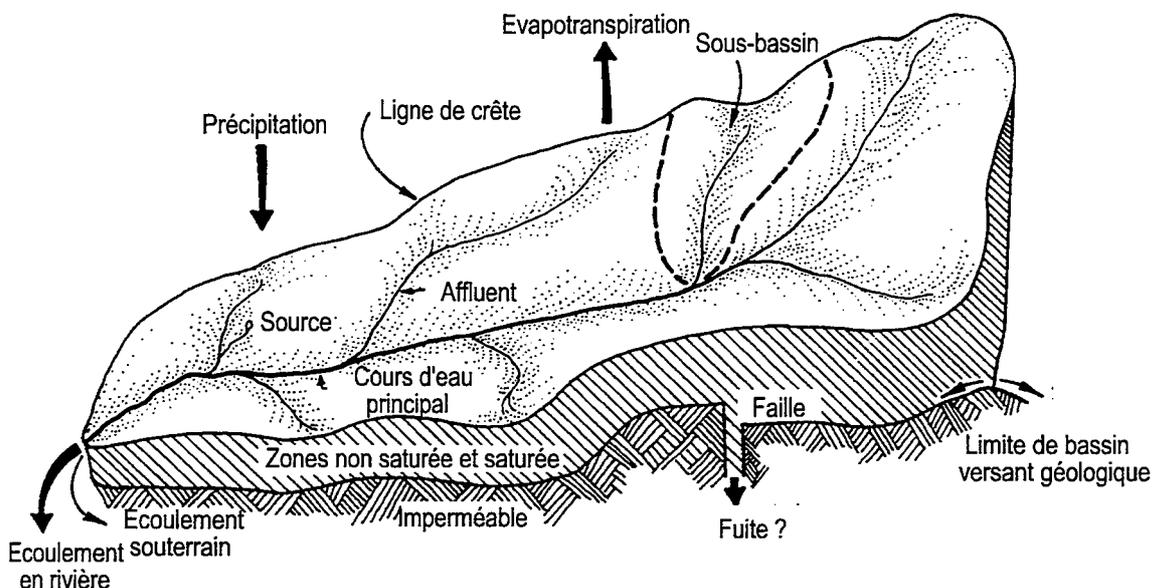
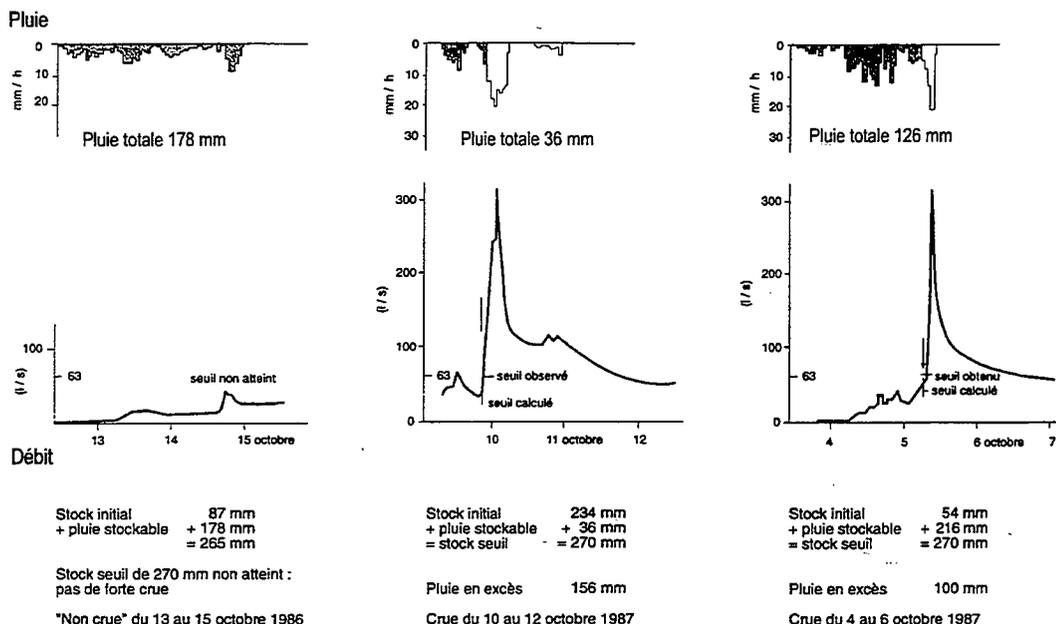


figure 1 : un bassin versant (d'après Hewlett, 1982)

La question de l'influence humaine dans la formation des crues est principalement celle de son influence sur les processus qui gouvernent les flux d'eau entre leur entrée dans le bassin versant et leur arrivée dans le réseau hydrographique. Elle est d'abord celle de la distribution dans l'espace et dans le temps de l'occupation du sol et des activités associées, qui conditionnent par exemple la localisation de surfaces plus ou moins aptes à infiltrer l'eau (urbain / non urbain), la présence de certains types de couverts végétaux en certains endroits et à certaines périodes (différents types de forêts, variété des surfaces cultivées), d'équipements hydrauliques (barrages, retenues, endiguements...), et de tout un linéaire (routes, chemins d'accès, pistes....) dont l'action sur l'infiltration et surtout l'acheminement de l'eau est de plus en plus reconnu...

Au sein des bassins versants de relativement grande dimension (>100km²), certains auteurs distinguent les « zones de production », plus densément drainées, où les cours d'eau ont des débits relativement faibles mais des débits spécifiques élevés, des « zones de transfert », où les débits augmentent, et des « zones de stockage » qui sont en général des plaines inondables où, à l'état naturel, se produisent les accumulations, sédimentation des matières solides, inondations des lits majeurs... (Schumm, 1977 ; Amoros et Petts, 1993).



Source : Cosandey et Didon-Lescot, 1990

figure 2 : non linéarité des crues : effet des conditions initiales.
Exemple du petit bassin du Mont-Lozère
(d'après Cosandey et Didon-Lescot, 1990).

Ce schéma général doit cependant être nuancé sur le plan fonctionnel. Certes, du fait des caractéristiques notamment topographiques et lithologiques, l'un des phénomènes prédomine en général en un lieu donné. Mais des conditions particulières, notamment celles qui prévalent pour les événements extrêmes (intensité et/ou durée des pluies, état de saturation des réservoirs *...) font que cette distinction simplificatrice n'est pas absolument stable spatialement. En réalité, production, transfert et stockage peuvent se produire partout.

2. Les différents processus et leurs facteurs de contrôle

La réponse d'un bassin à un événement pluvieux donné se traduit au niveau du cours d'eau par l'évolution temporelle des débits, ce qui est représenté par la forme de l'hydrogramme de crue. Cette forme dépend simultanément de l'apport (volume total, durée, intensités) et des caractéristiques et de l'état initial du bassin.

L'apport d'eau responsable des crues est indiscutablement dû aux précipitations. Ces précipitations peuvent être soit sous forme de pluie, soit sous forme de neige, auquel cas leur effet est différé jusqu'à la fonte. Mais seule une partie des précipitations contribue à la formation du débit : une autre partie en effet retourne rapidement vers l'atmosphère ; une autre enfin est stockée par le couvert végétal et les sols, avant de retourner éventuellement aussi vers l'atmosphère.

Les conditions initiales prévalant dans le bassin versant dépendent de l'histoire climatique récente (quelques jours à quelques mois pour les crues) et des caractéristiques des différents lieux et modes de stockage de l'eau dans le bassin qui dans le même laps de temps ont présidé à la redistribution de l'eau dans le bassin. Elles conditionnent largement les relations entre les pluies et les débits, certains processus de formation des crues n'entrant en jeu que lorsque certains seuils d'humidité du sol ou d'intensité de la pluie sont dépassés.

Les crues sont ainsi fortement dépendantes des processus intervenant au niveau des échanges avec l'atmosphère, à l'interface végétation - sol - formations superficielles et entre nappes et rivière. Ce sont ces processus que l'on va détailler maintenant.

2.1 Les échanges avec l'atmosphère

Aux échelles régionales, les précipitations ne sont probablement que faiblement influencées par les activités humaines. Il en va tout autrement de l'évapotranspiration, largement conditionnée par l'occupation du sol.

2.1.1 Les précipitations

Les précipitations sont la cause première des crues. Il est donc essentiel d'en connaître le mieux possible le volume, les intensités et la distribution spatiale. Les précipitations présentent en effet une hétérogénéité marquée à l'échelle de grandes régions. Cette hétérogénéité est en partie liée aux différents mécanismes générateurs de la pluie (ascendances frontales dynamiques *, ascendances convectives *, ascendances liées à l'orographie, dont la physique semble bien établie), et aux caractéristiques des masses d'air dont les précipitations sont issues.

Par exemple, à l'échelle du Bassin Parisien, les pluies océaniques classiques sont liées aux flux d'Ouest et sont marquées par un gradient associé à la distance à la côte : ainsi, en période hivernale, les régions côtières de Normandie sont davantage arrosées que l'intérieur des terres. L'ensemble subit généralement les mêmes périodes pluvieuses, mais les volumes et les intensités sont loin d'être homogènes. Au total les apports liés au passage des perturbations océaniques, assez peu intenses, concernent de vastes superficies.

Les mouvements de convection génèrent des orages qui peuvent être particulièrement brutaux. En présence d'air froid en altitude favorisant encore l'ascendance, l'air chaud chargé d'humidité se « vide » efficacement. C'est par exemple le cas lorsque des masses d'air chargées d'eau sur la Méditerranée et soumises à des flux de Sud - Est subissent des ascendances forcées au contact d'obstacles topographiques — les Cévennes, les Alpes —

et rencontrent des masses d'air froid en altitude. Les apports par les pluies orageuses peuvent être très intenses. Ils sont par contre, généralement, beaucoup plus localisés.

Il est important de connaître la répartition spatiale et temporelle des apports climatiques pour évaluer son influence dans la genèse des débits. Ces questions se heurtent à celles des échelles d'espace et de temps à prendre en compte. Suivant la densité et la répartition du réseau des stations météorologiques, les apports mesurés localement peuvent différer sensiblement des quantités réelles arrivées au sol, et être assez peu représentatifs de l'apport total sollicitant le bassin versant et de sa distribution par rapport au réseau hydrographique.

Plus forte dans le cas des systèmes convectifs que frontaux, la variabilité spatiale et temporelle est liée aux types de systèmes pluvieux et à l'influence de la topographie : elle est établie pour les bassins des cours d'eau dont la partie amont est constitué de montagnes élevées (Alpes ou Pyrénées par exemple). Elle l'est également pour la moyenne montagne : l'essentiel du volume des crues usuelles des rivières vosgiennes, liées à des précipitations de secteur Ouest qui subissent un important effet de foehn* du fait de l'orientation du relief, prend naissance dans les hauts bassins (Humbert, 1985 ; Humbert et al., 1993a et b).

Ce caractère hétérogène des précipitations reste important et présent à l'échelle de petits bassins élémentaires (moins d'un kilomètre carré) où une relation existe bien entre topographie, types de flux et précipitations (Adjizian et Ambroise, 1989).

Les précipitations extrêmes, éventuellement de courte durée, ont un rôle majeur dans la genèse de crues importantes. Cependant, l'analyse des fréquences* d'intensités pour différents pas de temps se heurte souvent soit au manque, soit à la durée limitée des enregistrements permettant de travailler aux pas de temps fin d'une à quelques heures (Estorge et al., 1980 ; Kieffer et Bois, 1996).

2.1.2 L'évapotranspiration

Le terme évapotranspiration inclut l'évaporation de l'eau interceptée par les couverts végétaux, l'évaporation du sol et la transpiration des plantes. Par son influence sur le stock d'eau et sa répartition dans un bassin, il conditionne les états initiaux : entre les événements pluvieux, c'est effectivement l'évapotranspiration qui influence la redistribution de l'eau dans les sols (Perrier et Riou, 1985).

Cette évapotranspiration est évidemment fonction des disponibilités en eau et des apports d'énergie (radiative ou advective, c'est-à-dire provenant du rayonnement solaire ou liée aux caractéristiques des masses d'air en mouvement). En montagne, le relief provoque d'importantes variations spatiales de l'énergie disponible (Perrier et Riou, 1985 ; Cellier et Brunet, 1994 ; Ambroise et Najjar, 1983 ; Ambroise et al., 1995) ; la topographie (pente et orientation) influence donc fortement l'évapotranspiration potentielle et réelle. Cela a été montré sur modèle réduit, notamment du fait des effets du relief sur le vent et donc sur l'évapotranspiration (CNRM, 1996). L'évapotranspiration est aussi, évidemment, dépendante des sols et formations superficielles et de la nature des couverts végétaux, dont l'influence sur le climat aux échelles régionales et locales peut ne pas être négligeable.

Là encore, la compréhension et la modélisation de la distribution spatiale des échanges avec l'atmosphère se heurte à des limites météorologiques dont il faut être conscient et notamment à une longueur généralement insuffisante des séries de données à pas de temps fin. La distribution même des facteurs de contrôle est loin d'être permanente et varie avec les flux atmosphériques et les caractéristiques au sol (topographie, sols et occupation des sols).

Loin de compliquer à outrance la compréhension des processus, les résultats évoqués ci-dessus indiquent que des démarches typologiques devraient permettre de classer des situations et de mieux comprendre la distribution des échanges avec l'atmosphère. Ceci ne peut évidemment se faire sans l'apport d'un certain nombre de développements météorologiques, permettant de mieux caractériser les apports atmosphériques et les échanges avec l'atmosphère, notamment dans leurs dimensions spatiale et temporelle.

2.2 L'interface sols - formations superficielles

L'essentiel de l'eau des cours d'eau a cheminé sur ou dans les versants, leurs sols et formations superficielles, avant de rejoindre le réseau hydrographique. Cela justifie l'importance qu'il faut accorder au fonctionnement hydrologique de l'interface sols - formations superficielles pour comprendre la redistribution de l'eau et les vitesses de circulation.

2.2.1 Principaux processus superficiels et souterrains de circulation de l'eau

Ceux-ci sont présentés sur la figure 3 empruntée à B. Ambroise (1991, modifiée 1995).

Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration *, dit ruissellement hortonien * est celui qui se produit lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol et que l'excès d'eau ainsi formé en surface se met en mouvement du fait de la pente. Les vitesses atteintes vont dépendre principalement de la pente, de la rugosité de la surface sur laquelle l'eau s'écoule et de l'épaisseur de la lame d'eau. Ce ruissellement se produisant le plus souvent sous forme de filets anastomosés plutôt qu'en nappe, les variations locales de l'épaisseur peuvent être importantes. Des vitesses de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres par seconde ne sont pas exceptionnelles. Cependant, sous climat tempéré, ce type de ruissellement est rarement généralisé sur une part importante du bassin. Si les zones concernées sont éloignées du réseau hydrographique, l'eau de ruissellement peut se réinfiltrer sur son parcours, comme l'attestent notamment les travaux sur des versants agricoles en Bretagne (Gascuel et al. ; 1996) ou en milieu viticole méditerranéen (Voltz et Andrieux, 1996). Par contre, la présence du réseau formé de fait par toutes sortes de motifs linéaires, tels les pistes, les routes, les bordures de parcelles, certains motifs agraires peuvent s'avérer efficaces dans la collecte, la conduite et la concentration vers l'aval (Ludwig et al., 1995 ; Jones et Grant, 1996).

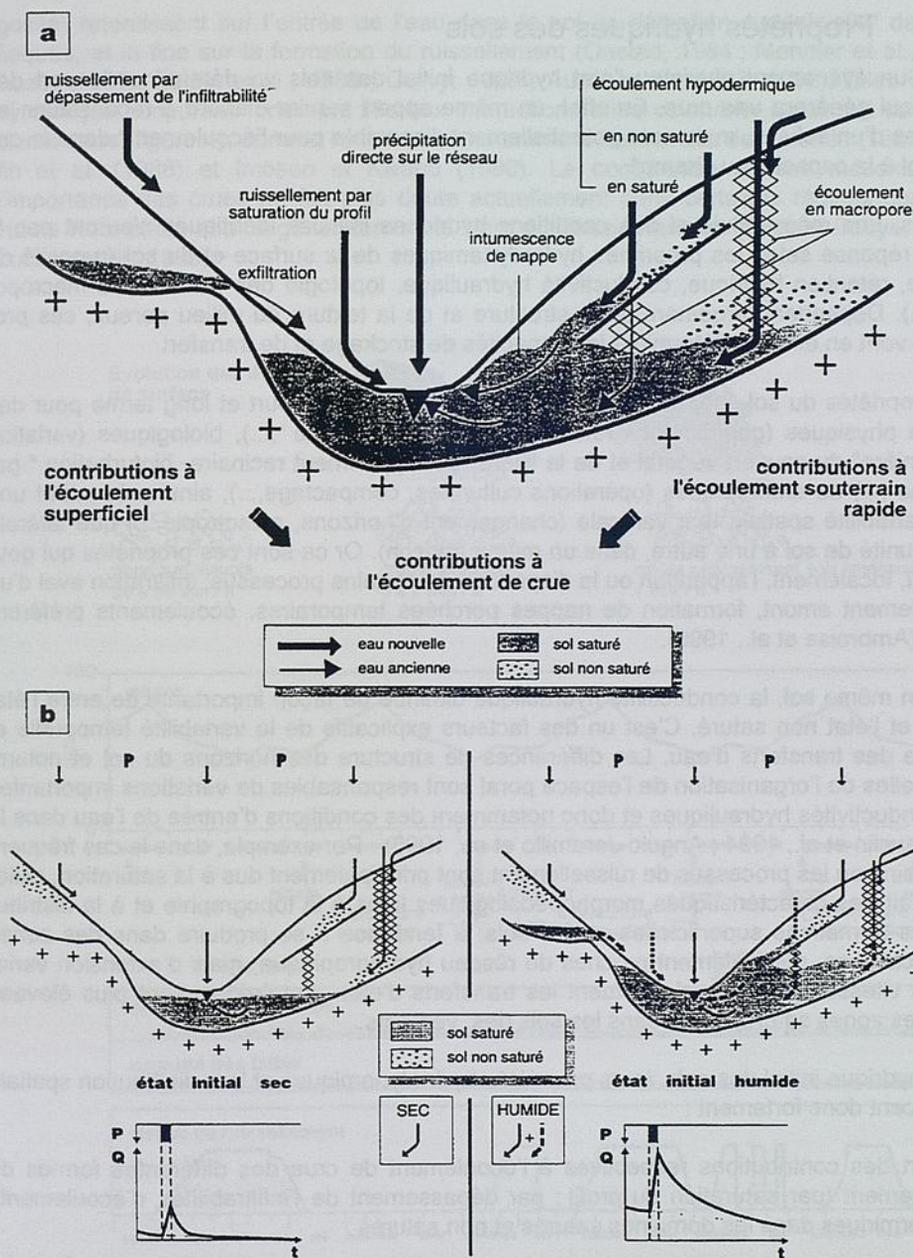
Le ruissellement par saturation du profil est celui qui se produit lorsque le réservoir que constitue le sol et les formations superficielles est totalement rempli, de sorte que tout apport supplémentaire sur ces zones saturées, quelle que soit son intensité même faible, ne

pourra que ruisseler — ou libérer un volume équivalent d'eau ancienne par effet piston (Cappus, 1960 ; Merot, 1978 ; Cosandey, 1984 ; Ambroise, 1986). Ce type de ruissellement se produit couramment dans les zones d'affleurement des nappes, même si celles-ci sont très localisées et/ou temporaires comme certaines nappes perchées.

L'écoulement hypodermique ou écoulement subsuperficiel est celui qui se produit à travers le sol et les formations superficielles, dans un milieu non saturé en eau. L'écoulement souterrain est celui qui s'effectue en milieu saturé, au dessus d'un substratum réputé imperméable. La frontière entre ces deux écoulements est mouvante en fonction des conditions d'humidité du sol. Les deux écoulements s'effectuent à des vitesses bien inférieures à celles qui se produisent en surface, plus élevées à saturation que dans le domaine non saturé : elles n'excèdent généralement pas des ordres de grandeur de 10^{-3} m.s⁻¹ à 10^{-5} m.s⁻¹, même lorsque la macroporosité est élevée.

L'exfiltration * correspond à la sortie en surface d'une eau infiltrée, et se produit lorsque cette eau rencontre une zone saturée ou de perméabilité limitée. Ce processus se produit généralement dans des endroits où le sol est peu épais ou peu perméable, ainsi que dans les zones gorgées d'eau généralement localisées dans la partie concave des bas de versants (Dunne et Black, 1970).

Ainsi, sauf en cas de très forte macroporosité liée à la présence de galeries d'origine biologique, éventuellement de drains enterrés, le transfert à travers la matrice du sol est généralement trop lent pour permettre à une partie importante des versants de participer significativement à la genèse de crues importantes et leur lente vidange contribue davantage à la recharge des aquifères et au soutien des débits de base. Mais les parties inférieures plus humides des versants, aux nappes peu profondes, sont rechargées rapidement par percolation à travers une faible épaisseur de sol non saturé. Un apport faible d'eau à la frange capillaire qui surplombe la nappe suffira à convertir cette frange capillaire en eau libre et à élever rapidement le niveau de la nappe. L'onde de perturbation induite est transmise vers l'aval jusqu'au cours d'eau drainant la nappe, à une vitesse bien supérieure à celle du déplacement réel de l'eau (Beven, 1989 ; Ambroise, 1991).



Source: B. Ambroise, 1991

figure 3 : Principaux processus de circulation de l'eau dans le compartiment sols - formations superficielles (Ambroise, 1991, 1995 et à paraître).

2.2.2 Propriétés hydriques des sols

Lors d'un événement pluvieux, l'état hydrique initial des sols va déterminer la part des pluies qui générera une crue. En effet, un même apport servira d'abord à reconstituer les réserves d'un sol sec, mais sera potentiellement disponible pour l'écoulement* dans le cas d'un sol à la capacité au champ* .

De plus, une même pluie et des conditions hydriques initiales identiques n'auront pas la même réponse selon les propriétés hydrodynamiques de la surface et du sol (rugosité de surface, rétention hydrique, conductivité hydraulique, topologie des réseaux de macropores *,...). Dépendant largement de la structure et de la texture du milieu poreux, ces propriétés vont en effet en déterminer les capacités de stockage et de transfert.

Ces propriétés du sol subissent des variations temporelles à court et long terme pour des raisons physiques (gonflement - retrait, gel - dégel, battance *,...), biologiques (variation saisonnière* du couvert végétal et de la litière, développement racinaire, bioturbation * par la faune ,...) ou anthropiques (opérations culturales, compactage,...), ainsi présentent une forte variabilité spatiale tant verticale (changement d'horizons, anisotropie,...) que latérale (d'une unité de sol à une autre, dans un même horizon). Or ce sont ces propriétés qui gouvernent, localement, l'apparition ou la disparition de certains processus: infiltration aval d'un ruissellement amont, formation de nappes perchées temporaires, écoulements préférentiels,.. (Ambroise et al., 1996).

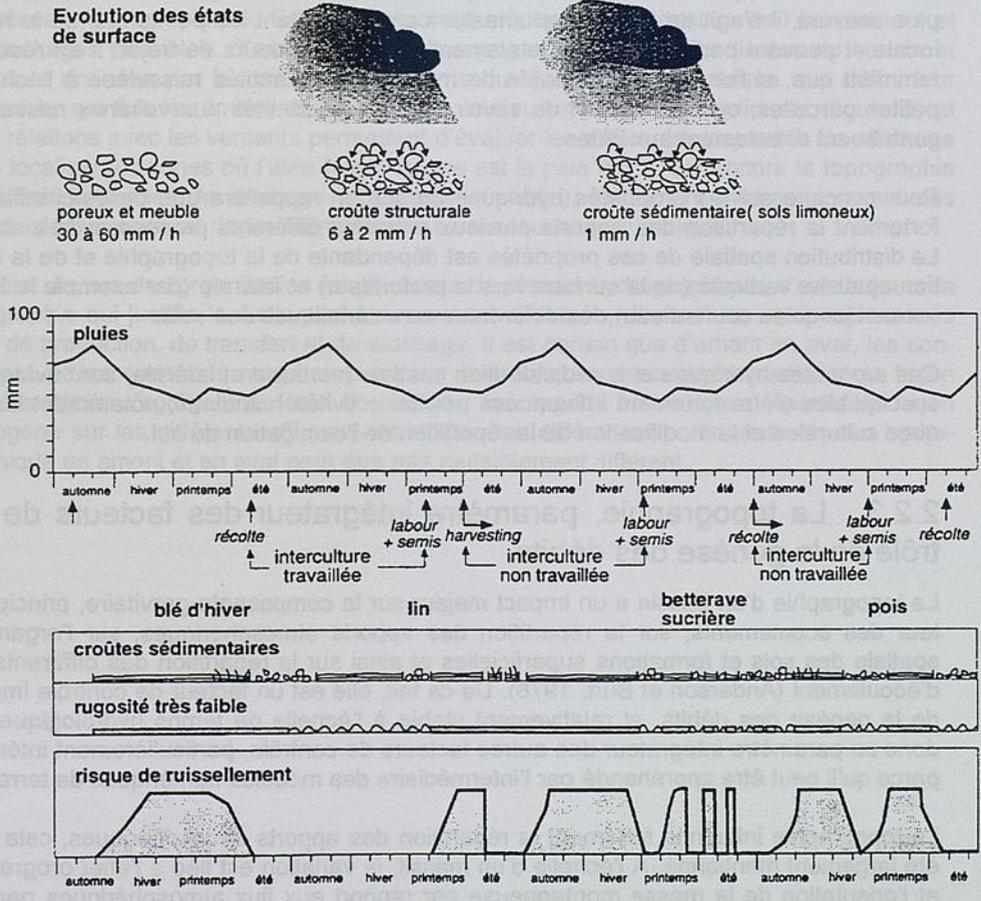
Pour un même sol, la conductivité hydraulique diminue de façon importante de entre l'état saturé et l'état non saturé. C'est un des facteurs explicatifs de la variabilité temporelle et spatiale des transferts d'eau. Les différences de structure des horizons du sol et notamment celles de l'organisation de l'espace poral sont responsables de variations importantes des conductivités hydrauliques et donc notamment des conditions d'entrée de l'eau dans le sol (Vauclin et al., 1994 ; Angulo-Jaramillo et al., 1996) . Par exemple, dans le cas fréquent de bassins où les processus de ruissellement sont principalement dus à la saturation, celle-ci, du fait des caractéristiques morphopédologiques liées à la topographie et à la distribution des formations superficielles et des sols, a tendance à se produire dans des zones bien localisées, généralement proches du réseau hydrographique, mais d'extension variable. La vitesse à laquelle s'effectuent les transferts d'eau sont évidemment plus élevées dans ces zones saturées que dans les sols des versants.

L'état hydrique initial des sols, leurs propriétés hydrodynamiques et leur distribution spatiale influencent donc fortement :

- la part des contributions respectives à l'écoulement de crue des différentes formes de ruissellement (par saturation du profil ; par dépassement de l'infiltrabilité), d'écoulements hypodermiques dans les domaines saturés et non saturés ;
- la dimension des aires et des volumes qui contribuent aux différentes formes d'écoulement et, en relation avec la topographie, leur localisation (Ambroise, 1991).

L'état hydrique des sols intervient en outre sur les mécanismes et la vitesse de dégradation de la structure du sol en surface (Boiffin, 1986 ; Le Bissonnais, 1990) ; en interaction avec les opérations culturales, ces modifications de la structure du sol en surface (porosité, ru-

gosité) retentissent sur l'entrée de l'eau dans le sol, la détention superficielle* dans des flaques, et in fine sur la formation du ruissellement (Onstad, 1984 ; Monnier et al., 1986 ; Auzet, 1987 ; Boiffin et al., 1988 ; Ouvry, 1989 ; Auzet et al., 1993, 1995). Elles ont une dynamique temporelle fortement liée aux interactions entre calendrier agricole et conditions climatiques (figure 4), comme l'ont montré notamment les travaux de Valentin (1981), Boiffin et al. (1988) et Imeson et Kwaad (1990). La contribution de ces mécanismes à l'importance des crues ne fait plus doute actuellement dans certaines régions comme la Haute Normandie et plus généralement le Nord du Bassin Parisien (Papy et Douyer, 1991 ; Ludwig et al., 1996).



Source A.V. AUZET et al. 1990

figure 4 : Evolution du risque de ruissellement en fonction du calendrier agricole et des conditions climatiques

Il convient ici d'insister sur l'importance des états de surface du sol, particulièrement dans le domaine cultivé, où ceux-ci sont nettement influencés par le type de culture et de pratiques culturales (Ouvry, 1986 ; Papy et Boiffin, 1989 ; Vauclin et Chopart, 1992 ; Papy et Souchère, 1993 ; Papy et al., 1996). Enfin, mais nous y reviendrons, il convient d'insister sur le fait que les propriétés hydriques des sols sont aussi fortement modifiées par la présence ou non d'un couvert végétal, le développement d'un système racinaire — différent selon les espèces et modifiant l'infiltrabilité. A des systèmes racinaires denses peuvent être associés de très fortes valeurs d'infiltrabilité, de l'ordre de 180 mm/h (Grésillon, 1994 ; Grésillon et al., 1995).

On notera que même lorsque le ruissellement apparaît, il est relativement rare qu'il prenne une forme en nappe continue avant de rejoindre un motif linéaire servant de collecteur : le plus souvent, il s'agit de filets d'eau anastomosés, exploitant les points bas de la rugosité locale et pouvant partiellement ou totalement s'infiltrer en cours de trajet. Il en résulte notamment que, si l'on est bien capable de mesurer les quantités ruisselées à l'échelle de petites parcelles, on est très loin de savoir relier ces quantités aux volumes ruisselés qui contribuent directement aux crues.

Pour conclure sur les propriétés hydriques du sol, on rappellera que celles-ci influencent fortement la répartition des apports pluvieux entre les différents processus de circulation. La distribution spatiale de ces propriétés est dépendante de la topographie et de la répartition spatiale, verticale (de la surface vers la profondeur) et latérale (par exemple le long du versant jusqu'au cours d'eau) des différentes caractéristiques des sols.

Ces propriétés hydriques et leur distribution spatiale (verticale et latérale) sont évidemment susceptibles d'être fortement influencées par les activités humaines, notamment les pratiques culturales et la modification de la répartition de l'occupation du sol.

2.2.3 La topographie, paramètre intégrateur des facteurs de contrôle de la genèse des débits

La topographie d'un bassin a un impact majeur sur la composante gravitaire, principal moteur des écoulements, sur la répartition des apports atmosphériques, sur l'organisation spatiale des sols et formations superficielles et ainsi sur la répartition des différents types d'écoulement (Anderson et Burt, 1978). De ce fait, elle est un facteur de contrôle important de la genèse des débits, et relativement stable à l'échelle de temps hydrologique. C'est donc un paramètre intégrateur des autres facteurs de contrôle, particulièrement intéressant parce qu'il peut être appréhendé par l'intermédiaire des modèles numériques de terrain.

La topographie influence fortement la répartition des apports atmosphériques, cela a déjà été largement mentionné. A l'échelle d'un massif, la variation est liée à l'effet orographique et l'orientation de la masse montagneuse par rapport aux flux atmosphériques paraît déterminante dans la distribution des précipitations. A l'échelle d'un bassin, les quantités de pluies et d'énergie reçues en tout point dépendent en outre de la pente, de l'orientation et de la position du point en crête ou en vallon — ces facteurs contrôlant son ensoleillement et son exposition aux vents (Adjizian et Ambroise, 1989; Ambroise et Najjar, 1983).

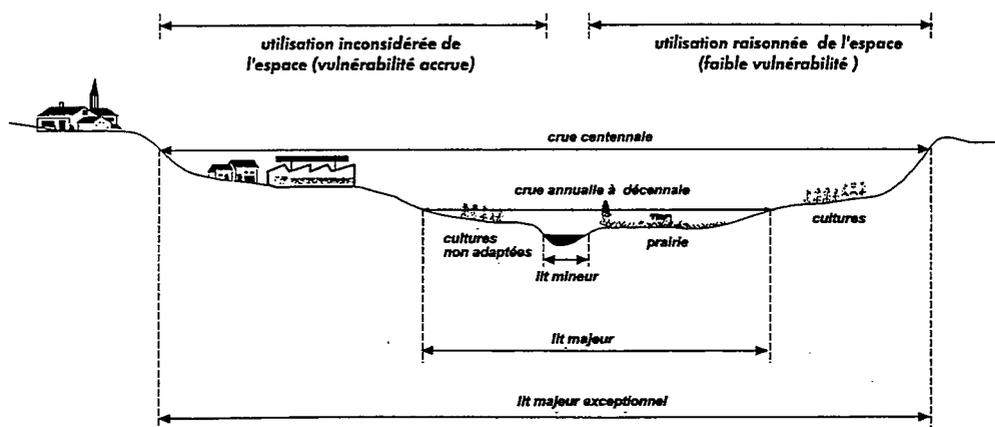
La topographie est aussi un facteur morphogénétique qui, à l'échelle des temps géologiques, est essentiel dans la mise en place des formations superficielles et dans leur évolution ultérieure, fixant ainsi leur répartition spatiale le long des versants et dans les fonds des vallées (Boulet et al., 1979 ; Mérot, 1995). A l'échelle de temps qui intéresse l'hydrologie, on peut considérer que les facteurs morpho-pédologiques sont des caractéristiques permanentes, qui influencent fortement :

- la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques des sols et des formations superficielles, en relation avec leurs propriétés physiques de texture et de structure,
- la distribution spatiale des conditions initiales et notamment des zones contributives d'extension variables où sont actifs certains types d'écoulement.

La topographie définit également un certain nombre de relations entre le bassin versant et son réseau hydrographique. Ces relations vont influencer les vitesses de l'écoulement et les stockages possibles. C'est en général la topographie qui fixe les limites du bassin et des aires drainées par les différents éléments du réseau hydrographique, qui définit leur hiérarchie, qui fixe les limites des lits mineur, majeur et majeur exceptionnel (figure 5) et leurs relations avec les versants permettant d'évaluer les différentes capacités de stockage et de localiser les zones où l'aléa hydrologique est le plus fort. C'est encore la topographie qui définit la densité de drainage (apparente et réelle), fondamentalement même du cumul des apports des versants et drains élémentaires au réseau hydrographique.

Du point de vue de l'organisation longitudinale du réseau hydrographique, c'est toujours la topographie qui justifie la distinction couramment effectuée, d'amont en aval, entre zones dites de production, de transfert et de stockage. Il est certain que d'amont en aval, les confluences et les variations morphologiques et hydrauliques associées structurent la façon dont les débits s'agrègent au sein du réseau : les apports ne sont pas répartis de façon homogène sur les différents affluents, et le rôle des différentes portions du réseau hydrographique en amont et en aval peut être très sensiblement différent.

Les différents espaces hydrauliques dans une vallée alluviale et les risques associés selon les modes d'utilisation



Source: J. Humbert (document de cours)

Hydrologie, CEM, JCM / CEM - 198

figure 5 : Les différents espaces hydrauliques dans une vallée alluviale et les risques associés selon les modes d'utilisation (J. Humbert, document de cours)

2.2.4 Les échanges nappes-rivières

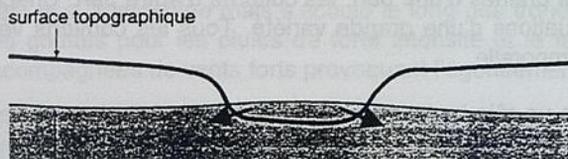
Ces échanges sont importants à prendre en compte car ils peuvent modifier la réponse du bassin à un apport pluvieux et notamment l'ampleur de l'onde de crue le long d'un réseau hydrographique.

L'exposé des différents types d'écoulement a déjà mentionné le rôle important, dans la genèse des crues, des zones saturées où la nappe est affleurante ou sub-affleurante. Situées à l'interface complexe atmosphère/eaux de surface/eaux souterraines, ces surfaces réagissent aux moindres précipitations ; elles sont d'extension très variables selon l'état hydrologique du bassin et évoluent au cours d'une même crue (Dunne et al., 1975 ; Cosandey, 1984 ; Ambroise, 1986 ; Mérot, 1988).

À côté de cette évolution des zones saturées, l'évolution de la position de la nappe phréatique au cours de la crue va déterminer les possibilités d'infiltration et d'exfiltration dans le lit du cours d'eau lui-même pour peut que la perméabilité du périmètre mouillé le permette, diminuant l'écoulement ou au contraire amplifiant son volume par drainage de la nappe, ce que révèle le suivi des niveaux piézométriques (figure 6) (Humbert, 1985).

La lithologie a évidemment un rôle essentiel dans la localisation de la nappe phréatique, mais également des nappes perchées, dont les contributions peuvent être importantes.

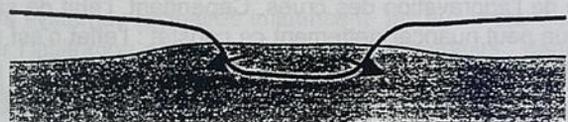
C'est à ce niveau également que doit être pris en compte l'infiltration à l'amont du système constitué par le bassin versant, dont le fonctionnement peut parfois dominer les contributions de la nappe. C'est un cas évoqué pour les circulations karstiques mais aussi de plus en plus souvent pour les drains à vocation agricole (fossés ou canalisations enterrées) ou d'origine biologique (galeries des fuisseurs).



Phase 1: début de crue

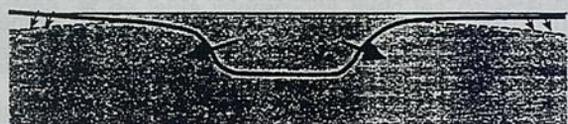
- pertes légères des débits du cours d'eau dans les berges

surface piézométrique



Phase 2: montée de crue

- accentuation des pertes dans la basse terrasse
- remontée de la nappe



Phase 3: débordement

- étalement des eaux dans le champ d'inondation
- pertes maximales
- continuation de la remontée de la nappe



Phase 4: décrue

- récupération d'une partie des eaux d'inondation
- drainage de nappe important



Phase 5: retour à une situation "normale"

- nappe légèrement réhaussée
- drainage lent

D.A.O. AGRICULTURE

Source: J.Humbert, 1985

figure 6 : Evolution au cours d'une crue des échanges entre cours d'eau et nappe phréatique (Humbert, 1985)

2.3 Le couvert végétal

La présence ou l'absence de couvert végétal constitue une caractéristique majeure de l'interface entre l'atmosphère et les sols. Un couvert végétal influence les échanges avec l'atmosphère du fait de l'interception des pluies par la canopée* et par l'action du système racinaire sur le bilan hydrique. Evidemment, il existe différents types de couverts : l'usage le plus courant distingue les forêts et prairies d'une part, les cultures d'autre part. Chacune de ces catégories regroupe des situations d'une grande variété. Tous les couverts végétaux sont susceptibles d'évolution temporelle.

On reconnaît aux couverts forestiers un rôle hydrologique majeur, qui a fait et continue de faire l'objet de nombreuses recherches. La littérature concernant les effets de la suppression des couverts forestiers sur les débits est abondante. Elle est fondée sur la comparaison de bassins forestiers ou déforestés, leurs autres caractéristiques étant les plus similaires possibles. La forêt diminuerait l'écoulement rapide et sa suppression est généralement évoquée comme la cause principale de l'aggravation des crues. Cependant, l'état de saturation du bassin au moment de la crue peut nuancer nettement ce constat : l'effet n'est pas aussi systématique qu'il y paraît et serait très dépendant des processus responsables des écoulements de crue (Hibbert, 1967 ; Bosch et Hewlett, 1982 ; Cosandey, 1992 ; Humbert et Najjar, 1992 ; Fritsch, 1992).

La forêt, tout comme les haies sur les talus de ceinture de fond de vallée des bocages, est un facteur de diminution des crues générées par les précipitations sur les surfaces saturées parce qu'elles en limitent l'extension (Cosandey, 1992 ; Mérot, 1978 ; Mérot et Bruneau, 1993). Outre leur rôle dans l'interception, les couverts permanents de type forêt ou prairie conservent aux sols une certaine permanence de leurs propriétés hydrodynamiques, notamment du fait de l'effet protecteur des litières. Comparé aux autres modes d'occupation du sol, la présence de tels couverts dans les hauts bassins semble bien, par ses différents modes d'action sur les mécanismes de transfert de l'eau, limiter les crues (Combes et al., 1995 ; Mathys et al, 1996).

Une étude des hydrogrammes* de plusieurs centaines de crues observées sur des bassins de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres carrés dans l'Oregon (Jones et Grant, 1996) conduit à des hypothèses quant à la forme même de l'hydrogramme de crues : les coupes forestières seraient responsables d'un accroissement du volume des crues, tandis que la présence de routes et de pistes associées aux travaux forestiers accroîtrait le débit de pointe* et diminuerait le temps de réponse, principalement du fait de la modification des chemins de l'eau. L'effet sur le débit de pointe est sensible également dans les grands bassins. Ceci conduit les auteurs à moduler les hypothèses généralement tirées des expérimentations sur de plus petits bassins — qui attribuent l'augmentation des débits de pointe à la diminution de l'interception — en réévaluant l'importance accordée aux routes ou pistes.

L'interception a surtout été étudiée pour les couverts forestiers. Rappelons que les lames d'eau stockées temporairement dans la canopée (et évaporées ensuite) représenteraient 15 à 30 % des précipitations annuelles pour les couverts de feuillus et 25 à 45 % pour ceux de résineux (Aussenac, 1981). Les caractéristiques morphologiques des peuplements interviendraient cependant souvent moins que les facteurs externes tels que l'intensité des averses, la vitesse du vent, le temps écoulé entre deux épisodes pluvieux (Viville et al.,

1993). La lame d'eau stockable est généralement évaluée à 5 ou 6 mm, et peut atteindre 15 mm lors de certains épisodes (Pfister et al., 1996). L'interception est ainsi un terme très important à prendre en compte en hydrologie générale.

Cependant la capacité d'interception des couverts est sans doute assez faible lors des précipitations abondantes et de forte intensité génératrices de crues (Petit, 1984) : les raisons évoquées sont le caractère limité de la lame d'eau stockable, au-delà de laquelle l'eau n'est plus interceptée mais s'écoule le long des troncs, l'importance de l'énergie cinétique des gouttes pour les pluies de forte intensité et le fait que de telles pluies sont souvent accompagnées de vents forts provoquant l'égouttement (Pfister, 1995).

Les couverts forestiers ont aussi un effet sur l'évaporation. Calder (1990) mentionne au Pays de Galles, des évaporations de 0,2 à 0,4 mm/h lorsque la canopée est mouillée, pour des températures relativement faibles de 8 à 10°C et des vents forts, ce qui n'est pas négligeable par rapport à des intensités de pluie courantes de 5 à 6 mm/h mais reste probablement faible pour les fortes intensités.

Les systèmes racinaires influencent les flux d'eau dans le sol et le sous-sol, en particulier sur l'infiltration et le remplissage des réservoirs : dans des bassins versants où la genèse du ruissellement est essentiellement due à la saturation et l'importance de la crue à l'extension des zones saturées, les systèmes racinaires qui privilégieront une infiltration rapide vers les réservoirs en contact avec ces zones peuvent de manière non négligeable contribuer aux crues (Grésillon et al., 1995). Une meilleure connaissance de l'influence des systèmes racinaires sur le bilan hydrique, en particulier ceux qui ont un développement profond, et de leurs interactions avec les caractéristiques des sols et sous-sols, est un objectif de recherches en développement actuellement, concernant une large communauté dont les thèmes dépassent d'ailleurs largement la problématique « crue ».

Un autre aspect, difficile à traiter sur le plan expérimental, concerne l'influence des couverts herbacés et des litières, qui favoriseraient plutôt l'écoulement hypodermique et l'infiltration (Le Meillour, 1996).

Les cultures annuelles et certaines cultures pérennes s'accompagnent de changements saisonniers importants de la couverture végétale et de la structure des horizons de sol travaillés. Ces changements s'accompagnent donc de variations notables des propriétés hydriques des sols, ce qui influence fortement les différents types d'écoulement, comme le montrait la figure 4. Jusqu'à récemment, les recherches concernant le rôle des couverts cultivés sur les transferts hydriques ont été généralement menées à l'échelle de la station ou de parcelles de dimensions réduites, avec des objectifs de type agronomique ou intéressant l'érosion des sols à l'échelle de parcelles.

A l'échelle de bassins versants entiers, les extrapolations ont rarement tenu compte du fait que, lors d'un événement pluvieux donné, les réponses hydrologiques sont fortement conditionnées par des variations spatiales liées à la juxtaposition de couverts et d'états différents, en interaction avec les variations géomorphologiques et pédologiques, et que ces variations pouvaient influencer fortement le cheminement de l'eau, favorisant la formation du ruissellement à certains endroits, son infiltration à d'autres.

Cette grande diversité des états peut, à un instant donné, être appréhendée à partir de critères d'infiltrabilité et de rugosité de surface, permettant d'évaluer les volumes infiltra-

bles, ceux pouvant être stockés temporairement sous forme de flaques et ceux disponibles pour un ruissellement (rapide) vers l'aval, éventuellement vers les cours d'eau s'ils ne s'infiltrèrent pas avant. Ces critères et leur évolution intègrent les interactions entre conditions morpho-pédologiques, agraires et climatiques (notamment leur succession depuis la précédente culture), mais leur modélisation est loin d'être aboutie et les stratégies expérimentales adaptées sont en discussion (Jetten et al., 1996).

En outre, les cultures s'accompagnent généralement de la mise en place d'un réseau de motifs linéaires d'origine agraire (traces de roues, fourrières, dérayures...) qui complètent le réseau existant de dépressions susceptibles de collecter le ruissellement. L'interaction entre d'une part des surfaces aux propriétés hydriques favorisant la genèse du ruissellement et ce qu'il faut considérer comme un réseau superficiel de collecte de l'écoulement assez dense sur les versants (Ludwig et al., 1996) confère aux bassins versants cultivés une structure hydrologique (Ludwig et al., 1995) qui n'est sans doute pas à négliger dans la genèse des crues, sans que des références expérimentales existent pour le moment pour les quantifier.

La grande diversité dans l'espace et dans le temps des situations associées aux couverts cultivés ne facilite ni la modélisation hydrologique, ni le jugement que l'on peut porter sur l'influence des différents types de cultures. Les questions soulevées par un certain nombre de crues observées en aval de bassins versants cultivés, le fait que ces questions relèvent réellement de l'interrogation sur l'influence de l'homme dans la genèse des crues — et sur sa mise en cause dans bon nombre de situations, particulièrement dans des régions de «plaines-plateaux et collines» où elles deviennent préoccupantes depuis maintenant quelques décennies, justifient la réflexion et les recherches à ce sujet, si l'on accepte de dépasser certains clichés simples mais peu fondés du point de vue des processus.

Et l'effet du drainage agricole ? Il ne peut être univoque. D'une part, il augmente les vitesses de transfert de l'eau dans le sol, accroissant ainsi potentiellement les volumes des crues et les débits de pointes. D'autre part, en abaissant le niveau de la nappe dans les sols peu filtrants, il accroît les capacités de stockage potentiel, atténuant ainsi l'écoulement en aval. Là encore, il est difficile de porter un jugement global, valable quelles que soient les conditions, en particulier parce que le drainage est souvent accompagné de modifications de l'usage agricole des terres (Arrowsmith et al., 1989). L'avis ne peut être porté qu'en fonction des effets sur les processus, qui sont nécessairement dépendants des conditions locales, morphopédologiques, climatiques et agraires.

2.4 L'occupation du sol et genèse des crues

L'influence de l'homme sur la formation des crues est principalement due à son action sur l'occupation du sol et l'aménagement des lits. Dans le cas d'aménagements importants, les perturbations du régime hydrologique ne sont en général pas difficiles à identifier. Il n'en va pas de même des transformations progressives ou diffuses dans les bassins, qui conduisent à des impacts plus difficiles à mettre en évidence, mais qui peuvent moyennant certaines précautions être détectées sur des chroniques de débits journaliers* (Humbert et Kaden, 1994).

L'urbanisation entraîne généralement une accentuation des pointes de crue et une réduction des temps de montée, si elle n'est pas accompagnée d'aménagements compensa-

teurs, parce qu'elle imperméabilise le sol et augmente le ruissellement (Wilby R. et Gibert J., 1993). Cependant, les villes sont rarement situées dans les têtes de bassins, principales zones de production : quand c'est le cas (par exemple pour Chambéry), l'urbanisation est un facteur aggravant de la formation des crues, surtout si elle s'accompagne de la diminution ou de la disparition de zones tampons faisant office de réservoirs naturels, comme par exemple des marais. Ce type de situation doit aussi être évoqué pour les bassins d'altitude urbanisés pour les sports d'hiver. Ce type d'urbanisation modifie le couvert végétal et crée des parkings nombreux, avec des rejets concentrés des eaux pluviales dans les lits des torrents, modifiant ceux-ci de manière importante comme dans le cas de la Ravoire. L'effet de l'urbanisation des zones de concentration, comme par exemple de la costière de Nîmes, de certains petits bassins périurbains des coteaux du lyonnais ou des bassins côtiers de la banlieue de Marseille mérite également d'être évoqué ici.

Il est un point trop souvent négligé : à une occupation du sol ou à un couvert végétal donnés est associé usuellement un réseau particulier de routes, pistes, chemins d'accès, fourrières, dérayures... ; lors de fortes pluies de tels réseaux sont généralement des lieux privilégiés de formation du ruissellement et des collecteurs efficaces pour son acheminement vers le réseau hydrographique. Il faut donc s'interroger sur les liaisons entre ces deux réseaux, et ne pas confondre l'effet réducteur ou aggravant des crues attribuable à l'occupation du sol elle-même et celui attribuable à son réseau d'accompagnement.

Enfin, si des références existent sur l'influence de différents types de couverts ou d'occupation du sol sur la genèse du ruissellement à l'échelle de parcelles, il existe peu de résultats expérimentaux à l'échelle de bassins versants drainés par un cours d'eau, prenant en compte :

- l'organisation spatiale des sols et de leurs modes d'occupation,
- les variations saisonnières des propriétés hydriques des couverts et des sols,
- les réseaux hydrographiques secondaires que sont tous les motifs susceptibles de conduire l'eau.

Des dispositifs expérimentaux existent dans différentes régions ; ils pourraient sans doute être utiles à cette fin. Des connaissances et des références existent probablement également au niveau de l'expertise, qui mériteraient d'être mobilisées et confrontées aux connaissances sur les processus.

2.5 Le transfert dans les réseaux hydrographiques

L'écoulement d'une masse d'eau donnée dans le lit d'une rivière induit mécaniquement, en l'absence d'apport latéral, un étalement progressif des débits (laminage hydraulique). Ceci est vrai quelle que soit la configuration des lieux, et est d'autant plus notable que les volumes de stockage intermédiaires mobilisés par l'eau au cours de son avancée sont plus importants. De ce point de vue, le laminage hydraulique le plus spectaculaire est réalisé lorsqu'il y a inondation, épanchement dans le lit majeur de la rivière. Diverses études évaluent que ceci se réalise assez spontanément en moyenne une fois par an dans un cours d'eau naturel. Briser cet équilibre spontané, par exemple en élargissant le lit mineur de façon à empêcher localement les inondations, a pour effet de reporter sur l'aval des débits moins laminés (et notamment des débits de pointe plus élevés).

Quant à la propagation des crues, les échanges nappe - rivière jouent un rôle capacitif analogue, en première approximation, aux échanges entre la rivière et son champ d'inondation : il y a stockage dans la nappe en début de crue, d'autant plus que la surface de contact (inondée) est importante, puis soutien lors de la décrue et même après (la fin de la sortie d'eau des nappes est souvent notablement différée dans le temps, la surface de contact se réduisant au seul lit mineur, et s'apparente plutôt au soutien d'un écoulement de base). Le volume concerné est cependant bien moindre, en règle générale, que celui du champ d'inondation, pour de simple raisons de capacité de stockage de l'aquifère et de cinétique des échanges.

L'avancée des crues vers l'aval ne peut cependant pas être réduite à un simple transfert hydraulique accompagné de laminage hydraulique. En effet, les différents affluents d'une rivière sont souvent en crue en même temps, souvent mais non pas toujours. Une conséquence pratique de ceci, est que le volume (ou le débit de pointe, etc...) d'une crue correspondant à une période de retour* donnée (décennale pour fixer les idées) augmente moins que proportionnellement à la surface du bassin versant considéré. Ce phénomène est dénommé laminage hydrologique.

Par ailleurs, l'effet hydrologique de certains sites (naturels ou ouvrages faits de main d'homme) n'est pas forcément le même quelle que soit la variable hydrologique considérée. Exemple, s'agissant du laminage des crues par un plan d'eau : ci-dessous à gauche, une analyse des crues du fleuve Rhône à son aval. On a évalué l'effet du laminage de ces crues par un plan d'eau de 50 km², dont le fleuve s'échapperait par un déversoir de 200 m de long. L'ouvrage est passif (pas de manœuvre de vannes). La figure de droite montre le résultat d'une analyse de hautes eaux effectuée sur la chronique laminée. On constate que les crues brèves sont laminées très fortement (passage du débit journalier décennal de 7000 à 5500 m³/s) ; mais la valeur correspondant aux crues plus longues est quasiment inchangée. On ne peut pas parler d'un effet de laminage sans préciser la durée de la crue étudiée (figure 7). L'effet hydrologique d'une action humaine peut donc dépendre de la caractéristique de débit considérée.

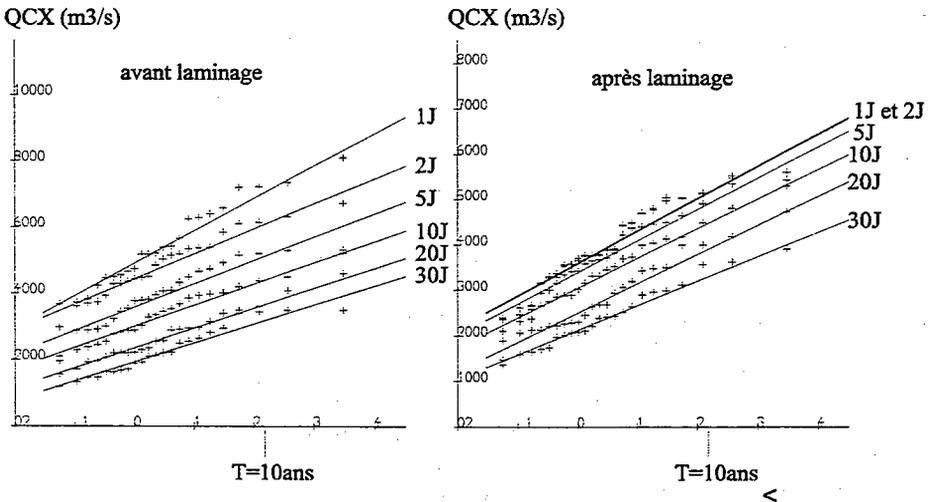


figure 7 - Effet du laminage hydraulique sur les crues

3. Conceptualisation de ces processus : théories, outils et connaissances disponibles

L'analyse des différents processus, qu'il s'agisse des échanges avec l'atmosphère ou de la circulation de l'eau dans les domaines superficiel et souterrain contribuant à l'écoulement de crue, ramène immédiatement au bassin versant, système complexe à trois dimensions (quatre si l'on inclut la dimension temporelle), qui ne peut se résumer à un simple impluvium.

La distribution des apports dans l'espace et dans le temps, les capacités de stockage temporaire des divers compartiments ont conduit à considérer le bassin comme un assemblage de réservoirs interconnectés (interception, surface, sol, nappe, nappe profonde...), permettant de décrire les états initiaux, les différentes capacités de stockage et les transferts. Cependant ces concepts restent globaux et ne tiennent pas compte de l'influence de la structure spatiale du bassin sur la genèse des débits.

Le concept de "zone contributive à surface variable" aide à décomposer le bassin en zones plus ou moins actives hydrologiquement. Au sein d'un bassin, la récurrence en certaines zones de conditions favorables ou défavorables à tel ou tel type d'écoulement dépend de ses caractéristiques permanentes. L'extension variable de ces zones dépend elle des facteurs non permanents propres à chaque événement (conditions initiales et aux limites). Aussi, l'identification et la cartographie de ces zones et de leurs variations peuvent-elles considérablement faciliter l'analyse dynamique du fonctionnement hydrologique d'un bassin (Cosandey, 1984 ; Mérot, 1988 ; Ambroise, 1991).

L'état des connaissances fait précédemment a mis l'accent sur l'importance des expérimentations sur lesquelles se fondent les théories, sur les limites météorologiques (quelles sont les incertitudes sur les apports, sur les états initiaux, sur les flux...), et sur les stratégies expérimentales propres à tenir compte des aspects dynamiques et de la variabilité spatiale. Dans la suite nous allons revenir sur ces différents aspects, qui influencent fortement la progression des connaissances et la capacité à modéliser le fonctionnement hydrologique des bassins versants — et en particulier de l'influence de l'homme qui s'exprime par la distribution des activités.

3.1 Aspects météorologiques ; séries de données disponibles

La compréhension de la genèse des crues - et leur prévision - nécessitent des données permettant de quantifier les apports et leur répartition dans le bassin, de caractériser les états hydriques initiaux des différentes zones contributives, d'évaluer les capacités de stockage en surface, dans le sol et le sous-sol, et les modalités de transfert dans chaque compartiment et aux exutoires* des bassins versants. Cela suppose d'avoir des mesures de référence au sol et des séries de données fiables suffisamment longues, pouvant être analysées à des pas de temps variables et notamment aux pas de temps fins.

Les mesures de référence, qu'il s'agisse des échanges atmosphériques, de l'état et des propriétés hydriques de conductivité et de rétention des sols, des niveaux piézométriques,

des débits, sont nécessairement locales, en un nombre limité de points et sur une durée déterminée.

Pour avoir une réelle signification hydrologique, ces données ponctuelles doivent être transformées en données spatialisées. Pour les pluies par exemple la surface de réception de quelques centaines de centimètres carrés des pluviomètres ou pluviographes est 10^6 à 10^7 inférieure à la surface d'un petit bassin versant d'un kilomètre carré. L'extrapolation spatiale des données localisées soulève des problèmes méthodologiques et conceptuels loin d'être facilement résolus actuellement.

Remarquons que la mesure de débit est réalisée en un point, mais fournit une information intéressant l'ensemble du bassin versant.

Il y a donc plusieurs incertitudes et des marges d'erreurs dont il faut avoir conscience et qui méritent d'être précisées : capacité à mesurer une grandeur, performance et qualité des capteurs, limites des méthodes et signification des résultats, précision de la mesure et représentativité spatiale, représentativité de la série temporelle (faible si elle est trop limitée...).

3.2 Couverture radar au sol

L'imagerie radar est employée dans la détection des précipitations, en particulier pour identifier les zones précipitantes potentiellement dangereuses. Le réseau ARAMIS de Météo-France comprend actuellement douze radars et devrait en compter cinq de plus d'ici cinq ans (Chèze et Helloc, 1996). Localement, d'autres radars sont utilisés pour des études plus spécifiques (Caoudal et al., 1996). L'évaluation des lames d'eau et des intensités, en particulier des pics qui intéressent la prévision des crues ne paraît pas encore opérationnelle (Datin et al., 1996). Les limites actuelles à l'exploitation quantitative des données radar sont liées d'une part à une couverture insuffisante, la qualité de l'information étant dépendante de la distance au radar, et d'autre part à la perturbation du signal (effets de masques, atténuation...).

Des progrès devraient être réalisés dans les prochaines années avec l'augmentation de la couverture radar et l'amélioration des modèles de correction et de traitement du signal, passant par une modélisation du processus de mesure lui-même (Météo-France et INSU, 1996).

3.3 Télédétection satellitale

La reconnaissance de l'occupation du sol se fait couramment à partir d'images satellitales, permettant de gagner un temps considérable si les surfaces à couvrir sont importantes. A cet égard les capteurs les plus utilisés sont ceux des satellites SPOT et LANDSAT.

Les travaux sur la répartition des échanges atmosphériques (précipitations, évapotranspiration) et la reconnaissance spatialisée des conditions initiales (états hydriques) sont plus

récents. Les progrès réalisés par la simulation numérique de la dynamique de l'atmosphère d'une part et le développement de modèles hydrologiques à bases physiques d'autre part ont rendu nécessaire le développement de modélisations plus réalistes de l'interaction entre sol, végétation et atmosphère.

Des recherches récentes démontrent qu'il existe des perspectives intéressantes pour évaluer les paramètres de surface à partir des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge et le bilan d'énergie à partir de celles de l'infrarouge thermique du satellite NOAA/AVHRR. La calibration faite à partir de mesures au sol permet de proposer une couverture spatiale de l'évaluation de l'évapotranspiration des couverts végétaux et de l'état hydrique des sols, mais ceci uniquement en surface (Ottlé et Vidal-Madjar, 1994 ; Ottlé et al., 1996). Les données radar du satellite ERS1/SAR quant à elles permettent d'accéder à un indice d'état hydrique (Griffiths et Wooding, 1996 ; Normand et al., 1996).

La télédétection apparaît donc comme un outil majeur, du fait des couvertures spatiales qu'elle permet avec des résolutions maintenant intéressantes. Elle nécessite des séries de mesures au sol pour le calage * des paramètres *. Un problème demeure : il pleut généralement au moment des crues, ce qui rend certains capteurs aveugles.

3.4 Mesure des débits

L'évaluation des débits d'une rivière est habituellement fondée sur l'exploitation d'une courbe de tarage, formalisant le lien biunivoque entre hauteur et débit réputé exister en une section donnée d'un cours d'eau. Une telle courbe est établie à partir de couples hauteurs/débits que l'on mesure ponctuellement, et d'un lissage réalisé avec un modèle.

La qualité de cette courbe dépend de celle des mesures ayant concouru à son établissement. Dans sa partie relative aux crues, la courbe de tarage est mal connue, car assise sur des valeurs mesurées du débit peu nombreuses, entachées d'incertitude déjà en raison de la difficulté voire du danger des mesures. Les débordements en lits majeurs compliquent aussi la mesure, en théorie et en pratique. La mesure du débit lors de crues exceptionnelles est donc entachée d'une incertitude importante dont il faut avoir conscience : elle peut atteindre 30 % en crue. (Obled, communication dans le cadre d'une réflexion sur les sites d'étude pour la problématique « risques hydrologiques »).

Le passage des hauteurs d'eau, que l'on sait mesurer en continu, à une estimation des débits se fait donc avec une incertitude qui est particulièrement importante pour les débits naturellement rares. Très souvent, les données de débits élevés ne résultent que d'une extrapolation, les débits réellement mesurés l'étant à des niveaux bien inférieurs. Dans le meilleur des cas, l'extrapolation tient compte des volumes et des vitesses, mais son résultat reste hasardeux. Par ailleurs, si la géométrie de la section et de ses abords change, la relation de jaugeage se transforme, ce qui signifie qu'il faut vérifier et éventuellement refaire la courbe de tarage. Or ce sont principalement les crues qui façonnent et modifient les lits des cours d'eau !

3.5 Utilisation des traceurs

Des traceurs isotopiques et chimiques peuvent être utilisés pour la détermination de l'origine de l'eau à l'exutoire du bassin versant et pour l'étude de son histoire au sein de ce bassin. Les traceurs peuvent être :

a) non interactifs avec les matrices organo - minérales, comme les isotopes stables et lourds de l'eau. Classiquement, ces marqueurs intrinsèques de la molécule d'eau permettent une approche temporelle de la décomposition de l'hydrogramme de crue basée sur l'âge de l'eau des réservoirs (eau « ancienne », initialement présente sur le bassin et eau « nouvelle » liée à la pluie). La décomposition de l'hydrogramme de crue à partir de cette approche temporelle permet généralement de mettre en évidence une forte contribution d'eaux présentes sur le bassin, antérieures à la pluie (Sklash et Farvolden, 1979; Hooper et Shoemaker, 1986; Pearce et al., 1986; Maule et Stein, 1990; McDonnell et al., 1990).

L'évaporation de l'eau dans les couches superficielles du sol ou une succession de pluies infiltrées dans le sol, de signatures isotopiques différentes, peut conduire à une différenciation notable entre l'eau des couches superficielles et celle des couches plus profondes du sol. En période de crue, l'existence de ce gradient isotopique rend possible une identification spatiale de la mobilisation successive d'eaux issues des couches superficielles et profondes de ce sol (Millet, 1996).

b) Interactifs ou non avec les matrices organo - minérales, comme les traceurs chimiques. Ces marqueurs permettent une approche plus spatiale (verticale ou géographique) de la décomposition de l'hydrogramme de crue, basée sur l'existence de plusieurs réservoirs (horizons du sol, zones saturées ...) dans le bassin. Cette dernière approche complète l'approche temporelle évoquée précédemment. Cependant en raison du caractère interactif de la plupart des traceurs chimiques, il n'est pas toujours possible de calculer les contributions « spatiales » des différents réservoirs. Ceci amène à revoir pour chaque bassin, le type de traceur approprié à l'obtention d'une décomposition quantitative de l'hydrogramme de crue.

3.6 Modèles Numériques de Terrain et Systèmes d'Information Géographique

La topographie du bassin versant influence de manière déterminante les processus hydrologiques, de manière indirecte en tant que paramètre partiellement intégrateur de la distribution spatiale des caractéristiques morpho-pédologiques, ou directement par la composante gravitaire ou son rôle dans la répartition des échanges atmosphériques. La distribution spatiale de paramètres topographiques peut souvent être considérée comme apportant une indication sur la variabilité spatiale des processus hydrologiques.

Ceci fait des modèles numériques de terrain, couplés avec des systèmes d'information géographique, des outils de plus en plus perçus comme pertinents pour la modélisation hydrologique et la prévision des crues (Moore et al., 1991). A l'échelle de bassins versants, le développement conjoint d'indices topographiques et de la structure spatiale des bassins

versants vis-à-vis des transferts d'eau permet de combiner prise en compte de la topographie, des épaisseurs efficaces de sols, de la connexion ou non des zones contributives identifiées (Saulnier, 1996) et devrait être prometteuse. A l'échelle régionale, ces outils s'avèrent intéressants pour la cartographie et la régionalisation* des paramètres hydrologiques (Cemagref, 1989 ; Gustard, 1993 ; Humbert, 1994 ; Kovar et Nachtnebel, ed, 1993 et 1996 ; Meijerink et al, ed, 1996).

3.7 Modèles hydrologiques (d'après Ambroise, 1991)

Que leurs objectifs soient opérationnels (aide à la décision) ou de recherche (formalisation et test d'hypothèse dans un but cognitif), l'objet des modèles hydrologiques est en général le bassin versant.

Il en existe plusieurs types, différents selon leurs objectifs, la manière dont le système et son fonctionnement sont décrits.

Les modèles empiriques* classiques visent à caractériser globalement les relations pluies - débits par le traitement de séries chronologiques, par exemple à partir des régressions pluie - débits, ou des méthodes dérivées du concept d'hydrogramme unitaire. Ils font intervenir uniquement les entrées et sorties, le bassin versant étant considéré comme une boîte noire caractérisée par des paramètres et des fonctions sans grande signification physique. Très utilisés en ingénierie, leur principale limite est leur dépendance par rapport aux données utilisées pour les établir. Leur utilisation en dehors de ce domaine d'observation est dangereuse, en particulier pour les événements extrêmes ou pour la transposition à un autre bassin ou à d'autres conditions.

Les modèles conceptuels* globaux représentent le bassin comme un assemblage de réservoirs interconnectés et sont fondés sur des équations de bilan assurant la conservation de l'eau dans le bassin et pour chaque réservoir mais utilisant pour leur vidange et leurs interactions des relations déterministes de type empirique. Le modèle SWM de Stanford (Crawford et Linsley, 1966) ou GR3 utilisé par le Cemagref (Michel) en sont des exemples connus. Ces modèles permettent de simuler les différentes composantes du cycle de l'eau et non plus seulement les débits, mais l'analogie avec des réservoirs nécessite un calage des paramètres décrivant les réservoirs et leur vidange sur les seuls débits et non sur des caractéristiques mesurables. L'utilisation de paramètres globaux ne permet pas de tenir compte de l'hétérogénéité et de la structure du bassin, ni de son influence sur son fonctionnement hydrologique. La calibration réalisée pour un bassin donné dans un état d'équipement donné font qu'ils ne permettent pas d'évaluer l'impact hydrologique d'un aménagement et ne peuvent être transposés à un autre bassin non jaugé.

Les modèles conceptuels spatialisés (ou « distribués »), par exemple le modèle couplé ORSTOM /Ecole des Mines (Girard et al., 1972), utilisent un maillage qui permet un découpage du bassin en éléments homogènes, ce qui permet de tenir compte de la répartition spatiale des caractéristiques du milieu et des processus hydrologiques et de prendre ainsi en compte les modifications localisées ou non. Leur mise en œuvre nécessite, cependant, un nombre important de données.

Les modèles à bases physiques, apparus dans les années 1980 (par exemple SHE, Abbott et al., 1986) tentent de représenter le fonctionnement hydrologique par un couplage de modèles physiques locaux dont les paramètres sont réputés mesurables. En théorie séduisants, ils sont lourds à exploiter et nécessitent un très grand nombre de données de sorte qu'ils sont difficilement validables.

Certains travaux actuels basés sur de tels modèles physico-conceptuels spatialisés, utilisent une approche stochastique* dans leur paramétrisation et leur application, pour tenir compte de l'incertitude sur les variables d'entrée et les paramètres.

De grands progrès sont attendus de l'introduction de concepts comme les indices « sol-topographie » utilisés dans les modèles topo-hydrologiques (Beven et Kirkby, 1979 ; Moore et al., 1988) : en tout point du bassin, les flux latéraux dans le sol sont estimés à partir d'un indice faisant intervenir la transmissivité* du profil de sol, la pente et la surface en amont drainée par ce point. La fonction de répartition spatiale de cet indice « sol - topographie », déduite d'un modèle numérique de terrain et d'hypothèses sur les variations de transmissivité, synthétise en une courbe simple, mais à bases physiques, l'essentiel de l'information spatialisée, permettant des calculs beaucoup plus simples par classes d'indices. Les fonctions de transmissivité peuvent être de différentes natures, suivant le fonctionnement des bassins et le type de fonction choisi — tenant compte de la forme de la courbe de récession*.

3.8 Modélisation hydraulique du transfert en cours d'eau

(Ce paragraphe 3.8 est une contribution de M. Jean-Yves Caneill (EDF/DER), condensée par les soins de l'éditeur en tenant compte de remarques de relecteurs).

Contexte général

On présente ici brièvement l'état de l'art dans la modélisation d'un cours d'eau et de son champ d'inondation, dans le but de déterminer une architecture au centre de laquelle se trouve un modèle hydraulique déterministe permettant de simuler numériquement l'écoulement en lit mineur et les crues éventuelles dans un bassin versant à l'échelle approximative d'un département. Cet outil aurait la charge de la fonction de transfert permettant de passer des apports (générés par un composant autre, strictement hydrologique) à des cartes de zone inondée (pour un événement ou un niveau d'aléa donné).

La modélisation numérique en mécanique des fluides a fait de grands progrès ces dernières années. Compte tenu de l'échelle du problème et du but énoncé, il paraît réaliste de s'orienter d'emblée vers des modélisations uni- et bidimensionnelle du phénomène.

Modélisations de type unidimensionnel (1D)

Utilisée dans plusieurs laboratoires, elle permet de « dégrossir » les problèmes. Peu coûteuse en temps de calcul, elle est bien adaptée aux échelles envisagées. Il est possible de construire des réseaux (1D ramifié ou maillé), pour tenir compte des principaux affluents ou émissaires d'un bassin versant.

Des paramétrisations de stockage latéral d'eau peuvent être introduites (« casiers »). Elles permettent de rendre compte de l'effet capacitif du champ d'inondation sur la propagation de l'onde de crue dans la rivière. Elle ne constituent par contre en rien une modélisation du champ d'inondation lui même (aucune description interne du champ d'inondation n'est possible — par exemple du champ de vitesse qui y règne).

Modélisations de type bidimensionnel (2D)

Quelques modèles bidimensionnels existent au plan national (Telemac-2D (EDF/LNH), RUBAR (Cemagref), Reflux (STC)...). Fondés sur des approches numériques différentes, ils résolvent tous les mêmes équations de Saint-Venant et permettent de gérer un domaine spatial dont l'extension varie avec le temps (en maritime, il s'agit de bancs découvrants ; ici il s'agira de champs d'inondation).

Importance des données topographiques

Tous les modèles requièrent un modèle numérique de terrain très détaillé. La finesse de la représentation topographique conditionne la qualité à attendre des simulations, ainsi que des informations concernant l'occupation du sol.

Axes de recherche nécessaires

Vis-à-vis du problème posé (déterminer l'effet des actions humaines sur la genèse et le déroulement des crues), on peut noter les besoins de recherche et développement suivants :

1- comment incorporer dans les codes de calcul des conditions aux limites de type « apports latéraux diffus » ; comment faire spécifier ces apports par la partie hydrologique ?

2- comment spécifier le champ de rugosité du lit majeur en fonction de la topographie, de la végétation et de l'échelle adoptée pour le maillage de calcul ?

3- comment prendre en compte des confluent (hydrauliquement résolus ou simples conditions aux limites fluides) ?

4- comment définir des représentations topographiques pertinentes, adaptées au calcul et à la restitution finale ?

5- comment faire coopérer les codes 1-D, seuls à même de traiter raisonnablement le linéaire important représenté par la rivière, et les codes 2-D, seuls à pouvoir traiter avec quelque validité le champ d'inondation lui-même ?

Notons enfin que si pour les codes 1-D des solutions opérationnelles sont approximativement transférables en l'état vers les bureau d'études, les codes 2-D restent du domaine de l'outil logiciel très spécialisé et relèvent plus de la recherche que de l'opérationnel.

3.9 Identification et typologies fonctionnelles

La compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, notamment lors de crues, ne peut faire l'économie d'un travail d'identification, de caractérisation, de reconnaissance sur le terrain.

La distribution des sols et formations superficielles, de leur occupation dans les bassins versants permet de délimiter des unités de comportement relativement homogènes vis-à-vis des transferts hydriques : ce sont des connaissances dont l'économie ne peut être réellement faite dès lors que l'on s'intéresse aux aspects spatiaux de la prévision des crues.

L'organisation du réseau hydrographique (confluences), la morphologie du lit du cours d'eau et de la base des versants, les modifications apportées par l'homme sont de précieuses indications de fonctionnement, de la distribution des processus sur les différents espaces amonts, et permettent en général d'identifier les principaux enjeux en cas de crue.

De ce point de vue, la caractérisation des cours d'eau et de leurs bassins, doit permettre d'établir à l'échelle régionale des typologies permettant de classer les situations : répartition spatiale des apports atmosphériques en fonction de la direction des flux dominants par rapport au relief, répartition des principales zones contributives et de leur extension variable en fonction des critères morphopédologiques, capacités de stockage en fonction des conditions initiales, ...

Analyse de l'action de l'homme sur le comportement des bassins versants et le régime des crues

An analysis of man's impact on catchment behaviour and flood regimes

Vazken Andréassian

Division Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques, Cemagref Antony

Résumé

Cet article s'intéresse à la façon d'examiner un changement supposé de régime hydrologique. Il montre la variabilité du comportement hydrologique des bassins versants tant dans le temps que dans l'espace. Il passe ensuite en revue quelques aspects méthodologiques classiques de l'étude des changements hydrologiques, et présente notamment les diverses manières de comparer le comportement des bassins versants. L'utilité des modèles numériques est présentée dans le cadre de l'étude par bassins versants appariés. Muni de ces outils, l'auteur examine ensuite quelques cas où l'influence humaine sur le régime des crues a été évoquée : incendie de maquis méditerranéen, coupe forestière, reboisement, drainage agricole, remembrement avec recul du bocage. L'auteur conclut que l'influence des aménagements humains sur la genèse des crues est surtout perceptible quant aux événements relativement modestes.

Abstract

This article deals with different approaches to analyse a possible change of catchment behaviour. It first shows the variability of catchment behaviour in time and space. Then, it presents classical hydrological methods to analyse hydrological changes and compare the behaviour of catchments. In the case of a paired catchment experiment, the use of numerical catchment models is demonstrated. The author then analyses various examples of actual catchment changes (wildfire of Mediterranean shrublands, clear cutting of forest land, reforestation, tile drainage and removal of agricultural land). The author concludes that man's impact on high flow events is mainly noticeable for the most frequent floods.

1. Comment peut-on mettre en évidence un changement de régime hydrologique ?

1.1 Le comportement hydrologique est très variable dans le temps et dans l'espace

1.1.1 La variabilité climatique est une source naturelle de variabilité du comportement hydrologique

L'étude des tendances et des non-stationnarités dans le régime hydrologique des cours d'eau est un problème extrêmement complexe. La technique la plus objective, que nous détaillerons par la suite, consiste à analyser directement le régime des écoulements, avant et après que le bassin n'ait été modifié par les activités humaines. On peut penser, sur une période relativement longue, pouvoir détecter une rupture ou une tendance. Mais dans le même temps, la variabilité climatique naturelle induit une variabilité très forte dans les phénomènes hydrologiques. Ce bruit* très important doit être pris en compte si on veut détecter un éventuel changement intrinsèque du bassin versant.

Examinons les données de la rivière Langouyrou à Langogne (Lozère) :

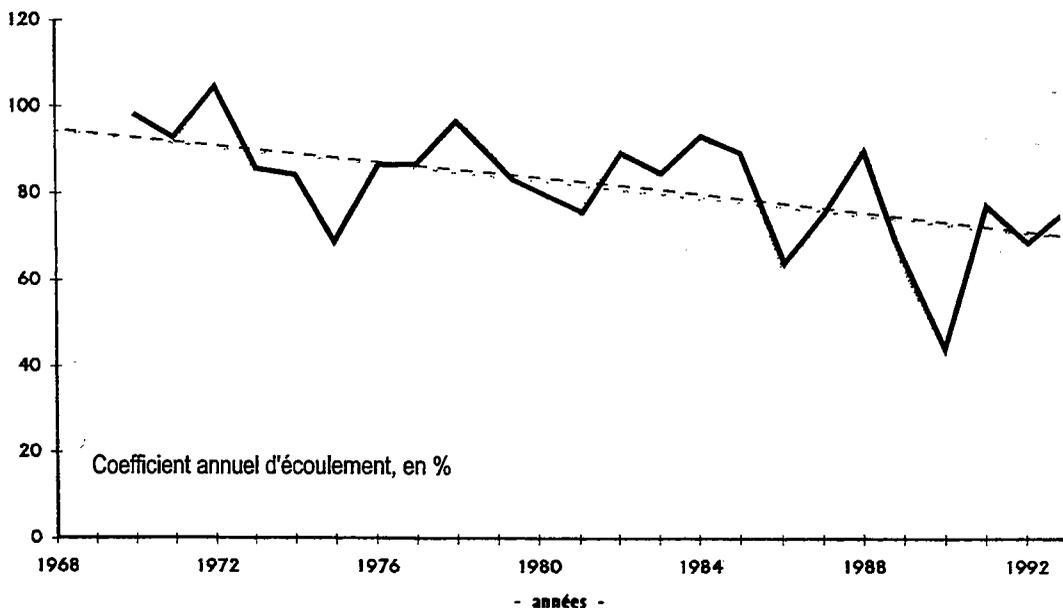


figure 1 : tendance observée pour le débit annuel sur le bassin versant du Langouyrou à Langogne

En examinant la figure 1 seule, on peut être tenté de calculer une droite de régression de pente négative. Une étude statistique peut même montrer que la pente de cette droite est significative à plus de 99.9 % : la tendance observée n'est pas un artefact. Peut-on d'autant en conclure à la manifestation d'une évolution (d'origine humaine ?) sur le régime hydrologique? Avant de porter un jugement, observons la figure 2 :

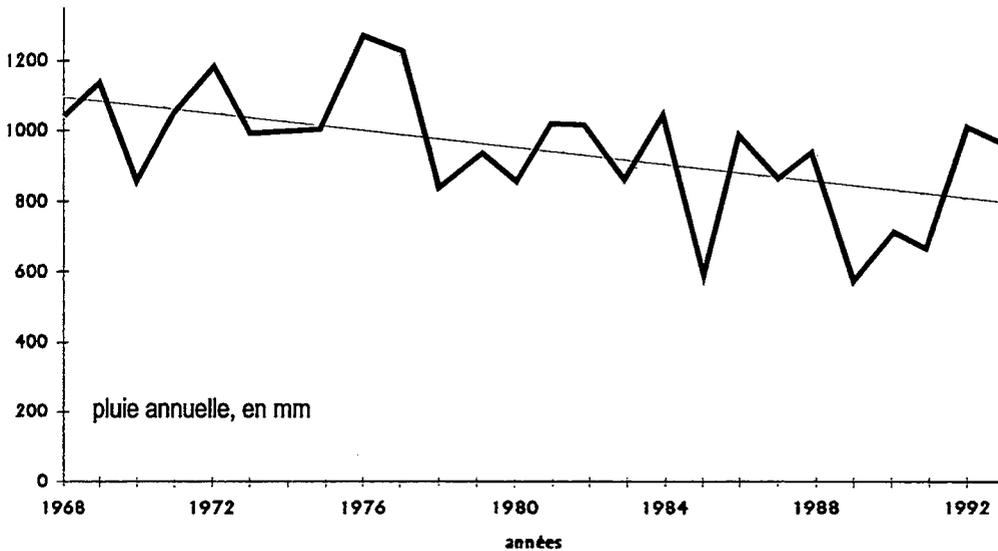


figure 2 : tendance observée pour la pluviométrie annuelle sur le bassin versant du Langouyrou à Langogne

On observe donc une tendance comparable à la précédente pour la pluviométrie du bassin, et une étude statistique comparable prouve que la pente de la régression linéaire est, elle aussi, hautement significative.

Que peut-on donc en conclure ? Uniquement qu'il serait hâtif de porter un jugement sur la seule base des débits annuels, la décroissance apparente des écoulements pouvant être expliquée par une tendance analogue de la pluviométrie. En ce qui concerne l'influence particulière des activités humaines sur les tendances observées, des recherches plus approfondies sont nécessaires.

En travaillant à l'échelle annuelle, on peut pour s'abstraire des variations climatiques, étudier le rapport entre écoulement et pluies qui les ont occasionnés. On assimile donc le problème à un modèle, une représentation — extrêmement simplifiée — qui s'écrirait

$Q=C \cdot P$, où :

- Q représente le débit annuel* ;
- P représente la pluviométrie annuelle ;
- C est le coefficient d'écoulement* (paramètre du modèle)

La démarche générale permettant de s'abstraire des variations naturelles du climat sera celle-ci : les paramètres du modèle sont supposés évoluer après une modification intervenue sur le bassin étudié. Ici il s'agit de C.

Malheureusement un tel modèle est très rudimentaire (trop) : on sait que dans un bassin donné les écoulements augmentent plus vite que la pluie, et ici le paramètre unique C montrera une décroissance liée à une erreur de modélisation. Conclure à un changement de comportement intrinsèque au bassin versant sur cet argument serait une erreur.

1.1.2 La variabilité des comportements hydrologiques des bassins versants est très grande, même au sein d'une région apparemment homogène

Considérons parmi les sous bassins du Réal Collobrier suivis par le Cemagref dans le massif des Maures, les bassins du Rimbaud et de Vaubarnier. Caractérisés par un même couvert végétal et une superficie très proche, ils se trouvent à moins d'un kilomètre l'un de l'autre.

Bassin Versant	Superficie (km ²)	Végétation	Crue décennale (m ³ s ⁻¹)	
			valeur journalière	valeur instantanée
Rimbaud	1.4	maquis	1.5	6.8
Vaubarnier	1.5	maquis	0.9	1.6

tableau 1: crues décennales estimées pour deux sous bassins du Réal Collobrier

Le tableau 1 montre cependant qu'ils n'ont pas du tout le même comportement en crue : pour ces deux bassins voisins, un calcul de la crue décennale (basé sur plus de 20 ans de données, ce qui est très raisonnable) donne des résultats très supérieurs pour le bassin du Rimbaud : 67 % de plus que Vaubarnier pour le débit journalier et 325 % pour le débit instantané.

Ainsi donc, même pour des bassins « apparemment semblables », le comportement hydrologique peut être très différent. La recherche de bassins versants semblables paraît un leurre du point de vue de l'analyse hydrologique. Les hydrologues se préoccupent plutôt d'identifier des références stables (appelées bassins témoins ou bassins de contrôle) auxquelles pourront être comparés les bassins étudiés.

1.1.3 Le régime des crues est une composante particulière du régime hydrologique

Le régime des crues est une composante bien particulière du régime hydrologique d'un bassin. En plus des problèmes hydrologiques "classiques" qui viennent d'être évoqués, les crues apportent une difficulté supplémentaire, d'ordre statistique.

Rappelons ce que l'on appelle période de retour d'une crue. Cette notion traduit le fait que les crues d'une rivière sont d'autant moins probables qu'elles sont importantes, et donc d'autant moins fréquentes. En utilisant un vocabulaire statistique, on dira que la période de retour représente la fréquence de dépassement d'un certain débit. Pour estimer valablement le niveau d'une crue de période de retour T, il est nécessaire de disposer de données de débit pendant un certain nombre d'années. Plus l'échantillon sera grand, plus l'intervalle de confiance associé à l'estimation de la crue sera resserré. Le problème est que l'on dispose très rarement d'un nombre d'années suffisant pour estimer sans contestation possible une crue rare (T= 10, 50, 100 ans...). Ceci fait que l'estimation est très dépendante de l'échantillon disponible. Elle est par ailleurs toujours sujette à révision au fur et à mesure que les séries observées s'allongent.

On a présenté dans le tableau 2 le débit décennal instantané pour un petit bassin versant de Brie : le bassin de Mélarchez.

Période utilisée dans l'estimation	Débit instantané décennal estimé (m^3s^{-1})
années 1974-1983	2.1
années 1980-1989	3.2
années 1962-1990	3.1

tableau 2: crues décennales instantanées estimées sur différentes périodes pour le bassin versant de Mélarchez (Seine et Marne)

La différence entre les deux estimations est proche de 50 %. Cela n'a rien d'exceptionnel, même sous climat tempéré : même sans changement sur le bassin versant, les estimations calculées par les méthodes classiques dépendent de la "série climatique", et l'évaluation du débit décennal instantané est difficile.

1.2 Méthodologie d'étude des changements hydrologiques

Les paragraphes précédents ont montré quelques difficultés rencontrées dans l'étude des non stationnarités du régime hydrologique et l'estimation des crues. Comment peut-on procéder ?

1.2.1 Recours à l'expérimentation intentionnelle

Les bassins versants expérimentaux existent depuis longtemps aux Etats-Unis, où la première expérimentation a été lancée en 1911 dans les montagnes du Colorado (Bates et Henry, 1928). Cette expérimentation avait pour but d'évaluer l'influence de l'exploitation forestière sur le régime de l'eau, notamment sur les étiages* et les crues. De nombreuses autres expérimentations ont suivi pour évaluer l'effet du déboisement, du boisement et du reboisement, des incendies de forêt et des pratiques agricoles (labour selon les courbes de niveau par exemple). Des expériences similaires ont été menées, entre autres, en Afrique du Sud, en Australie, au Kenya et en Guyane française.

Dans ces opérations, les scientifiques ont été associés à la préparation, à l'exécution et au suivi des changements dans le but d'isoler de façon aussi nette que possible l'impact de la modification humaine du "bruit" hydrologique général.

1.2.2 Adaptation de la démarche hors expérimentation intentionnelle

Dans la plupart des situations "réelles", on essaie de se ramener à un cas typique de bassin versant expérimental, pour essayer d'évaluer l'effet d'une modification observée de l'occupation des sols (remembrement ou drainage par exemple). Trois types de comparaisons sont possibles (Cosandey, 1995; McCulloch et Robinson, 1993).

La plus immédiate des comparaisons consiste à considérer deux bassins, similaires en tous points excepté leur occupation des sols (fig. 1). C'est ce que l'on peut appeler une comparaison synchronique, examinant les deux bassins dans le même temps. On est en mesure de comparer la réponse des deux bassins aux mêmes événements climatiques et on peut alors essayer de mettre en relation les différences observées avec le couvert végétal de chaque bassin. Cette méthode, très intuitive, a été l'une des premières utilisées. Elle est cependant aujourd'hui presque abandonnée, car la variabilité naturelle des comportements hydrologiques est telle qu'il est très difficile de mettre en relation les différences de comportement avec les différences d'occupation des sols. Même dans le cas de bassins apparemment similaires, le bruit induit par les particularités de chacun couvre le plus souvent l'influence de l'occupation de sols.

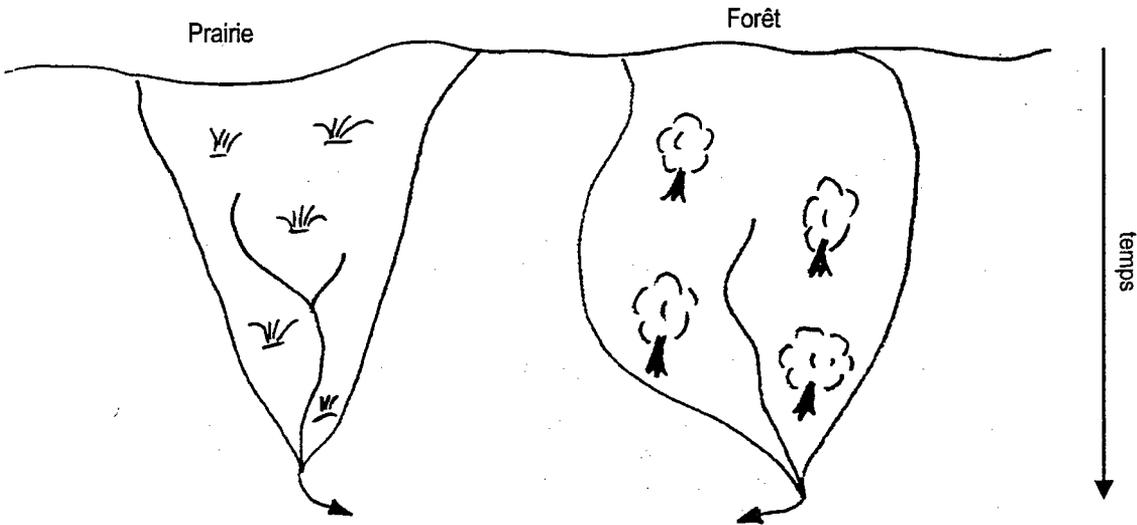
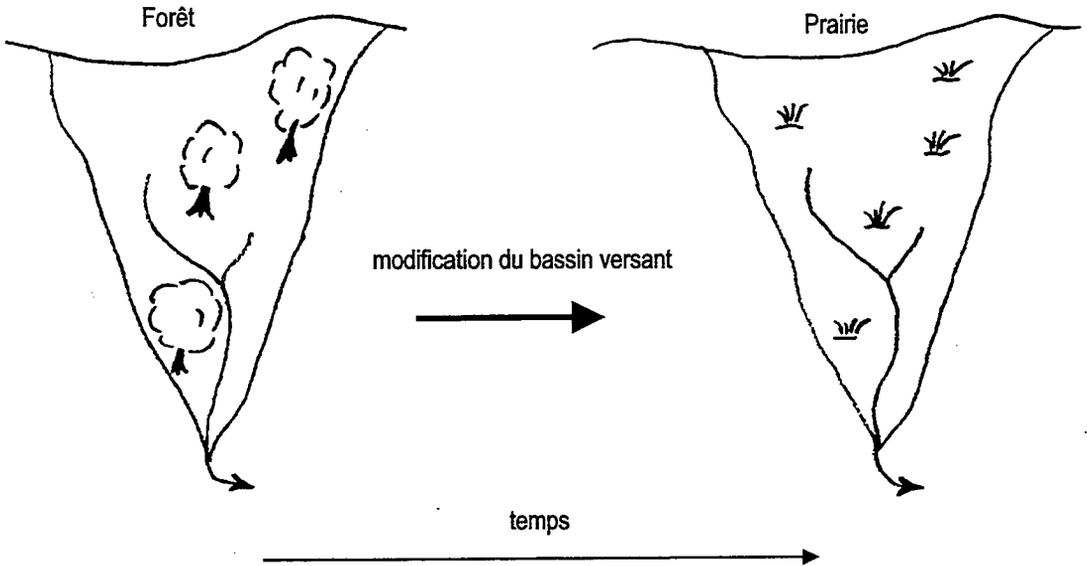


figure 3 : comparaison synchronique entre bassins versants (respectant une unité de temps)

Le second type de comparaison a pour but de s'affranchir des différences entre bassins en suivant un même bassin versant sur une assez longue période, pendant laquelle son occupation des sols est modifiée. Cette comparaison est dite diachronique, elle respecte par contre une unité de lieu (figure 4). Cette méthode est malheureusement sensible à la variabilité climatique spontanée qui se manifeste aussi pendant les périodes de suivi (voir à cet égard l'exemple du Ru du Four p. 60).



*figure 4 : comparaison diachronique entre bassins versants
(respectant une unité de lieu)*

Plus sophistiqué, le troisième type de comparaison est dénommé comparaison de bassins versants appariés (figure 5). On y étudie une paire de bassins sur une double période : pendant la première période — de calage — les bassins présentent une occupation des sols similaire. L'étude des comportements hydrologiques a alors pour objectif d'établir une relation simple entre le comportement des deux bassins. A la fin de la période de calage, un des bassins subit un changement (modification de l'occupation des sols : coupe forestière, remembrement, drainage, etc.). L'autre reste rigoureusement inchangé. Par la suite, la comparaison des comportements du "bassin traité" et du bassin de contrôle* permet d'évaluer l'impact spécifique de la modification réalisée sur l'hydrologie des bassins, dans la mesure où les relations établies avant traitement permettent de préjuger de la réaction

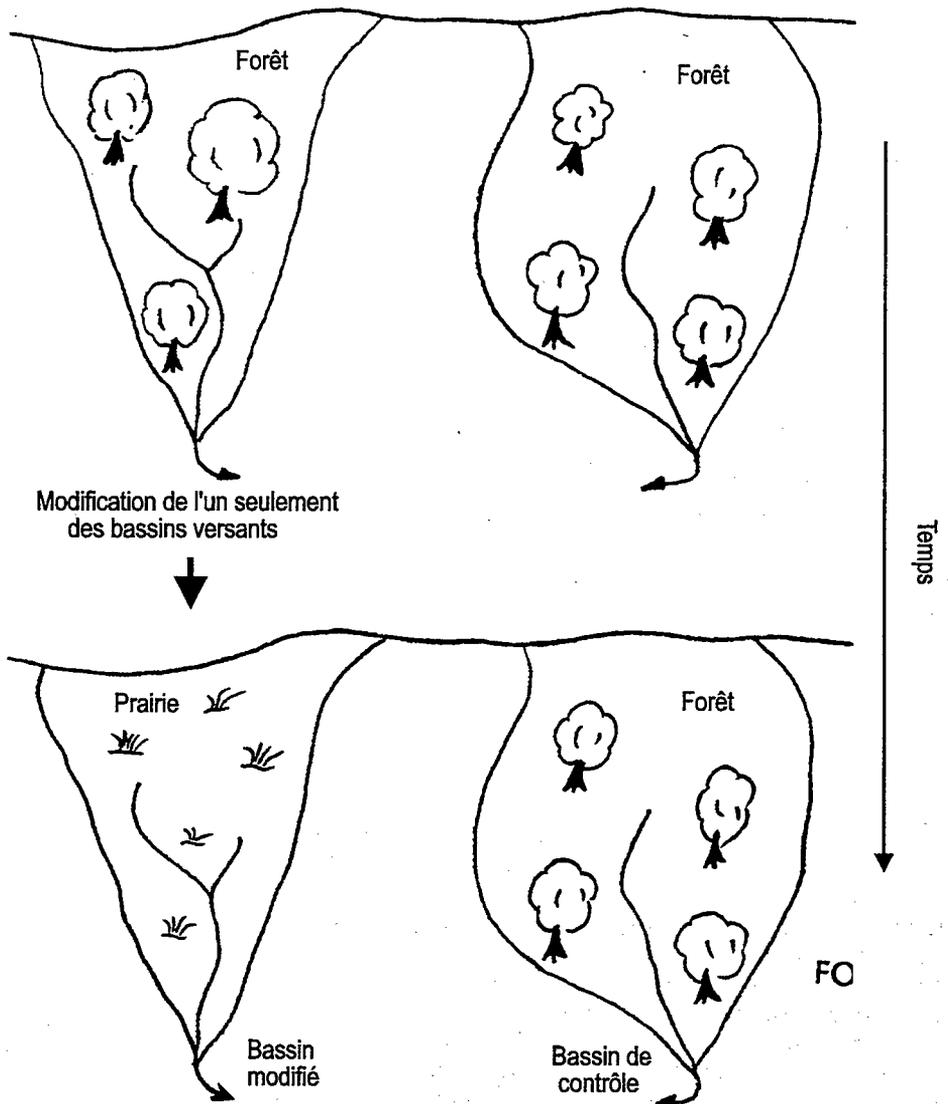


figure 5 : comparaison de bassins versants appariés

1.2.3 Régionalisation et transfert d'échelle

Notons que les résultats obtenus sur de petits bassins versants, aussi précieux qu'ils soient, ne peuvent être appliqués directement à grande échelle. Des précautions doivent être prises en ce qui concerne la régionalisation des résultats obtenus, ainsi que le transfert à une échelle supérieure.

Présentée sommairement, la régionalisation hydrologique est l'étude des zones suffisamment homogènes au plan des processus pour permettre une certaine généralisation et transfert des résultats de terrain. Ce processus est indispensable, car le coût des études de terrain interdit leur multiplication.

Pour sa part, le transfert d'échelle consiste en l'étude des relations existantes entre certains comportements hydrologiques, et la taille des bassins versants considérés. Les comparaisons et expérimentations de bassins versants sont le plus souvent effectuées à petite échelle (quelques km²), mais les résultats qui intéressent les gestionnaires concernent plutôt de grandes unités, de plusieurs centaines de km² au moins.

1.2.4 Usage des modèles numériques pour détecter un changement de comportement hydrologique

Notons que l'expérimentation sur des bassins versants réels constitue la solution de référence. Les modèles de simulation présentés dans l'article précédent, malgré tous les efforts développés depuis le début des années 60, restent de grossières approximations des processus hydrologiques réels.

Cependant, ces modèles numériques présentent trois intérêts essentiels par rapport aux expérimentations : ils fournissent des résultats à moindre coût, bien plus vite qu'un bassin versant expérimental, et ne demandent pas de maîtrise foncière.

A l'occasion d'exemples qui seront détaillés ci-dessous, on tentera de montrer comment utiliser de tels modèles numériques dans le cadre d'analyse méthodologique tracé en 1.2.2. De manière générale, le modèle numérique est calé sur le bassin versant réel avant transformation, et devient le bassin de contrôle de la comparaison par bassins appariés.

2. Quelques exemples d'influence humaine vérifiée sur le régime des crues

2.1 Effet de l'incendie du maquis méditerranéen : cas du bassin du Réal Collobrier

Les incendies de forêt sont un phénomène très courant dans toute la zone méditerranéenne, mais aussi dans d'autres parties du globe soumises à la sécheresse estivale : Californie, Province du Cap, Sud Australien (Lavabre, Sempere-Torres et Cernesson, 1991; Hibbert, 1985; Scott, 1993). A l'opposé de ce qui s'est fait dans les pays anglo-saxons, très peu d'études ont été réalisées en France sur l'influence des incendies sur les crues.

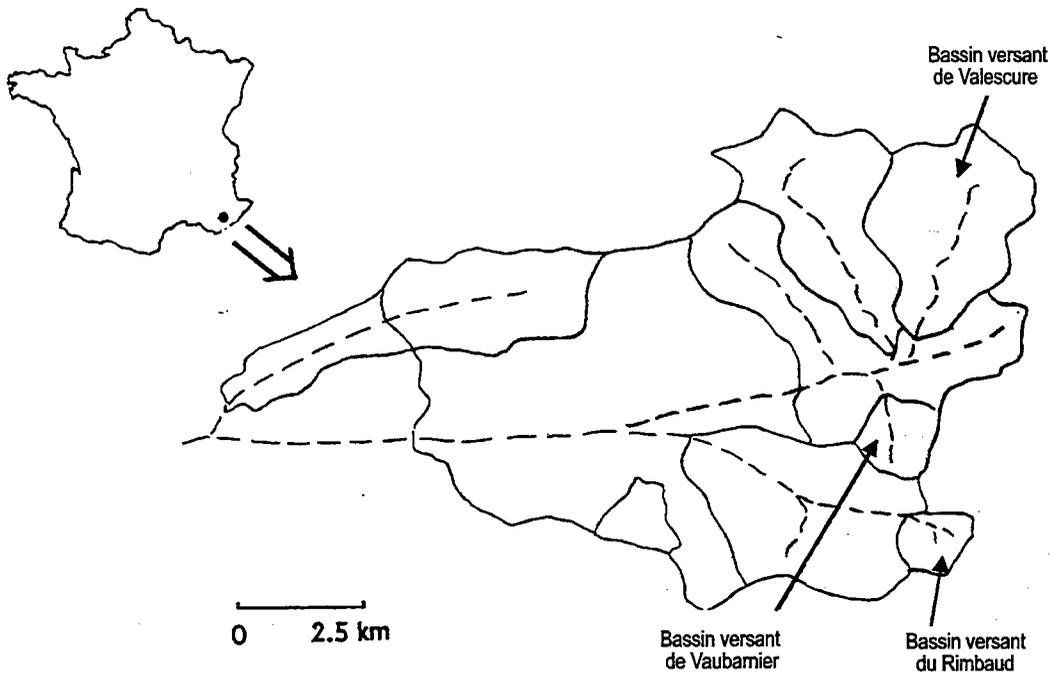


figure 6 : localisation des sous bassins du Réal Collobrier

L'exemple du bassin du Réal Collobrier est, à ce titre, d'un grand intérêt. Ce bassin versant de recherche, observatoire hydrologique* implanté dans le massif des Maures, est géré par le Cemagref depuis 1967. En août 1990, la zone d'étude a été partiellement incendiée. Certains sous bassins suivis ont été touchés, d'autres totalement épargnés. Le sous bassin du Rimbaud (1.5 km²), étudié ici, a été particulièrement affecté par l'incendie et on estime que 85 % de sa couverture initiale de maquis arbustif a été détruite par le feu.

La méthode des bassins appariées a été utilisée par les chercheurs du Cemagref et du CERGRENE :

- en utilisant comme bassin de contrôle les sous bassins voisins de Valescure et de Vaubarnier ;
- en utilisant comme bassin de contrôle la modélisation avec des modèles simples au pas de temps mensuel, journalier et horaire [de type conceptuel global].

Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3 :

variable hydrologique	effet de l'incendie compris	
	entre	et
écoulement annuel	+10 %	+ 60 %
volume de crue	+20 %	+ 60 %
moyenne des crues	+ 5 %	+ 260 %
durée des crues	+ 5 %	+ 160 %

tableau 3 : effets de l'incendie sur les crues du bassin du Rimbaud (d'après Nascimento, 1995)

La méthode des bassins versants appariés a permis de distinguer les influences de l'incendie proprement dit et les influences climatiques : en effet, l'incendie de 1990 est intervenu à la fin d'une période de sécheresse prolongée de 3 ans dans le massif des Maures, qui avait déjà modifié de façon non négligeable les comportements hydrologiques.

La modélisation a également permis d'aller un peu plus en avant dans l'analyse des modifications des comportements hydrologiques qui génèrent les crues : en effet, si on cale le modèle GR4J sur le bassin réel modifié, on constate une diminution du paramètre de calage rendant compte du temps de concentration du bassin. Cette information, strictement comportementale, renvoie à une éventuelle diminution de la capacité d'infiltration des sols, suite à la destruction de la végétation et à la chaleur dégagée par l'incendie qui peut entraîner un comportement hydrophobique des sols méditerranéens ; hypothèse à examiner ensuite par des moyens autres.

2.2 Effet d'une coupe forestière : cas des bassins versants du Mont Lozère

Les bassins versants de recherche situés sur les pentes sud du Mont Lozère ont permis d'analyser l'effet d'une coupe forestière dans de bonnes conditions expérimentales.

Deux bassins versants contigus présentaient un couvert végétal varié (pessière* et prairie). Plusieurs années de mesures hydrométriques et pluviométriques avaient permis de comparer les comportements du bassin en pessière et du bassin en prairie. L'étude a établi qu'il n'y avait pas de réelle différence de comportement en ce qui concerne la genèse des crues sur les deux bassins.

Les deux bassins présentent les deux mêmes types de crues :

- des "petites" crues, pour lesquelles une faible part de la pluie incidente s'écoule, la quasi-totalité s'infiltrant et venant alimenter les réserves superficielles et souterraines;
- des crues "cévenoles", liées à des précipitations très volumineuses et intenses, caractéristiques de la région. Au delà d'une certaine limite, alors que les réservoirs du sol et du substratum altéré sont saturés, l'écoulement augmente brutalement et une part très importante de la pluie ruisselle.

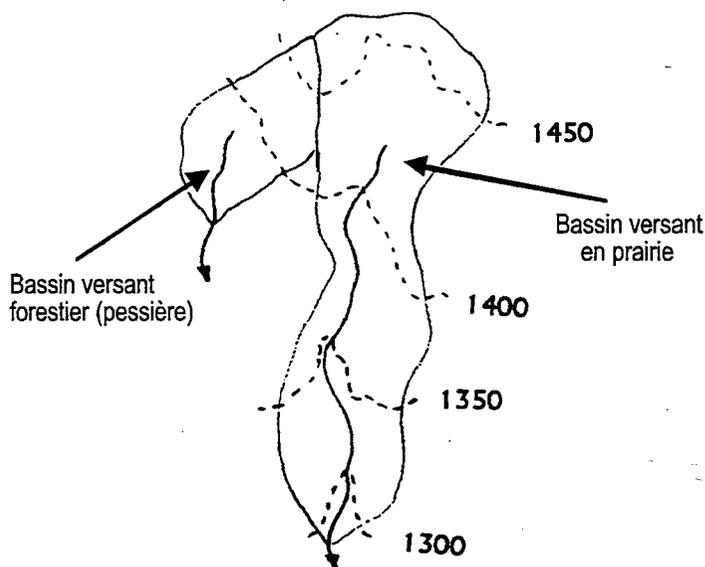


figure 7 : situation des bassins versants du Mont Lozère

Les quelques différences qui existent entre les deux bassins sont les suivantes :

- le "seuil de saturation" est supérieur pour la pessière : cela est lié notamment à une épaisseur de sol plus importante. Ainsi, la capacité totale de stockage est estimée à 270 mm pour la pessière et seulement à 230 mm pour la prairie;
- le volume total des "petites crues" est plus important sur le bassin en prairie : alors que le coefficient d'écoulement événementiel est toujours très faible pour la pessière (inférieur à 3 %), il peut s'élever jusqu'à 10 % pour la prairie. Cela est lié à l'apparition d'un ruissellement de surface plus rapide sur la prairie, en liaison avec des surfaces dégradées par le pâturage.

Une coupe forestière à blanc a concerné la totalité du bassin versant boisé, permettant d'évaluer les conséquences des pratiques sylvicoles sur le régime des crues (Cosandey, 1993).

Après la coupe de la pessière, il ne semble pas y avoir de modification dans le déclenchement des crues cévenoles. La capacité totale de stockage de l'eau - essentiellement liée à l'épaisseur de sol - n'est pas altérée, et le seuil de déclenchement des crues reste le même. Il semble donc que la végétation seule n'introduise pas de différence de réaction aux événements pluviométriques extrêmes (qui mobilisent 200 à 300 mm de pluie en un ou deux jours!).

Cependant, la réaction du bassin déboisé par rapport aux événements plus modestes est modifiée : le coefficient d'écoulement rapide de certaines petites crues est bien supérieur à ce qui était observé auparavant : il peut atteindre et dépasser 5 % de la pluie incidente. Les observations de terrain montrent que les travaux de coupe ont eu pour conséquence
 – la création de nouveaux chemins forestiers, le défoncement des anciens ;

– surtout, la création d'une ravine qui draine une nappe, drainant de façon rapide un écoulement hypodermique qui se serait autrement effectué de façon beaucoup plus lente.

Il apparaît donc que les travaux forestiers ont la possibilité de modifier l'écoulement de petites crues. Ce résultat est cohérent avec de nombreuses observations effectuées aux Etats-Unis (Jones et Grant, 1996).

2.3 Effet du reboisement des marnes noires dans les Alpes du Sud

Les bassins versants de recherche de Draix, gérés par la division Protection contre les Erosions du Cemagref (Grenoble), se trouvent dans une région soumise à une intense érosion, liée à la nature du substrat géologique (marnes noires). Les paysages résultants sont très caractéristiques (bad-lands). (Meunier, 1996).

Deux bassins voisins de taille similaire, le Laval et le Brusquet, peuvent être comparés pour essayer de comprendre les influences respectives de la forêt et de la dénudation sur les crues.

Les deux bassins présentaient un couvert végétal négligeable à la fin du siècle dernier. Le Brusquet a alors été reboisé, et le couvert forestier occupe à présent près de 80 % de la surface du bassin (tableau 4). Le bassin du Laval est, quant à lui, resté totalement dénudé. Ces bassins mettent donc en scène des situations de couvert végétal très contrastées.

bassin versant	surface (km ²)	taux de dénudation (%)	érosion annuelle moyenne (tonnes/ha)
Laval	0.86	78	177
Brusquet	1.08	13	4

tableau 4 : caractéristiques des bassins versants de Laval et de Brusquet (Meunier, 1996)

Après près d'un siècle d'évolution, les différences sont frappantes, d'abord en ce qui concerne les niveaux d'érosion : les travaux de reboisement réalisés au siècle dernier par les services RTM* avaient avant tout pour but de contrôler l'érosion et le transport des sédiments.

Les équipements hydrométriques installés dans les années 1980 permettent d'analyser le comportement des bassins par rapport aux crues. La différence de comportement des deux bassins est frappante. Le bassin dénudé réagit à la fois plus vite (sa pointe de crue précède de près d'une demi-heure la pointe de crue du bassin versant boisé) et de façon plus im-

portante (sa pointe de crue est près de dix fois plus haute). Cette différence peut s'expliquer, d'une part, par une différence de processus dans la génération de l'écoulement. Le bassin dénudé montre un taux de ruissellement de surface plus important, alors que le bassin reboisé a une contribution majoritaire d'écoulement hypodermique.

Ceci est lié à la fois :

- à l'état de surface du sol : le bassin dénudé peut générer une croûte dite de battance qui ralentit l'infiltration de la pluie, alors que le bassin reboisé, grâce aux racines des arbres et à la matière organique du sol, présente des vitesses d'infiltration supérieures;
- à l'épaisseur du sol : après un siècle de boisement, l'épaisseur de sol est supérieure sur le bassin reboisé; l'utilisation de la réserve en eau du sol par les arbres a pour conséquence une disponibilité du sol forestier au stockage. Cet effet est particulièrement important après une longue période sans pluie.

La capacité d'interception et de rétention d'eau du feuillage forestier peut également contribuer à la diminution de l'écoulement.

L'exemple des bassins versants de Draix illustre donc la différence de comportement hydrologique suivant le couvert végétal. Il faut cependant noter que cette différence n'est bien visible qu'en raison de la durée de vie du boisement qui a fini par influencer sur les caractéristiques des sols.

L'exemple précédent des bassins versants du Mont Lozère a bien montré que pour des sols forestiers comparables, les différences de comportement après déboisement sont moins accentuées.

3. Exemples réfutés d'influence humaine sur le régime des crues

3.1 Le drainage du bassin versant du Ru du Four (St-Fargeau, Yonne)

La controverse au sujet des effets du drainage sur le régime des crues dure depuis plusieurs années, sans que l'on puisse apporter de réponse définitive (Cemagref, 1985). A l'échelle de la parcelle, dans des conditions de pluie non exceptionnelles, le drainage agricole (par drains, enterrés) permet d'amortir l'effet des pluies génératrices de crues : la nappe étant rabattue, le pouvoir de stockage du "réservoir sol" est plus important. Le drainage semble donc favoriser le rôle "tampon" du sol par rapport aux crues. Par contre le réseau d'assainissement (l'ensemble de fossés destiné à évacuer l'eau des drains) peut avoir un effet exactement inverse : ces fossés sont généralement surcreusés lors de l'installation des drains qui y débouchent. Il s'ensuit généralement une augmentation de la débitance, d'où une accélération du transfert de l'eau vers l'exutoire du bassin, susceptible d'accroître les pointes de crue (Lesaffre et Arlot, 1991; Zimmer, 1995). L'antagonisme de ces deux effets rend difficile la prévision de l'effet global d'aménagements hydroagricoles

de ce type. Le manque de données (pas de suivi des bassins versants avant drainage, absence de bassin de contrôle permettant de s'abstraire des variations climatiques) ne permet guère de réduire le flou qui entoure ce sujet.

L'exemple du bassin versant du Ru du Four (Nascimento, 1995) est particulièrement intéressant dans la mesure où il s'agit de l'un des rares exemples français où le suivi des bassins avant et après modification humaine a pu être réalisé suivant la méthode des bassins versants appariés. Ce bassin de 6 km² au total, contient en son sein un sous bassin de 2.7 km², couvert par des prés et des bois. Ce dernier, n'ayant subi aucun changement pendant la période d'étude, a servi de bassin de contrôle. Les deux bassins ont été suivis de 1981 à 1983, date à laquelle 50 ha (soit 8.3 % de la surface du bassin) de terres agricoles ont été drainées. Après drainage, les deux bassins ont pu être comparés en 1984 et 1985.

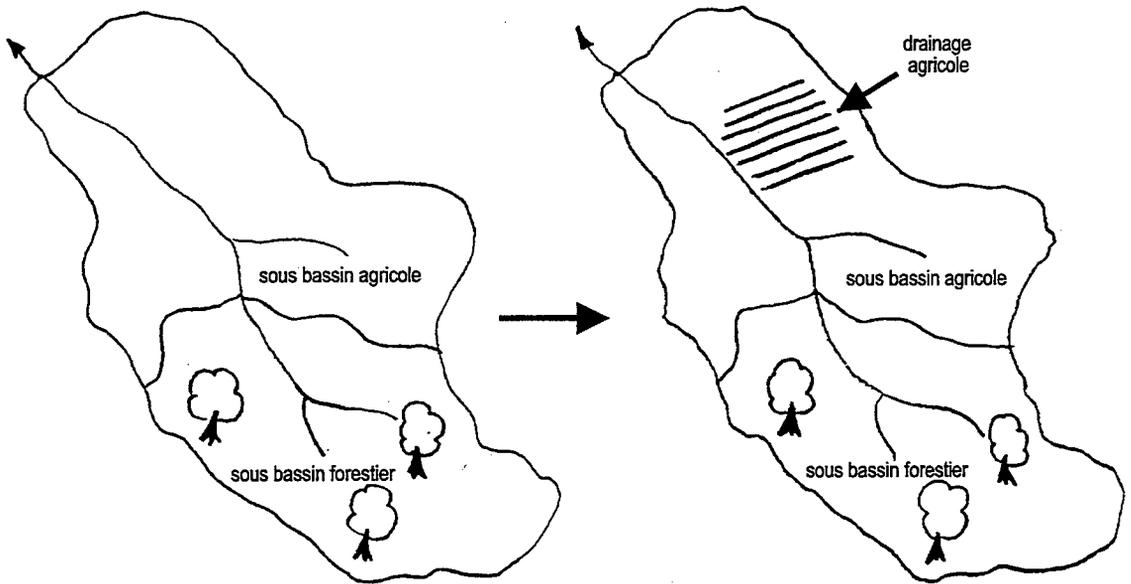


figure 8 : situation des bassins versants du ru du Four

Une première approche a consisté à analyser les caractéristiques des crues sur le bassin de 6 km², avant et après drainage. Les résultats sont présentés dans le tableau 5 :

Lame d'eau (mm)	Période 1981-1983 (avant drainage)	Période 1984-1985 (après drainage)
écoulée en crue	131	80
écoulée en étiage	9	6
journalière maximale	18	6

tableau 5 : Caractéristiques de l'écoulement pour le bassin entier du Ru du Four

[crue et étiage sont ici définis en comparant la lame d'eau journalière au débit interannuel du cours d'eau dénommé module : il y a crue quant la lame d'eau journalière excède quatre fois le module ; il y a étiage en dessous d'un dixième du module]

Une analyse trop rapide de ce tableau pourrait conclure que le drainage a eu un effet réducteur sur les débits de pointe et de crue, peut-être également sur le débit d'étiage. Les résultats du bassin de contrôle de 2.7 km² doivent être également pris en compte :

Lame d'eau (mm)	Période 1981-1983 (avant drainage)	Période 1984-1985 (après drainage)
écoulée en crue	156	93
écoulée en étiage	3	3
journalière maximale	14	9

tableau 6 : Caractéristiques de l'écoulement pour le bassin de contrôle

En intégrant les données recueillies sur le bassin de contrôle, on est forcé de reconnaître que la réalité n'est pas du tout aussi simple qu'elle le paraissait. On retrouve sur les deux bassins une même tendance de réduction des débits de crue. Il y a donc visiblement là une fluctuation climatique, qui masque l'éventuel impact hydrologique du drainage (tableau 7) :

	Période 1981-1983 (avant drainage)	Période 1984-1985 (après drainage)
Pluviométrie annuelle moyenne (en mm)	911	754

tableau 7 : Pluviométrie moyenne annuelle pour les bassins du Ru du Four

L'observation directe des débits ne suffit donc pas à prouver une évolution du régime hydrologique consécutive au drainage.

Il était par contre possible d'essayer de détecter une évolution de la relation pluie-débit à l'aide d'un modèle hydrologique. Ceci a été fait par Nascimento (1995). La conclusion qu'il en tire est que, si le drainage a un effet sur l'hydrologie, cet effet n'est pas détectable lors du drainage de 8 % du bassin du Ru du Four.

3.2 Le remembrement et le recul du bocage sur le haut bassin de l'Ouanne (Yonne)

Entre 1962 et 1973, huit communes du haut bassin de l'Ouanne, situées à l'amont de Toucy, ont été remembrées. Le remembrement s'est accompagné de la suppression d'un nombre important de haies, et d'une conversion de certaines prairies en terres labourables. L'étude de photographies aériennes a montré qu'entre 1955 et 1978, 1200 km de haies (sur un total de 1950) avaient disparu, et que 1800 ha de prairies (sur un total de 5700 ha)

avaient été retournées. Assurément, les changements subis sont relativement importants pour un bassin versant de 15 300 ha au total.

Une polémique sur les effets du remembrement est apparue à la suite d'une série de trois années successives (1976 à 1978) où les crues ont été particulièrement importantes. Suite aux interrogations du public, l'Agence de l'Eau, alors Agence Financière de Bassin, a demandé une étude au Laboratoire de Géographie Physique de l'Université Paris 6 (Bauman, 1983, 1985). Cette recherche s'est fondée sur une étude de l'évolution de la structure bocagère entre 1955 et 1978, et sur une classification des sols du bassin. Sur la base de comparaisons entre parcelles voisines qui ne différaient que par la présence d'une haie, Bauman a cru pouvoir estimer les variations de la teneur moyenne en eau du sol, en fonction des types de sol et de la présence ou non d'une haie. Se fondant sur le linéaire de haies disparu, l'auteur a ainsi estimé que le bassin versant devait être plus humide avant le remembrement, stockant en moyenne 12.5 mm d'eau de plus, le relatif assèchement du bassin pouvant être lié à l'augmentation présumée des crues.

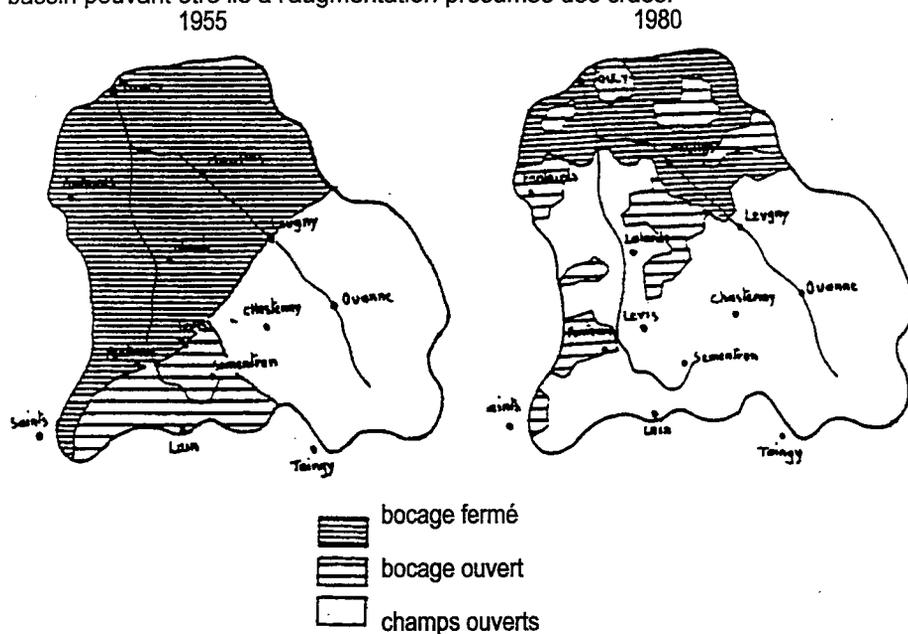


figure 10 : le bassin versant de l'Ouanne à Toucy (d'après Bauman, 1983)

L'interprétation qui a été faite de ces mesures semble cependant un peu hâtive, voire contradictoire. A l'opposé des conclusions de Bauman, un bassin en moyenne plus humide devrait produire des crues plus importantes, la capacité du "réservoir sol" étant plus rapidement dépassée au cours d'un événement pluvieux majeur.

Il semble donc qu'il faille plutôt raisonner en termes de modification de la capacité globale du "réservoir sol" du bassin versant. Ce dernier, pour un régime climatique donné, influence l'humidité moyenne du sol et pourrait permettre d'interpréter les mesures faites par Bauman.

Un essai d'interprétation des mesures de terrain effectuées par Bauman sur le bassin versant de l'Ouanne a donc été réalisé à la Division Hydrologie du Cemagref à Antony. En utilisant un modèle hydrologique conceptuel (GR4J), calé sur les données de l'Ouanne pour la période 1969-1978, nous avons cherché à quantifier les conditions et l'effet d'une "humidité moyenne" plus importante. Les résultats montrent :

1/ qu'une augmentation de 12.5 mm de l'humidité moyenne du bassin peut être retrouvée en augmentant de 24 mm la capacité totale du "réservoir sol" du modèle.

2/ avec cette modification (nous ramenant en première approximation à un bassin versant sans remembrement), on observe effectivement des débits de crue légèrement moindres : la lame d'eau écoulée en crue calculée par le modèle pour un bassin bocager est inférieure de 11 mm à la lame d'eau calculée pour le bassin remembré pour la période 1969-1978.

3/ cependant aucune conséquence n'est décelable sur les débits de crue rares (fréquence décennale et au-delà), tels que le modèle les calcule.

Les arguments avancés par Bauman pour prouver que l'aménagement du bassin versant de l'Ouanne à Toucy a modifié le régime des eaux ne suffisent ainsi pas à clore le débat hydrologique : la réinterprétation réalisée par le Cemagref rend également compte des observations faites dans le bassin, mais indique qu'il est impossible de conclure quant aux crues rares sur la base des informations disponibles.

Ceci ne signifie pas que le remembrement n'a pas eu d'effet sur l'hydrologie, notamment entre 1955 et 1969 avant le début du jaugeage de l'Ouanne : les stations hydrométriques ont généralement été installées trop tardivement pour permettre une approche diachronique valable, sans parler de l'absence presque systématique d'un bassin de contrôle.

Cet exemple illustre bien la difficulté qui existe dans l'analyse des conséquences d'aménagements.

4. Conclusion

Le plus souvent, la mise en évidence de l'impact humain sur le régime des crues est difficile, dans la mesure où la variabilité climatique naturelle peut facilement induire en erreur et mener à des conclusions erronées.

Quant à la méthode, les exemples que nous venons de présenter ont montré :

- comment on peut essayer de cerner l'impact réel de certaines activités humaines sur les crues ;

- l'aide qu'apporte à cet égard un modèle hydrologique de bassin versant, en permettant de systématiser une approche en « bassins appariés ».

Des exemples eux-mêmes on retiendra que :

- S'agissant plutôt de petites crues (fréquentes), les recherches ont dans plusieurs cas pu mettre en évidence leur augmentation à l'occasion d'incendies de forêt, des travaux d'exploitation forestière, de remembrement...

- S'agissant plutôt de grandes crues (rares), aucune influence des travaux de drainage agricole, de remembrement, d'exploitation forestière n'a été décelée, au moins à court terme. Cette absence de détection est probablement liée à la fois à une part plus importante de la sollicitation climatique dans la genèse de ces événements et au faible recul dont on dispose eu égard à la rareté des phénomènes. Elle n'exclut ni que cette influence existe déjà ni qu'elle s'installe à terme, par exemple du fait de phénomènes d'érosion.

Le simple résultat sur les petites crues, et le l'incertitude où nous sommes s'agissant des grandes, oblige à la précaution dans les aménagements.

Par ailleurs, il reste toujours nécessaire de distinguer ce qui est du domaine de la crue de ce qui est du domaine de l'inondation. Comme on le verra dans l'article suivant, de nombreuses impressions d'augmentation des crues ont en réalité pour origine une augmentation de la vulnérabilité des constructions humaines aux inondations (typiquement par la construction d'habitations en zones inondables autrefois strictement agricoles).

Essai de synthèse en vue de l'action : l'influence humaine à travers les pratiques actuelles et futures de gestion des eaux dans leurs versants et dans leurs réseaux *Human influence as a consequence of water management : a summary for action.*

Guy Oberlin

Cemagref, groupement de Lyon
3 bis quai Chauveau CP 220
69336 Lyon cedex 09
tél 04 72 20 87 72
fax 04 78 47 78 75
mel guy.oberlin@cemagref.fr

Résumé

Ce chapitre présente les indicateurs hydrologiques de base permettant de caractériser un régime de crues, guider les diagnostics ou les actions de gestion : débit décennal de pointe et durée caractéristique de crue, ainsi que d'autres indicateurs parfois nécessaires, tels que débit de plein bord, temps de réponse et temps de montée des crues. L'auteur présente ensuite quelques agrégats d'actions socio-économiques et d'aménagements dont les effets sur les crues sont connus : modifications du couvert végétal, remembrements et travaux connexes, pratiques culturelles, drainage souterrain, assainissement agricole, aménagement et entretien du réseau hydrographique, urbanisation. Sont évoqués ensuite divers aspects moins connus, relatifs à la perception spatio-temporelle d'une crue locale, aux embâcles et débâcles, à la pertinence des entretiens, nettoyages et recalibrages consécutifs aux crues, au caractère cumulatifs des effets, à l'irrégularité de réalisation des crues et au changement climatique. La fin du chapitre examine les conditions à vérifier pour que les influences humaines ne soient demain plus subies mais maîtrisées, ainsi que quelques agrégats possibles d'actions, redéfinis comme de nouveaux métiers d'une gestion intégrée professionnelle des eaux

Abstract

This chapter introduces synthetic descriptors for high flow regimes, like ten-year peak discharge, characteristic flood duration, and some others, as fullbank discharge. Then, the author discusses the impact on floods of some well-known socio-economical actions, like crops changes, field structure modifications, river works, urbanization. Later, other less-known topics are introduced. The end of the chapter suggests how human impact can be included willingly into a future oriented, professional water management.

1. Introduction

Le présent exposé entend tirer parti des multiples connaissances présentées précédemment, pour en extraire une base synthétique, simplifiée mais réaliste. Cette base a pour but premier de guider une modélisation dédiée à la quantification des influences humaines sur les crues. Mais elle doit aussi être exploitable dès à présent pour les gestionnaires et les aménageurs, dans l'objectif d'une gestion intégrée des eaux.

Les précédents chapitres illustrent bien la complexité des influences humaines sur la formation des crues. Mais il ne faudrait pas abuser de cette réalité de complexité pour en déduire une impuissance à agir dans le sens de la connaissance et de la maîtrise des phénomènes (influencés ou non), de la modération des crues quand c'est possible, ou encore pour justifier des laisser-aller et des laisser-faire.

1.1 Quelques distinctions nécessaires

Pour y voir clair, il faut d'abord séparer les actions humaines influant sur l'aléa de crue de celles faisant évoluer la vulnérabilité des terrains concernés. Nombre de cas présentés trouvent en effet l'origine de leur médiatisation davantage dans les vulnérabilités concernées (réellement augmentées, ou moins assumées que par le passé) que dans les aléas subis, que ces derniers soient modifiés ou non d'influences humaines.

Par ailleurs, l'irrégularité de réalisation d'un régime de crues, à court terme et sur des surfaces fixées, ne préjuge en rien de l'existence et de la relative stabilité de ce régime (qu'il possède ou non des tendances à évoluer). Ce régime des crues est structuré par le bassin versant, et structurant pour les milieux concernés par les crues. Nous affirmons donc que l'usage des sols et les aménagements peuvent être structurants dans le temps et dans l'espace, malgré la complexité des processus, pour peu qu'on veuille bien :

- ne pas tirer des conclusions générales à partir d'événement historiques locaux considérés seuls (intéressants en soi, ils sont toujours singuliers et ne sont jamais par eux-mêmes représentatifs du régime du cours d'eau)

- tenir compte des effets d'échelle spatiale et de cumul temporel. Ces derniers jouent dans les deux sens : telle influence locale spectaculaire peut disparaître en aval ; telle influence localement négligeable mais largement répandue peut aboutir à des effets cumulés significatifs en aval ; telle influence "instantanée" peut s'effacer sur des durées plus longues...

Ainsi les pratiques d'usage, d'aménagements et de gestion des terrains, peuvent bien avoir une influence sur la genèse des crues, aussi bien en versant qu'en fond de talwegs, mais à condition de les examiner à l'échelle ad hoc.

A l'intérieur des crues elles-mêmes, il faut distinguer aspects hydrologiques et hydrauliques :

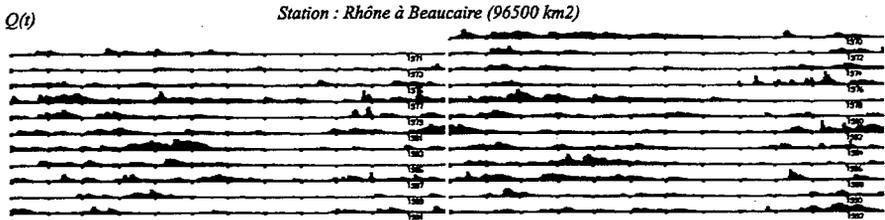
- les aspects purement hydrologiques sont liés aux chroniques liant les débits Q au temps courant t , ce que l'on note $Q(t)$. Ces aspects hydrologiques sont synthétisés en "régimes

hydrologiques" qui s'expriment généralement sous forme de débits caractéristiques (QC) fonction de périodes moyennes de retour T, ce que l'on note QC(T) ; cette synthèse renonce à la chronologie fine des événements observés pour obtenir une caractérisation pertinente des événements possibles et de leur probabilité d'apparition ;

- les aléas hydrauliques correspondants sont les diverses grandeurs manifestant ces débits physiquement, visiblement et de façon directement utilisable par la société : hauteurs d'eau, vitesses, durées, etc...

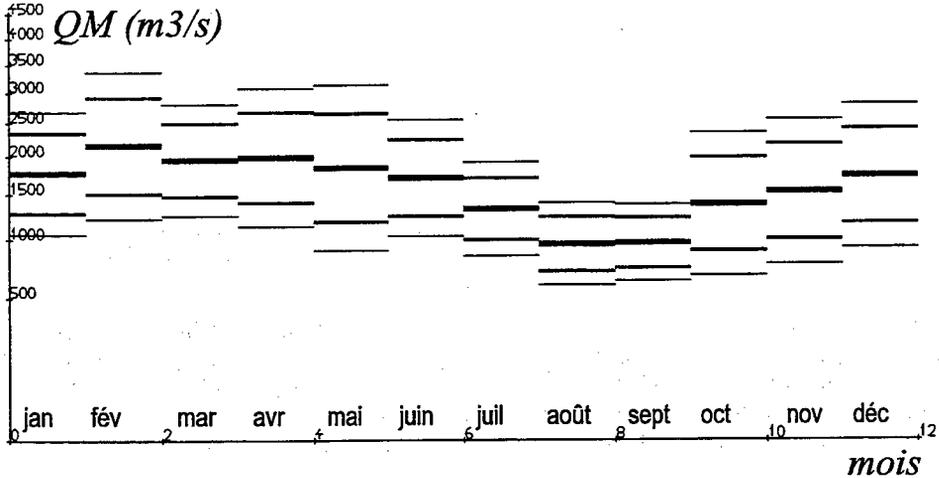
NOTE : La synthèse descriptive des débits : quoi et pourquoi ?

Les débits d'une rivière sont connus par l'intermédiaire d'un enregistrement continu de la hauteur, transformé en débit via une courbe de tarage*.



Ci-dessus on présente la chronique de débit du Rhône à Beaucaire pour 23 années. On constate l'irrégularité des écoulements d'un moment de l'année à l'autre, et d'une année sur l'autre, en fonction des événements météorologiques se succédant dans le bassin versant, des états de surface et des décisions de gestion prise par les opérateurs du bassin etc... Cette chronique contient toute l'information concernant le régime hydrologique du Rhône, mais cette information est difficilement lisible.

Apports mensuels

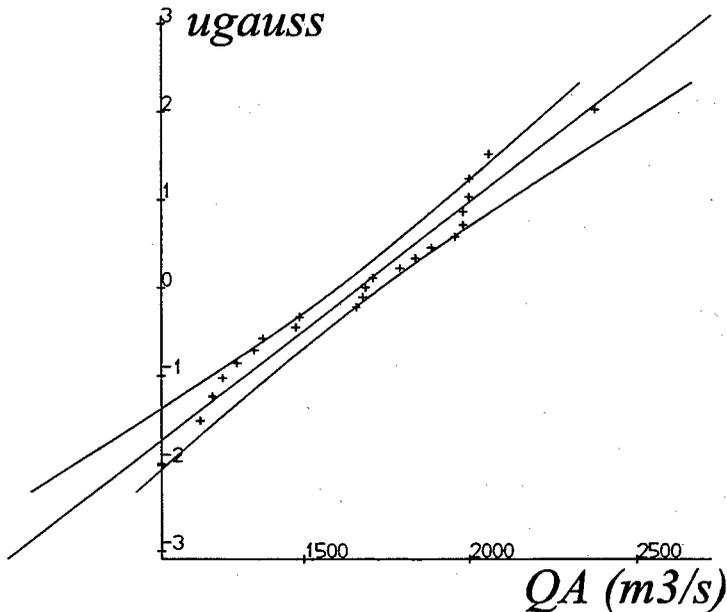


Ci-dessus on examine, dans la tradition instaurée par Maurice Pardé, les écoulements mensuels ; la ligne centrale représente ici la valeur médiane du débit de chaque mois, entourée de part et d'autre des valeurs quinquennale et décennale sèches et humides (les ajustements sous-jacents portent sur les racines des débits mensuels, ajustées à une loi normale).

On observe le régime particulier du Rhône, avec une forte dispersion autour des valeurs médianes pour toutes les saisons, et elles sont nombreuses, où des crues fortes sont susceptibles d'amener de forts volumes d'eau (hiver (océanique)-printemps (océanique + fonte nivale)-automne (crues des affluents cévenols)), mais pour le reste, hors les mois d'été, l'écoulement est soutenu de part les sources de débit différenciées du Rhône (pluie en automne et hiver pour la Saône, neige au printemps pour les affluents alpins, débit soutenu en fin de prin-temps par le haut-Rhône (Léman)).

[Pour des cours d'eau plus petits, ce diagramme sera souvent plus simple, avec une source d'alimentation majeure, pluie, neige ou glace].

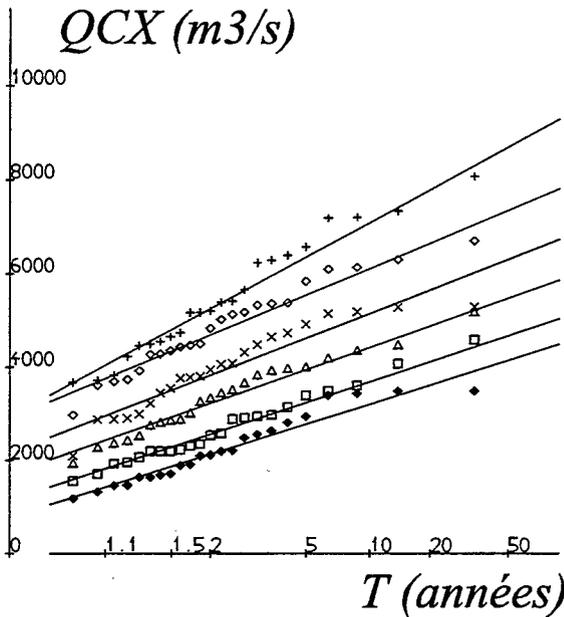
Apports annuels



Les apports annuels d'une rivière, hors des zones arides, peuvent être considérés comme la somme de nombreux événements hydrologiques et tendent à suivre une loi normale de par le théorème centrale-limite. Ci-dessus on vérifie cette propriété sur un "papier de Gauss", en exhibant les valeurs décennales sèche et humide et le module (espérance mathématique du débit de la rivière au point considéré).

Hautes eaux

En examinant les valeurs fortes prises par les débit (débits dépassés sur 1, 2, 5... 30 jours consécutifs, maxi-maux annuels, nommés QCXd*) on constate qu'ils peuvent être décrit par des lois (ici loi dite de Gumbel, on peut faire mieux) qui permettent de préciser les valeurs de ces débits dépassés avec une période moyenne de retour donnée. Ceci réalise une description simple du régime des hautes eaux.



Sens et utilité de ces analyses

Les trois analyses présentées ci-dessus constitue autant de regards "spécialisés" extrayant de la chronique des informations utiles participant de la connaissance du régime hydrologique de la rivière. Cette approche est traditionnelle en gestion-aménagement de la rivière : en effet, ce n'est pas le détail des événements historiques, mais bien les structures sous-jacentes, qui peut fonder l'insertion durable des aménagements humains dans les bassins versants.

On citera évidemment les études d'aléa d'inondation comme application des figures précédentes. De manière plus générale, s'agissant de modèles pluie-débit*, on peut examiner tant les chroniques observées que reconstituées avec cet oeil : le but étant non pas seulement d'obtenir les meilleures chroniques possibles, au sens d'un critère de moindre carrés, que de savoir aussi dire en quoi, sur quelles variables hydrologiques les chroniques reconstituées sont fidèles, et de pouvoir expliciter les conséquences d'un aménagement simulé.

Étienne LEBLOIS (GIP HydrOsystemes, Cemagref)

1.2 Objectifs de ce chapitre

Un premier objectif "diagnostic" sera de tenter une synthèse méthodologique des analyses précédentes. On le fera dans la perspective de trouver :

- d'une part, des indicateurs plutôt hydrologiques, qui ont une signification scientifique et cognitive, une faisabilité technique, et une manipulabilité leur permettant de nous aider à évaluer synthétiquement, aussi bien des effets subis et observés, que des effets recherchés, dans le régime des crues ;

- d'autre part, des indicateurs plutôt socio-économiques, c'est-à-dire quelques "agrégats" de types d'actions observées ou prévues en usages des sols, en aménagements, en gestion hydrauliques et en gestion intégrée (le futur), qui soient socio-économiquement perceptibles et surtout négociables.

En essayant de caractériser les seconds via les premiers, c'est à dire en tentant d'évaluer cette fois synthétiquement les causes d'influences, on devrait contribuer à un interfaçage entre pratiques humaines et effets sur les crues.

Le second objectif "connaissances pour l'action" est de présenter connaissances et éléments méthodologiques de telle sorte qu'ils puissent être exploités au mieux. Les actions visées sont toutes celles susceptibles d'influencer les crues. Compte tenu de la complexité des processus, et de l'intérêt général évident à plutôt agir dans le sens de la modération des crues que dans le sens de leur aggravation, ce second objectif est nettement orienté "actions pour la modération des crues" (impacts neutres ou positifs, compensations d'impacts négatifs, améliorations de situations antérieures). On se place ainsi en accord avec la gestion intentionnelle générale, même si la gestion effective est parfois différente.

Bien compris, bien exploité, l'outil d'interfaçage cité au premier objectif pourrait servir le second, qui devrait servir lui-même une gestion intégrée et améliorée des bassins, au titre d'actions contribuant à moduler le régime des crues dans le sens de la modération.

Par souci de ne pas séparer bonnes et mauvaises actions, dans une dichotomie qui pourrait être caricaturale, on a préféré structurer les catégories d'actions en agrégats. On distinguera des agrégats classiques (cultiver, entretenir des lits, implanter des ouvrages, construire) et d'autres relativement nouveaux, exprimés selon des "métiers" de l'eau qui pourraient se développer demain (gestion intégrée), puisque l'eau est un "produit" économique et d'intérêt général.

On y distinguera bien sûr les pratiques aggravantes de celles modératrices des crues, ainsi que les pratiques habitudes des innovations possibles.

De tout ceci devrait résulter à terme une capacité à modéliser des influences humaines de manière progressivement intégrée aux aménagements et à la gestion. On passerait ainsi du stade actuel d'analyse des impacts à un stade plus élaboré et plus positif de gestion, bien sûr intégrée, alliant à la modération des crues, des bénéfices quant à la ressource en eau, aux milieux aquatiques, aux sols, et à la réduction des dommages.

Rappelons ici, pour éviter des malentendus sur la portée de ce chapitre, deux réalités déjà mentionnées plus haut :

- l'influence humaine sur la genèse des crues n'est qu'une composante du problème des inondations dommageables, qui en comporte bien d'autres : aléas hydrauliques, vulnérabilités, tout ce qui est lié aux risques...

- le fort lien entre modération des crues et ressources en eaux, ainsi que les effets souvent positifs des crues pas trop fortes, même inondantes (qualité des milieux incluse).

1.3 Complexité ... provisoire

Comme déjà dit à plusieurs reprises, les conditions d'occurrence des crues sont fort complexes et variables dans le temps et dans l'espace. Les exposés de ce rapport, et ce chapitre ne peut y échapper malgré sa volonté de synthèse, sont donc complexes et chargés de nuances. Il est essentiel de se plonger, au moins un fois, dans cette complexité, pas d'en retenir tous les détails d'emblée.

(Le sous-chapitre 2 présente les indicateurs de synthèse recommandés pour justement ne pas avoir à traîner cette complexité et ses nuances. De même, les propositions pour le futur, ébauchées au sous-chapitre , ne rentreront plus dans les détails. Mais l'exercice de lecture du sous-chapitre 3 reste recommandé).

2. Les indicateurs hydrologiques de base pouvant caractériser un régime de crues, guider les diagnostics ou les actions

Compte tenu de la "dentelle" que représente une chronique de débits Q en temps courant t , $Q(t)$, on pourrait craindre qu'il y ait une quasi-infinité d'indicateurs potentiels du régime des crues. Fort heureusement, il n'en est rien : un faible nombre de variables hydrologiques peut suffire à caractériser l'essentiel d'un régime de crues en une section donnée de rivière, voire sur tout ou partie d'un bassin versant.

En modélisation déterministe, un modèle hydrologique capable de générer correctement des séries continues de débits (par ex. la famille des modèles conceptuels GRid*, les diverses formes de TOPMODEL, ou les modèles distribués issus du modèle Cequeau) fonctionne déjà convenablement avec un minimum de 2-3 paramètres par section de calage (section où est observé une chronique de débit exploitée lors du calage), et l'équivalent de quelques autres (disons 2 à 4 en sus) pour le calage général ou régional, outre bien sûr une connaissance du milieu (caractéristiques physiographiques* des bassins et réseaux hydrographiques, caractéristiques climatiques).

En modélisation plutôt synthétique, produisant donc des évaluations directes de quantiles de débits caractéristiques associés à des probabilités d'apparition, des modèles comme AGREGEE* (développement de la méthode du Gradex*) ou QdF* (modélisation des régimes de crue sensu stricto) sont de même en grande partie déjà déterminés par seulement 2 paramètres locaux, outre divers paramètres généraux mais de calage/validation très large (régional pour un bassin moyen, voire national pour un grand bassin).

Pour analyser finement une influence on préfère les premiers (déterministes).

Cependant, les paramètres des modèles déterministes ont rarement une signification hydrologique directement compréhensible, même s'ils ont habituellement une dimension physique claire (par exemple la dimension d'un volume, généralement un potentiel de stockage d'eau). Pour exprimer des connaissances sur les influences humaines, pour prédéterminer l'influence d'aménagements par exemple, on préférera les seconds (synthétiques). Ces modèles de synthèse descripteurs de connaissances ont souvent des significations hydrologiques directement liées aux régimes des crues (par exemple le débit instantané décennal, ou une durée "médiane" des crues, dans les modèles QdF). On recommandera donc ici de choisir prioritairement les indicateurs hydrologiques des régimes et des influences dans la famille des paramètres des modèles de synthèse.

Cela n'ôte en rien l'intérêt des modèles analytiques : pas de synthèse valable sans analyses préalables suffisamment fournies !

Les aléas hydrauliques concrétisation des réalités hydrologiques sur le terrain, subissent une "dialectique" contradictoire qui oblige à les manipuler avec précautions :

- d'une part, ils sont très "pédagogiques" (tout le monde comprend ce qu'est une hauteur d'eau, une profondeur, une vitesse, etc...) et directement liés aux questionnements de la société sur les crues : ce sont ces aléas qui provoquent les risques subis ou redoutés ;

- d'autre part, ils sont terriblement sensibles à une infinité de détails topographiques, innombrables (les mille et un détails de la forme des lits et des fonds de vallées) sinon instables : tous travaux de génie civil, d'exploitation des sols, de la végétation, etc... outre les phénomènes plus ou moins naturels de dynamique fluviale et d'érosion.

Il résulte de ce dernier point que les indicateurs recommandés seront prioritairement des indicateurs hydrologiques, seuls porteurs de signification aux diverses échelles spatiales et aux divers termes temporels qu'exigent des diagnostics d'influence et des options de gestion.

Pour les échelles locales et à court terme, hydrologie et hydraulique sont heureusement assez fortement liées, ce qui permet de traduire localement les régimes hydrologiques en termes d'aléas hydrauliques, très parlants pour la société.

Réciproquement, il paraît possible d'analyser la contribution locale des actions à but hydraulique (aménagements touchant généralement la topographie, les rugosités des sols, leurs perméabilités, ou leur érodabilité) sur les régimes hydrologiques. Mais ceci n'est vrai que si la topographie locale est bien connue, suivie quand elle évolue, et ceci en tous lieux s'il faut intégrer des influences locales sur de larges espaces. Bien connaître cette topogra-

phie tout le long d'une rivière est une situation encore rare, et pourtant à généraliser si on veut aller vers une gestion intégrée des eaux, équitable entre tous les riverains et tous les usagers.

2.1 Un couple d'indicateurs de crues recommandé

En débits, un bon compromis est le débit instantané maximal décennal QIXA10*, si possible corrigé de l'effet d'échelle spatiale en l'exprimant en débits pseudo-spécifiques* Q/S_n (n étant de l'ordre de 0.8 et S la superficie du bassin versant). Ce débit instantané maximal décennal est encore représentatif des crues faibles et moyennes, déjà un peu représentatif des fortes et rares, et relativement accessible aux mesures et aux modélisations. Il a été fréquemment analysé, des compilations existent (cartes, méthodes régionales sommaires), ce qui permet assez rapidement de l'utiliser pour typer un régime local, et de le situer vis à vis de soupçons d'influences, ou vis à vis d'objectifs de modération qui se présenteraient.

Ce débit est à associer à une durée caractéristique de crue. On propose le paramètre dit D* de la méthode SOCOSE* (médiane conditionnelle, pour QIXA10, de la durée ds^* des crues observées à la moitié de leur débit de pointe) : inférieur souvent à la durée d'une crue (qui est de l'ordre de 2 à 3D, selon le seuil où l'on considère la rivière en crue), ce paramètre a l'avantage d'être mieux défini, et d'être déjà suffisamment analysé et régionalisé pour pouvoir jouer un rôle de référence.

On reproche souvent à ces descripteurs de manquer de sensibilité, et donc de pousser trop souvent aux conclusions de non influence humaine (pour les diagnostics) ou de non efficacité (pour les mesures de corrections/modérations). Cette critique semble viser non pas tant les paramètres eux-mêmes que leurs méthodes sommaires d'estimation (par exemple CRUPEDIX*, SOCOSE, abaques SOGREAH*, en rural, méthodes de type CAQUOT en urbain). L'estimation de ces paramètres à partir des seules caractéristiques physiographiques des bassins reste certes très approximative. Mais depuis l'émergence des méthodes sommaires dans les années 70 beaucoup de progrès ont été accomplis, tant en analyse (modèles pluie-débit) qu'en synthèse (modèles débits-durée-fréquences QdF et al.), ainsi qu'en observations (allongement des séries disponibles, extension internationale des bases de données...). On dispose donc aujourd'hui de méthodes améliorées, réduisant les incertitudes sur ces deux paramètres et permettant leur transfert régional vers à peu près n'importe quel bassin.

2.2 Autres indicateurs parfois nécessaires

Il est déconseillé de remplacer et d'ignorer les indicateurs précédents, compte tenu de leur représentativité générale.

Cependant ce couple de référence a les inconvénients du compromis cité : il n'est vraiment représentatif ni des crues très fréquentes ni des crues très rares. Si donc le diagnostic d'influence ou le test d'efficacité d'aménagement à effectuer concerne prioritairement l'un de ces deux domaines, il peut être préférable de compléter.

Pour les crues faibles, on prendra le débit instantané annuel* (sigle QIXA1*). Pour définir un tel paramètre annuel, il est obligatoire d'analyser les chroniques de débits par une méthode de type renouvellement (valeurs supérieures à un seuil), qui est maintenant bien connue. Pour le paramètre de durée, par contre, il ne semble pas opérant de chercher une caractéristique asservie un débit annuel, car les durées des crues faibles ont une variabilité intrinsèque très forte qui rend l'opération illusoire.

La connaissance directe des crues très fortes est gênée par les incertitudes hydrométriques. Les débits élevés observés sont rares et leur évaluation très incertaine : jaugeages difficiles, écoulements très turbulents. Ceci bruite toutes les modélisations, analytiques ou synthétiques, et donc la sensibilité de telles crues aux influences humaines est indiscernable.

Un débit centennial, par exemple, n'est ni observable ni dérivable valablement des séries de débits. Il est habituellement approché par des modèles pluies-débits $Q(P)$, qu'il s'agisse de modèles générant des chroniques ou de modèles de synthèse. L'asservissement de la simulation des débits rares à la connaissance que l'on a des pluies fait que de telles approches ne pourront rien apporter à la recherche d'influences humaines ou des effets à attendre d'actions modératrices (sauf via un changement climatique, hors de propos ici). Des recherches en cours cherchent à sortir de cette impasse.

2.3 Temps de réponse et temps de montée des crues

La rapidité avec laquelle un débit augmente fait partie des caractéristiques de l'aléa crue auxquels la société est sensible, pour l'alerte en temps de crise et donc pour la protection des populations présentes dans les zones à risques. Cet indicateur relativement sensible aux influences humaines a hélas une variabilité propre très forte, liée aux irrégularités de la distribution spatiale des pluies sur les bassins, qui se réalise de manière toujours différente et peu structurée en dehors des grands bassins. C'est donc un indicateur d'emploi délicat. Malgré des observations intéressantes faites çà et là, il est à ce jour difficile de le proposer comme pertinent.

Par exemple, pour la crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine, en septembre 1992, la distribution spatiale tout à fait particulière des pluies, centrées sur l'aval du bassin, a complètement gommé l'éventuel raccourcissement du temps de montée qu'aurait pu peut-être provoquer — simple hypothèse — le développement récent, en aval du bassin également, de parcelles de vignobles de coteaux à ruissellement rapide.

Une exception aux réserves précédentes : si l'influence humaine est principalement due à des modifications "hydrauliques" et en particulier à des modifications de la géométrie des lits (sections, rugosités, ouvrages, ...), elle peut être assez nette. Certains ouvrages de petits bassins urbains et périurbains, ou les aménagements réalisés sur les cours d'eau de la vallée d'Aoste, ont expressément pour visée d'augmenter les temps de montée. On peut alors valablement faire des estimations d'influences sur les temps de réponse ou de montée, contrôlables par modèles hydrauliques transitoires, associée à l'étude des indicateurs généraux (évolution de D , par exemple).

2.4 Un indicateur de synthèse global

Dans l'immense majorité des cas les influences humaines ont des effets variables selon les durées d prises en compte (du débit de pointe aux débits évalués sur une durée mensuelle) et la rareté des débits, évaluable par leur période moyenne de retour T (du débit dépassé plusieurs fois dans l'année au débit extrême). On observe également très souvent des effets rapidement compensés à l'intérieur même d'un régime. L'exemple type est celui du drainage agricole enterré à la parcelle, qui réduit les pointes de crues, augmente en corollaire la durée et les débits du corps de la crue, et réduit les débits d'étiages, le tout dépendant du type de la crue, de son importance, et de la surface drainée. On observe un effet semblable pour les retenues de laminage à restitution rapide du type bassins d'orages. Dans ces conditions, il peut être trop partiel de se polariser sur un seul couple (d, T).

Les modèles de synthèse dits QdF sont tout à fait adaptés à ces problèmes d'estimation d'influences différenciées selon d et T . Mais l'usage des QdF n'est à ce jour ni généralisé ni même toujours accepté. C'est pourquoi cet indicateur global n'est cité ici qu'en dernière position.

(voir un exemple d'étude des crues sur plusieurs durées dans l'encadré sur l'effet hydrologique d'un stockage local passif).

2.5 Indicateurs liés aux étiages

En toute rigueur et en conformité avec l'esprit de la gestion intégrée des eaux, dans une logique de bonne prise en compte de toutes les influences, directes ou indirectes, il ne faudrait pas conclure définitivement un diagnostic d'influence humaine sur les crues ou finaliser des décisions de gestion, sans prendre en compte les effets de ces décisions sur les étiages, sur la qualité des eaux, sur les milieux (biocénoses, mais aussi sédiments, etc...). Le sujet étant ici limité à l'influence humaine sur les crues, on ne les développera pas. Notons cependant que ce n'est pas hors de portée. Des travaux de comparaison entre régime des crues et régime des étiages (sur le bassin de la Loire, entre autres), montrent qu'ils ont des liens assez forts : crues et étiages ont en commun d'être liés aux stockages dans les bassins versants, lesquels laminent à court terme les écoulements rapides et soutiennent ultérieurement les étiages.

2.6 Indicateurs hydrauliques

Malgré leur forte variabilité locale, les indicateurs hydrauliques ont l'avantage d'une très bonne lisibilité sociale. L'enjeu est donc d'exploiter cette lisibilité, mais en évitant d'en tirer des conclusions généralisées à tort. L'exercice est difficile, les sophismes sont ici légion, presque aussi nombreux que ceux liés à la confusion entre aléas et vulnérabilités.

Le premier indicateur hydraulique proposé, à la limite entre hydrologie et hydraulique, est à ce jour le seul indicateur tout à la fois synthétique, représentatif des aléas hydrauliques induits par le régime hydrologique et exploitable tant en diagnostic qu'en aménagement : il

s'agit du débit de plein bord du lit mineur (QPB*). Exprimable en débit, il a intérêt à être au moins exprimé par sa période moyenne de retour (en le considérant comme débit instantané), ce qui permet le lien avec le régime hydrologique de la rivière. Il représente un bon complément aux indicateurs hydrologiques précédents. Par exemple si sa période de retour est élevée, plus rare que les valeurs d'équilibre habituelles qui seraient plutôt inférieures à l'unité (d'après les lois de la dynamique fluviale), il y a présomption d'un surdimensionnement lié à des influences humaines ; ceci peut influencer le régime des crues si ce surdimensionnement est généralisé sur une longueur significative du cours d'eau.

(Notons qu'il n'y a que présomption, car cette situation est aussi celle des cours d'eau très incisants ou endigués de longue date. Le cas incisant peut par exemple être consécutif à un blocage des sédiments en amont par un aménagement de type barrage ou des extractions de graviers, ou par des restitutions importantes de débits, toutes mesures susceptibles d'avoir des influences nettes sur les aléas hydrauliques, et significatives sur les régimes de crues).

En complément, on peut proposer la cote atteinte par les débits des indicateurs hydrologiques précédents (débit de pointe décennal, éventuellement aussi annual). Purement hydraulique, il n'échappe donc pas aux limitations indiquées en introduction : représentativité seulement locale et forte sensibilité à des modifications de détail de la topographie locale, laquelle n'a à elle seule guère de signification vis à vis du régime des crues.

2.7 Divers

On pourrait compléter cette liste à l'infini, et de manière encore significative. Par exemple la concentration, surtout en éléments solides, mais parfois aussi en éléments solubles, serait un indicateur exploitable. On a aussi vu proposer les vitesses.

Une mention spéciale peut être faite à un indicateur d'érosion des sols : la présence d'arrachements à toutes échelles (particules, rigoles de toutes tailles, jusqu'aux ravines) est un indicateur qualitatif mais pertinent du ruissellement, et l'évolution de cet indicateur dans le temps peut donner une appréciation qualitative d'une éventuelle tendance dans le régime des crues. A défaut d'observation de ces phénomènes (aménagements futurs), on peut exploiter un paramètre d'un modèle d'érosion des sols agricoles. Si la plupart des évaluations scientifiques ont démolé la capacité de tels modèles sommaires à donner des valeurs absolues valides pour les érosions, par contre ces mêmes évaluations ont souvent souligné leur capacité à apprécier des différences relatives, et donc des influences.

Au niveau global du présent rapport, on ne développera pas davantage ces pistes.

2.8 Conclusion

En conclusion de ce sous-chapitre sur les indicateurs hydrologiques de synthèse recommandés pour guider des diagnostics d'influences humaines sur les crues, ou des actions d'aménagements modérateurs des crues (compensations ou progrès nets), on recom-

mande de d'abord travailler avec le couple (QIXA10,D). Ceci assuré, on le complétera par d'autres indicateurs appropriés, inspirés ou non des recommandations complémentaires faites ci-dessus, choisis en fonction des besoins non satisfaits. On gardera en perspective la solution idéale de travailler avec un indicateur global de l'ensemble du régime de crues, seul capable d'afficher les nuances et compensations internes présentes. Si cette dernière perspective peut déjà être amorcée, on choisira un modèle de synthèse de type QdF ou équivalent.

3. Quelques agrégats, ou typologies, d'actions socio-économiques et d'aménagements, dont on sait présenter les effets connus sur les crues

La perspective choisie dans ce sous-chapitre est de présenter les connaissances de manière synthétique à fins de diagnostics. Elle n'exclut pas de se soucier des "effets probables à venir". Ceci conduira à ne pas seulement reprendre les catégories d'actions déjà présentées aux chapitres précédents, mais aussi à en imaginer des nouvelles possibles.

On examinera ici l'exploitabilité des indicateurs hydrologiques précités, de manière à suggérer des moyens de diagnostic.

On rappelle que l'objet de ce rapport est limité aux influences humaines sur les régimes des crues, c'est-à-dire aux seuls aspects aléas du risque hydrologique lié. On ne traite pas des vulnérabilités, et donc pas des risques d'inondations. En conséquence, dans les catégories d'actions citées ici, agrégées ou non, on ne parlera pas des évolutions d'occupation des sols susceptibles d'influencer la vulnérabilité aux aléas et donc d'influencer les dommages (dans un sens ou dans l'autre). Ces aspects procéderaient d'une analyse des influences humaines sur les risques d'inondations, et des dommages liés, analyse située en aval des propos de ce rapport.

3.1 Actions classiques : synthèse des effets connus

3.1.1 Modifications du couvert végétal

3.1.1.1 Forêt

L'effet de la forêt est globalement modérateur sur les crues, surtout les plus fréquentes, et les actions sur le taux de boisement se déclinent assez bien en termes de diagnostic, y compris avec les indicateurs synthétiques proposés ci-dessus. L'emploi d'un modèle de synthèse complet (QdF ou équivalent) permet en outre de préciser le "centre de gravité" des effets (en durée jusqu'à D, et jusqu'à quelques années pour la période de retour T), et les zones de disparition progressive des effets (au-delà de quelques D, et d'un T de l'ordre

de quelques dizaines d'années). On notera que l'indicateur complémentaire de débit solide permettrait de déceler des effets bien au-delà. Si le boisement s'étend jusqu'aux lits mineurs, un indicateur de niveau hydraulique peut utilement être considéré : probable rehaussement des niveaux d'eau par suite d'un probable développement des ripisylves* et phytocénoses* annexes (N.B. : bon exemple d'aléa hydraulique localement "aggravé" sensu stricto, mais d'une part modérateur sur l'hydrologie en aval, car contribuant au laminage des crues pour l'aval, et d'autre part non aggravant au sens des dégâts locaux, la forêt supportant bien, hors vitesses excessives, les eaux inondantes).

Il y a deux réserves importantes à la clarté relative de ce diagnostic et à celui d'aménagements qui exploiteraient le couvert forestier pour modérer les crues.

- on observe parfois, dans des cas spécifiques et extrêmes, un effet négatif sur la ressource en eau : surévaporation due à l'interception du houppier (si les pluies se présentent en période feuillue), surévapotranspiration en zone à longue saison sèche si la forêt peut alors puiser dans une nappe proche ; l'étalement des écoulements de crue, favorable aux ressources, fini par être concurrencé par ce prélèvement sur la ressource, parfois même jusqu'à un bilan globalement négatif pour la ressource (mais toujours globalement modérateur de crues ; rappelons par ailleurs l'effet bénéfique de la ripisylve sur la qualité de l'eau) ;

- le sol forestier est indissociable des effets hydrologiques de la forêt sur les crues : comme il peut mettre des décennies, voire des siècles, à se former, les effets d'une action de boisement (nouvelle) sur les crues sont limités à court et moyen terme; en corollaire une déforestation, si elle n'entraîne pas l'érosion du sol forestier (pas trop de pentes, circulation des engins organisée plus ou moins en courbes de niveau pour réduire le nombre de fossés sauvages drainants, etc.) n'entraîne pas immédiatement une aggravation significative des crues, surtout lorsque la végétation de remplacement s'installe rapidement et densément.

A cette problématique de la forêt, on peut assimiler une grande partie de tous les couverts végétaux denses et permanents. Le cas extrême de la prairie permanente est évidemment limité par l'extrême faiblesse de son "houppier" et par la possible minceur et imperméabilité de ses sols.

3.1.1.2 *Agriculture*

La difficulté de caractériser les effets de l'agriculture est liée à la diversité du couvert végétal qu'elle induit et à la mosaïque (souhaitée) de son parcellaire. En effet l'agriculture n'entraîne pas systématiquement un couvert végétal dense et permanent, et l'intégration de ses effets est encore inaccessible aux modèles analytiques : il existe bien sûr des procédures, mais très peu validées. La seule exception concerne les cas d'homogénéité et de relative uniformité (non souhaitée) des cultures sur de vastes espaces. On peut alors utiliser les critères habituels (QIXAT*, D, ...) si un bassin versant déjà significatif, et donc un écoulement individualisé, est concerné par une telle homogénéité de couverture végétale. Il sera toujours plus aisé d'effectuer analyses, diagnostics et propositions d'aménagement, à une échelle plus vaste (pratiques culturelles régionales). Pour les cas intermédiaires, le critère complémentaire d'érosion des sols peut être qualitativement exploité.

3.1.1.3 Résumé quant au couvert végétal

En résumé, un couvert végétal dense et permanent (en cultures annuelles : rotations sans pauses, avec cultures dérobées si nécessaire), et à défaut une mosaïque aussi diversifiée que possible (type bocage), ont des effets quasi indiscutables de modération du régime des crues, toutes choses égales d'ailleurs. Sous réserve de travailler à l'échelle de bassins à écoulements déjà mesurables (donc assez grands) et modélisables de manière valable, on peut exploiter les indicateurs hydrologiques de synthèse habituels, tant pour les diagnostics passés que pour ceux d'aménagements futurs.

3.1.2 Remembrements et travaux connexes

On ne considère ici que les aspects relatifs à la géométrie des parcelles, ainsi que les haies, talus et fossés, puisque les aspects strictement agricoles (cultures) ont été mentionnés ci-dessus pour la végétation, et le seront sommairement ci-dessous pour les techniques de travail des sols.

Le premier élément important est la modification de longueur des parcelles dans le sens de la pente, dont l'effet est relativement net, surtout en période de sol nu, qu'il soit tassé (ruissellement aggravé) ou trop travaillé (érosion aggravée, avec battance éventuelle).

Ensuite vont jouer les talus, prioritairement ceux barrant la pente. L'efficacité des talus susceptibles de retenir des eaux en leur amont (ruissellements, mais aussi écoulements subsuperficiels) va dépendre de leurs capacités brutes de stockage, de leur "tenue" à ces excès temporaire d'eau, de leur capacité à les disperser sans érosions locales, et enfin de leur contribution à la circulation des écoulements concentrés (réseau hydrographique naissant). C'est probablement ce dernier volet qui est le plus significatif et le premier, en aval des parcelles agricoles trop ruisselantes, réellement susceptible de compenser ou non les effets de l'intensification agricole amont (décelables au niveau des indicateurs hydrologiques recommandés). Pour que cet effet soit net, il faut pratiquement des haies épaisses, solides, à levées de terre (talus sensu stricto), très végétalisées, si possible bordées de bandes enherbées, et disposées non seulement plus ou moins en travers des pentes, mais encore organisées de manière à créer un réseau hydrographique intelligent : légère pente pour drainer (sinon : probabilité de mouilles permanentes, par ailleurs surfaces contributives potentielles aux écoulements directs), mais surtout contribution rallongée et ralentie de leurs eaux aux réseaux en aval. Pour cela, l'implantation dite en contre-pente topologique* est la plus recommandée : l'écoulement (qui suit la pente longitudinale de la haie/talus) est à diriger vers l'amont du talweg principal dominé par le versant, avec une pente minimale pour drainer les eaux "stockées" dans les quelques jours qui suivent l'événement pluvieux (voir ci-dessous).

« contre-pentes topologiques » et ralentissement dynamique

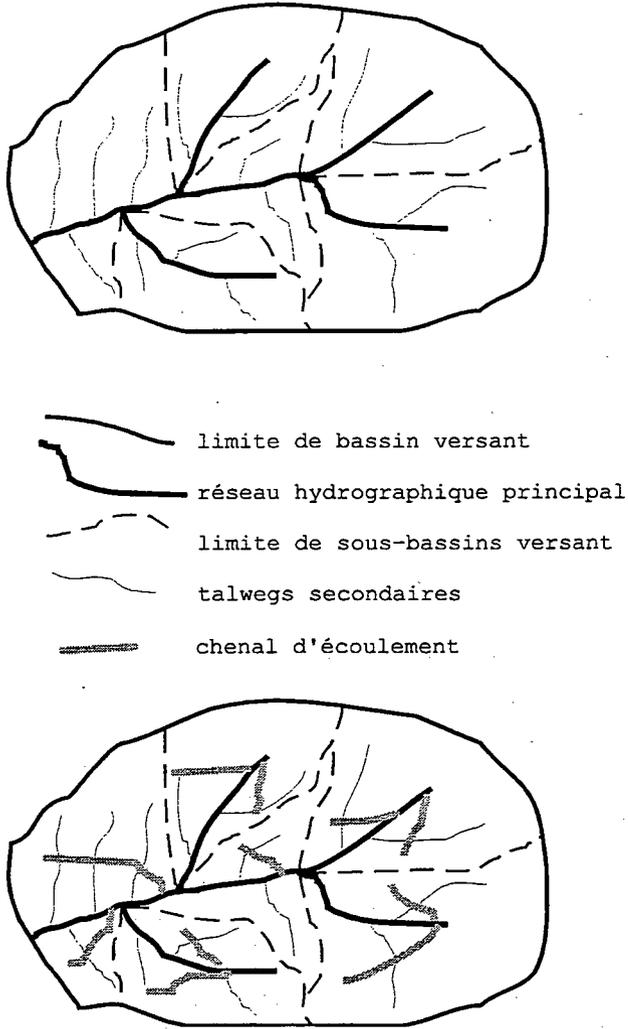


Figure 1 - contre-pentes topologiques et rallongement des trajets hydrauliques

En haut, dans un bassin versant non aménagé, les écoulements suivent les lignes de plus grande pente et se concentrent rapidement dans le réseau hydrographique principal.

En bas, on a aménagé dans les versants (pas dans les talwegs) des chenaux d'écoulement en contre-pente topologique. Les écoulements sont rallongés, et le transfert des eaux vers l'aval est ralenti, ce qui diminue d'autant les pointes de crue. En très hautes eaux, cependant, les chenaux débordent et les écoulements reprennent des lignes de plus grande pente, dont la localisation doit donc être prévue.

Les éventuels fossés créés ont une influence qui va dépendre de leur pente, de leurs longueurs et de leur capacité de débit à plein bord. Pour les deux premiers éléments, les effets sont à peu près les mêmes que pour les talus/haies cités ci-dessus. Pour le troisième, l'aggravation de crue par rapport à l'absence de fossé est nette si ce dimensionnement est élevé. Mais cet effet peut être plus ou moins neutralisé, voire devenir relativement modérateur, si des limiteurs de débits exploitent le surdimensionnement pour le stockage des eaux (voir le paragraphe sur drainage et assainissement agricole). Par ailleurs, s'il s'agit de fossés en travers de pente et à pente longitudinale faible, disposés selon le principe de la contre-pente topologique, alors l'accélération est seulement latérale, et la grande capacité est favorable au piégeage des eaux qui dégringoleraient des versants dominant le fossé "en travers". Cette disposition présente alors des aspects modérateurs (allongement du trajet). En général, en cas de disposition en talwegs ou en travers de versants, des fossés creusés le plus tard possible, de simples cunettes embroussaillées, voire même de simples bandes enherbées en pieds et têtes de talus/haies, et le tout conforme à la règle de la contre-pente topologique, auront une influence non aggravante sur les crues, voire seront déjà capables de modérer peu ou prou le régime des crues venant des versants amont.

Il faut rappeler que les versants de pente non négligeable ont par ailleurs des capacités de drainage naturel. Si celui-ci est fort, des talus/haies (versants amont petits), ou des fossés (versants amont plus importants) en travers seront donc capables de modérer ces drainages naturels élevés s'ils présentent eux-mêmes des rugosités (embroussailllements) et des allongements de parcours hydraulique (contre-pentes topologiques) significatifs et à la mesure des débits reçus.

Pour ces talus et haies qui jouent un rôle hydraulique, créant ou subissant des écoulements déjà concentrés, et bien sûr pour ces fossés amont, et surtout pour ceux plus ou moins "en travers" des pentes des versants sur lesquels ils sont implantés, il faut envisager ce qui s'y passe en cas de surverse. Quand leurs capacités sont dépassées, les effets peuvent alors être différents de ceux des fonctionnements "nominaux" :

- si leurs parements aval (au sens du versant, pas de leur légère pente longitudinale propre) comportent une végétalisation dense, embroussailllements inclus, ils résisteront longtemps à ces surverses et il n'y a guère de modification de leurs effets (voir ci-dessous pour les effets des surverses dans les pentes dominées en aval) ; s'ils s'érodent sous ces surverses, voire s'effondrent, alors leurs effets "nominaux" seront non seulement neutralisés, mais ils peuvent encore être localement considérés comme ayant aggravé les crues en leur aval (transversal) immédiat ;

- ces surverses (inévitables en crues très fortes, quoiqu'il advienne des structures transverses) vont naturellement suivre la ligne de plus grande pente du versant, plus ou moins perpendiculairement à la structure de tels talus, haies et fossés primaires (ou ce qui en tient lieu) qu'elles viennent de quitter, et se retrouver dans les micro-talwegs du versant ; à défaut, elles créeront des rigoles ou des ravines ; si ces passages ont été prédéterminés, voire protégés contre les érosions (herbes, broussailles, cunettes empierrées, ...), l'influence peut encore être un peu modératrice sur ces crues "débordantes" ; sinon les lois de la physique (parcours le plus rapide) n'induisent guère de modération naturelle ; on notera bien sûr que ces effets de surverse ont une probabilité d'autant plus rare de se produire que les capacités d'évacuations "latérales" des débits (haies/talus et fossés transverses) sont élevées : c'est le cas (rare ...) déjà cité où un certain surdimensionnement a des

effets relativement modérateurs. On notera qu'on diagnostique le même effet avec des structures subhorizontales fréquentes.

En résumé, comme pour la couverture végétale, on peut présenter les structures subhorizontales de versant, sous réserve qu'elles puissent stocker et freiner significativement les eaux descendant des versants, comme globalement modératrices des crues. Leur élimination est donc globalement aggravante. Toutes choses égales d'ailleurs, ce sont les structures en contre pente topologique qui contribuent le plus à la modération des crues, à cause de l'allongement du trajet hydraulique qu'elles induisent. Mais il faut compléter ce diagnostic en phases de fort excès d'eaux : même en versant, il existe des cheminements préférentiels des eaux ruisselantes, à savoir la plus grande pente et ses micro talwegs. Les influences humaines n'y sont alors plus régies que par la couverture végétale, ou la rugosité de ces cheminements. Les capacités d'évacuation en débit des structures latérales subhorizontales commandent la fréquence d'apparition de ces écoulements "débordants" ou de "surverse" en versants. A tout le moins, ces structures "en travers" compensent peu ou prou les éventuelles aggravations de crues induites par les modifications culturales et agricoles qui accompagnent les remembrements. Bien que les phénomènes liés à ces aménagements de remembrement et de travaux connexes soient relativement complexes, les indicateurs hydrologiques proposés pour caractériser les régimes de leurs écoulements aval sont tout à fait applicables. On ne peut toutefois guère en tirer beaucoup d'enseignements sur les processus élémentaires. Enfin, tout ceci n'est encore guère démontrable, ni d'ailleurs déterminant dans ses effets, si ces modifications ne sont pas généralisées sur des surfaces assez grandes en amont du secteur diagnostiqué.

3.1.3 Modification des pratiques culturales

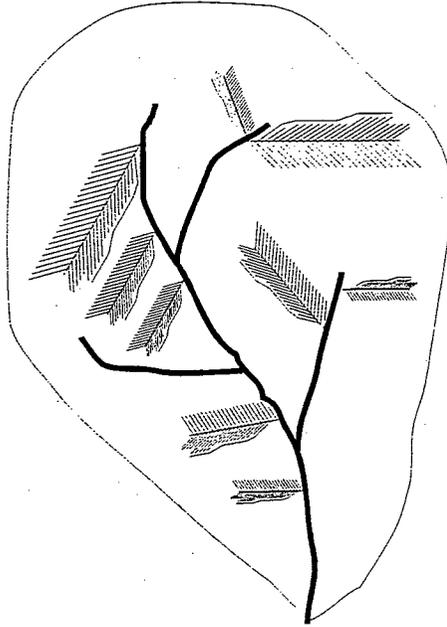
Outre la végétation, le remembrement vus ci-dessus, outre le drainage (plus loin), il convient d'étudier les techniques de travail du sol. Elles n'auront d'effet significatif à l'échelle des crues d'une rivière aval que si des pratiques homogènes sont appliquées sur de grandes surfaces, sur une partie significative du bassin versant, sans que des structures de freinage, comme celles citées en travaux connexes au remembrement, ne soient mises en oeuvre.

Cet agrégat d'actions n'est pas facile à présenter du point de vue de ses effets. Ceci résulte, d'une part, de l'extrême variabilité des effets avec l'intensité des pluies et des écoulements élémentaires ; d'autre part, des réactions fort différenciées, et parfois imprévisibles, des sols vis à vis des pluies incidentes et des ruissellements : battance et érosion. Ainsi un sol fortement mais grossièrement travaillé en pseudo-courbes de niveau — labours profonds, grosse mottes, sillons subhorizontaux en contre pente topologique — peut présenter des effets de modération dans la formation des écoulements élémentaires. Mais, surtout pour un sol restant nu, il suffira de continuer de le travailler — sarclage et hersage pour briser les mottes et affiner les agrégats, avant semis — pour qu'il se comporte de manière quasi opposée : battance, érodibilité, voire quasi liquéfaction et érosion massive, sous forte pluie. De même, si un sol peu travaillé (simple "griffage" avant nouveau semis) peut présenter une résistance à l'érosion intéressante et réduire la formation des rigoles, il aura tendance à trop ruisseler, ... sauf s'il a subi une forte sécheresse (cas fréquent après récolte, par exemple) car il peut alors être l'objet, s'il est assez argileux, d'une structuration par des fentes de retrait si nombreuses, larges et profondes, qui en fera un vrai gruyère !

En résumé, on préférera donc, sur ce volet du travail du sol, afficher une prudente neutralité générale. Les effets sur la qualité des eaux et sur l'érosion sont plus nets, mais hors sujet. Les critères hydrologiques de synthèse sont ici, entre autres pour des motifs d'échelle et d'objet, peu efficaces : l'écoulement issu d'une parcelle est encore assez dispersé et diversifié, et donc assez éloigné de l'aspect concentré et assez bien délimité de celui d'un exutoire de bassin versant.

3.1.4 Drainage souterrain et assainissement agricole

Les effets du drainage artificiel sont différents selon qu'il s'agit de drainage souterrain, au niveau parcellaire, ou d'assainissement agricole, au niveau du bassin versant (figure 2). Les effets du drainage seront également différents suivant que les réseaux sont installés sur les versants, où ils drainent pendant 2-3 mois hivernaux des nappes perchées temporaires, ou dans des zones basses (lits majeurs des cours d'eau, zones humides) où ils drainent des nappes permanentes ou quasi-permanentes



 drains et collecteurs enterrés

 fossés et talwegs

Figure 2 - drainage souterrain à la parcelle et assainissement agricole

Même si le drainage est souvent lié à d'autres aménagements, comme l'intensification des cultures, il faut distinguer ses effets propres, sous peine de confusion et d'inefficacité dans les mesures à prendre.

Drainage

Par suite d'une longue tradition technique de rigueur dans le dimensionnement des réseaux de drainage enterré, des méthodes objectives ont été développées pour viser aussi précisément que possible les seuls objectifs de lutte contre les excès d'eau, sans plus : généralement l'assainissement des terres agricoles pour des motifs agronomiques (éviter à court terme l'asphyxie des cultures), pédologiques (éviter les effets pervers d'une hydromorphie* trop marquée des sols) et de calendrier de travail des sols (circulation des engins agricoles sans entraves et sans risques de dégradation des sols). Cette position doit beaucoup au fait qu'elle était également la plus économique (on a vu poindre, dans les fastes années 60 et 70, des tendances au surdimensionnement). Ces réseaux de drainage souterrain constituent la grande majorité des drainages réalisés en France (80%). Ils ne fonctionnent que pendant une durée brève de 1 à 3 mois, au cours de l'hiver, en drainant des nappes perchées des horizons superficiels. Le drainage alimente surtout les débits moyens, réduit les surfaces participantes de surface et donc le ruissellement en durée et en extension, et plus généralement prolonge plutôt les trajets hydrauliques.

Il y a des exceptions : sols subhorizontaux où le ruissellement superficiel transite plutôt laborieusement alors que le drainage va raccourcir les trajets de ses écoulements ; sols à fortes capacités et perméables dont le stockage va être sous-employé même sous fortes pluies ; sols perméables infiltrants en profondeur, même sous fortes pluies, où le drainage va intercepter une partie de ces écoulements. Notons que ceci correspond à des situations où le drainage pouvait ne pas se justifier.

Les effets du drainage parfois présentés comme aggravants du point de vue de la qualité des eaux de surface ("crues" de pollution) concernent en fait les effets des fertilisations et des pratiques agronomiques sensu stricto.

Le drainage souterrain à la parcelle, tel quel, est plutôt modérateur, et d'autant plus qu'il concerne en principe des terres cultivées plutôt intensivement, donc à caractéristiques plutôt aggravantes pour les crues et les phénomènes associés (érosion etc.). Par une réduction à moyen terme des surfaces saturées et contributives aux écoulements superficiels, il modère en général tout ou partie des effets pervers des occupations intensives des sols vis à vis des crues.

Assainissement agricole

Les réseaux de fossé fonctionnent à peu près comme des lits de cours d'eau lorsqu'ils sont localisés dans un talweg. En d'autres termes, les processus et lois que suit un réseau hydrographique s'appliquent aux structures de drainages superficielles lorsqu'elles présentent des lits mineurs et majeurs, y compris dans le cas de talwegs bruts dont le fond véhicule naturellement les écoulements qui y arrivent, que ce fond soit naturel, cultivé ou revêtu (enherbé, embroussaillé, engravé, bétonné, etc.). On se référera donc au passage sur l'aménagement des rivières pour les diagnostics à faire sur ces réseaux hydrographiques amont.

Ce principe de base étant rappelé, l'ensemble du réseau hydrographique amont présente, par rapport aux aménagements de cours d'eau en général, deux particularités :

- généralement de petite taille, les structures amont d'assainissement agricole (naturelles ou non) peuvent faire l'objet de manipulations plus aisées que les grands lits des cours d'eau, et font effectivement l'objet d'un maximum d'intervention (entretien, travaux connexes). Plutôt génératrice d'effets aggravants (artificialisation quasi-systématique, bouleversements fréquents, entretiens exagérés, erreurs de "dosage" et entre autres de dimensionnement), cette caractéristique d'accessibilité peut aussi être exploitée pour générer des effets de modération : c'est sur ces réseaux amont qu'on peut le plus facilement développer les limiteurs de débits et capacités de stockage temporaire, car c'est économique et maîtrisable (les cultures riveraines peuvent le plus souvent supporter des submersions temporaires sans dommage).

- dans le cas particulier des fossés devant recueillir collecteurs enterrés, il y a un surdimensionnement structurel initial : leur fond doit se trouver en-dessous des collecteurs, soit souvent à plus d'un mètre de profondeur. Leur construction à la pelle mécanique leur donne une largeur qui peut être considérable, en particulier s'il faut des pentes modérées pour assurer la tenue des berges. Les capacités en débit de plein bord sont alors totalement hors normes, compte tenu des habituellement très modestes besoins de protection des terres riveraines, agricoles en principe : il n'est pas rare de rencontrer des fossés amont capables d'évacuer sans déborder une crue décennale* ! Les effets aggravants induits peuvent être forts si les surfaces concernées sont importantes.

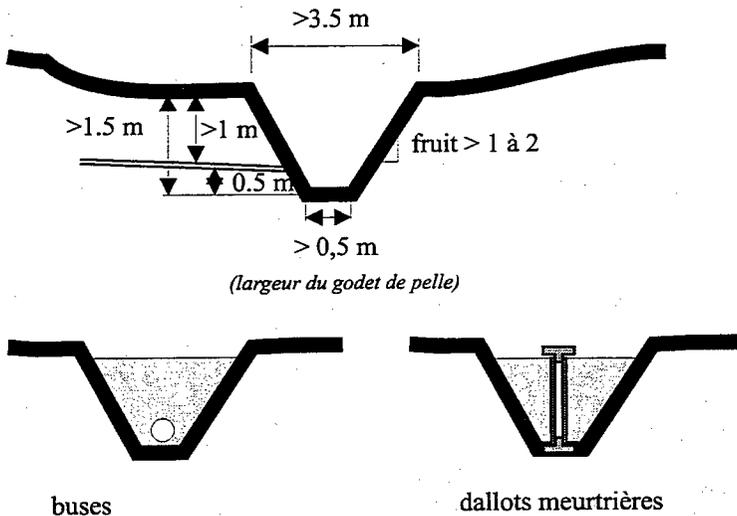


Figure 3 - surdimensionnement des fossés d'assainissement agricole, d'origine technologique, et limiteurs de débits permettant d'y faire face

- L'installation de limiteurs de débits (buses ou dalots meurtrières sous les passages de chemins, en particulier) modère efficacement cet effet, voire le neutralise (figure 3). De manière générale, les ouvrages d'assainissement agricole amont doivent être dimensionnés sur la base de crues fréquentes (débit journalier maximum annuel).

Toute autre est la situation des fossés d'assainissement agricole qui ne suivent pas les talwegs, réalisables en versant et plateaux. On se reportera pour cela aux structures en versant (haies et talus subhorizontaux, fossés dits topologiquement à contrepente) présentées avec les aménagements connexes aux remembrements.

Drainage de bas fonds, de zones humides et de lits majeurs

Ces zones ont une forte capacité de laminage qui peut être complètement bouleversé par le drainage. En particulier, les écoulements des versants peuvent emprunter les fossés d'assainissement et échapper au laminage. L'influence sur l'aval va dépendre de la proportion des zones humides amont drainées. Comme pour tout plan d'eau, l'énergie laminage se réduit fortement lorsque les niveaux de débordement sont atteints : on connaît des zones humides naturelles dont le régime des crues sortantes est quasi nul en événements fréquents et moyens, alors que pour des crues rares il rejoint des régimes à très forte production et à coefficient d'écoulement très élevé, par saturation généralisée des surfaces. Un drainage généralisé de ces zones peut également réduire leur contribution aux étiages, la plus grande partie des eaux stockées étant évacuées dès le printemps.

En résumé

Le drainage souterrain à la parcelle, correctement conçu, est plutôt modérateur des crues. L'assainissement agricole, aux effets d'échelles spatiales près, suit les processus d'influences des cours d'eau et ne doit pas être surdimensionné. Tout drainage des zones humides, bas fonds et lits majeurs met à mal leur capacité de laminage et aggrave les crues.

Les critères hydrologiques de diagnostic proposés sont ici opérationnels, car les d'écoulements sont parfaitement délimités et concentrés en des exutoires, et que ce soit en drainage souterrain ou en assainissement agricole.

3.1.5 Aménagement et entretien du réseau hydrographique

On préfère parler de réseau hydrographique plutôt que de cours d'eau, une bonne partie des processus mis en œuvre par l'influence humaine se situant en amont (fossés à écoulement temporaire et assimilés), ou en zones inondées très temporairement, donc en dehors des cours d'eau, au sens commun du milieu aquatique permanent d'un lit mineur.

Compte tenu...

- de la relative facilité avec laquelle les volumes d'eau présents dans un réseau hydrographique peuvent être manipulés,

- de ce que c'est le plus souvent autour des réseaux hydrographiques que se situent les enjeux à l'origine des problèmes d'inondations dommageables et donc la sensibilité au crues (unité de lieu entre aléas subis et vulnérabilités installées), et

- de ce que les volumes arrivés jusque là deviennent incontournables,

... ce sont ces aménagements du réseau hydrographique qui portent les actions humaines les plus significatives sur le régime des crues, aléas hydrauliques compris, et tant pour les aggravations que pour les modérations.

La quasi conservation du volume des eaux arrivées dans le réseau hydrographique, pour un bassin versant donné, conduit à pouvoir souvent réduire l'essentiel des influences hydrologiques à des déformations des hydrogrammes (fonction de transfert). Il reste bien entendu encore des infiltrations ou des drainages (fonction de production), mais ils sont généralement peu significatifs vis à vis des volumes de crues (il peut y avoir des exceptions en zones alluviales très perméables), même s'ils peuvent être essentiels pour la ressource en eau et ultérieurement les étiages.

Il y a bien sûr une croissance continue des volumes et débits vers l'aval, suivant une loi générale de débit pseudo-spécifique (croissance moins que proportionnelle à la surface du bassin), et ceci même s'il n'y a pas d'affluent localisé en raison des apports diffus des surfaces latérales. C'est le domaine le plus représentable par les indicateurs hydrologiques recommandés. En particulier, un modèle de synthèse (QdF ou équivalent) exprimé en débit-seuils* (débits continûment dépassés sur une durée d) peut représenter dans tous ses détails les éventuelles déformations d'hydrogrammes. Ces modèles paraissant majoritairement commandés par le couple de paramètres recommandé (QIXA10,D), on voit l'intérêt de ce dernier.

Les déformations d'hydrogrammes vont pour l'essentiel dépendre de l'évolution du stockage des eaux dans les lits parcourus. Elles résulteront

- de l'équation de continuité* pour ce qui est des stockages non dynamiques (réservoirs, de toutes natures, à eaux de vitesse quasi-nulles : donc essentiellement les lits majeurs, plus les réservoirs importants situés sur les lits mineurs) ;

- de l'équation de diffusion (qui inclut la précédente) pour ce qui est des eaux coulant à vitesses encore significatives (lits mineurs, et lits moyens).

Ces stockages, statiques ou dynamiques, sont liés à des ralentissements (drastiques ou seulement relatifs et partiels). Il y a essentiellement deux manières de ralentir des eaux dans un réseau hydrographique :

- jouer sur la pente motrice (ligne dite d'énergie) : on ralentit en dérivant les eaux vers des lits à pentes plus faibles ; à pentes de lits données, on diminue la pente motrice par des effets de remous aval : barrages et seuils ou étranglements de toutes natures et de toutes tailles...

- jouer sur la rugosité des lits parcourus : on ralentit en augmentant les pertes de charges linéaires : matériaux des fonds et berges ; végétations de tous niveaux, des macrophytes*

de fond de lit mineur aux forêts alluviales de lits majeurs ; obstacles divers, et en particulier bois morts et sédiments.

De tels moyens de ralentissement ne sont toutefois efficaces que si l'élévation de niveau trouve à se "dissiper" dans un lit supplémentaire, généralement dans une partie élargie de la section d'écoulement, ou dans une dérivation ou un "casier" qui se met alors en eau (sinon l'élévation de niveau d'eau liée à une tentative de ralentissement va tout simplement régénérer de la pente motrice supplémentaire, ou réduire l'effet de la rugosité par amélioration du rayon hydraulique. Le ralentissement final sera donc faible et d'autant plus décevant qu'il est accompagné d'une aggravation de l'aléa hydraulique de cote, souvent gênant).

La conséquence principale de tous ces processus est, dans le cas du ralentissement, une réduction des débits les plus élevés d'un hydrogramme (pointe et au-dessous), contrebalancée par une plus longue durée de débits inférieurs, lorsque de la vidange des stockages temporaires mobilisés par le ralentissement : il y a donc un aplatissement de l'hydrogramme (voir figure 4). Le seuil entre "réduction" et "augmentation" des débits et durées est variable avec la nature des stockages supplémentaires mobilisés, mais le plus souvent encore présent dans la phase intense de l'hydrogramme : par exemple, "aggravation" du régime en décrue au-dessous du tiers ou de la moitié de la pointe. Des effets à moyen terme (fin de récession et queue de crue), voire à long terme (débits moyens, puis étiages post-crués laminés, renforcés), existent, mais ils ne sont pas de règle.

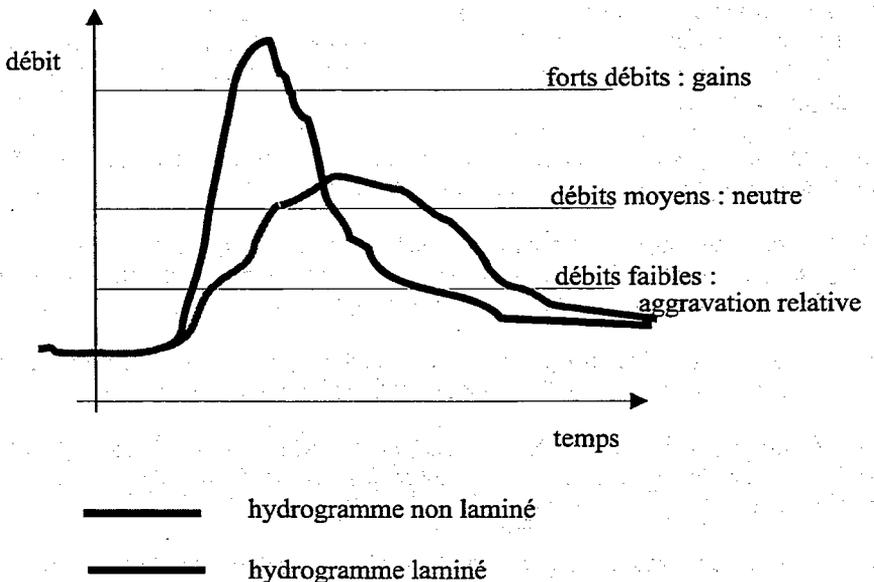
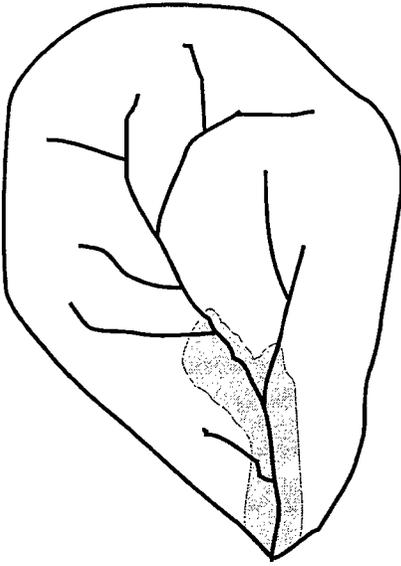
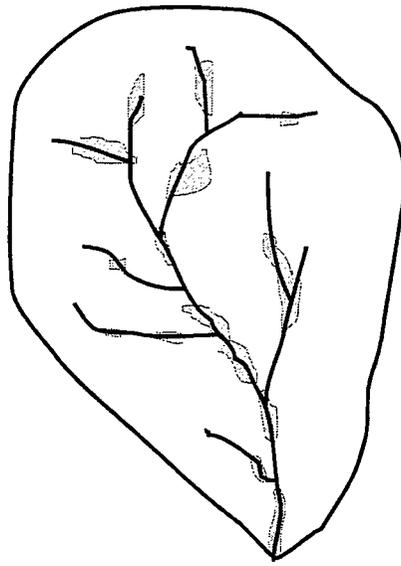


Figure 4 - effet temporel, en un point donné, du laminage hydrologique



avant laminages amont



après laminages amont

Figure 5 - effet spatial, à un instant donné, du laminage hydrologique

Pour la faisabilité physique de telles influences modératrices, on peut avancer une règle principale et une règle annexe, en tirant les leçons des processus rapidement esquissés ci-dessus :

- un réseau hydrographique ne lamine efficacement que s'il dispose d'espaces supplémentaires aux emprises des seuls lits mineurs facilement mobilisables pour qu'y passent des écoulements transitoirement (transitoirement, c'est-à-dire qu'il ne s'agira pas a priori de surfaces à statut de zones humide ou aquatique). La notion de champ d'expansion des crues correspond parfaitement à de tels espaces supplémentaires ;

- éventuellement, mais seulement secondairement, le supplément d'espace peut être obtenu en cote. Il faut alors des suppléments de cote importants (lits mineurs surdimensionnés, cuvettes, barrages, limiteurs de débit, seuils énergiques, pertuis étroits). Il est important de noter que de telles capacités "verticales" d'accueil sont rarement disponibles, et qu'un tel ralentissement "vertical" perturbe de façon importante les dynamiques des lits mineurs, engendrant de nombreux effets pervers sur ces dynamiques et sur les milieux aquatiques, sans compter la création d'un risque pour l'aval en cas d'effacement de ces ouvrages bloqueurs des eaux.

Malgré la relative clarté des processus concernés ici, les aménagements modérateurs concernés ici sont encore peu fréquents, à l'exception des grands barrages écrêteurs* de crue. On observera beaucoup plus fréquemment des situations inverses : réduction de l'espace disponible aux eaux, abaissement des lignes d'eau, accélération des écoulements, surnettoyage voire recalibrage fréquents.

On sait que l'explication de cette situation se trouve dans les aspects fonciers : les processus de modération envisagés exploitent des emprises foncières, même si c'est seulement quelques rares heures par an ou par décennies.

A l'inverse, les processus d'accélération diminuent localement l'emprise de l'eau, qui est reportée sur l'aval. Or ils aboutissent le plus souvent à un surdimensionnement mené jusqu'à un milieu aquatique relativement très grand, éventuellement la mer. C'est la ressource en eaux qui généralement en pâtit (sécheresses estivales).

Les outils techniques et scientifiques adéquats ici sont les modèles hydrauliques pour tous les cas de figure. Ils sont même quasiment indispensables pour les diagnostics de laminages dynamiques. Les modèles hydrologiques de synthèse sont actuellement opérationnels et suffisants pour les laminages statiques, mais pas encore pour les dynamiques. La mise en oeuvre des modèles hydrauliques est freinée par la nécessité de disposer, comme déjà mentionné en introduction, d'une topographie suffisamment représentative des lits et zones concernées. Ceci est parfois évalué comme trop coûteux lorsque le coût d'acquisition est amorti à tort sur la seule analyse de diagnostic des effets des aménagements sur les débits (il devrait aussi être amorti sur les travaux et aménagements à venir).

En résumé, c'est donc dans le réseau hydrographique, défini le plus largement possible (tous les types de lits et talwegs), que se joue l'influence humaine sur les crues, à la fois la plus significative, mais aussi une des plus modifiables, dans les deux sens, modération ou aggravation. C'est évidemment ici le meilleur domaine d'emploi des critères hydrologiques recommandés pour le suivi de ces influences. C'est aussi le domaine où les critères hydrauliques sont les plus parlants et les plus exploitables, de par les liens assez stables qui y existent entre hydrologie et hydraulique, et aussi de par l'aptitude des modèles hydrauliques à modéliser ces écoulements bien concentrés.

3.1.6 Constructions, urbanisations et imperméabilisations sévères

On a vu ci-dessus qu'il n'y a pas que béton, toits et asphalte qui imperméabilisent les sols. En outre, les opérations d'urbanisation sont de plus en plus associées à la mise en place de bassins de laminage (au moins pour les averses intenses de très courtes durées : les "orages"), et certaines surfaces urbanisées commencent même à être structurellement "perméabilisées" : chaussées poreuses, revêtements poreux et non jointifs, etc. Néanmoins, les effets de réduction drastique des capacités de stockage des parcelles urbanisées sont encore la règle, au moins pour les très nombreuses parcelles urbanisées avant ces récentes années, ainsi que pour les développements plus ou moins "sauvages" comme ceux de beaucoup de zones péri-urbaines de type pavillonnaire.

S'il n'est guère utile de s'étendre ici sur l'aggravation drastique des volumes d'écoulements en zone imperméabilisée, il faut aussi mentionner des facteurs qui en limitent les effets :

- les secteurs "perméabilisés", efficaces bien qu'encore minoritaires ;
- la faible structuration des lits majeurs : rarement délimités, plus souvent fortement maillés (réseaux de rues et voies), et presque toujours fort rugueux (obstacles en tous genres) ;

même si leurs écoulements peuvent être parfois rapides et spectaculaires (rues en pente), ils sont rarement plus rapides qu'en zone rurale dégagée ; ils sont évidemment localement plus dommageables en raison de leur vulnérabilité propre, mais ne sont guère aggravants quant à la formation de l'aléa ;

- vers l'aval, ces aggravations peuvent s'effacer rapidement, la proportion de zone imperméabilisée devenant rapidement négligeable quand un bassin versant croît vers l'aval, sauf dans le cas d'effets cumulatifs dus à une urbanisation constante.

Le principal inconvénient rémanent concerne la qualité des eaux de ruissellement urbain, tout à fait exécrable en crue, même si des efforts de lavages des zones imperméabilisées (chaussées) sont régulièrement faits. A noter un effet local rémanent induit sur le régime quantitatif des eaux : la réduction drastique de l'alimentation des nappes. Peut-être souhaitable du point de vue de la qualité des eaux des sols et souterraines, cette réalité est néanmoins perturbatrice pour l'équilibre hydrodynamique et pour la végétation résiduelle, y compris pour les zones adjacentes aux zones urbaines.

En résumé, si les effets locaux de l'imperméabilisation sont spectaculaires sur la fonction de rendement, ils le sont moins sur la fonction de transfert surtout lorsque se développent les bassins dits d'orages. Ces effets peuvent éventuellement se réduire assez rapidement vers l'aval en cas de sortie de la zone urbaine, sauf quant à la qualité des eaux et quant à l'état des sols et des nappes. Les indicateurs hydrologiques et hydrauliques sont très utiles pour estimer ces effets, et surtout les hydrauliques vis à vis des fortes variations des stockages (quasi éliminés, ou artificiellement redéveloppés). Mais on manque de références hydrologiques préalables à l'urbanisation ou à une évolution de celle-ci. Des méthodes sommaires de bonne qualité (méthodes dérivées de Caquot et CIA), ou des modèles événementiels pluie-débit existent et sont opérationnels. On n'a par contre pas encore de bons éléments de synthèse des régimes urbains, ni surtout des régimes péri-urbains ou partiellement urbains, souvent rapidement évolutifs. En d'autres termes, il n'y a encore guère de modèles de synthèse (de type QdF ou autres) bien validés en urbain, même s'il en existe pour d'autres types de bassins très ruisselants (certains torrents alpins, certains vignobles de coteaux).

Provisoirement, il faudra continuer d'utiliser ici les critères recommandés à partir d'éléments tirés non des régimes mais des seules "crues de projets", méthodes sommaires incluses, et des différences obtenues en imperméabilisant (ou en "perméabilisant") leurs paramètres physiographique et de réseau hydrographique.

Ce long rappel clôt la description synthétique et globale des effets connus provoqués par les agrégats d'actions traditionnels, et traditionnellement utilisés dans l'analyse des impacts humains sur le régime des crues. On aborde à présent, avant de proposer de nouveaux agrégats d'actions définis cette fois selon leur fonctionnalité future en gestion intégrée des eaux, quelques éléments mal connus, mal interprétés, ou susceptibles de mieux éclairer l'interface société/crues.

3.2 Actions, processus et autres réalités, d'effets ignorés ou mal connus

Ce paragraphe rassemble, en les détaillant quelque peu, diverses remarques relatives à des aspects ignorés, mal connus, mal interprétés ou encore inexploités de cette problématique des influences humaines sur les crues.

3.2.1 Perception de la signification spatio-temporelle d'une crue locale

Quand l'occurrence d'une crue, en un lieu et en un moment donnés, réveille la prise de conscience de la réalité de ce phénomène, souvent après une torpeur plus ou moins prolongée, on assiste à de nombreuses interprétations plus ou moins erronées.

Hasard et irrégularités de la réalisation historique locale d'un régime donné

Il est normal que la réalisation historique réelle d'un régime se fasse de manière apparemment hasardeuse à court terme et localement. Même avec un régime parfaitement connu, et sans aucune erreur ou lacune, les quantiles* $QC(T)$ des diverses caractéristiques de crues ne se réaliseraient qu'à moyen terme. Par exemple une crue décennale a une probabilité non négligeable d'être dépassée à court terme plus souvent ou moins souvent qu'une fois tous les 10 ans. Même sur un siècle, la probabilité que le nombre de ses réalisations réelles soit encore différent de la dizaine, est loin d'être négligeable. Cette irrégularité locale décroît avec la taille du secteur analysé et, à l'échelle d'une région ou d'un pays, les réalisations locales convergent beaucoup plus vite vers les nombres moyens déduits des régimes.

De ceci résulte une règle fondamentale : si un individu lié à un lieu précis (sa propriété) peut éventuellement ne pas toujours tirer un profit net de la connaissance des régimes hydrologiques que sa propriété subit (s'il a la malchance de vivre des réalisations historiques à court et moyen terme qui s'écartent par hasard du régime moyen), n individus par contre, c'est à dire la société, tirent bien profit de cette connaissance, et d'autant plus que n devient grand (un département, une région, un pays, ...). Il en résulte que les autorités collectives (de la commune au pays) doivent absolument défendre cette position, et ne pas se rabattre, comme elles le font encore trop souvent, sur un simple "respect" des crues historiques passées.

Un corollaire de cette distinction entre réalisations à moyen terme et régimes, est que les irrégularités normales sont souvent beaucoup plus importantes que les dérives en probabilités liées à des modifications des régimes. Ceci ne conduit pas à pouvoir négliger ces dernières, et la même remarque que ci-dessus peut se faire à l'échelle régionale : des influences locales négligées y apparaissent plus vite que localement et deviennent rapidement structurantes à l'échelle d'une collectivité.

Déterminisme régional de l'épicentrage*

Un corollaire de ce qui précède concerne ce qu'on appelle l'épicentrage. Par suite de l'indépendance spatiale partielle entre les événements hydrologiques, un événement don-

né, rare du point de vue du jugement que l'on peut porter localement sur lui, survient avec une probabilité notablement plus forte quelque part dans un territoire de gestion de grande étendue. Un débit de crue localement perçu comme centennal pourra, en moyenne, se produire tous les 10 ans, voire tous les ans, çà et là dans un territoire suffisamment grand. Ce phénomène est très intéressant pour les hydrologues : en l'interprétant selon la propriété dite d'ergodicité* (une certaine équivalence entre temps et espace dans la quête d'un volume d'information donné), on a là le moyen d'observer (avec des limites et des réserves de représentativité) assez fréquemment, à l'échelle régionale, des phénomènes localement rarissimes. Ainsi interprété, malgré les hypothèses audacieuses qui sous-tendent l'ergodicité, l'épicentrage rend service. Mais si l'on confond les variables à localisations fixées (les crues perçues localement) et les variables non localisées (une crue quelque part dans le territoire de gestion), on commet une erreur qui peut être très importante.

En résumé, dans l'analyse d'une caractéristique de crue observée ou prévue, il faut d'abord bien distinguer les échelles d'espace (section en travers d'un cours d'eau, réseau hydrographique proche et d'ensemble, bassin versant proche et global, aire d'analyse). Il faut ensuite considérer l'échelle de temps, d'une part suite aux liens entre temps et espace (en principe via les durées d) et, d'autre part et surtout, pour replacer les estimations des probabilités dans leur contexte : on ne conclut pas à une influence, ou à une erreur, parce qu'une décennale ne se produit pas sagement tous les dix ans, ou parce qu'une millennale locale se produit quelque part en France en moyenne tous les ans.

3.2.2 Embâcles et débâcles : mythes et réalités

Les débâcles d'embâcles émeuvent régulièrement foules et décideurs de par leur caractère spectaculaire, et provoquent des décisions d'entretien et d'aménagement le plus souvent injustifiées, voire allant à l'encontre du but recherché de modérer les crues.

La plupart du temps, ces phénomènes se produisent sur les petits cours d'eau, pour lesquels les débris flottants sont grands par rapport aux tailles modestes des lits et des ouvrages. Ils sont plus rares en grands cours d'eau, où seuls des ouvrages barrants fortement les lits (ponts à arches multiples, barrages à pertuis étroits, ...) peuvent provoquer des embâcles. Si vis à vis des crues faibles on peut imaginer réduire les risques d'embâcles en nettoyant drastiquement les lits amont (mineurs, berges, majeurs, versants raides, etc.), ce n'est plus concevable en crues fortes, sauf à transformer en désert le bassin versant — ce qui ferait d'ailleurs naître d'autres dépôts, sédimentaires cette fois. La lutte contre les embâcles est donc quelque peu vaine, limitée aux crues relativement modestes, et presque toujours perverse pour ce qui est des nettoyages amont : la désertification des parcours hydrauliques entraîne une accélération des crues amont avec un très fort développement de l'érosion si la dévégétalisation touche les sols.

En pratique, il vaut donc beaucoup mieux prendre son parti des embâcles, et chercher à en connaître les influences, le plus souvent modératrices. En matière d'aménagements, le but ne sera pas d'éliminer les embâcles, mais de chercher à en maîtriser la localisation par des pièges à objets flottants et à sédiments, de place en place le long des biefs, et surtout aux endroits ad hoc (voir plus loin).

A ces réalités matérielles s'ajoutent des réalités hydrauliques. Par définition, une débâcle est précédée d'une embâcle, laquelle stocke de l'eau derrière elle et donc lamaine la crue. Il y a donc, au moins au cours de l'embâcle, modération de l'aléa hydrologique (de débit) en aval, au détriment de l'aléa hydraulique (de cote) en amont. Selon que la vulnérabilité des terrains inondables concernés est plus forte en aval ou en amont, l'embâcle est localement bénéfique ou non (elle est toujours bénéfique à neutre plus en aval). En pratique, on a là une clé de diagnostic des embâcles "utiles" : celles situées en amont de zones plus vulnérables, ou en aval de zones moins vulnérables.

Les débâcles d'embâcles ne sont en effet pas systématiques, loin de là : la majorité des embâcles tiennent pendant toute la crue. Cette réalité est souvent ignorée, malgré ses effets modérateurs, car seules les débâcles sont spectaculaires et attirent l'attention. Les embâcles de toutes tailles sont en fait innombrables sur quasiment tous les cours d'eau et tout le temps, à chaque crue un peu mobilisatrice d'éléments flottants et de sédiments en réserve, et passent le plus souvent totalement inaperçues. S'il y a tout de même débâcle en cours de crue, l'aléa hydrologique (débit) va subitement croître vers l'aval. Cela peut être spectaculaire, mais il est aisé de démontrer que l'accélération de la crue post-débâcle dépasse rarement l'hydrogramme "naturel" qui aurait passé en aval si l'embâcle n'avait pas eu lieu. Le risque marginal induit vient éventuellement du fait que l'embâcle rend, dans un premier temps, un service de modération aval sur lequel on compte, consciemment ou non. Le fait que cette modération ne tienne pas dans le temps, et que la crue retrouve soudain sa force initiale, peut surprendre une vigilance relâchée.

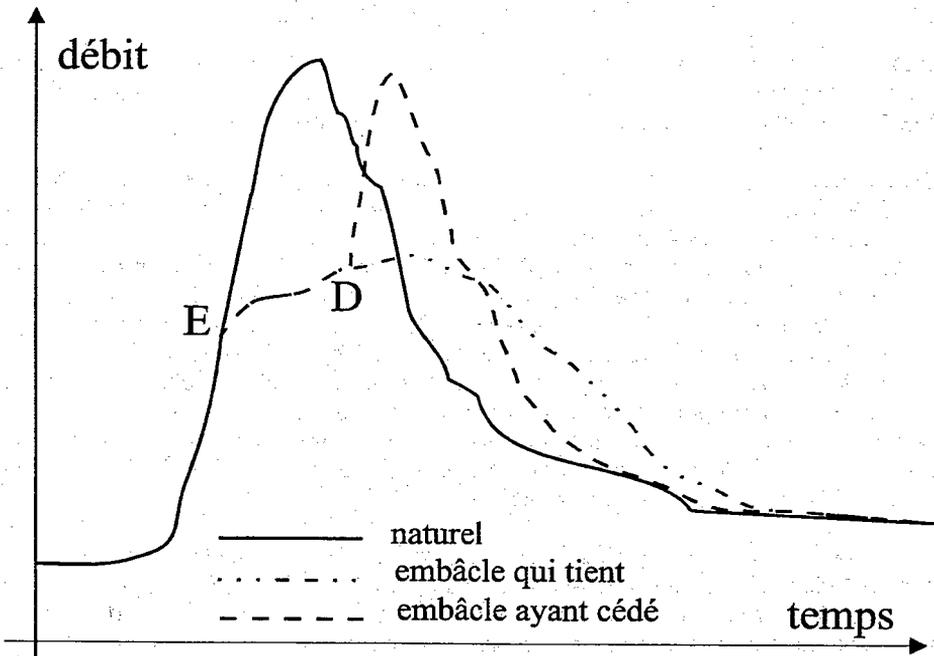


Figure 6 - effet d'une embâcle, selon qu'elle se maintient ou qu'elle cède

En pratique d'aménagement, il est difficile de bâtir une politique de modération des crues sur ces embâcles plus ou moins sauvages et peu fiables dans la durée. Mais il faut en tenir compte dans les diagnostics faits en matière d'influences humaines, surtout pour l'estimation des effets de nettoyages anti-embâcles : le diagnostic est le plus souvent sévère... pour les nettoyages ! Maintes fois, des riverains se sont plaint d'une aggravation subite des régimes de crues suite à des travaux de nettoyages décidés pour réduire les risques d'embâcles ! Il faut savoir par exemple que, dans d'innombrables petits cours d'eau ruraux (la majorité du réseau hydrographique du territoire national), il y a des embâcles tous les quelques hectomètres, à chaque passage inférieur. En outre, en zone d'élevage, les clôtures y sont également implantées, pour éviter que les bêtes n'empruntent le passage hydraulique, ce qui est une véritable mesure de localisation des embâcles, efficace quoique non intentionnelle. Ces embâcles stockent en leur amont de petits volumes d'eau dont la somme peut faire des volumes considérables, d'un effet modérateur certain sur les crues au moins faibles à moyennes. L'aggravation amont de l'aléa hydraulique passe le plus souvent inaperçue par suite de la faible vulnérabilité, et de ce que ce volume disparaît ensuite rapidement. Par ailleurs, les sols peuvent déjà être saturés par la pluie, et les eaux inondantes n'y ajoutent pas donc grand chose, sauf en sédiments et dépôts.

Enfin, il faut noter que l'aggravation de la cote en amont d'une embâcle se fait à vitesses de l'eau modérées (eaux inondantes moins dangereuses). Il n'y aurait en effet guère d'embâcle si le remous dû au bouchon ne se propageait pas vers l'amont, et s'il se propage, c'est que les vitesses sont fortement ralenties. Un corollaire de cette situation est que les embâcles en cours d'eau à forte pente n'augmentent guère la dangerosité naturelle d'un tel cours d'eau : faute de remous suffisant, le volume stocké transitoirement en amont, et donc l'énergie potentielle suspendue et qui pourrait déferler lors de l'éventuelle débâcle, sont fort peu différents des conditions sans débâcles.

En résumé, il n'y a pas d'autres solutions pour progresser, dans l'objectivité du diagnostic vis à vis des embâcles, que de réviser drastiquement la vision qu'on a de ces phénomènes et la culture actuelle. Dans l'immense majorité des cas, et même en tenant compte des échecs relatifs des débâcles, les embâcles sont, sauf en leur amont immédiat, un puissant facteur global de modération des aléas hydrauliques dus aux crues.

3.2.3 Entretien, nettoyages et recalibrages bruts et "réflexes", dans les phases post-crues

On comprendra, à la lecture des paragraphes précédents, que les réflexes de curage immédiat qui suivent les crues ne résolvent pas grand chose : dans l'immédiat on obtient une modération locale des aléas hydrauliques mais une aggravation du régime des crues à l'aval. A terme plus ou moins proche, les équilibres hydrogéomorphologiques se rétablissent.

En résumé, il est important de tenir compte de ces actions perverses d'urgence, dans tous les diagnostics d'influence, soit pour en tenir compte dans l'analyse d'une situation donnée, soit pour les prévoir et tenter de les limiter.

3.2.4 Les petits effets font les grandes perturbations

De tous temps, et encore dans la phase récente sous contrôle des lois sur les impacts, on a observé la réalité suivante : d'innombrables travaux hydrauliques en rivières font l'objet d'analyses d'impacts individualisés qui concluent, souvent à juste titre, à des effets négligeables sur le régime des eaux, tant des points de vue hydrologiques, hydrauliques, sédimentaires, etc. Et pourtant la situation se dégrade pour le régime des crues, à cause des cumuls. Le cas le plus flagrant est celui des modifications des cotes de l'eau, ou le cumul de quelques rares centimètres finit pas provoquer des évolutions significatives des aléas hydrauliques, lesquels finissent pas faire évoluer les régimes hydrologiques (par modifications des conditions de laminage).

En résumé, on ne se limitera pas, dans un diagnostic d'influence, à cumuler des impacts faibles ou nuls ("impacts zéro"), mais on reprendra une analyse comparant la situation actuelle à une référence aussi éloignée dans le temps que possible.

3.2.5 Climats : irrégularités, changements et conséquences hydrologiques sur les crues

Si le climat en lui-même est quasiment indépendant des influences humaines sur les écoulements, ses éventuelles tendances peuvent avoir des origines humaines (effets de serre), en dehors de l'objet de ce rapport.

Il faut néanmoins faire un lien entre la réalité de ces éventuelles tendances (par exemple l'éventuelle tropicalisation du régime des fortes pluies), et les irrégularités de réalisation des régimes mentionnés plus haut. Quelles que soient l'importance et les enjeux des risques de dérives climatiques, y compris dans les options les plus pessimistes (dérives fortes déjà en cours), ces tendances climatiques ne réduisent en rien la pertinence des analyses d'influences humaines sur les écoulements ou des aménagements modérateurs des crues. Elles ne les modifient pas non plus significativement dans leurs quantifications, dans les choix structuraux qu'elles peuvent induire, etc. En effet, à l'échelle de la gestion des crues et des aménagements, disons à court et moyen terme, jusqu'à quelques dizaines d'années d'échéance, les réalités des régimes et leurs irrégularités de réalisations historiques priment sur des tendances climatiques. En d'autres termes, les éventuelles dérives climatiques ne permettent pas d'ignorer le régime actuel des crues, ni d'exagérer ou d'édulcorer des effets humains directs sur ces crues.

En résumé, les champs d'action et les termes des influences climatiques et des influences humaines sur les crues sont différents, sinon quasi-indépendants : à court et moyen terme, le problème climatique ne perturbe en rien les problèmes d'influences humaines directes sur les écoulements et sur les régimes de crues. La réalité d'une influence de dérive climatique ne saurait démobiliser des actions de diagnostics, mesures et aménagements à entreprendre vis à vis des crues et de leurs régimes actuels.

Ceci n'implique nullement une quelconque démobilisation vis à vis de ces problèmes d'influences humaines sur les climats. C'est à l'évidence un problème très sérieux (y compris pour les crues), à aborder avec d'autant plus de détermination que les mesures de correction envisageables sont difficiles et touchent des comportements à grande inertie.

Développer des concepts et outils de gestion intégrée adaptés aux régimes hydrologiques qui prévalent à ce jour est cependant probablement le meilleur moyen de savoir appréhender en temps opportun une variabilité légèrement modifiée par changement climatique.

3.2.6 Médias, informations, formation et culture des riverains et usagers

Ce point de liaison entre les réalités des crues et les informations diffusées à leur sujet, en particulier par les médias, a déjà été abordé çà et là ci-dessus. Si on ne peut reprocher aux médias de fournir des informations immédiates sur les événements, même si elles subissent le biais habituel introduit par la tendance à privilégier le spectaculaire et l'explication simpliste, il y a plus profondément une insuffisance généralisée de culture et de formation.

Beaucoup de journalistes ont fait récemment de gros efforts de formation aux réalités des crues et des influences humaines qu'elles subissent ou non, mais la culture des riverains et des décideurs laisse encore trop à désirer vis à vis des réalités des crues et de leurs aménagements. Un minimum de culture commune sur les réalités des crues semble indispensable si l'on veut que les textes et règles de la gestion des crues, généralement utiles voire assez bien faits, soient utilisés, bien interprétés, et surtout respectés dans le temps.

En résumé, l'effort pédagogique et culturel doit porter sur toutes les filières de formation. Il pourrait même être suggéré de développer cette culture dans le monde littéraire, à l'exemple de la ville de Gênes qui a encouragé l'écriture d'un essai destiné à susciter, chez le lecteur, la prise de conscience de l'existence généralisée des lits majeurs, même en ville.

3.3 En conclusion

Les éléments proposés ci-dessus en 2. et 3. devraient pouvoir soutenir une modélisation des influences relativement significative, à défaut de pouvoir être dénuée d'incertitudes. Mais cette consolidation resterait au niveau des impacts, c'est à dire relativement passive et a posteriori. Il serait dommage de laisser ce chapitre de synthèse, et ses perspectives de modélisation, à ce stade.

Nous terminerons donc par un effort de prospective, pour préparer la modélisation et l'action de demain, laquelle ne se contentera plus de subir des influences, ou de simples diagnostics d'impacts, mais voudra aborder directement la gestion des eaux, crues incluses, et dans une vision aussi intégrée que possible.

4. Les influences demain, subies ou maîtrisées ?

Le croisement entre les informations disponibles (communications précédentes) et les synthèses faisables et les principales lacunes ou erreurs d'interprétations (paragraphe 2. et 3. de la présente communication), conduit à diagnostiquer une situation artificiellement complexe, dans laquelle on ne dégage de moyens structurés ni pour diagnostiquer en per-

manence les effets, ni pour satisfaire les objectifs recherchés (en principe, modérer les crues). En caricaturant quelque peu, on a mis progressivement sur le dos de diverses filières (qui concernent les eaux, mais dont l'eau n'est pas le métier, ou seulement pour un aspect limité) des charges et contraintes de plus en plus lourdes, espérant que leur-réunion clarifierait au moins les problèmes d'influences, sinon en minimiserait les négatifs et en développerait les positifs. Tout ceci devrait fabriquer, par effet de coopération, une bonne gestion des eaux continentales et de leurs risques associés (crues et altér).

Cependant, ces filières auraient-elles bonne volonté et compétence, voire détermination à aller dans le sens de la clarté des influences puis dans celui du progrès (modération des crues, par exemple), peut-être que le résultat resterait décevant. Il est en effet probable que des objectifs aussi précisément techniques et sensibles que ceux liés à la prise en compte du complexe régime des eaux et des crues ne peuvent être convenablement servis par une nébuleuse d'acteurs, fussent-ils coordonnés par les lois sur l'eau.

Or la complexité du fonctionnement d'un réseau hydrographique et les exigences sociales grandissantes à son égard (services écologiques et environnementaux inclus), exigent une qualité d'actions et de comportements (non-interventions incluses) qui le dispute largement à celle d'un produit industriel haut de gamme. Dans ce paragraphe, on cherchera donc à présenter quelques pistes allant dans ce sens d'une "professionnalisation" des actions qui concernent les crues. Comme ces perspectives sont en aval du propos principal de ce rapport, on se contentera de les ébaucher, et de poser quelques hypothèses, mais sans les approfondir. L'objet de ce 4. est plutôt de lancer le débat sur les pratiques et les agrégats d'actions souhaitables demain, c'est-à-dire susceptibles de clarifier les influences de leurs actions, et aussi de les faire évoluer significativement et « professionnellement » dans le sens souhaité (en crues, ce sera vers leur modération). Auparavant, il y a un minimum d'étapes à franchir.

4.1 Les étapes préalables à franchir

La première condition à satisfaire est d'être formé à la réalité complexe des crues et de leurs conditions d'occurrence et d'évolution. Une fois cette complexité sinon assimilée, du moins pressentie, il faut passer à des modèles et indicateurs de synthèse : rester dans la dentelle des réalisations historiques et des multiples causes d'aggravation ou de modération, stériliserait l'action et rendrait les diagnostics illisibles (Cf. 3. ci-dessus).

Une seconde étape est de comprendre que, pour l'instant du moins, et pour ce qui est des pratiques classiques, la culture d'aménagement et de gestion des eaux est toujours et encore une culture d'évacuation, malgré certaines anciennes velléités pour inverser la tendance (par ex. Plan des Surfaces Submersibles des années trente), et de très récentes mesures légales ou réglementaires, favorables à la modération des crues mais pas encore mises en applications ou respectées (exception : les grands barrage-réservoirs). Cette culture d'évacuation aggravante pour les crues doit être abandonnée sous peine de stériliser à la base l'essentiel des mesures de modération des crues. Le remplacement par une culture de freinage dynamique (et pas d'abord de blocage statique derrière des barrages) exigera peut-être une génération, et sûrement une évolution du cadre juridique (par exem-

ple, dans le Code Rural, des règles actuelles imposant la transparence des structures linéaires, routes et autres, traversant les vallées et cours d'eau.

Le freinage développant l'inondation temporaire de vastes zones, associé à une analyse fine et généralisée des vulnérabilités de ces zones aux eaux en excès devient incontournable. Ceci inclut aussi la mise à jour et la prise en compte permanente de cette analyse, en particulier dans les négociations foncières et d'occupations des sols, et tant entre les particuliers qu'en inter-collectivités.

Au fur et à mesure de la mise en place d'aménagements issus de cette nouvelle culture, les connaissances hydrologiques se préciseront, et les lacunes de connaissances actuelles se combleront progressivement (sur les effets cumulés aval des ralentissements modérateurs amont, ou sur certains types d'échanges nappes/rivières en crues), autorisant la mise au point des dispositions précises et nuancées.

Dans cette perspective, les analyses locales d'impacts perdront de leur importance, au profit d'une politique délibérée de modération des crues, menée pour elle-même. On rappelle que cette politique peut avoir de fortes retombées positives pour les ressources et la qualité des eaux et des milieux aquatiques et annexes. Une telle politique suppose des moyens (collectifs) propres. Une unité de responsabilité pour l'aménagement de toutes les structures hydrauliques d'un grand bassin versant (des sols aux réseaux, en passant par celles des versants) sera sans doute incontournable : les Commissions Locales de l'Eau (CLE) prévues dans les Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE) pourraient en être les initiateurs, voire les maîtres d'ouvrage futurs.

On arrête là cette ébauche simplifiée de prospective, supposant acquis que l'objectif n'est plus de discuter des influences sur les crues, ou d'en chercher les responsables, mais de mener une politique délibérée, énergique et ... responsable, de modération des crues, et peu importe qu'il s'agisse de compenser des influences aggravantes ou d'améliorer une situation antérieure, naturelle ou déjà modérée. Dans l'attente, il est urgent de préserver les champs d'expansion des crues dans leur état actuel.

4.2 Quelles règles communes pour réunir filières et pratiques vers ces nouvelles catégories d'actions et vers des objectifs communs négociables ?

Pour exprimer en règle pratique d'aménagement et de gestion des eaux les recommandations précédentes, on a d'abord avancé le concept général de gestion intégrée des eaux pour un développement durable.

Sympathique et acceptable par tous, ce concept est néanmoins trop général pour les techniciens et aménageurs, et peut avoir une interprétation inefficace : s'il suppose l'intégration effective de toutes les actions actuelles sur l'eau (même les seules susceptibles de concerner le régime des crues), on retombe dans une complexité non maîtrisable.

Est alors apparu le concept plus concret de Ralentissement Dynamique, né d'abord pour les ressources et les milieux aquatiques, mais directement exploitable pour la modération des régimes de crues et la réduction de leurs dommages. De nombreuses recherches sont à mener pour généraliser ce concept déjà partiellement applicable :

- examiner les relations entre le volume des stockages transitoires développés (sur et dans les sols) et celui des écoulements de crues ;
- examiner les relations entre les temps de réponse (ou les durées caractéristiques) des crues et les constantes de temps de ces stockages ;
- évaluer les équivalents statiques (stockages à vitesses quasi-nulles, comme les réservoirs de barrage) des volumes de stockage dynamiques (à vitesses non négligeables)

Enfin, il semble bien au vu des premiers résultats obtenus autour de ces nouveaux concepts, qu'une clef fondamentale dans la modération des crues (soit en elle-même, soit pour compenser des aggravations) passe par la mobilisation des innombrables cuvettes potentielles disponibles en amont des passages hydrauliques sous structures linéaires: en moyenne, la moitié de ces cuvettes présente des vulnérabilités relativement faibles par rapport aux vulnérabilités plus fortes en aval qu'il conviendrait de mieux protéger (par une modération du régime des crues subies). La mobilisation de ces cuvettes pour des épandages transitoires, ouvre un champ immense de potentialités de modération et de régulation dynamique des régimes de crues. Les tâches induites sont également immenses. Elles concernent à peu près tous les domaines des sciences de l'eau, ainsi que de la socio-économie et de la juridiction des eaux, aussi de la mécanique des sols et du génie civil : évolution des talus actuels vers des talus ayant un minimum de propriétés hydrauliques, résistance au risque de renards hydrauliques et aux surverses occasionnelles...

Confirmer la faisabilité de tels aménagements, en apprécier les tâches préalables induites, en maîtriser le développement opérationnel, puis leurs contrôle, surveillance et gestion, pourrait devenir une action hydraulique majeure du siècle à venir, et servir beaucoup des aspects de la gestion intégrée des eaux — pas seulement l'aspect visible de laminage des crues. Dans tous les cas les évolutions et révolutions proposées semblent être parmi les seules mesures capables de réellement faire progresser la maîtrise et la modération des régimes de crues, avec en prime l'amélioration des ressources et de la qualité des milieux aquatiques et annexes.

4.3 Les nouveaux agrégats possibles d'actions, redéfinis comme de nouveaux métiers d'une gestion intégrée professionnelle des eaux

On peut tenter de rassembler les actions qui seraient induites par ces nouvelles règles d'aménagement et de gestion, dans de nouveaux agrégats, cette fois spécifiques à la gestion intégrée des eaux continentales dans leurs milieux (nouveaux métiers de l'eau ?). Comme ces propos sont en aval de l'objet de cette note (influences humaines sur les crues), et en outre beaucoup plus larges, on se contentera d'énumérer ces agrégats.

4.3.1 La maîtrise des zones contributives aux écoulements de crues (versants)

On peut imaginer que les agriculteurs, en tant que gestionnaires de facto de la majorité des versants (terrains), contribuent à cette maîtrise. La professionnalisation recherchée exige que cette action ne soit pas considérée comme secondaire vis à vis de la production agricole. Il faut envisager ici une période d'évolution très longue pour le monde agricole et rural, sans doute très exigeante pédagogiquement.

4.3.2 Structure et dimensionnement des réseaux hydrographiques en versants

En imaginant une gestion commune, à l'échelle des collectivités territoriales, étendue vers l'amont des réseaux hydrographiques, on pourrait plus facilement assurer la professionnalisation et la responsabilisation recherchées, avec peu de conflits potentiels à l'aide d'un territoire "réseaux" bien délimité. Mais l'étroitesse des structures linéaires concernées, et l'extrême proximité et intrication (maillages denses) avec les terrains ruraux et agricoles, pose des problèmes de "mitoyenneté" qui renvoient aux difficultés du paragraphe précédent.

4.3.3 Aménagement des réseaux hydrographiques en talwegs et vallées

La professionnalisation des actions concernant cette échelle paraît accessible à relativement court terme. Certains syndicats hydrauliques solides sont pratiquement déjà dans cette situation. A noter qu'on trouve là une tentation à définir le plus largement possible l'espace latéral "affecté" au réseau hydrographique, pour y exercer tranquillement ce "métier" d'eau proposé ici. Sans nier l'intérêt d'un espace latéral. ("espace de liberté" d'un cours d'eau) facilitant la gestion et l'aménagement, il faut savoir que le concept de gestion intégrée ne pousse pas à une telle dichotomie, mais prend plutôt acte du continuum entre le lit mineur et le lit majeur le plus lointain, quasiment jamais inondé ; il reste donc à la majorité des zones inondables la possibilité d'une exploitation « normale » .

Les enjeux considérables de ce secteur, et la relative facilité des actions qu'on peut y mener, conduisent à souhaiter la professionnalisation des intervenants. On rappelle qu'au vu des analyses faites dans les paragraphes précédents, il faut techniquement distinguer des types d'actions modératrices relativement différenciées entre les lits mineurs, moyens, majeurs et les cuvettes potentielles en tous genres (du casier latéral d'une ancienne lône, à la cuvette potentielle située en amont d'un pont de chemin de fer). On pourrait penser à délimiter une fonction spécifique aux (grands) barrages, mais l'objectif recherché de cohérence maximale le long d'un cours d'eau fait préférer une "intégration" des barrages et de leurs cuvettes dans cette catégorie principale des "vrais" cours d'eau.

En conclusion, nul doute que si demain ces trois catégories de métiers existaient en exploitant les connaissances et outils disponibles, et ce dans un esprit de gestion intégrée dont les lois en vigueur se font assez correctement l'écho et le soutien, alors la situation

actuelle vis à vis des crues pourrait considérablement se clarifier, voire s'améliorer, et majoritairement dans le sens d'une modération des crues, quel que soit le contexte actuel de leur régime, naturel ou influencé, encore aggravé ou déjà modéré, vif ou lent.

On sortirait alors de l'ère actuelle d'étude d'influences supposées pour aborder une ère de négociations menant à des influences voulues.

Au-delà, et en sus des propositions de cette note dédiée aux régimes quantitatifs des crues, il faudrait aussi aborder les aspects complémentaires touchant à la qualité des eaux (de crues), au transport solide (en crues) et à la géomorphologie des lits (y compris leur déstabilisation en crues), si l'on voulait progresser dans l'intégration des divers éléments constitutifs d'une crue, et susceptibles d'être influencés par des actions humaines.

Si cette note pouvait conduire le lecteur vers une prise de conscience des potentialités d'une gestion intégrée soutenable et équitable, voire vers une volonté pour soutenir une telle évolution, cette note aurait dépassé ses objectifs, et ce dans la bonne direction, celle d'une modération de crues associée à un développement des ressources et de la qualité des milieux.

Références bibliographiques

- Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., 1986 : An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen « SHE » : Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Adjizian et Ambroise, 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. Climatol.*, 2 : 103-109.
- Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 1995, L'influence de l'occupation du sol sur les inondations, 43 pages.
- Ambroise B., 1986 : Rôle hydrologique des surfaces saturées en eau dans le bassin du Ringelbach à Soultzeren (Hautes-Vosges), France. In : O. Rentz, J. Streith et L. Zilliox (Eds), *Recherches sur l'Environnement dans la Région. Actes du 1er Colloque Scientifique des Universités du Rhin Supérieur*, 27-28/06/86. ULP-Conseil de l'Europe, Strasbourg, 620-630.
- Ambroise B., 1991 : Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - processus et modèles -. Séminaire « Les flux dans les volumes pédologiques et à leurs limites : approches à l'échelle spatiale du bassin versant ». Conseil Scientifique du Département « Science du Sol » de l'INRA, Dijon, 26-27/03/91. Doc. interne CEREG, 34p.
- Ambroise B., 1996 : Topography and the water cycle in a temperate middle mountain environment : the need for interdisciplinary experiments. *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 217-235.
- Ambroise B., Auzet A.V., Humbert J., Mercier J.L., Najjar G., Paul P., Viville D., 1995 : Le cycle de l'eau en moyenne montagne tempérée : apport des bassins versants de recherche vosgiens (Ringelbach, Strengbach, Fecht). *Annales de Géographie* 581/582 « Le système bassin versant, fonctionnement naturel, interventions humaines », 64-87.
- Ambroise B., Najjar G., 1983 : Cartographie de l'évapotranspiration journalière en région montagneuse - Application au petit bassin du Ringelbach, Hautes Vosges (France). *Les Colloques de l'INRA*, no 15, 187-200.
- Amoros C., Petts G.E. (Eds.), 1993 : *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Collection d'écologie, Paris, 300p.
- Anderson M.G., Burt T.P., 1978 : The role of topography in controlling throughflow generation. *Earth Surf. Proc.* 3, 331-344.

- Angulo-Jaramillo R., Thony J.L., Vauclin M., 1996 : Caractérisation hydrodynamique des sols in-situ par infiltrométrie sous pression contrôlée. Atelier Expérimentation et Instrumentation, Toulouse 15-17/10/96. Météo-France/INSU, Volume des résumés étendus, 6p.
- Arrowsmith R., Armstrong A.C., Harris G.L., 1989. The role of sub-surface drainage in the generation of runoff from sloping clay land under different agricultural management regimes. British Hydrological Society, Second National Hydrology Symposium, University of Sheffield, 4-6 septembre 1989, 23-36.
- Assemblée Nationale (Mathot P., Mariani T.), Inondations : une réflexion pour demain, rapport no 1641 de l'Assemblée Nationale
- Aussenac G., 1981 : L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. La Houille Blanche 7/8, 531-536.
- Auzet A.V., 1987: L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques. CEREG-UA 95 CNRS, Eds.: Ministères chargés de l'environnement et de l'agriculture, 60p.
- Auzet A.V., Boiffin J., Ludwig, B., 1995 : Concentrated flow erosion in cultivated catchments : influence of soil surface state. Earth Surf. Processes and Landforms 20, 759-767.
- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Ludwig B., Maucorps J., 1993: Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the North of France. Catena. 20 (1/2): 41-62
- Bates, C. G. et A. J. Henry, 1928. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. Mon. Weather Rev. Suppl., 30: 1-79.
- Bauman, O. 1983. Le haut bassin de l'Ouanne. Approche méthodologique d'un bocage en mutation. Conséquences des transformations du paysage agraire sur la capacité de stockage de l'eau dans les sols. Thèse de l'Université Paris 7, 418 p.
- Bauman, O. 1985. Le haut bassin de l'Ouanne : conséquences des transformations du paysage agraire sur la capacité de stockage de l'eau dans les sols. La Houille Blanche, 2: 153-160.
- Beven K.J., 1989 : Interflow. In : H.J. Morel-Seytoux (Ed.) "Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling - Theory and Practice", NATO ASI Series C, Vol. 275, Kluwer Academic Publ., 191-219.
- Beven K.J., Kirkby M.J., 1979 : A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull. 24(1), 43-69.

- Beven, K. J., R. Lamb, P. F. Quinn, R. Romanowicz et J. Freer. 1995. TOPMODEL. In : V. P. Singh, ed. Computer models of watershed hydrology. Water Resour. Publ., Highlands Ranch, Colorado. pp. 627-668.
- Boiffin J., 1986 : Stages and Time-Dependency of soil crusting in situ. In F. Callebaut, D. Gabriels and M. De Boodt (Eds.) « Assessment of soil surface sealing and crusting », Proc. of the Symposium held in Ghent, Belgium, 1985, 91-98.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988 : Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, vol. 8, pages 663-673.
- Bosch J.M., Hewlett J.D., 1982 : A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology, 55, 3-23.
- Boulet R., Brugière J.M., Humbel F.X., 1979 : Relations entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyanne française septentrionale: conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. Science du Sol 1, 3-18.
- Burlando P., Mancini M., Rosso R., Impact of climate change on hydrological modeling and flood risk assessment, contribution au séminaire Ribamod (Copenhague, 10-11 octobre 1996), 25 pages.
- Buttle J.M., 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. Progress in Physical Geography, 18, 1, 16-41.
- Calder I.R., 1990 : Evaporation in the uplands. John Wiley & sons, Chichester, 148 pages.
- Caoudal S., Delrieu G., Creutin J.D., 1996 : Métrologie des précipitations en hydrologie urbaine : test de cohérence de données issues de divers capteurs dans le cadre de l'expérimentation Marseille 92-93. Atelier Expérimentation et Instrumentation, Toulouse 15-17/10/96. Météo-France/INSU, volume des résumés étendus, 5 pages.
- 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. 1, 493-520.
- Cellier P., Brunet Y., 1994 : Influence du relief sur les profils et les échanges énergétiques au niveau d'une parcelle. Actes du séminaire Ecosystèmes naturels et cultivés et changements globaux 17-19/05/94, Courrier de l'Environnement, INRA, Paris.
- Cemagref, 1985. Contribution à l'analyse de l'influence du drainage sur les crues de Grand-chain. Cemagref, Antony. 66 pages.

- Cemagref, 1989 : Analyse des crues des petits bassins versants du Sud-Est de la France. Rapport de synthèse, Lyon, 55 pages, annexes.
- Chèze et Helloco, 1996 : Atelier Expérimentation et Instrumentation, Toulouse 15-17/10/96. Météo-France/INSU, volume des résumés étendus, 6 pages
- CNFSH, 1994, actes de la journée scientifique du 2 juin 1994 consacrée aux événements hydropluviométriques intenses observés récemment sur le sud-est de la France.
- Combes F., Hurand A., Meunier M., 1995 : La forêt de montagne : un remède aux crues. In M.Meunier (Ed.), Compte-rendu de recherches n°3, BVRE de Draix. Collection Etudes du Cemagref, série Equipements pour l'Eau et l'Environnement 21, 113-121.
- Cosandey C., 1984 : Recherches sur les bilans de l'eau dans l'ouest du massif Armoricaïn. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Paris IV, 511 pages.
- 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), pages 13-22.
- Cosandey C., 1995 : La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? Annales de Géographie 581/582 « Le système bassin versant, fonctionnement naturel, interventions humaines », pages 7-25.
- Cosandey C., et Didon-Lescot J.F., 1990 : Etude des crues cévenoles: conditions d'apparition dans un petit bassin forestier sur le versant sud du Mont-Lozère, France. IAHS Publ. 191, 103-115.
- Cosandey, C. 1993. Forêt et écoulements : Rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel. Impact d'une coupe forestière. Rapport CNRS, Meudon. 81 pages.
- Crawford N.H., Linsley R.K., 1966 : Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Tech. Rep. 39, Dep. Civil Eng., Univ. Stanford, Stanford (CA, USA), 210 pages.
- Cunge J., introduction to discussion on future modelling needs, contribution au séminaire Ribamod, Copenhague, 10-11 octobre 1996, 13 pages
- Datin R., Obled C., Helloco F., 1996 : Evaluation de lames d'eau moyennes à partir de réseau sol ou d'imagerie radar : applications aux bassins versants de l'Ardèche. Atelier Expérimentation et Instrumentation, Toulouse 15-17/10/96. Météo-France/INSU, volume des résumés étendus, 6 pages.
- Dosseur H., 1964 : Contribution à la définition de caractéristiques d'état du bassin expérimental d'Alrance (Aveyron) pour la prévision hydrologique. Thèse Doct. 3è cycle, Univ. Montpellier-EDF, Montpellier, 178 pages, annexes.

- Dunne T., Black R.D., 1970 : An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res.* 6(2), 478-490.
- Dunne T., Moore T.R., Taylor C.H., 1975 : Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrol. Sci. Bull.* 20(3), 305-327.
- Estorge J.L., Laborde J.P., Zumstein J.F., 1980 : Mise en évidence des relations entre le gradex des pluies journalières et les gradex des pluies de durée inférieure à 24h en Lorraine. *La Météorologie, Série VI, numéro spécial 20-21, « Précipitations et Hydrologie »*, 139-149.
- Foster I. Grew R., Dearing J., 1990, Magnitude and frequency of sediment transport in agricultural catchments : a paired lake-catchment study in midland england, in *Soil erosion on agricultural land, 1990, John Wiley Ltd, pages 153-171.*
- Fritsch J.M., 1992 : Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie des petits bassins versants. Ed. ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, 352 pages.
- Garry Gérald (dir.), *Cartographie des zones inondables - Approche hydrogéomorphologique, ouvrage publié sous les auspices des ministères chargés de l'équipement et de l'environnement, Editions Ville et Territoire, 100 pages.*
- Gascuel C., Cros-Cayot S., Durand P., 1996 : Spatial variations of sheet flow and sediment transport on an agricultural field. *Earth Surface Processes & Landforms*,
- Girard G., Morin G., Charbonneau R., 1972 : Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cahiers ORSTOM série Hydrologie* 9(4), 35-52.
- Gresillon J.M., Taha A., Le Meillour F., Lavabre J., Puech C., 1995. Analyse temporelle et spatiale des apports de crue sur un bassin méditerranéen : relation avec les processus hydrologiques. *Effects of scale on Interpretation and management of Sediment and Water Quality. Proc. of a Boulder Symposium. IAHS Publ.* 226, 119-129.
- Griffiths G.H., Wooding M.G., 1996 : Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR Data. *Hydrological Processes* 10, 1127-1138.
- Gustard A. (Ed.), 1993 : *Flow regimes from experimental and network data (Friend). Vol 1 / Hydrological studies. Unesco/Inst. Hydrology, Wallingford, 210 pages.*
- Hewlett, J.D., 1982 : *Principles of Forest Hydrology, The University of Georgia Press, Athens, 183 pages.*
- Hibbert A.R., 1967 : Forest treatment effects on water yield. In Sopper W.E. and Lull H.W. (Eds), *Forest Hydrology, Pergamon, 527-543.*
- Hibbert, A. R., 1985. Storm runoff and sediment production after wildfire in chaparral. *Hydrol. Water Resour. Ariz. Southwest*, 15: 31-42.

- Hooper R. P. and Shoemaker C. A., 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Wat. Resour. Res.*, 22, 1444-1454.
- 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 XV*, n° spécial « Les crues de 1983 en Alsace et en Lorraine », hommage à R. Frécaut, 67-125.
- Humbert J., Kaden U., 1994 : Détection des modifications de l'écoulement fluvial au moyen de l'indice de débit de base. *Revue de Géographie Alpine « Cours d'eau aménagés, cours d'eau perturbés ? »* Tome LXXXII(2), 25-36.
- Humbert J., Najjar G., 1992 : Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré - Une analyse de la littérature francophone. CEREG-ULP, Strasbourg, 85 pages.
- Humbert J., Perrin J.L., 1993a : Précipitations et relief. Le cas du versant oriental des Hautes-Vosges. In M. Griselin (Ed.) « L'eau, la Terre et les Hommes », ouvrage en hommage à R. Frécaut, Presses Universitaires de Nancy, 147-154.
- Humbert J., Perrin J., Perron L., 1993b : Etude méthodologique de quantification spatiale des précipitations appliquée à la France Nord-Est. Secteur-test : versant oriental des Hautes Vosges. Rapport Agence de l'Eau Rhin-Meuse, CEREG-ULP, Strasbourg, 47 pages, annexes.
- Hursh C.R., Brater E.F., 1941 : Separating storm hydrographs from small drainage areas into surface and subsurface flow. *Trans. Amer. Geophys. Union* 22, 863-870.
- Jakeman, A. J. et G. M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Wat. Resour. Res.*, 29: 2637-2649.
- Jetten V., Boiffin J., De Roo A., 1996. Defining monitoring strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments : a simulation approach. *European Journal of Soil Science*, 47, 579-592.
- Jetten V.G., 1996 : Interception of tropical rain forest : performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes* 10, 671-685.
- Jones I.A., Grant G.E., 1996 : Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, 32(4), 959-974.
- Kennedy, V. C., Kendall, C., Zellweger, G. W., Wyerman, T. A. and Avanzino, R. J., 1986. Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole River Basin, California. *J. Hydrol.*, 84, 107-140.
- Kieffer A., Bois P., 1996 : Traitement statistique de longues séries de pluies et intérêt des pluviographes. Atelier Expérimentation et Instrumentation, Toulouse 15-17/10/96. Météo-France/INSU, volume des résumés étendus, 8 pages.

- Kirkby M.J., 1986 : A runoff simulation model based on hillslope topography. In V.K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe & E.F. Wood (Eds.) *Scale Problems in Hydrology*. Reidel, Dordrecht (NL), 39-56.
- Lavabre J., Meriaux P., analyse de deux crues catastrophiques dans le sud-est de la France, symposium international Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, tome 3, pages 171-182
- Lavabre J., Sempere Torres D., Cernesson F., 1993 : Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142, 273-299.
- Lavabre, J., D. Sempere-Torres et F. Cernesson. 1991. Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. *Hydrologie Continentale*, 6(2): 121-132.
- Le Bissonnais Y., 1988 : Comportement d'agrégats terreux soumis à l'action de l'eau : analyse des mécanismes de désagrégation. *Agronomie*, 8, 915-924.
- Le Meillour F., 1996 : Etude expérimentale et numérique de la contribution des eaux de surface à la formation des crues. Conséquence sur l'hydrogramme d'un bassin versant. Thèse de doctorat, mention Géophysique, UJF Grenoble.
- Lesaffre, B. et M.-P. Arlot., 1991. L'impact du drainage sur le milieu. *Courants*, 11 : 46-53.
- Loumagne C., Michel C., Normand M., 1991 : Etat hydrique du sol et prévision des débits. *Journal of Hydrology* 123, 1-17.
- Ludwig B., Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., King D., Chadoeuf J., 1996 : Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etudes et Gestion des Sols* 3, 53-70.
- Ludwig B., Boiffin J., Chadoeuf J. et Auzet, A.V., 1995 : Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments, *Catena* 25, 227-252.
- Maire G., Lasserre S., 1988, Structure et fonctionnement d'un système fluvial déséquilibré par l'intervention anthropique : la Moselle non canalisée à la sortie du massif Vosgien, *MOSELLA*, tome XVIII, no spécial, parution 1991, pages 39-81
- Makhlouf, Z. et C. Michel. 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.*, 162: 299-318.
- Mathys N., Meunier M., Brochot S., 1996 : The forest effect on floods in small mountainous catchments : some results from experimental catchments of Draix, France. *Conference on Ecohydrological Processes in small Basins*, Strasbourg, France, septembre 96.

- Maule, P. S. and Stein, J., 1990. Hydrologic flow path definition and partitioning of spring meltwater. *Water Resour. Res.*, 26, 2959-2970.
- McCulloch J. S. G. et M. Robinson. 1993. History of forest hydrology. *J. Hydrol.*, 150: 189-216.
- McDonnell, J. J., Bonnel, M., Stewart, M. K. and Pearce, A.J., 1990. Deuterium variations in storm rainfall : implications for stream hydrograph separation. *Water Resour. Res.*, 26, 455-458.
- Mérot P., 1978 : Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux. Thèse INRA-ENSA, Université de Rennes I, 196 pages.
- Mérot P., 1988 : Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrologie Continentale* 3(2), 105-115
- Merot P., 1995 : Le rôle du bocage sur le cycle de l'eau. Synthèse bibliographique. INRA-ENSA Rennes, 10 pages.
- Merot P., Bruneau P., 1993 : Sensitivity of bocage landscapes to surface run-off : application of the Kirkby Index. *Hydrological Processes* 7, 167-173.
- Météo-France et INSU, 1996 : Atelier Expérimentation et Instrumentation. Toulouse, 15-17 octobre 1996. Volume de résumés étendus.
- Meunier, M. 1996. Couvert forestier et crues sur les petits bassins versants de montagne. *Unasylva*, 47 (185): 29-37.
- Michelot J.L., 1995, Gestion patrimoniale des milieux naturels fluviaux, guide technique édité par la conférence permanente des Réserves Naturelles de France, 67 pages
- Millet, A., 1996. Bilans hydriques et géochimiques dans le cycle forestation - déforestation : le cas des forêts tropicales. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 199 pages.
- Monnier G., Boiffin J., Papy F., 1986 : Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 22 : 123-131.
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R., 1991 : Digital Terrain Modelling : A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5(1), 3-30.
- Moore I.D., O'Loughlin E.M., Burch G.J., 1988 : A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes & Landforms* 13(4):305-320.

- Moore R.J., Jones D.A., Linking hydrological and hydrodynamic forecast models and their data, contribution au séminaire Ribamod (Copenhague, 10-11 octobre 1996), 19 pages.
- Nascimento, N. 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Thèse de doctorat. CERGREN, 447 pages.
- Normand M., Loumagne C., Cognard A.L., Otlé C., Taconet O., Vidal-Madjar D., 1996 : Observation et prise en compte de l'état hydrique des sols en hydrologie : une étude sur des bassins versants bretons. Actes du colloque interceltique sur l'Hydrologie, Rennes, juillet 1996, 9 pages.
- Onstad C.A., 1984 : Depressional storage on tilled soil surfaces. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 27(3), 729-732.
- Otlé C., Vidal-Madjar D., 1994 : Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX-MOBILHY region. Journal of Hydrology, 158, 241-264.
- Otlé C., Vidal-Madjar D., Cognard A.L., Loumagne C., Normand M., 1996 : Use of vegetation and soil variables inferred from radar and optical remote sensing in hydrological modelling. Proc. Workshop Wallingford, juin 96.
- Ouvry J.F., 1986 : Programme de lutte contre l'érosion des terres et les inondations. Volume 1 : ruissellement et érosion des terres agricoles. Rapport d'activités de la campagne 1985-86. AREAS, 10 pages, annexes.
- Ouvry J.F., 1989 : Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré: expérience du Pays-de-Caux (France). Cahiers ORSTOM, série Pédologie 25 (1,2), 157-169
- Papy F., Boiffin J., 1989 : The use of farming systems for the control of runoff and erosion. Example from a given country with talweg erosion. Soil Technology Series 1, 29-38.
- Papy F., Douyer C., 1991 : Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. Agronomie 11, 201-215
- Papy F., Martin P., Souchère V., Capillon A., 1996 : la maîtrise du ruissellement : modéliser les pratiques de production pour orienter les recherches d'innovations. GIP HydrOsystemes, Colloque « Erosion, transfert de particules, formation de dépôts », Toulouse, 7-8 mars 96.
- Papy F., Souchère V., 1993 : Control of overlandflow and talweg erosion : a land management approach. In S.Wicherek (Ed.), Farm Land Erosion in Temperate Plains environment and Hills, Elsevier, 503-514.

- Perrier A., Riou C. (Eds), 1985: Les Besoins en Eau des Cultures. CIID, INRA, Paris, 929 pages.
- Petit F., 1984 : L'interception des pluies par différents types de couverts forestiers. Bull. Soc. Geo. de Liège, 20, 99-127.
- Pfister L., 1995 : Interception des précipitations dans quatre peuplement forestiers (Epicea, Hêtre) du bassin versant du Strengbach. Etude des processus et modélisation. Mémoire de DEA Systèmes spatiaux et aménagements régionaux, ULP Strasbourg, CEREG-URA 95 CNRS, 97 pages.
- Pfister L., Viville D., Najjar, G., Biron P., Richard S., Fischer L., 1996 : Rainfall interception in a 30-year old spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). Conference on Ecohydrological Processes in small Basins, Strasbourg, France, septembre 96.
- Puyou-Lascassies, 1996, Evaluation de la contribution des moyens spatiaux à la gestion du risque d'inondation, rapport Scot Conseil, 106 pages
- Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O., 1991 : The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital terrain Models. Hydrological Processes 5, 59-79.
- Rhode, A., 1987. The origin of stream water traced by oxygen 18. Ph. D. Thesis, Uppsala University, Dpt. Phys. Geog., Div. Hydrol. Rep. Ser. A., Sweden, 260 pages.
- Saulnier G.M., 1996 : Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL. Thèse de Doctorat, INPG, UJF, LTHE Grenoble, 275 pages et annexes.
- Schumm S.A., 1977 : The fluvial system. Wiley, New-York, 338 pages.
- Scott, D. F., 1993. The hydrological effect of fire in South African mountain catchments. J. Hydrol., 150 : 409-432.
- SHF- acte des Journées Hydrauliques SHF de 1986
- Sklash, M. G. and Farvolden, R. N., The role of groundwater in storm runoff. J. Hydrol., 43, 45-65, 1979.
- Todini E. AFORISM a comprehensive forecasting system for flood risk mitigation and control, 21 pages
- Valentin C., 1981 : Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertique. Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VII, 213 pages, annexes.

- Vauclin M., Chopart J.-L., 1992 : L'infiltrométrie multidisques pour la détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte-d'Ivoire. *L'agronomie Tropicale* 46 (4), 259-270.
- Vauclin M., Elrick D.E., Thony J.L., Vachaud G., Revol P., Ruelle P., 1994 : Hydraulic conductivity measurements of the spatial variability of a loamy soil. *Soil Technology* 7, 181-195.
- Viville D., Biron P., Granier A., Dambrine E., Probst A., 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). *Journal of Hydrology*, 144, 273-282.
- Voltz M., Andrieux P. (Eds), 1996 : Etude des flux d'eau et de polluants en milieu méditerranéen viticole. Le programme Allegro-Roujan. Rapport final de l'AIP Valorisation et protection des ressources en eau. INRA, Science du Sol, Montpellier, 31 pages.
- Wels, C., Cornett, R. J. and Lazerte, B. D., 1991. Hydrograph separation : a comparison of geochemical and isotopic tracers. *J. Hydrology*, 122, 253-274.
- Wilby R., Gibert J., 1993 : Dynamiques hydrologiques et hydrochimiques. In C.Amoros et G.E. Petts (Eds.) *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson, Paris, 43-60.
- Zimmer, D. 1995. Drainage, assainissement agricole et crues : un débat qui reste d'actualité. *Géomètre* n°7: 36-39.

Vocabulaire

1. Vocabulaire hydrologique général

Advectif	par advection ; advection : transport (de matière, d'énergie) lié au mouvement d'un fluide
Annual	de période moyenne de retour 1 an
Ascendance frontale dynamique	mouvement vertical ascendant de l'air, sollicité par l'avancée des fronts météorologiques ; générateur le plus souvent de pluies réalisant des cumuls localement modérés mais intéressant de vastes surfaces
Ascendance convective	mouvement vertical ascendant de l'air, sollicité par l'instabilité verticale de l'atmosphère ; générateur le plus souvent de pluies réalisant des cumuls localement intenses mais spatialement irrégulières, intéressant chaque fois des surfaces modestes
Bassin de contrôle	voir bassin-témoin*
Bassin témoin	bassin d'étude, en général de petite surface, que l'on maintient en l'état pendant une longue période, afin de comparer les observations que l'on y fait à celles que l'on obtient sur des bassins autres soumis à évolution, par exemple sur des bassins expérimentaux.
Bassin versant	à la fois la notion topographique de zone limitée par une ligne de partage des eaux et celle de surface d'interception des précipitations (Roche).
Battance	modification de la texture de la couche superficielle du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, conduisant à son imperméabilisation
Bioturbation	mouvements verticaux d'éléments du sol provoqués par la faune
Bruit (d'un signal)	composante proprement aléatoire du signal, opposée à sa partie utile réputée informative
Calage	détermination des paramètres d'un modèle (ses constantes internes non identifiables à des grandeurs mesurables sur le terrain) en vue d'un comportement satisfaisant de ce modèle. Le calage nécessite des données (de pluie, de débit, etc.) réelles, mesurées sur une certaine durée.

Canopée	partie aérienne d'une plante
Capacité au champ	hauteur d'eau (mm) qu'un sol en place peut soustraire à l'écoulement gravitaire.
Capacité d'infiltration	quantité d'eau maximale pouvant s'infiltrer dans un sol donné par unité de temps, dans des conditions données (d'humectation notamment).
Coefficient d'écoulement	pour un intervalle de temps ou un événement pluie-débit donnée, c'est le rapport du volume total écoulé à l'exutoire d'un bassin, au volume précipité sur ce bassin
Contre-pente topologique	voir encadré
Courbe de récession	partie décroissante d'un hydrogramme de crue
Courbe de tarage	courbe élaborée à partir de couples hauteurs/débits mesurés. Le passage des hauteurs d'eau, que l'on sait mesurer en continu, à une estimation routinière des débits se fait ensuite à l'aide de cette courbe de tarage. Mais la partie haute de la courbe de tarage reste souvent mal connue : les débits les plus élevés étant rarement observés et leur mesure difficile, voire dangereuse, l'incertitude de mesure peut atteindre 30 %. Par ailleurs, les crues importantes modifient généralement le lit du cours d'eau, ce qui remet en cause la validité des éléments antérieurs ayant fondé la courbe de tarage. (Obled, communication dans le cadre d'un réflexion sur les sites d'étude pour la problématique « risques hydrologiques »).
Crue	période de haute eaux, de durée plus ou moins longue, consécutive à des averses plus ou moins importantes
Débit annuel	valeur moyenne du débit, prise sur une année.
Débit de pointe	débit maximal instantané (d'une crue, ou observé sur un laps de temps choisi)
Débit journalier	valeur moyenne du débit, prise sur un jour civil
Débit-seuil	débit dépassé continûment pendant une durée donnée
Décamillennale	qui a une probabilité 1/10000 d'être dépassé l'an prochain
Écoulement	désigne un volume écoulé ou un débit moyen sur un temps assez long ; souvent exprimé en hauteur d'eau ramenée à la superficie du bassin versant (mm).

Écrêteur	se dit d'un ouvrage destiné à diminuer le débit de pointe des crues en transit
E (coefficient d')	volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère pour une variation unitaire de la charge hydraulique
Épicentrage	phénomène par lequel un événement donné, localement évaluable comme rare, se révèle relativement fréquent pour la personne en charge d'un vaste territoire.
Équation de continuité	équation traduisant la conservation de la masse (d'eau, ici).
Ergodicité	propriété d'un champ fonction du temps par laquelle on peut, dans l'estimation d'une espérance mathématique locale, remplacer la moyenne temporelle locale par une moyenne spatiale
Érodabilité	sensibilité à l'érosion
Étiage	niveau le plus bas atteint, une année donnée, par un cours d'eau. utilisé pour basses eaux
Exfiltration	arrivée en surface d'un écoulement souterrain régi par la loi de Darcy
Exurgence	lieu de passage d'eau d'une nappe aquifère vers la surface ou vers un cours d'eau
Exutoire	dans un bassin versant, le point le plus en aval du réseau hydrographique, par où passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin.
Foehn	phénomène d'assèchement et de réchauffement des masses d'air humide lors de leur passage par dessus un relief. Suppose nécessairement des précipitations sur le versant au vent.
Fréquentielle (description)	se dit d'une description des écoulements dans laquelle les événements susceptibles de survenir sont décrits par leurs caractéristiques propres et associés à une probabilité d'occurrence, indépendamment de leur date éventuelle de réalisation effective. Cette approche visant à une description structurelle du système est équivalente à l'approche climatologique, mais pour la partie terrestre du cycle de l'eau.
Hortonien : selon Horton	ruissellement hortonien : ruissellement de surface dû à ce que l'intensité de la pluie est supérieure à la conductivité hydraulique du sol
Hydrogramme	graphique figurant la variation des débits en fonction du temps

Hydrologie stochastique	consiste à décrire les chroniques des données hydrologiques en terme de processus stochastique, incluant la distribution statistique des phénomènes dans l'espace et l'ensemble des corrélations spatio-temporelles qui peuvent être envisagées
Hydrométrie	méthodologie et technologie de la mesure des hauteurs et des débits dans les cours d'eau
Hydrométrieque	lié à la mesure des variables hydrologiques
Hydromorphie	caractère d'un sol (notamment) régulièrement et longuement soumis à la présence d'eau.
Hydromorphologie	étude de la morphologie des cours d'eau, notamment l'évolution du profil en long, des profils en travers, du tracé planimétrique, et des phénomènes physiques que ces grandeurs permettent d'investiguer : captures, méandrement, anastomoses etc.
<i>Impluvium</i>	surface réceptrice de pluie, d'un pluviomètre ou d'un bassin versant conçu comme simple collecteur
Indice foliaire	rapport entre la surface cumulée des feuilles et la surface du sol
Lit majeur	portion de la vallée ou la rivière n'est pas habituellement présente, mais où elle est susceptible de s'épancher lors des crues
Macrophytes	végétaux supérieurs, par opposition au phytoplancton
Macropore	lieu privilégié de passage de l'eau dans un sol, par exemple à l'emplacement d'une galerie animale où d'une ancienne racine
Modèle conceptuel	modèle reproduisant de manière schématique les mécanismes du système étudié considérés comme pertinents pour la résolution des questions étudiées
Modèle empirique	lien strictement descriptif liant l'entrée et la sortie d'un modèle, indépendant de toute considération sur la physique des phénomènes
Modèle pluie-débit	appareillage conceptuel visant à déterminer la chronique de débit qui résulte dans un bassin versant donné d'une chronique de pluie donnée
Modèles à base physique	modèle dont la structure veut tenir compte des processus élémentaires à l'oeuvre dans le bassin versant et de la géométrie des milieux dans laquelle ils se déroulent

Observatoire hydrologique	lieu d'observation des composantes du cycle hydrologique, visant à la pérennité et à l'exhaustivité
Paramètre	constante numérique interne à un modèle, ne correspondant pas à une grandeur physique mesurable sur le terrain ou traitée comme telle.
Période de retour	durée moyenne séparant deux occurrences d'un phénomène donné, approximativement inverse de sa probabilité d'occurrence une année donnée.
Pessière	forêt d'épicéa
Physiographique	dépendant des caractéristiques de l'objet, notamment géométriques
Phytocénose	peuplement végétal, conçu comme communauté
Pluies antérieures (indice des)	grandeur numérique basé sur les pluies précédemment tombées et réputée traduire l'état présent du bassin versant
Pluviométrie annuelle	total des hauteurs des pluies observées une année donnée
Pseudo-spécifique	pour une grandeur hydrologique dépendante de la taille du bassin versant d'observation, se dit de la valeur approximativement constante obtenue après division par la fonction puissance appropriée de la surface du bassin versant. Généralisation de la notion de grandeur spécifique au cas des variables dont la croissance avec la taille du bassin n'est pas linéaire (quantiles de crue par exemple).
Qquantile	dans une loi de probabilité, valeur de la variable aléatoire associée à une valeur particulière de la fonction de répartition ou probabilité au non dépassement
Régime des crues	au sein du régime hydrologique, la partie des descripteurs qui s'intéresse aux hautes eaux
Réservoir	(1) tout lieu de séjour de l'eau, dans la description du cycle hydrologique ou (2) barrage vu comme capacité de stockage (américanisme)
Ripisylve	végétation arborée bordant une rivière, et ses annexes
Talweg	lieu géométrique défini par la convergence des lignes de plus grande pente
Toposéquence	organisation des sols le long d'une ligne de plus grande pente

Transfert d'échelle	étude des relations existant entre une même variable mesurée à différentes échelles
Transmissivité	propriété d'un aquifère à assurer le transit de l'eau, s'exprimant comme le produit du coefficient de perméabilité par l'épaisseur de la nappe souterraine
Variation diurne	variation d'un phénomène au cours de la journée ; s'agissant du débit, elle peut être due aux variations de l'évapotranspiration ou à celles de la fonte de la neige ou de la glace
Variation saisonnière	variation d'un phénomène liée aux conséquences climatiques du cycle solaire annuel

2. Méthodes et sigles

STH	surface toujours en herbe (pré ou pâturage)
AGREGEE	variante de la méthode du GRADEX, permettant plus de généralité dans les lois descriptives des pluies et s'attachant à rendre compte des périodes de retour intermédiaires.
CRUPEDIX	méthode sommaire de détermination du débit instantané maximal annuel décennal QIXA10, à partir de la pluie journalière maximale annuelle décennale, de la surface du bassin versant et d'un facteur régional.
ds (pour une crue)	durée pendant laquelle le débit est resté constamment supérieur à la moitié du débit de pointe.
D	durée caractéristique de crue (définie en un point donnée du réseau hydrographique) : médiane des ds pour les crues dont le débit de pointe est le débit instantané maximal annuel décennal QIXA10
gradex	accroissement d'un quantile pour une augmentation unitaire du logarithme népérien de la période de retour. Traduit en pratique l'accroissement de la variable hydrologique avec la rareté des événements.
GRid	une série de modèles conceptuels développés par le Cemagref ; i désigne le nombre de paramètres (2 à 4) ; d est le pas de temps de travail (H, J ou M)
POS	Plan d'Occupation des Sols

PSS	Plan des Surfaces Submersibles
QCXd	Débit continûment dépassé pendant la durée d
QdF	Q=Débit ; d=durée ; F=Fréquence ; une approche particulière du régime des hautes eaux (Cemagref Lyon) constituée 1) d'un choix initial de variables d'étude (QCX, VCX) ; 2) lesquelles sont étudiées sur plusieurs durées ; 3) utilisant pour l'extrapolation vers les périodes de retour élevées la méthode AGREGEE, généralisation de la méthode du GRADEX ; 4) utilisant une normalisation dimensionnelle pour le transfert le long des cours d'eau ou vers des bassins non jaugés ; 5) exploitant ces critères dans le cadre de modèles adimensionnels, parmi lesquels le choix se fait en fonction d'un arbitrage entre la taille du bassin versant et la dynamique du régime pluviométrique. Un des produits de la méthode est l'obtention d'hydrogrammes dits monofréquences, proposés comme un ensemble cohérent de crues de projet.
QIXA1	Débit Instantané maXimal Annuel, annual
QIXA10	Débit Instantané maXimal Annuel décennal
QIXAT	Débit Instantané maXimal Annuel de période de retour T années
QPB	Débit de plein bord
RTM	Restauration des Terrains en Montagne
SAU	Surface Agricole Utile
SOCOSE	méthode sommaire d'estimation du débit instantané maximal annuel décennal QIXA10 et de D, durée caractéristique de crue
SOGREAH (abaques)	méthode sommaire d'estimation du débit instantané maximal annuel décennal QIXA10

Liste des auteurs

Auteurs responsables de chapitre

Introduction	Thierry Pointet <i>GIP Hydrosystème</i>
Chapitre 1	Vazken Andreassian <i>Cemagref Antony, Unité de recherche Hydrologie</i>
Chapitre 2	Anne-Veronique Auzet <i>CEREG (ULP-CNRS), Strasbourg</i>
chapitre 3	Vazken Andreassian <i>Cemagref Antony, Unité de recherche Hydrologie</i>
Chapitre 4	Guy Oberlin <i>Cemagref Lyon, Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique</i>
Édition	Étienne LEBLOIS <i>GIP HydrOsystèmes</i>

Autres participants

De très nombreuses personnes sont venues en aide aux auteurs responsables de chapitre, dont Bruno Ambroise, Charles Obled, Claude Cosandey, Claude Michel, Daniel Viville, Frédy Langenfeld, Gérard Maire, Jacques Lavabre, Jean-Yves Caneill, Joël Humbert, Maurice Meunier, Nicole Mathys, Philippe Mérot, Philippe Puyou-Lascassies... et sûrement d'autres encore que l'éditeur n'a même pas connues : que chacun soit ici remercié.

Relecteurs externes

Plusieurs personnes sont intervenues pour fournir avis, conseils et critiques au document initial, parmi lesquels l'éditeur tient à remercier tout particulièrement Daniel Zimmer, Pierre Chevalier, Michel Bouvier, Alain Faure-Soulet, et Julienne Baudel. La consolidation des remarques (nombreuses et parfois divergentes) a été effectuée par l'éditeur, qui reste donc seul responsable du texte final.

Deuxième partie

Actes du séminaire
18-19 novembre 1996

ministère de l'Environnement

Ouverture du séminaire

Benoît Lesaffre

Chef du service de la Recherche et des Affaires économiques
ministère de l'Environnement

Je voudrais rappeler rapidement le contexte des travaux de ce séminaire, dire ce qui a déjà été fait, et dire quelques mots sur le déroulement de ces deux journées.

Ce séminaire vient à point, pour plusieurs raisons qui se complètent.

D'abord, nous avons subi ces dernières années, partout en France et en Europe, quelques très fortes inondations. Rappelons-nous : Nîmes en 1989, Vaison-la-Romaine en 1992, plusieurs régions qui ont été sous l'eau en janvier 1995 et 1996. À chaque fois, ce sont des dizaines de décès et de disparitions, des dizaines de milliers de foyers sinistrés, des milliards de francs de dégâts. À chaque fois, les responsabilités sont recherchées, sur la base souvent d'intuitions justes, mais également d'idées fausses.

En second lieu, la politique publique française de prévention contre les risques naturels fait actuellement l'objet d'une évaluation par une instance officielle, l'instance Bourrelier, du nom de son président. Cette instance proposera très prochainement des recommandations d'action et d'organisation, y compris en terme de besoins de recherches, en appui à notre politique publique.

Enfin, les services de l'État, les collectivités territoriales, les agences de l'Eau souhaitent également disposer d'outils d'aide à la prévention et à la gestion des risques.

Par rapport à ces grandes préoccupations, qu'est-ce qui a été lancé, dans lequel s'inscrit ce séminaire ? Comme vous le savez tous, tous les travaux le montrent bien désormais, un risque est la rencontre d'un aléa, en l'occurrence l'aléa « crue », et de la vulnérabilité du milieu récepteur. Par rapport à l'ensemble des questions concrètes qui se posent, et elles sont nombreuses, le ministère de l'Environnement a souhaité mieux connaître quelles pratiques humaines influencent de manière sensible l'aléa « crue ». En effet, si des réponses plus précises que celles dont on dispose actuellement sont apportées, on peut espérer pouvoir proposer soit des aménagements plus respectueux de l'environnement, soit des pratiques de gestion plus adaptées, soit encore des mesures compensatoires.

On doit également déboucher sur des actions à caractère pédagogique permettant de développer la culture du risque de tous les acteurs. Il s'agit de modifier un certain nombre de comportements, vis-à-vis de l'aléa " crue " ou en terme d'occupation du sol et de vulnérabilité du milieu. À partir de cette demande du ministère, les organismes de recherche en environnement ont été

mobilisés et des propositions de travail ont été élaborées avec le GIP HydrOsystemes, Groupement d'intérêt public de recherche, regroupant six organismes.

Quels sont les résultats attendus de cette démarche ?

D'abord, une synthèse des connaissances sur les processus hydrologiques et hydrogéologiques qui conduisent à la formation et à l'évolution des crues. Pourquoi cette synthèse ? Il s'agit de mettre en évidence le lien entre les actions humaines et les paramètres contrôlant ces processus.

Si nous faisons le lien entre ces deux points, c'est pour pouvoir hiérarchiser les actions humaines en fonction de leur importance réelle. Il s'agit d'élaborer un argumentaire sur l'influence des activités et des pratiques de l'homme sur le régime des crues, et d'une façon plus générale sur le régime des eaux.

Dernier point attendu de cette démarche, une fois l'analyse faite : repérer les besoins complémentaires en recherche finalisée et en produits à élaborer, par exemple en terme de modèles opérationnels, de règles de négociation ou de gestion, d'approches socio-économiques.

Pour produire ces résultats, il est nécessaire de mobiliser la recherche publique et de la mettre en dialogue avec les gestionnaires. Ce dialogue ne débute heureusement pas aujourd'hui : il a déjà eu lieu par le passé et aujourd'hui est donc une étape.

Le domaine scientifique concerné est en effet complexe et suppose la mobilisation de nombreuses compétences. Notons que nos préoccupations commencent à être intégrées dans les programmes européens de recherches. Par exemple, le programme actuel « Environnement et climat » de Bruxelles met l'accent sur la gestion des situations de crise, sur la gestion active des systèmes physiques et des écosystèmes ainsi que sur le choix des politiques d'aménagement. Les futures actions de recherche dans le domaine de l'eau favoriseront les approches intégrées à l'échelle des bassins versants.

Pour terminer cette introduction : ces deux jours seront consacrés à étudier un premier projet d'état de l'art quant à l'influence humaine sur l'origine et la formation des crues, remis dans votre dossier et dont vous avez pu prendre connaissance. C'est un document de travail provisoire, qui s'appuie sur divers travaux scientifiques mais également d'autres séminaires, notamment le séminaire tenu il y a un an à l'Assemblée nationale. Ainsi les auteurs l'indiquent, on souhaite encore quelques améliorations. Les débats d'aujourd'hui et de demain y aideront.

Aujourd'hui, il y aura d'abord quelques illustrations concrètes. Elles seront suivies de trois exposés à caractère synthétique. Le premier exposé portera sur les processus, ce qu'on en sait ; le second sur les actions de l'homme, là aussi ce qu'on en sait, les questions qui sont encore posées ; le troisième sur les démarches de modélisation qui sont en cours ou envisageables.

L'emploi du temps réserve du temps au dialogue avec la salle et je vous invite à ce que ce soit vraiment une séance de travail entre les intervenants et vous tous. Demain, un premier bilan et quelques perspectives nous seront proposées. Le dialogue entre scientifiques et

praticiens fera l'objet d'une table ronde. Je vous remercie d'avance pour votre présence, vos questions et interventions, vos idées, pour que *in fine* nous puissions d'une part mettre à jour le document qui vous est proposé, d'autre part mettre en place des actions de recherche qui puissent répondre aux préoccupations des pouvoirs publics et de la société. Je tiens aussi, en introduisant ces journées, à remercier l'ensemble des organisateurs tant au sein du ministère qu'au sein des membres du GIP HydrOsystemes, pour la préparation de ces deux journées.

Je passe la parole à Thierry POINTET qui animera le début de matinée.

M. Thierry Pointet

Merci. Je dirai juste deux mots pour situer la dimension scientifique de nos travaux.

En premier, il faut noter que les crues et les inondations sont des phénomènes intégrateurs de beaucoup d'autres. On a souvent tendance à partialiser ces autres phénomènes, à ne les traiter que par des aspects singuliers, les plus marquants ou les plus faciles à saisir. Ceci conduit généralement à avoir un raisonnement limité, qui n'entre pas dans le fond des choses. Un des soucis qui nous ont donc guidés dans la préparation de ces journées est la collaboration scientifique entre les organismes, de manière à atteindre une masse critique vis à vis d'un sujet qu'on ne peut traiter ni simplement ni rapidement. Autrement dit, les enjeux nécessitent une collaboration au niveau national entre les organismes de recherche.

Ensuite, on se trouve en présence à la fois d'une demande sociale et d'une offre de recherche ; ceci a été rappelé par Benoît LESAFFRE. Il est essentiel de bien synchroniser les deux, et donc l'action des organismes de recherche avec l'action des services de l'État, en appui à la politique nationale.

Sommairement, on attend de ce travail trois choses :

- un examen des méthodes : lever toutes les ambiguïtés sur des facettes mal connues, mal saisies ou que l'on ne sait pas encore traiter, faire connaître les méthodes qui existent déjà, développer celles dont on a encore besoin ;
- un examen des compétences et de comment les mobiliser ;
- un examen distinguant deux démarches : la démarche empirique et la démarche analytique. Examiner partiellement et sommairement un phénomène, observer des relations de cause à effet entre quelque chose que l'on observe sur le terrain et un phénomène d'intérêt, c'est une démarche empirique. On souhaiterait s'orienter plutôt vers une démarche analytique, à savoir comprendre, mesurer, utiliser des modèles pour pouvoir analyser chaque facteur et en saisir l'importance, et avoir ainsi des moyens de calculer et de mesurer les effets des mesures que l'on se propose de prendre.

Notons que si une crue est un phénomène rapide, tout ce qui la précède est lent. Il est difficile de mesurer ce qui est lent et encore incertain. Et au total la modélisation de phénomènes naturels lents au déclenchement est délicate. Ce point est au coeur des préoccupations des personnes qui ont travaillé sur le document qui vous a été remis.

J'arrête là pour ces aspects. À côté du document dont vous disposez, fruit d'un travail entre organismes, principalement membres du GIP mais pas uniquement, il y a eu un comité scientifique qui a travaillé depuis un an et qui a essayé de tracer et d'établir un canevas, très incomplet, de ce que l'on pourrait inscrire sous le thème de l'aspect des pratiques humaines sur la production et la propagation des crues. Le séminaire d'aujourd'hui devrait contribuer à compléter ce document, et tous les éléments que l'on recueillera à la faveur des questions et de la table ronde de demain abonderont ce texte de façon à le finaliser et à faire quelque chose qui sera plus complet et lisible.

Une autre chose est d'identifier les verrous de connaissance, les points sur lesquels on bute pour analyser les phénomènes qui précèdent les crues et contribuent à leur déclenchement, de manière à identifier les composants d'une action de recherche que l'on pourrait lancer à partir de 1997. Autrement dit, cette séance est bien une séance de travail, qui doit être nourrie par les éléments que vous pourrez apporter.

Quelques cas récents

1. exposé de M. Maxime Ghio, DIREN Centre

Les cas que nous présenterons concernent plutôt le territoire rural, où l'urbanisation est relativement peu développée du point de vue de son influence hydrologique. L'influence humaine est cependant évoquée pratiquement lors de chaque crue, à tort ou à raison, mais bien souvent à tort.

Ce qui frappe dans les réactions des gens, c'est leur méconnaissance des ordres de grandeur tant des volumes et des débits que même des pluies concernant un bassin versant. On peut prendre l'exemple d'une crue de l'Essonne en 1983, où il a été fait mention d'étangs dont on avait lâché les vannes alors qu'il se trouve quelques hectares d'étangs seulement dans un bassin versant de 2000 km². Les personnes se situant à l'aval d'un bassin versant ont du mal à évaluer ce qui a pu tomber en amont.

Considérons le ruissellement. Lorsqu'on fait des projets d'aménagement urbain, on se base souvent sur des pluies décennales, réputées provoquer des crues décennales, et on prend des coefficients de ruissellement de l'ordre de 90 %. Mais la somme de l'écoulement et de l'infiltration, différence entre la pluie et l'évapotranspiration réelle, est quelque chose qui est relativement variable. En matière de rôle hydrologique des bassins versants, il ne faut pas oublier que le sol est un intermédiaire obligé. Il est là, attend qu'il pleuve, éventuellement il refusera l'eau qui va tomber mais peut aussi dans certains cas l'absorber.

Considérons le cas du bassin versant de l'Huisne. Cette rivière provient du département de l'Orne, fait un crochet en Eure-et-Loir à Nogent-le-Rotrou — inondable — puis rejoint la Sarthe au Mans. Ce bassin a présenté des crues importantes depuis la guerre.

Lors de la crue de janvier 1995, le débit a approché 100 m³/s, ce qui n'est pas exceptionnel mais déjà significatif pour un bassin versant de 830 km². Ce qu'il faut savoir, c'est qu'après une fin d'année 1994 déjà pluvieuse, on a eu durant le mois de janvier 1995, plus de 160 mm de pluie. Lorsqu'on compare les volumes tombés et écoulés, on constate que pour quelques 130 millions de m³ de pluie, l'écoulement a atteint environ 50 millions de m³. Malgré les pluies antérieures, il demeure une différence très importante, dans un tel bassin entre les pluies et les débits recueillis. Evidemment on a dans ce bassin versant des nappes importantes, dans les sables cénomaniens et autres. Ceci se voit parfaitement dans l'importance des étiages, qui sont soutenus. Un tel bassin versant, malgré des crues notables, emmagasine beaucoup d'eau et il serait impossible de dire que tout ruisselle.

Ce qui est vrai sur le mois l'est aussi sur des durées plus fines : la pluie maximale journalière représentait l'équivalent d'un débit de 480 m³/s ; le débit journalier maximal écoulé est de 91 m³/s.

On peut reprendre les mêmes évaluations pour plusieurs durées ou sur d'autres bassins versants. Par exemple, sur un petit affluent de la Loire dans le Loiret, au bassin pourtant

moins perméable, le rapport de la pluie décennale journalière à la crue journalière décennale reste de 1 à 3 ou 4. Ceci incite donc à insister sur l'existence d'un potentiel d'augmentation du rendement des pluies sur lequel des actions humaines malencontreuses pourraient jouer.

En ce qui concerne la région Centre, il me paraît remarquable qu'on ne connaît pas très bien les sols. Compte tenu de leur rôle d'intermédiaires obligés de la relation pluie-débit, dans une région à pluviométrie annuelle moyenne modérée, il faudrait étudier les choses et voir quelle est l'influence de l'homme sur les crues via son action sur les sols.

2. exposé de M. Georges Golosof, anciennement à la Direction régionale de l'Équipement d'Ile-de-France

Le risque est conjonction d'un aléa et d'une vulnérabilité : je vais surtout vous parler des vulnérabilités.

Souvent, lorsqu'on parle de crues, on imagine implicitement un fleuve ou une grande rivière avec lit mineur et lit majeur. Mais parmi les catastrophes enregistrées au cours de ces dernières années, il y a beaucoup de configurations topographiques qui diffèrent sensiblement de ce schéma. Je vais vous présenter rapidement une typologie de ces configurations et quelques exemples des processus à l'œuvre en fonction du contexte topographique.

En tête des processus souvent mis en cause se trouve l'urbanisation du lit majeur. D'autres processus sont généralement méconnus, d'autres totalement méconnus, comme la barrière au ruissellement. Il y a des situations particulièrement dangereuses qui sont les situations à risque de divagation. On connaît bien le problème des cônes de déjection en montagne. En piémont on retrouve un phénomène analogue, atténué certes par rapport aux cônes de déjection, mais présentant exactement la même dynamique. Dans les plaines de comblement littoral, par exemple sur tout le littoral de la Méditerranée, on trouve le même phénomène aussi, encore plus atténué mais tout aussi dangereux. Enfin, on trouve quelques cas divers et variés. Au total, on arrive à une vingtaine de types différents en incluant bien sûr le cas classique des inondations par fleuve ou grande rivière.

Cas du Remontalou.

Examinons l'aménagement fait à Chaudes-Aigues sur le Remontalou. À l'aval d'un pont ancien, le Remontalou a été mis en souterrain, avec un rétrécissement entre la section rectangulaire d'entrée et la section ellipsoïdale de sortie, ce qui crée un risque évident d'obstruction. Ensuite, au centre de l'agglomération, se trouve un pont ; en rive droite, la moitié de la section du pont a été consacrée à l'aménagement d'un parking. On retrouve ensuite une section qui est à peu près la section spontanée du lit mineur. Viennent ensuite un pont ancien avec une maçonnerie de moellons, puis un centre de rééducation qui s'étend non seulement sur le lit moyen mais aussi sur la moitié du lit mineur (on manquait de place). En aval, on retrouve un lit presque égal à la section normale, puis un passage busé récent, de 2m de diamètre sur 200m de long.

Lorsque l'on compare la section des ponts anciens à celle de la buse qui termine l'aménagement, on peut évoquer bien sûr le remembrement, la déforestation, la malédiction divine, tout ce que l'on voudra. On peut aussi regarder en face ce qui se passe à l'intérieur de l'agglomération.

Cas de Manduel

Dans l'agglomération de Manduel, dans le Gard, le bassin versant apparaît relativement plan, sans talwegs marqués. L'écoulement s'y produit sous la forme d'un ruissellement en nappe, comme un ruissellement de toiture. L'agglomération a été en effet construite sur un versant, un peu à l'écart du cours d'eau local, le Buffalon, situé au Nord — et provoquant lui des inondations classiques ; telle était la situation en 1975.

Passons à la situation de 1989 : l'urbanisation a réalisé une véritable barrière au ruissellement en nappe, qui conduit à des inondations de 20, 30, 40, 50 cm dans les rez-de-chaussée, dont aucun n'est surélevé. Les rares fossés qui ont été respectés ne suffisent plus à l'évacuation des débits.

Cas de Puy-Cerguier

Un autre type de ruissellement en nappe, plus dangereux, est illustré par le cas de Puy-Cerguier. Cette commune a connu une crue et une inondation catastrophiques au début de l'année 1996. Il n'y a dans le bassin versant de la commune aucun cours d'eau, mais un ruissellement en nappe. Comme le bassin versant est disposé en amphithéâtre, il y a convergence de tous les filets d'écoulement vers le village actuel.

Le vieux village était certes réalisé sur une petite butte. Au Nord immédiat de cette butte, une sorte de gouttière recevait les eaux et les envoyait dans le Savignol (le quartier s'appelle « les horts » — donc les jardins, du latin *Hortus*, ce qui signe son usage non bâti ancien). Mais depuis un siècle la gouttière s'est remplie de constructions, et le village continue de se développer, notamment par la fermeture de la sortie vers le Savignol.

En 1996, il y a eu des dégâts matériels très importants, et deux ou trois morts.

Cas de Montpellier

A Montpellier, on parle beaucoup des crues du Lez et des risques d'inondations qui lui sont liés ; on parle moins du Verdanson, et pas du tout des bassins versants du Sud de la ville. Or voici ce qui s'y passe : un premier bassin versant a été envahi par l'urbanisation, avec mise en souterrain du ruisseau sur d'importants tronçons, comme entre la nationale 113 et la voie ferrée. Un deuxième bassin versant n'était pas encore atteint par l'urbanisation en 1986, sauf dans sa partie amont. En 1996 le ruisseau a presque totalement disparu. Un autre bassin versant, est en passe d'être atteint par l'urbanisation.

Dans la plupart des agglomérations françaises — il y en a des centaines d'exemples — l'urbanisation entraîne donc la disparition des rus et ruisseaux. Les pertes de capacité de débit vont jusqu'à 50% suivant le type de couverture réalisé.

3. exposé de M. Stéphane Cardelli, mission inter-services de l'eau des Alpes-Maritimes

(exposé présenté par M. Étienne LEBLOIS)

L'exposé de Monsieur CARDELLI porte sur le thème de la périurbanisation en région côtière méditerranéenne. Au cœur de cette présentation se trouve le cas de la commune de Vallauris. Ceci rappellera bien sûr ce qui a été dit par Monsieur GOLOSSOF auparavant.

En considérant une carte de la situation de l'urbanisation en 1960, on voit le bourg de Vallauris, paisiblement installé dans son bassin versant. Le bassin comprend plusieurs vallons en confluence, dont les talwegs ont été couverts dans les années 50-70, en raison de nuisances olfactives en période estivale. Les travaux ont été menés en référence à la crue centennale telle qu'on pouvait l'estimer d'après les informations disponibles à l'époque.

Depuis, et durant 30 années, l'extension urbaine s'est faite. Des zones urbanisées ont remplacé les zones agricoles de différents vallons (vallons des Fumades, des Issourda-doux, de Lescure). Simultanément, les débordements des petits cours d'eau de ces vallons sur la voirie et les propriétés privées se sont accrus. Cette évolution est nette, quoiqu'on ne dispose pas d'enregistrements ou de mesures qui permette de la quantifier.

Des précipitations exceptionnelles en octobre 1993 ayant joué un rôle de catalyseur dans la prise en compte du problème, des études récentes ont été réalisées pendant l'été 1996 et ont confirmé son existence.

Comment peut-on envisager de maîtriser un tel aléa de crue aggravé par l'urbanisation ?

Les crues récentes, notamment en juin 1994, ont montré que la formation d'embâcles reste localement le principal phénomène aggravant. Il est difficile de faire la part des avantages ou des inconvénients à cet égard de la présence de végétation dans les lits des rivières. L'impression dominante est que les effets favorables pour les crues de faible ou moyenne importance sont annulés par les embâcles générés au moment des crues extrêmes. Même entretenue, la ripisylve est en région méditerranéenne de relativement mauvaise qualité. Le fait est que la végétation méditerranéenne est ressentie comme un élément de risque, et le nettoyage des cours d'eau paraît une action prioritaire en région Méditerranéenne.

Par ailleurs, l'introduction de mesures compensatoires lors des constructions et des imperméabilisations est devenue systématique dans les Alpes-Maritimes. Plusieurs communes ont introduit cette obligation de leur POS* : on crée donc des bassins d'écrêtement, d'infiltration, on utilise des chaussées réservoirs... Une maîtrise de ce type devrait être mise en oeuvre désormais aussi dans les bassins évoqués auparavant.

Rappelons que la situation particulière de ces bassins versants n'est pas représentative de l'ensemble des Alpes-Maritimes ; hors de la côte urbanisée, les bassins versants sont grands, peu urbanisés, et le facteur prépondérant pour l'analyse des crues est et reste la pluviométrie.

L'influence de l'homme sur la genèse des crues est donc peu évoquée pour le moment dans les Alpes-Maritimes, et reste cantonnée à des cas flagrants de petits bassins versants notamment côtiers.

4. exposé de M. Jacques Lavabre, Cemagref, Groupement d'Aix-en-Provence

Je vais vous parler des crues de la Frayère et du Var, étudiées suite aux événements de 1994. Ce sont deux crues différentes ; la première, qui concerne un tout petit bassin versant de 20 km², est une crue typiquement méditerranéenne de part les pluies qui l'ont générée. La seconde concerne un bassin versant relativement étendu, et est plus une crue d'hiver caractérisée par des pluies de grande extension spatiale.

Crue de la Frayère

Pour la Frayère, en juin 1994, la pluie était selon Météo-France une pluie de panache, forte, mais en rien exceptionnelle. On a pu estimer le débit de la Frayère par différence, son confluent avec la Siagne étant encadré par deux stations hydrométriques. L'ordre de grandeur est de 10 m³/s/km². De telles valeurs sont assez habituelles dans la région.

Je vais vous montrer quelques vues qu'il faut malheureusement projeter lorsqu'on parle des crues : les embâcles et le ralentissement dynamique qu'elles induisent, c'est bien mais ici elles sont localisées dans le lotissement : embâcle de troncs — vous en voyez l'envergure —, de voitures... ceci amène à de l'hydraulique tridimensionnelle, vu le nombre de voitures dans le lotissement.

Evidemment il y a des prescriptions spéciales pour les immeubles soumis aux inondations, selon l'article R111-2. Mais ici l'eau est arrivée jusqu'à la toiture de la maison. On réfléchit aux conditions amont de formation des crues ? très bien ! Ici, on est à l'aval : les parkings souterrains seront inondables, on le sait mais on les construit quand même. Voici une voiture qui s'est arrêtée au plafond du parking... L'école c'est pareil : 200 enfants la fréquentent. Heureusement que la crue s'est produite un dimanche après-midi.

Ici une vue d'Auribeau, prise non pas d'avion mais du vieux village, qui est un peu en hauteur. Vous avez une idée de la zone urbaine touchée lors de la crue : elle est située sur le cône de déjection d'un vallon. Dans le ruisseau, le lendemain, il ne reste que quelques litres d'eau par seconde, mais les laisses de crue se voient sur les maisons au premier étage. Il y a des gens qui s'en sont sortis en montant sur les cheminées. Ici, une maison était vraiment dans le cours d'eau : elle a été détruite... Là, l'eau a débordé et a emporté la route...

Vous la hauteur des bâtiments ? On sait qu'on est dans une nasse, mais on fait quand même des bâtiments de 2 m de haut seulement. C'est un cas d'école la Frayère, qui relève du " Canard Enchaîné ", avec des permis de construire les pieds dans l'eau.

Coût de la crue : 100 millions de francs environ. Malgré cela, l'urbanisation n'a pas été arrêtée, puisque (?) il n'y a pas eu (heureusement) de victimes.

Crue du Var

Une crue du Var a eu lieu en novembre 1994, le bassin versant fait 2800 km². La pluie a duré quatre jours, atteignant un total de 180 mm en quatre jours. Un tel cumul est tout à fait bénin pour la zone méditerranéenne. Ce n'est même pas la plus forte pluie de l'année : en janvier 1994 il avait été observé 200 mm de pluie en quatre jours. Ce qui est étonnant, c'est le débit qui en a résulté : entre 3000 et 3600 m³/s selon les estimations.

Une vue prise vers la pont de La Menta, pratiquement à la pointe de la crue, a permis d'évaluer son débit. Au milieu du seuil, une micro-centrale électrique. Le lendemain, le seuil était quasiment détruit ; au premier plan, l'échelle à poissons, il va falloir qu'ils soient costauds pour l'utiliser... Ces seuils ont été faits il y a une trentaine d'années pour stabiliser le lit du Var. Cependant on a du mal à les stabiliser eux-mêmes. Ici le seuil fait un peu plus de 200 mètres de large, il s'agit d'un gros ouvrage : le coût de réparation est estimé à 50 millions et augmente après chaque pluie étant donné que le seuil se dégrade un peu plus à chaque crue.

A chaud, la crue a été déclarée exceptionnelle ; une semaine après elle a été évaluée millennale, sur la base de l'étude hydrologique de quelques pages qui a servi à tout l'aménagement du Var, évalué à plusieurs centaines de millions de travaux.

Un réexamen est en cours, vu les enjeux : la crue a en effet engendré un milliard de francs de dégâts, tant sur l'aéroport que tout au long du Var.

Le problème théorique rencontré sur cette crue c'est que la pluie, considérée localement sur tous les sous bassins, correspond chaque fois à une période de retour comprise entre 5 et 10 ans. Ce qui est assez exceptionnel, c'est l'étendue spatiale de la pluie plus que son cumul local. Et après réexamen, la période de retour de la crue de 1994 serait plutôt de 50-100 ans.

Quant à l'analyse des causes du désastre : rien de perceptible à l'amont, au moins sur le Var. Par contre, la vulnérabilité est extrême à l'aval.

5. exposé de M. Le Bissonnais, INRA Orléans

On va revenir un petit peu dans le Nord, en milieu agricole aussi. Je vais vous parler d'un événement qui s'est déroulé au cours de l'hiver 1994-1995 sur des petits bassins versants agricoles, dans le Pays de Caux. Il s'y trouve deux petits bassins sur lesquels on a quelques mesures.

Le contexte est celui de systèmes de production agricoles intensifs sur sols limoneux très instables. Ce caractère sera le principal facteur à l'origine des ruissellements. Les pluies sont plutôt de faible intensité par rapport au milieu méditerranéen ; les pentes sont égale-

ment faibles. Les événements de ruissellement importants se produisent à la fois en hiver, suite à des périodes pluvieuses, et au printemps, au cours d'orages très courts.

Quand on observe les sols de cette région et de toute la bande côtière au nord-ouest du bassin parisien, on trouve qu'après le travail du sol la structure du sol est bonne, le sol perméable, avec de bonnes capacités d'infiltration a priori. Quelques dizaines de millimètres de pluie après, malgré sa faible intensité (90 % des pluies de la région ont une intensité inférieure à 10 mm/h), la surface se ferme et il se forme des croûtes de battance à l'échelle de la parcelle. Au cours d'un épisode pluvieux, l'eau commence à ruisseler sur les parcelles dont la pente dépasse 1% et se concentre progressivement. L'écoulement d'abord diffus se rassemble le long des lignes de travail du sol ou de traces de roues. Les filets se creusent progressivement, se rejoignent en limite de parcelle en particulier le long des fourrières (les dernières lignes de travail du sol). À la limite des parcelles, on observe la concentration de l'ensemble.

Suivons un événement tel qu'il s'en est produit une vingtaine au cours de l'hiver 1995 (environ 15 mm de pluie avec des intensités moyennes de 5 mm/h). Les mesures ont été réalisées le 15 février 1995 sur deux petits bassins versants

- un bassin de 250 hectares environ, cultivé à peu près à 50 % de sa surface, avec encore une proportion importante de bois et de prairies, en particulier dans le talweg ;

- un autre bassin d'une centaine d'hectares, cultivé lui à 90 % (et donc l'ensemble de la surface du bassin y est constitué d'un sol tel que décrit précédemment). Toutes les parcelles sont pratiquement connexes, et le ruissellement se propage sans obstacles sur l'ensemble du bassin versant.

Le bassin versant le moins intensément cultivé a reçu ce jour-là une hauteur de pluie de 13 mm. Le coefficient de ruissellement a valu 5 % environ, c'est la valeur la plus élevée enregistrée sur ce bassin. Le ruissellement a démarré assez tardivement avec un temps de réponse d'une heure environ.

Sur le second bassin, entièrement cultivé, le début de ruissellement se produit dès les premières gouttes de pluie, avec une intensité de l'ordre du millimètre par heure, un coefficient de ruissellement de l'ordre de 36 % pour une hauteur de pluie totale de 12 mm et des intensités moyennes de 3-4 mm/heure. On voit là un des effets de la mise en culture.

Si on applique des modèles d'écoulement sur ces bassins versants, on peut bien localiser l'origine du ruissellement : ce sont les parcelles cultivées en blé d'hiver qui le génèrent ; les circulations d'eau vers l'exutoire du bassin empruntent ensuite les talwegs habituellement secs. Pour le petit bassin versant intensément cultivé, il y a pratiquement connexité complète de toutes les zones ruisselantes et une liaison directe à l'aval. Dans le cas du bassin le moins cultivé, par contre, les parcelles ruisselantes sont essentiellement à la périphérie du bassin versant et le ruissellement doit traverser, pour rejoindre l'exutoire, un territoire formé de prairies ou de bois où se produit un piégeage important de l'eau de ruissellement. Ceci explique le coefficient de ruissellement beaucoup plus faible et le temps de réponse plus long.

Après, l'écoulement arrive sur la route : il y a très peu d'aménagements et de fossés, donc l'eau et les matières érodées rejoignent les voies de circulation, et s'écoulent plus bas dans la vallée, où se trouvent les villages.

C'est pour cela que j'avais mis le terme « crue » entre guillemets dans mon titre, ce n'est pas de l'hydrologie de grands fleuves, mais du ruissellement sur des surfaces agricoles. Ce ruissellement rejoint quand même les fleuves côtiers qui font de l'ordre d'une dizaine, une vingtaine de kilomètres de long.

Pour résumer les principaux facteurs d'influences humaines sur le ruissellement des sols : à l'échelle de la parcelle agricole, évidemment, c'est le travail du sol et la couverture végétale ; les surfaces qui ruissellent sont des surfaces couvertes en principe, mais très peu en fait, par des céréales d'hiver. Elles représentent 50 % peut-être de la surface cultivée de ces bassins, et il n'y a pas grand chose à espérer à ce niveau là. On peut travailler le sol de manière plus grossière mais de toute façon il y a des limites au niveau du contact plante-semence-sol.

C'est plutôt à l'échelle de l'aménagement des petits bassins versants élémentaires que l'on pourrait agir, au niveau de la répartition de l'occupation du sol et surtout en s'intéressant aux seuils de pourcentage de surface des bassins versants cultivés au-delà desquels se produit presque systématiquement une connexion du ruissellement vers l'aval et un coefficient de ruissellement aggravé à l'échelle de ces petits bassins.

Une mesure relativement simple, envisageable dans le cadre des pratiques agri-environnementales, est l'installation de bandes enherbées le long des chemins d'eau et des chemins de concentration du ruissellement. De toute façon, la fragilité des sols fait qu'une certaine quantité d'eau y arrive ; ces bandes enherbées pourront ralentir le ruissellement, en infiltrer une partie et surtout piéger les particules solides transportées.

Commentaire de M. Thierry Pointet

Nous sommes ici à l'amont du phénomène : nous observons les paramètres qui sont générateurs des crues. Je retiens comme un facteur important l'aptitude des milieux naturels à séquestrer ou du moins différer temporairement les ruissellements, donc leur aptitude à redistribuer les écoulements non pas totalement vers le ruissellement mais aussi vers l'infiltration : c'est certainement un des facteurs sur lesquels on pourra jouer ; ce genre d'axes de réflexion pourrait être un fil conducteur pour faire une sorte de gestion active des écoulements.

6. Exposé de M. Gérard Maire, CNRS, CEREG

Je présenterai la crue de 1983 sur la Moselle. À Epinal, le module de la rivière est de 37 m³/s, le débit de crue décennal est estimé à 600 m³/s et le débit de crue centennal à 900 m³/s, ceci d'après des études déjà anciennes. Avec 740 m³/s en débit de pointe, la crue d'avril 1983 était environ trentennale.

La partie étudiée est le piémont de la vallée, à l'aval de la zone de formation de production de l'écoulement. Je vais restreindre mon exposé à un site qui se trouve dans les environs de Flavigny. Le Canal de l'Est, qui franchit la Moselle par un pont-canal avec dix grosses piles, n'intervient pas ici. À l'aval du pont-canal, se trouve un espace d'environ 1 km². À partir de l'analyse de ce qui se passe dans cet espace on peut reconstituer un certain nombre de phénomènes de crues et poser quelques questions plus générales.

Géomorphologue de formation et hydrologue par vocation, je suis parti du phénomène suivant : à la suite des crues de 1983, j'ai constaté sur ce secteur l'existence d'une forme bizarre, creuse, une énorme ravine de lit majeur faisant environ 200 mètres de long et 3 à 4 mètres de profondeur. Cette ravine, à sec après les crues, débouchait sur une gravière. Je me suis donc posé le problème de l'origine de cette forme.

On peut reconstituer la situation en début de crue de la façon suivante. Un canal permet une réalimentation du Canal de l'Est à cet endroit. Un autre canal ancien, ayant alimenté un moulin, sert dans la disposition actuelle de trop-plein au canal de réalimentation.

Lorsque la crue commence à provoquer des débordements, ceux-ci se produisent juste à l'aval du franchissement du pont-canal. Ils remplissent d'abord d'anciennes gravières ; celles-ci sont entourées de digues : elles se remplissent et c'est tout ce qui se passe.

Par contre, à partir de l'ancien canal du moulin, le surplus d'eau du canal de réalimentation circule et déborde à différents endroits. Il remplit une gravière secondaire précédemment à sec, et déborde également en d'autres endroits de l'ancien lit majeur de la Moselle, préférentiellement sur d'anciens cours. Ces débordements sont contenus par le tracé d'une de chemins ruraux légèrement surélevés. Peu à peu, l'ensemble de ce casier se remplit d'eau.

Dans la gravière principale, l'eau est toujours à un niveau bas. L'eau est haute dans le lit de la Moselle et basse dans la gravière parce que la nappe phréatique n'a pas encore réagi. Les eaux de débordement sont donc contenues par le chemin légèrement surélevé. Au bout d'un moment les eaux de débordement, qui ont rempli le casier, passent par-dessus le chemin rural et débordent dans la gravière, amorçant la création de la forme que nous avons vue au départ, et surtout produisant un gros tourbillon qui ameuse progressivement la bande de séparation des eaux entre Moselle et gravière. Cette bande finit par être percée. Comme le remplissage de la gravière a été relativement lent, la différence de niveau est restée notable. À ce moment-là, il y a un déversement brutal de la rivière dans la gravière. Le niveau des eaux s'égalise alors très vite entre la Moselle et la gravière.

La forme dont je vous ai parlée au début, et qui était à l'origine de cette enquête à la Sherlock Holmes, montre qu'il y a eu une succession d'événements qui se sont produits entre le lit majeur, le lit mineur et le niveau de la nappe phréatique. Quelles conclusions en tirer ?

Les conclusions sont qu'en phase de montée de la crue, il faut noter l'importance déterminante de conditions très locales, d'ordre hydrogéologique, hydraulique et topographique. Dans ce contexte on doit noter l'importance des structures de nature anthropiques, qu'il s'agisse de digues, chemins, gravières ou canaux, qui toutes jouent un rôle dans la façon dont la crue se développe en phase de montée de crue. On doit également noter la diversité des processus et des rythmes de montée des eaux et de submersion dans les diffé-

rents espaces concernés que ce soit le lit mineur, le lit majeur ou les chenaux de crue, les casiers d'inondation, etc. Tous ces processus jouent aussi un rôle important pour la nappe phréatique dont le rôle, dans le rythme de montée, est décalé et d'ampleur moindre.

Toutes ces caractéristiques sont-elles vraiment des caractéristiques locales ? Certes on observe le long d'une rivière du type de la Moselle — dont le bassin versant fait là 1300 km² — une succession de situations locales. Mais ces situations se retrouvant très fréquemment, avec des variantes, on ne peut pas minimiser leur importance globale.

Pour l'exemple des gravières de la Moselle : il y a des gravières un peu partout, il y en avait beaucoup en 1985, et depuis elles ont crû et embelli. À chaque point du cours d'eau, des processus analogues à ceux que je vous ai expliqués sont susceptibles de se reproduire.

Dans ce cadre-là, ce qui est conçu comme local devient général, et comme en chaque point les processus de crue intègrent l'ensemble des processus du bassin versant du cours amont, je crois qu'il faut réfléchir vraiment au fameux adage selon lequel les petits ruisseaux font les grandes rivières, et en prendre toute la dimension.

7. Exposé de M. Ripoché, secrétaire de l'Entente interdépartementale de l'Oise, agence de l'Eau en Seine-Normandie

(exposé présenté par M. Étienne Leblois)

“ Les dernières crues dans le bassin de l'Oise ”.

Les crues du bassin de l'Oise sont essentiellement des crues de plaines, puissantes, de dynamique relativement lente (c'est uniquement sur les secteurs les plus à l'amont, où il y a des terrains plus imperméables et plus pentus, que les crues peuvent se rapprocher de crues qu'on appellerait torrentielles). Les inondations subies par l'Oise en décembre 1993 et en janvier 1995 ont été des crues d'hiver, particulièrement importantes, et aussi un peu différentes l'une de l'autre.

La crue de décembre 1993 a été généralisée sur l'ensemble du bassin de l'Oise, avec dépassement systématique des hauteurs d'eau enregistrées auparavant, de l'ordre de 20 à 30 centimètres en tous les points. Les précédentes crues inondantes remontant à plus de vingt ans, cette crue a pris la plupart des personnes et des services par surprise, intervenant de surcroît en période des congés de Noël (presque un axiome de l'hydrologie opérationnelle).

La crue de janvier 1995 se caractérise elle par la concomitance des crues de l'Aisne et de l'Oise. Par ailleurs la crue de la Seine limitait, à l'aval, les écoulements de la rivière. De ceci provient que par rapport à 1993, les hauteurs d'eau observées ont été inférieures de 20 centimètres à l'amont de la confluence entre les deux rivières Oise et Aisne ; par contre, en aval de la confluence de l'Oise et de l'Aisne on a observé des hauteurs d'eau encore plus haute qu'en 1993, de 10, 20, voire 30 centimètres, avec des dégâts particulièrement importants là en raison du développement de l'urbanisation dans ce territoire.

Cette deuxième crue a entraîné des dommages moindres que celle de 1993. Pourquoi ? Parce qu'en 1995, la crue a été moins une surprise : un effet de mémoire a joué vis-à-vis des personnes et des services, chacun a réagi plus tôt et plus efficacement. Il y a donc un phénomène de mémoire des crues, notamment des événements récents, dont il faut tenir compte.

Illustrons un autre aspect de cette " mémoire des crues ". En amont de l'Oise se trouve une commune, Guise, régulièrement soumise à des inondations. Le développement de l'urbanisation, y compris dans ces trente dernières années, s'y est fait en dehors des zones inondables, par le fait que la mémoire des crues est constamment réactivée par les événements qui se succèdent.

A l'inverse, dans la partie de l'Oise à l'aval de Compiègne, le développement s'est effectué essentiellement en zone inondable. La dimension inondation semble avoir été oubliée, d'où les impacts très importants des crues de 1993 et 1995. Pourquoi la dimension inondation n'a-t-elle pas été suffisamment prise en compte ? Est-ce que la faible mémoire de l'inondation a fait négliger ce critère de constructibilité ? Ceux qui ont pu soulever cette question ont-ils été entendus face à la pression de l'urbanisation, aux enjeux économiques ? Est-ce que c'est simplement le fruit d'un optimisme illusoire considérant que la technique peut tout résoudre, qu'il y aura toujours moyen d'assurer la protection nécessaire ? Mais la technique ne permettra pas de se sortir de toutes les situations dans lesquelles on peut se mettre...

Il est certain qu'il est particulièrement difficile de bien prendre en compte et de faire prendre en compte des phénomènes qui sont structurellement aléatoires. C'est très clair notamment dans les zones où le vécu des inondations est faible. Il y a une certaine culture de l'inondation qui joue sur la manière dont les gens réagissent.

Un autre aspect des dernières inondations que l'on peut évoquer, c'est la remise en cause des projets d'urbanisation qui s'avèrent maintenant être prévus en zones inondables. Les conséquences pour les communes peuvent être très fortes, notamment au point de vue financier. Ainsi, on peut citer la commune de la Croix-Saint-Ouen, à proximité de Compiègne, dont toutes les zones d'expansion envisagées dans les dernières années se trouvent être en zones inondables : elles sont donc a priori inconstructibles ; si une telle disposition est confirmée dans le plan de protection contre les risques, toutes les prévisions d'évolution du budget communal seront remises en cause.

On peut donc évoquer les règles de la fiscalité qui poussent les communes à construire dans leurs limites administratives pour obtenir un retour financier et limiter ainsi les impôts locaux des habitants. La logique de la rivière ne s'encombre pas des limites administratives. À l'inverse, le développement de zones d'expansion des crues sur cette commune, coïncée pour son propre développement économique, pourrait être bénéfique pour limiter les risques sur d'autres communes susceptibles elles de créer des activités. Comment la commune accueillant en quelque sorte l'aléa hydrologique pourrait-elle en avoir un retour (en espèces sonnantes et trébuchantes), par exemple dans le cadre de l'intercommunalité ? Voilà quelques réflexions rapides au regard des dernières crues sur la Vallée de l'Oise.

Débat suite à l'exposé de Mme Auzet

(L'exposé de Mme Anne-Véronique Auzet est à trouver dans la première partie du présent document, au chapitre 2)

8. intervention de Mme Claude Cosandey, géographe, CNRS

A l'échelle de la France, dans tous les milieux bien couverts par la végétation, l'infiltration est hors des zones saturées le processus hydrologique dominant. Le ruissellement hortonien qui n'existe pratiquement pas en milieu naturel apparaît à partir du moment où le sol est mis à nu d'une manière ou d'une autre. L'opposition fondamentale paraît donc être celle existant entre un sol nu et un sol couvert par la végétation, les sols couverts par la végétation ne sont pas très différents suivants les types de végétation. L'action de l'homme intervient donc essentiellement par la façon dont elle met le sol à nu, que ce soit pour les cultures ou par des travaux forestiers. À partir de ce moment là — et à ce moment là seulement — les types de culture, les types de processus prennent énormément d'importance. Mais si l'on réfléchit aux rôles des activités humaines, c'est d'abord en raison de leur effet dans la disparition de la couverture végétale.

Mme Anne Véronique Auzet

C'est une remarque à laquelle je souscris. C'est d'abord au niveau des sols nus ou urbanisés que se pose le problème.

M. Thierry Pointet

Un travail allemand, effectué il y a quelques années, a bien mis en évidence les aptitudes des différents milieux à non pas séquestrer mais retenir temporairement de l'eau, qu'elle soit destinée à ruisseler ou à s'infiltrer. Il y a des distinctions entre les différents types de couvert végétal, avec ou sans présence de débris végétaux, autrement dit des sols cultivés, entretenus ou au contraire des sols très naturels, des couverts forestiers, des couverts de type arbustif ou de type herbacé. Ce paramètre est variable et il est probable qu'en jouant sur la nature du couvert végétal, on doit pouvoir le moduler et l'ajuster aux besoins.

9. intervention de M. Goubet, Président du Comité technique permanent des barrages

Je suis surpris de ne jamais avoir entendu parler du vent ce matin. Le vent conduit à une sous-estimation des précipitations enregistrées par le pluviomètres pouvant aller jusqu'à 40%. Lorsqu'on a des pluies comme celles de janvier 1995, accompagnées en moyenne de vents forts, les chiffres des publications météorologiques sont vraisemblablement sous-estimés. Lorsqu'on fait des ratios comme ceux qui nous ont été présentés ce matin à différentes reprises entre le nombre de millimètres tombés et le nombre de millimètres écoulés ou infiltrés, on s'aperçoit souvent que l'indétermination sur le nombre de millimètres tombés peut modifier les conclusions quantitatives que l'on est conduit à tirer de la simple comparaison pluie-débit — certes sans bouleverser les conclusions.

M. Thierry Pointet.

Pour le calage des modèles c'est un paramètre qu'il faut évidemment veiller à ajuster.

Anne-Véronique Auzet.

Je pensais avoir parlé du vent, peut être pas de façon assez explicite. La direction des vents surtout a un rôle très important. L'effet du relief s'exprime aussi par la position du relief par rapport aux flux dominants. Un travail fait sur un petit bassin versant vosgien a comparé les pluies mesurées par un pluviomètre parallèle au versant à celles mesurées par un pluviomètre horizontal, la position classique. Le rapport entre les deux mesures va jusqu'à 2 pour le versant le plus exposé au vent moyen.

10. intervention de M. Dunglas, Conseil général du génie rural des eaux et des forêts.

A propos de l'exemple de l'Oregon : a-t-on une idée de la topographie locale et des modes d'exploitation de la forêt ? Il y a en effet plusieurs types d'exploitation forestière selon que l'on coupe la forêt par surfaces extrêmement importantes ou si on exploite la forêt, comme on commence à le faire maintenant d'une manière assez systématique en France, avec la technique dite de " forêt jardinée " dans laquelle on choisit les arbres. D'autre part, en zone plate, l'influence de la manière dont on exploite la forêt doit être relativement différente de ce qui se passe avec une zone montueuse comme l'Oregon.

Je rappellerai également qu'actuellement la couverture forestière en France augmente en moyenne de 70 000 hectares par an. Le taux de couverture dépasse sensiblement les 25% actuellement, alors qu'à l'époque de la révolution, il y a 200 ans, il était de 18%.

Deuxième point, à propos de la modélisation des crues et des SIG et MNT : à l'heure actuelle on se heurte à la difficulté d'avoir une topographie précise, centimétrique, des lits mineurs et majeurs, pour pouvoir évaluer l'écoulement hydraulique des crues. Or il est

fondamental de pouvoir assigner des limites précises aux crues, en raison des implications pour les P.P.R. et les autorisations d'urbanisation. La mise au point de la topographie requise représente des coûts tout à fait considérables. Une topographie en cours dans toute la vallée de l'Aisne et la vallée de l'Oise se chiffre par millions de francs, on ne peut la remplacer ni par des cartes au 25000^e de l'I.G.N. ni par leurs équivalents numériques.

Troisième point, s'adressant à Monsieur Le Bissonnais. Les diapositives qu'il nous a passées sont passionnantes et significatives ; dans des terrains limoneux de ce genre, et d'une façon plus générale dans la plupart des terrains, le sens du travail du sol a une influence évidente, selon qu'il soit le long des plus grandes pentes ou le long des lignes de niveau ; ensuite l'influence de la teneur en matières organiques du sol a de l'importance. Y a-t-il des progrès à attendre dans cette direction, étant entendu qu'avec les machines agricoles actuelles le travail le long des lignes de niveau est extrêmement difficile ? Peut-on essayer d'améliorer les choses en augmentant la teneur des sols en humus, en quelque sorte ?

Mme Anne-Véronique Auzet.

Sur la gestion forestière : l'article de Grant et Jones, citant l'Oregon, m'a servi pour dire qu'il y a plusieurs types de gestion et qu'on ne pas simplement opposer forêt et prairie par exemple. Quant aux travaux allemands qui donnent des paramètres pour différents types de couvert ou différents états, mais toujours sur certains types de sol : la dynamique des états de surface me fait me méfier de toute valeur globale en matière de genèse des crues, parce qu'une crue arrive toujours à un moment particulier par rapport à cette dynamique ; prendre un paramètre global conduit en fait à des erreurs manifestes.

Toutes les personnes qui utilisent des MNT confirmeront que leur qualité et l'art de les exploiter au mieux sont des problèmes majeurs. Au niveau de la recherche, ce sont des pistes toujours ouvertes. Maintenant, par rapport à la reconnaissance des lits majeurs, on peut peut-être aussi disposer d'un MNT générique et le compléter par un repérage manuel sur le terrain, par une personne capable de le faire, cela coûte peut-être bien moins cher et on est aussi bien plus sûr de ce que l'on fait.

Yves Le Bissonnais.

On a parlé de sol nu et de sol couvert tout à l'heure. En fait des sols qui ruissellent peuvent être prétendument « couverts », typiquement par des céréales d'hiver. Certains sols réellement « nus », labourés ou d'inter-culture, peuvent avoir une bien meilleure détention superficielle du fait de leur rugosité. Il faut donc se méfier des classifications « nu », « couvert ».

En résumé sur les pratiques agricoles : les terres labourées vont ruisseler, former des croûtes de battance si les sols sont très sensibles ; les prairies permanentes seront les principaux lieux de pénétration de l'eau dans le sol. C'est l'existence de ces prairies permanentes dans les zones sensibles (ruptures de pente), au moins pour certain pourcentage du bassin, qui modère les conséquences aval de ces ruissellements. Les ruissellements ont toujours existé, mais étaient autrefois plus faibles en raison de l'existence des prairies, zones tampon réparties un peu partout dans le paysage. Souvent, l'évolution de l'occupation du sol et la destruction des prairies s'est faite petit à petit et on ne s'est pas aperçu des conséquences jusqu'à avoir un ruissellement important en rigoles.

Pour le sens du travail du sol : le travail en courbe de niveau comme le pratiquent les Américains n'est pratiquement pas envisageable chez nous ; c'est valable pour de très grands versants, au sein de très grands parcellaires. La plupart des parcelles chez nous sont travaillées le long de la plus grande dimension de la parcelle. D'autre part les versants sont assez complexes et recouvrent en général plusieurs pentes ce qui fait qu'on a toujours un endroit dans la parcelle où l'eau va finir par se concentrer.

On peut limiter une partie du ruissellement en augmentant la rugosité, mais c'est en compétition avec d'autres critères agronomiques. Quant à la matière organique : elle a un effet positif vis-à-vis de la stabilité structurale du sol, mais la plupart des sols cultivés en France ont des teneurs en matière organique très faibles et qu'on a peu d'espoir de remonter ; la marge de manoeuvre est très limitée là-dessus ; les sols les plus résistants, du fait d'une teneur en matière organique plus élevée, sont les prairies récemment retournées.

Anne-Véronique Auzet.

A la réflexion sur les types de couvert, s'ajoute celle sur leur localisation : Papy et Douyer, à partir du recensement de 30 années de catastrophes à partir de la presse locale, ont essayé de voir comment ces catastrophes pouvaient être expliquées climatiquement. Certaines n'avaient pas d'explication climatique. En comparant les données à celles des recensements agricoles, on a constaté que les catastrophes pouvaient être partiellement associées à une descente de la surface en herbe en-dessous d'un certain seuil. L'existence d'un seuil signifie que la localisation de la prairie a de l'importance. Les travaux effectués dans le pays de Caux par Jean-François Vruy vont dans ce sens : il est hors de question de remettre toute cette zone en prairie mais peut-être qu'en mettant des prairies à certains endroits privilégiés, on résoudra le problème de l'interconnexion entre zones à risque, que ce soient des cours d'eau ou autres.

Une étude anglaise a examiné deux bassins versants similaires débouchant dans un réservoir. Un des bassins était presque entièrement cultivé, l'autre pratiquement en prairie. Le réservoir s'envasait et l'hypothèse faite était que le principal apport venait des zones cultivées. La réalité était inverse : dans le bassin cultivé il y avait une bande enherbée de quelques mètres autour du talweg, car les gens ne se risquaient pas avec les machines à cet endroit là. Cet endroit abandonné suffisait à filtrer et à retenir une partie importante des sédiments, peut-être pas l'eau. Dans l'autre bassin les animaux venant s'abreuver au cours d'eau faisaient une connexion extrêmement efficace entre les surfaces amont et la rivière. Je pense qu'il faut être assez attentif à ces questions de connections.

11. intervention de M. Fernand Berthier, BRGM

Un point paraît implicitement pris en compte sans jamais être exprimé totalement : le transport solide. Il a un fort impact, semble-t-il. Est-il bien étudié ? Pour un même bassin versant, selon le taux d'ablation, les modifications du réseau hydrographique seront différentes. On peut disposer d'une topographie extrêmement précise, mais n'est-elle pas illusoire, du fait de la quantité de matériaux transportés et déposés, qui vont changer cote et profils du cours d'eau ?

Anne-Véronique Auzet.

Il y a un peu deux communautés scientifiques différentes, travaillant l'une sur l'érosion, l'autre sur l'eau. Ceux qui travaillent sur l'érosion ont à connaître de l'hydrologie mais il n'y a pas de travaux sur l'effet du transport solide sur la crue elle-même, bien que la dynamique du lit lui-même ait une influence sur la crue qui se voit très clairement dans le domaine agraire. Les personnes qui travaillent sur l'hydrologie et celles qui travaillent sur l'érosion, si elles commencent à avoir des contacts, restent assez séparées.

12. intervention de M. Francis Desgardin, CERTU

Je n'ai pas beaucoup entendu parler de la prise en compte de l'influence du drainage. Ce que j'ai pu en lire jusqu'à présent était des réflexions sur les effets du drainage sur les sols eux-mêmes. Or j'ai assisté en Lorraine, dans la décennie 1980-1990, à l'explosion du drainage sur le plateau de part et d'autre de la vallée de la Moselle. Le drainage entraîne surtout un changement d'exploitation. On passe de prairies permanentes, bocagères même, à des labours qui laissent le sol nu et souvent tassé parce que ce drainage permet de cultiver du maïs fourrage. Au mois de novembre le sol est nu et tassé ; Mme Auzet a parlé de l'effet de la structure des sols et M. Le Bissonnais vient d'insister. Voilà peut-être un effet majeur du drainage.

On voit aussi réapparaître des ruisseaux qui avaient disparu au XIXe siècle. Au XVIIIe la Lorraine était une région de production céréalière, ensuite elle est passée à la prairie, et est ensuite devenue une région fromagère jusqu'au début du XXe siècle... Maintenant on est repassé aux céréales et on constate une augmentation du ruissellement, effet indirect mais très important du drainage.

Par ailleurs, sur le tronçon de la Moselle dont a parlé Gérard Maire, entre Toul et Epinal, on a assisté entre 1950 et 1980 à un encaissement artificiel du lit, essentiellement par extraction de graviers du lit mineur. Cet encaissement était voulu, suite aux inondations de 1947, pour limiter les inondations ; sur soixante-dix kilomètres l'abaissement représente en moyenne un mètre avec des pics allant localement jusqu'à trois ou cinq mètres. Le temps de propagation des crues entre Toul et Epinal s'est réduit de 24 à 16 heures, au moins pour les crues petites et moyennes. On peut penser que le débit maximum de ces crues petites et moyennes s'est accru parallèlement, mais là je n'ai pas d'éléments d'information.

13. intervention de M. Jean-Michel Grésillon, université de Bordeaux

J'aimerais revenir sur les problèmes de processus. Je crains en effet que l'on exagère un petit peu le problème de la contribution par zone saturée. Lorsqu'un sol est dénudé il y a un effet d'accélération : les vitesses augmentent, les temps de concentration diminuent et aboutit à des crues dont les débits sont multipliés par un facteur qui serait de l'ordre de 10 tout simplement parce qu'on a réduit les temps de transfert.

Il faut absolument faire la distinction entre les zones couvertes de végétation, dans lesquelles les mécanismes sont plutôt des mécanismes à surface saturée prépondérants, et les zones dénudées qui seront des zones à mécanisme de ruissellement. Plutôt que d'opposer ruissellement hortonien et sur zone saturée, il faut dire ruissellement sur zone imperméable : on a là des accélérations catastrophiques, comme dans les zones urbaines aux temps de transfert très courts.

14. intervention de M. Marc Ehrlich, Laboratoire hydraulique de France

Je voudrais faire une remarque concernant la modélisation. Votre bibliographie concernant le modèle SHE est légèrement périmée, il faudrait éventuellement la revoir en raison de plusieurs applications qui vont plutôt dans le sens de la modélisation bidimensionnelle de phénomènes.

Est-ce qu'on néglige, en l'état actuel des connaissances, l'influence de l'homme sur les changements climatiques ? Je fais référence au réchauffement global et au changement de typologie des pluies qui peuvent, d'après certains chercheurs, devenir plus violentes et plus localisées.

Quant aux " crues éclair " en zones urbaines : n'y a-t-il pas ici un problème de conflit entre les acteurs impliqués dans l'ensemble du phénomène, entre les municipalités et les grands travaux qui sont entrepris dans différentes zones urbaines ?

Mme Anne-Véronique Auzet.

Reprenons dans l'ordre. La question du drainage est très complexe, et la bibliographie ne permet pas de conclusions générales. Dans un certain nombre des cas, le drainage a une action aggravante sur la crue. Pourquoi, dans quel cas précisément, par quels processus ? Cela n'est pas extrêmement précis et j'ai préféré ne pas l'aborder en tant que tel. La question du drainage est réelle, mais souvent abordée d'une manière un peu globale et il faudrait arriver à raisonner à l'échelle des crues. Je n'ai pas dit que le drainage n'avait pas d'effet aggravant mais je n'en sais rien.

Ensuite, mon propos n'était pas d'accroître outre mesure l'importance du ruissellement de saturation. Ce qu'Yves Le Bissonnais a montré, ne l'appelons peut-être pas hortonien.

M. Jean-Michel Grésillon

Je me dis simplement qu'on exagère peut-être un peu en ce moment, par effet de balancier, le concept de surface contributive saturée. Dans la plupart des phénomènes paroxystiques qu'on a pu voir ces dix dernières années, ce phénomène a une part, mais le concept de surface saturée implique celui de stock d'eau, de sol capable de stocker. On a alors un schéma en tête, fondamentalement de progression lente, alors que, en particulier dans les régions méditerranéennes, ces progressions peuvent être extrêmement rapides du fait de

profondeurs de sol parfois très faibles. Si le sol est très peu épais, avec peu de stock, on arrive tout de suite à une surface saturée. C'est donc une surface saturée, mais sa dynamique est telle que c'est finalement presque le même phénomène qu'on appelait avant phénomène hortonien.

15. intervention de M. Daniel Duband, hydroclimatologue, Société hydrotechnique de France

Vous avez montré un cas très intéressant d'étude anglo-saxonne basée sur un échantillon de quelques centaines de cas. Ce serait pas mal que les hydrologues français puissent présenter des résultats basés sur au moins quelques dizaines de cas...

Quant aux intensités de pluie : on mesure parfois des intensités de pluie de plus de 100 mm/h, en particulier dans les régions cévenoles, méditerranéennes, et les Pyrénées orientales : jusqu'à 300 mm en 6 heures ; est-ce qu'alors l'intensité de pluie n'a pas de part prédominante dans le débit de crue, où on retrouve, comme vient de le dire M. Grésillon, la fonction de transfert, la réponse très pointue ?

Que dire des effets de taille des bassins ? On travaille sur des bassins de quelques ares, quelques hectares ... et on y analyse un certain nombre de processus. Jusqu'où peut-on aller en termes d'agrégation pour raisonner sur des surfaces de quelques centaines de kilomètres carrés par exemple ? Intervient encore la géologie : un bassin du plateau de Millevaches ne répond pas de la même façon qu'un bassin, de même surface, du Cantal ou de Haute Ardèche. Les généralisations sont-elles vraiment possibles ou chaque rivière est-elle un cas particulier lié aux intensités de pluie et à sa propre géologie ?

Mme Anne-Véronique Auzet.

Ce dont j'ai parlé concerne principalement des bassins amont de taille relativement élémentaire ; à la limite, il s'agit de processus hydrologiques de versants. En particulier je n'ai pas parlé ici des processus d'échanges qui avaient lieu dans le lit lui-même, notamment les échanges entre nappe et rivière le long du linéaire.

Ce qui est généralisable c'est l'existence des processus. Mais leur distribution, leur organisation dans l'espace, leur part respective ne seront pas du tout la même d'un bassin à l'autre, ni d'un événement climatique à l'autre. Dans les bassins à l'échelle de la gestion, je pense que c'est l'organisation spatiale des processus qui est importante, et la manière pour certains de devenir prépondérants lors des crues, en fonction des types d'événement.

Pour les très fortes intensités de pluie, on ne peut pas appliquer les mêmes raisonnements, et l'influence de l'homme sur la genèse des crues est alors probablement très limitée. Par contre, l'action de l'homme est déterminante quant aux dégâts liés à la crue elle-même, en raison des vulnérabilités en place.

Je voulais revenir à la question des changements climatiques. Je crois tout à fait possible que les distributions de pluie se modifient mais je ne crois pas que nous ayons de séries de données qui puisse permettre de le mettre en évidence.

16. intervention de M. Michel Robert, SRAE, ministère de l'Environnement

Mes questions touchent à l'influence des pratiques culturales. Quelle est l'influence des sols de vignobles ? Il y en a 900 000 hectares en France, les surfaces sont nues et en pente : il y a une contribution certaine à l'érosion ; il y a une contribution à la genèse des crues ?

La seconde question concerne les Cévennes. Bien que ce soit un exemple typique de région où les crues paraissent d'origine climatique, je me souviens d'un article de Grigny et Muxart qui montrent que le changement des pratiques culturales, sur une période longue, a pu avoir un rôle prépondérant.

La troisième question concerne l'extension spatiale qu'on peut donner à l'exemple qui nous a été donné par M. Le Bissonnais au niveau des grandes cultures ?

M. Yves Le Bissonnais.

L'exemple que j'ai présenté est très représentatif de toute la bande nord-ouest du bassin parisien, depuis la vallée de la Seine jusqu'à la frontière belge et encore au-delà et dans le Sud de l'Angleterre. D'autres zones limoneuses en France présentent les mêmes types de phénomènes, parfois en combinaison avec d'autres types d'érosion. C'est le cas en Bretagne : dans cette région typique de ruissellement par zone saturée, il peut y avoir du ruissellement de surface sur les parcelles cultivées par exemple en maïs. D'une manière plus générale, la région du sud-ouest est aussi très sensible à ces phénomènes, ou encore la Bresse, qui a des sols limoneux très ruisselants. D'une manière générale, toutes les régions où l'on observe un accroissement des cultures de printemps ont vu l'apparition des phénomènes de ruissellement plus important sur les sols cultivés du fait de la mise à nu de ces sols pendant de longues périodes, en particulier pendant des périodes humides.

Mme Anne-Véronique Auzet.

Pour le vignoble il existe des résultats montrant clairement l'accroissement du ruissellement lié à la vigne, surtout associé à certaines pratiques de sols nus de la vigne, donc en raison de l'état des surfaces. Au niveau des crues dans les cours d'eau, la question est toujours de savoir comment le ruissellement qui se produit sur les surfaces cultivées en vigne est collecté, et connecté ou pas au réseau hydrographique. Plus l'herbe a disparu, plus les talus, plus les broussailles ont disparu, plus on a de chance qu'il y ait une connexion. Des travaux menés dans le bassin du Roujan semblent montrer que beaucoup de ruissellement né à la parcelle est collecté, mais que sur le collecteur lui-même il y a une réinfiltration.

La question n'est pas simple ; elle mérite réellement d'être posée et fouillée : ce qui se passe à l'échelle de parcelle a-t-il une traduction dans le lit du cours d'eau ? L'exemple de la Bretagne le montrent bien : un article significatif publié par Gascuel et Groscaillot montre comment un ruissellement naît à un endroit du versant peut ne pas parvenir à la base du versant ; il y a moins de ruissellement à la base du versant qu'en haut.

17. Intervention de M. Thierry Pointet

Une ou deux questions portaient sur la contribution du sous-sol, et sur la question des surfaces saturées en faible ou moyenne profondeur. À cet égard il paraîtrait souhaitable d'évaluer les volumes que peuvent mobiliser certains processus : exemple :

Dans des bassins de faible relief, on distingue traditionnellement une zone non saturée surmontant la nappe, zone saturée. Dans la zone non saturée les écoulements sont principalement verticaux, dans la zone saturée ils sont subhorizontaux. Dans la nappe l'effet moteur est une dénivelée, le gradient hydraulique. Dans le non saturé, on a autour des grains des films aqueux. Pour des sols avec une porosité d'environ 20% - pour fixer les idées - et une occupation des vides d'environ 20 %, le volume de sol est occupé à 4 % par l'eau. Quand il pleut, le sol va se garnir, évoluer vers la saturation. Que se passe-t-il alors ?

Tant que la zone reste non saturé, il y avait présence d'air compressible. Ensuite, l'ancienne « zone non saturée » devient non compressible et transmet les pressions. La hauteur contributive se voit augmentée de toute la hauteur de la zone non saturée initiale. Si celle-ci est de 5 mètres, avec une porosité de 20 %, cela constitue un volume d'un million de mètres cubes par kilomètre carré, tout à fait considérable. À partir du moment où la saturation induit continuité hydraulique et augmentation soudaine du gradient, une augmentation de la transmission gravitaire, un débordement et une contribution dans les zones basses à un écoulement de type crue sont possibles et peuvent survenir brutalement. Le système se désaturera ensuite par tarissement gravitaire et on observera une courbe d'atténuation très progressive.

Comment se fait-il que certaines crues demeurent et que certaines zones restent inondées même après l'arrêt complet des pluies ? Le schéma ci-dessus présenté participe peut-être des phénomènes. Parce qu'il va de la particule, via le kilomètre carré, jusqu'au bassin versant, c'est expérimentalement très difficile à vérifier. Si des éléments permettaient d'avaliser ou critiquer cette notion, je serais preneur.

Débat suite à l'exposé de M. Andréassian

(L'exposé de M. Vazken Andréassian est à trouver dans la première partie du présent document, chapitre 3, auquel le lecteur est priée de se reporter).

M. Étienne Leblois

Vazken Andréassian nous a montré qu'il était facile de se tromper ; on voit aussi que l'irrégularité des réalisations du régime hydrologique fait qu'il est particulièrement difficile, de se prononcer sur la réalité ou non, ou l'ordre de grandeur des influences humaines sur le régime des crues. C'est cependant ce que souhaite le Ministère de l'Environnement.

Nous avons maintenant un peu de temps pour aborder cette question : par quels moyens pouvons-nous collectivement, par expérimentation, par modélisation, par recueil d'informations, affirmer ou non l'existence et l'ordre de grandeur de l'influence humaine sur le régime des crues ?

18. Intervention de M. Principi, cadre technique honoraire.

Je pense à une cause d'aggravation des inondations dont on ne parle jamais : les irrigations. Elles imbibent le sol, qui absorbera moins d'eau à la saison des pluies - c'est un premier point. Surtout, ces irrigations consomment de l'eau en été ; elles vont puiser les eaux nécessaires dans des barrages, qui pour faire face à la demande, doivent être remplis en hiver, ce qui diminue d'autant leur efficacité dans la prévention des crues (en plus de cela, l'irrigation crée une surproduction agricole qui sera combattue par des jachères).

Vazken Andréassian.

Je n'ai absolument aucune opinion dans ce domaine. Vous parlez de barrages dont la réserve en eau est utilisée pour l'irrigation. S'il n'y avait pas d'irrigation, ils ne seraient donc pas construits et il n'y aurait pas non plus la plus petite possibilité de les utiliser comme écrêteur de crues. Tout dépend en fait du barrage et de sa gestion. Dernièrement il y a eu un article sur le journal : « construction d'un nouveau barrage pour protéger le bassin parisien des inondations ». L'irrigation dans la vallée de la Seine n'est peut être pas très importante. Les barrages de la Seine assurent le soutien d'étiage en vue de l'adduction d'eau potable, et afin de garder à Paris une allure agréable même en été.

Étienne Leblois

Ce qu'évoque ce débat, c'est que si les processus élémentaires sont relativement bien identifiés, la compréhension de leur organisation dans l'espace et dans le temps, et donc de leur arbitrage de fait, pose des problèmes.

19. Intervention de M. Desgardin, CERTU

Outre les bassins lorrains drainés évoqués ce matin, pensons aux bassins qui ont été déforestés le long de la vallée de la Meuse, dans les côtes de Meuse. Pour étudier la modification de comportement de ces bassins, pas seulement par le drainage mais aussi par le changement de l'exploitation, je voudrais aller dans de monsieur Andréassian, qui est d'utiliser plus intensément les données hydrométriques. En considérant des crues sur des épisodes pluvieux analogues, et suivants des périodes sèches analogues pour s'assurer d'un état des sols à peu près similaire, est-ce qu'on ne pourrait pas aborder la modification de comportement liée à drainage ou déforestation ?

Je rappelle l'intérêt du recensement général de l'agriculture (RGA) qui, comptant par commune et par canton la surface toujours en herbe, peut être un bon indicateur de ces variations d'exploitation du sol.

Vazken Andréassian

C'était effectivement l'esprit de mon dernier transparent ; c'est quelque chose de tout à fait possible et même très intéressant à faire ; les données existent ; la plupart des gestionnaires de ces données n'ont qu'une envie, c'est qu'elles soit utilisées pour le bien de tous.

Par anecdote, une limite du RGA, est qu'il recense les exploitations en fonction de leur commune de domiciliation. De nombreuses exploitations sont parisiennes ; il est difficile de les prendre en compte.

M. Oberlin

Quand on opère comme proposé, on arrive à caractérisation globale des influences, au niveau des observations. Appliqué aux débits ceci aboutit à des régimes hydrologiques. Je crois aussi que c'est important et intéressant, mais il y a tout de même un problème qui est qu'on ne peut pas désagréger ces observations vers les processus amont.

Intervention non identifiée

Je voudrais insister sur le point évoqué par Maxime Ghio, les ordres de grandeur. Quand on fait une étude des conséquences d'un aménagement humain sur une crue, il faut absolument prendre en compte ces ordres de grandeur. Les vieux bilans hydrologiques qui paraissent le B.A.BA sont souvent un bon moyen de voir un petit peu clair. Considérons un parking et un bassin versant de 50 km² : le parking n'y fait pas grand chose.

Ajoutons un mot concernant l'influence des barrages, notamment de soutien d'étiage. Prenons par exemple le bassin de la Doller en amont de Mulhouse. Ce barrage, fait spécialement pour soutenir les étiages, contrôle une surface de bassin versant ridicule, parce qu'il est très en amont du bassin versant. Quand survient une crue, il ne joue qu'un rôle extrêmement faible, qu'il soit plein ou vide au départ. La position des équipements hydrauliques dans le bassin versant est déterminante pour leur rôle dans l'hydrologie de crues.

Intervention non identifiée

Je voulais rappeler que la banque HYDRO a des renseignements parfois extrapolés, les services n'ayant pas toujours pu mesurer les débits maximaux. Il faut penser à un cet aspect de critique des données avant de se lancer dans des analyses de tendance.

Étienne Leblois

Beaucoup de personnes avaient des idées ce matin, sur les processus. Sommes-nous moins à l'aise quant à la manière dont nous pourrions répondre effectivement aux questions posées ?

Est-ce qu'une expérimentation physique en France paraît réalisable ?

Est-ce que la documentation particulière de quelques bassins versants, tenant compte de ce qui a déjà été observé, mais en intensifiant les mesures sur une période de quelques années à venir paraît imaginable, réalisable, utile ?

Est-ce que l'exploitation a posteriori, sur chroniques enregistrés, avec tout le soutien des ministères et organismes qui gèrent les différentes banques de données, suffirait pour répondre aux questions, à savoir classer les influences humaines, les hiérarchiser et proposer des stratégies de gestion ?

Véronique Auzet

Je voulais réagir à la partie de ton propos concernant l'expérimentation existante. Par rapport à la genèse des crues, les sites expérimentaux existants concernent principalement des hauts bassins. C'est important pour la production mais ne couvre pas l'ensemble du thème crue, notamment tout ce qui se passe dans la zone de transfert, avec intervention des échanges de et vers la rivière et de la dynamique des lits.

20. intervention de Guy Oberlin

Vazken, tu dis qu'aux Etats-Unis sont réalisées des expérimentations ; je suppose que c'est en particulier quand on sait d'avance qu'il y aura tel ou tel problème d'aménagement, et qu'à cette fin les résultats sont publics, publiés, et interprétables. Est-ce que cela a amélioré le débat sur les influences humaines sur les crues ? Ou malgré une expérimentation et des connaissances à priori mieux ordonnées et plus abondantes que chez nous, l'aspect psychosociologique de ces problèmes d'influence est-il resté ?

Vazken Andréassian

C'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Non, les expérimentations ne sont pas forcément faites d'avance. Elles sont faites à la suite d'événements variés, ou pour justifier certains investissements. Pour financer une quelconque expérimentation, un gouvernement a besoin d'avoir une certaine pression.

Dans beaucoup de cas les études avaient pour but d'étudier les bilans hydrologiques, la question étant de savoir comment on pouvait augmenter la ressource en eau utilisable. En Arizona, on voulait savoir si en brûlant une partie du maquis, on pouvait avoir une augmentation de rendement en eau. Il a été ainsi démontré que cela ne satisferait pas la demande et qu'il fallait envisager autre chose. L'investissement en jeu était le CAP (Projet d'Arizona Central), un très grand canal amenant l'eau du Colorado jusqu'à Tucson, en plein désert ; il y avait des enjeux de droit d'eau très importants entre les états d'Arizona et de Californie, qui méritaient bien quelques vérifications préalables. La motivation des expérimentations n'était pas d'abord de répondre à l'opinion publique.

Malgré tout ce qui a été fait au niveau des crues, on tend à voir surgir en France, chaque fois qu'il y a un problème, les mêmes arguments ; et si vous interrogez trois hydrologues différents, ils auront trois modèles différents donnant trois résultats différents. C'est déstabilisant. Avec des données concrètes, on a matière à une argumentation plus satisfaisante. Ce qui ne supprime ni les questions, ni les éventuelles accusations.

21. intervention de M. Daniel Dubant.

Je voudrais savoir de quelles crue vous parlez ? Est ce que ce sont des crues moyennes, inférieures à la crue décennale ? Est ce que ce sont des crues plus rares ? Nous ne sommes pas dans la même situation face à des phénomènes rares que face à des crues moyennes. De quoi s'agit-il ?

Vazken Andréassian

Vous avez tout à fait raison. Pour ce que j'ai présenté, il s'agissait plutôt de crues moyennes. Pour les crues très exceptionnelles, beaucoup de gens s'accordent à penser que l'influence humaine est somme toute comparable à l'influence du parking dans le bassin de 50 km². Tout le problème est que ce qu'il y a de plus démonstratif et de plus pédagogique est de montrer les influences sur les petits bassins versants où sont fait des expérimentations. Pour les grandes crues, on est souvent démuné pour répondre aux questions.

Étienne Leblois

Souvenons-nous de la distinction qu'on peut faire, quant à la réaction d'un bassin versant, entre une fonction de production et une fonction de transfert. Dans la mesure où notre séminaire s'intéresse aux influences humaines, nous les évoquerons surtout quant à des crues relativement médianes. Pour les crues les plus fortes, il y aura saturation de la fonction de production et l'action humaine ne pourra plus être évoquée. Sur les crues extrêmes, l'homme n'aura d'influence que sur la fonction de transfert.

22. Intervention de M. Germain Leynaud, Conseil scientifique du GIP Hydrosystèmes

Nous devrions montrer notre conscience des incertitudes lorsque nous avançons des chiffres : la crue décennale, la crue centennale, etc. : les projeteurs n'hésitent pas à annoncer des chiffres qui sont présentés et qui peuvent tout au moins être interprétés par le public comme étant vérité d'Évangile. Que ceux qui sont conscients de ces incertitudes les affichent : la crue décennale ce n'est pas 3 m³/s, mais 3 m³/s plus ou moins quelque chose d'inconnu et d'assez important ; et plus on va vers des événements exceptionnels, plus ce quelque chose est important. Je crois que c'est une notion importante à faire passer vis-à-vis du public et vis-à-vis des décideurs.

Étienne Leblois

Cette remarque pourrait être le germe d'une conclusion de notre séminaire, la nécessité d'un effort pédagogique. Mais pédagogique vis-à-vis de qui ? et sur quels points ?

Exemple du débit décennal : la notion de « décennal » se rattache à une variable aléatoire ; mais si je mesure différentes choses sur une crue physique (une crue concrète qui s'est déroulée un jour donné), le débit de pointe va avoir telle période de retour, le volume de la crue sur dix jours va avoir une autre période de retour, car il est une réalisation d'une autre variable aléatoire qui répond à une autre fonction de répartition.

Intervenant non identifié

À propos des aménageurs et des habitants : notez bien qu'ils ne s'intéressent pas au débit, c'est la hauteur d'eau qui les intéresse ! Si le débit peut passer sans que cela les inonde, tant mieux. Si par contre la moitié du débit passe et qu'ils sont inondés... c'est la hauteur d'eau qui intéresse les médias, les habitants et les aménageurs.

Débat suite à l'exposé de M. Oberlin

(L'exposé de M. Guy Oberlin est à trouver dans la première partie de ce document, au chapitre 4, auquel le lecteur est prié de se reporter)

Étienne Leblois

La gestion des crues devrait donc se faire avant tout sur le terme principal, qui est le régime des hautes eaux. Et pour détecter et évaluer l'effet des influences humaines, tu proposes de te baser des indicateurs agrégés de ce régime, des indicateurs synthétiques, tels que le débit de pointe décennale ou une durée caractéristique de la dynamique des bassins versants. La parole est à la salle.

23. Intervention de M. Michel Robert, SRAE, ministère de l'Environnement

Je veux bien que l'on gère les crues dans le réseau hydrographique mais tout à l'heure, dans le pays de Caux, on les a vues descendre par les routes. Alors recourir à des aménagements qui essaient de jouer l'influence humaine, au niveau des mesures environnementales, par la disposition de la jachère qui pourra être en prairie, jouer sur 20 % de prairies dans un bassin versant, c'est peut être quand même un moyen d'avenir, plutôt que gérer l'eau qui s'en va ? Dans d'autres cas, où il y a une influence climatique forte ou de l'urbanisation, il faudra effectivement gérer l'eau avant tout, c'est sûr, mais il y a peut être deux cas de figure ?

Guy Oberlin

Ce que j'ai dit est qu'il faut s'occuper du régime hydrologique en général et pas seulement des écarts imputables à l'influence humaine. Ceci concerne aussi les crues tout en amont, là où elles se forment, et vise l'ensemble de l'écoulement, pas seulement telle norme décennale sur laquelle il faudrait dimensionner drainage et fossés. La rétention d'eau partout où elle est possible est également favorable à la ressource en eau, en raison de la recharge de nappe, du moins dans notre pays où il n'y a pas trop de pertes par évaporation.

24. intervention de M. Jacques Astier, société BRL

Je suis assez d'accord avec un certain nombre d'affirmations que vient de faire Guy Oberlin, notamment la mise à l'écart provisoire — pas définitive — des effets secondaires de l'influence humaine. On a pu les voir pervertir l'hydrologie naturelle, ceci veut dire qu'un jour on peut espérer les voir venir corriger ces effets pervers ; mais la plupart du temps ils sont de second ordre. Il a été également dit que le travail au niveau du bassin versant était

d'autant plus facile que ce bassin versant était diversifié et que donc il y avait des modalités d'intervention diverses.

Mettons provisoirement un peu de côté les influences humaines et raisonnons à l'échelle du bassin versant et de la compréhension de la dynamique des crues elles-mêmes. Je soulèverai une question : comment faire accepter logiquement et politiquement le transfert de vulnérabilité, même si à un moment donné l'aménageur est convaincu qu'il y a intérêt à faire ce transfert ? Je pense notamment à une image que tu as présentée, qui faisait apparaître une inondation sur le cours aval de la rivière et son report sur les affluents amonts par l'aménagement. Même que si on est convaincu qu'en terme de dommage global, c'est la deuxième solution qui est la bonne, comment se servir d'arguments juridiques existants ou d'arguments forts pour faire passer ce message sociologiquement et politiquement ?

Guy Oberlin

C'est vrai que ce n'est pas écrit dans les textes aujourd'hui : comme d'habitude les textes suivent les pratiques. Ainsi sur un certain nombre de cours d'eau il y a déjà eu des solidarités de bassin, survenues sans contraintes législatives.

Je citerai dans l'Orne et le Calvados le bassin de la Dive : en aval des zones inondables, le bassin est très vulnérable et très limité. Le département aval a dit au département amont : "n'aggravez en aucune manière vos crues sinon il y aura des conflits". Les collectivités amont, communes et syndicats de communes, lorsqu'elles avaient besoin de protéger une commune, ont dès lors choisi des aménagements tels que des épandages d'eau, pour ne pas aggraver le régime des crues en aval. Ceci s'est fait avec des mesures de compensation extrêmement légères : dans le cas que je cite, je crois qu'il n'y a aucun flux financier, pas d'assurance spéciale. Mais quand il y a inondation dans un verger, les pompiers viennent laver pour que les vaches ne broutent pas de l'herbe souillée de sédiments (c'est mauvais pour leur système gastrique). Ces arrangements tourment depuis vingt ans, sans appel ni aux ministères ni aux préfets.

Je pense donc qu'en faisant émerger la notion de vulnérabilité, en proposant des normes guide et en demandant aux gens de décider eux-mêmes quel est le niveau de protection raisonnable, on met en place des négociations. Si ces négociations se terminent par des contrats financiers, de prévoyance ou des mutualisations d'assurances complémentaires aux « Cat. Nat. », pourquoi pas... Mais effectivement cela ne se fera pas rapidement...

25. Intervention de M. Germain Leynaud

Je voudrais abonder dans le sens de la remarque de Monsieur Robert : dans certains petits bassins versants, l'influence humaine peut être nette, quand on favorise la battance, qui réduit l'infiltrabilité à des niveaux vraiment très bas. Quand vous dites qu'il faut s'occuper pour l'essentiel de gérer le régime de base, je pense que vous incluez là-dedans la réduction, tant que faire se peut, de la vulnérabilité : se tenir à l'écart du danger dans la mesure où le réduire peut être difficile.

A propos des structures subhorizontales que sont les fossés à contre-pente. Ce système a été généralisé aux USA et en Afrique du Nord. Il était assez systématisé, il s'agissait bien de réseaux cohérents au point de vue hydrographique, comme des banquettes d'infiltration, dont on prévoyait bien qu'elles ne pourraient pas absorber toutes les pluies. Gabarit et pente étaient calculés en fonction du régime climatique local de façon à faire cheminer les eaux annexées vers des exutoires dûment équipés pour éviter le développement de l'érosion. Les sites étaient à écoulements non permanents, et je pense qu'on répondait là à la nécessité aussi d'augmenter les ressources en eau, la gestion de l'eau étant quand même un tout.

En France, la structure foncière rend difficile de donner autant de cohérence à des mesures, agri-environnementales ou autres, qui permettraient d'avoir fort impact sur la genèse des crues et sur la capacité d'infiltration générale sur les bassins versants.

26. Intervention de M. Jacques Lavabre

Guy, tu proposes un modèle synthétique de description des crues paramétré par une durée et par le débit décennal. Comment cette méthode, qui lie débit décennal et débits de fréquence très rare, tiendra-t-elle compte du fait que si l'influence humaine induit une modification du régime, elle sera plutôt au niveau du débit décennal (pour moi, sur les gros débits, qu'on connaît mal d'ailleurs, l'influence des aménagements sera toujours marginale) ?

Il y a également une véritable opposition, quant aux influences humaines, entre le régime méditerranéen et le régime atlantique. En milieu méditerranéen, les intensités des pluies sont telles que l'influence des bassins versants, en allant vite, pourrait être considérée comme négligeable. Ce n'est pas pareil dans le cas qu'on nous a montré de ruissellement sur les champs en Beauce, où une petite influence humaine peut jouer. En milieu méditerranéen, non. Comment cela va se traduire dans ce modèle ? Je ne vois pas très bien comment rentrer de l'influence humaine dans les statistiques...

Guy Oberlin

Le concept de modèle de synthèse devrait pouvoir être exploité en étude des influences, pas forcément la norme en débit décennal telle quelle. En faisant référence à une méthodologie spécifique, sans doute provisoire, qui consiste à normer ces modèles par des débits instantanés décennaux, tu mets le doigt sur une faiblesse de la forme mathématique actuelle de ces modèles. En caricaturant : si le débit décennal est multiplié par deux, tout va être multiplié par deux, or c'est faux puisque le débit millénal ne va pas changer. Tu fais une bonne critique qui est la critique de la norme en débit, forme provisoire et frustrante.

Je défends la notion de modèle de synthèse au sens générique, car je pense qu'il ne faut pas travailler seulement sur l'instantané décennal, mais essayer de prendre tout le régime en compte ; des essais faits montrent que c'est techniquement possible et scientifiquement solide, pourquoi ne pas le faire aussi !

27. Intervention de M. René Danière, Fédération des sociétés de protection de la nature, association nationale de protection des eaux et rivières

Je constate qu'il y a quand même une grande réserve dans les analyses, ceci montre bien combien il y a lieu d'être prudents en matière de phénomènes naturels. Je crois que ces phénomènes naturels restent incontournables. Il ne faut pas oublier que nous avons au dessus de la tête une pompe solaire immense qui prélève de l'eau et qui va nous la renvoyer.

J'ai entendu, à plusieurs reprises le mot « aléa ». Pour nous, il n'y a pas d'aléa, il y a une indétermination du phénomène. Ce phénomène devra se produire, il se produira dans l'espace, dans le temps, dans des zones indéterminées mais de toutes les façons il se produira. Ce n'est pas un phénomène aléatoire. C'est un phénomène indéterminé et il faut considérer que tôt ou tard il est acquis pour nous.

C'est un problème que nous rencontrons quant aux crues ; votre document sera remis à des hommes politiques car les inondations ont des incidences sur des phénomènes économiques. Derrière des DDE travaillent sur des plans de zones inondables ; le document finira quand même avec une orientation politique et il aura, au delà des zones inondables, avec des incidences sur les plans d'occupation des sols. Le phénomène des crues et leur conséquence, les inondations, sont des phénomènes économiques et politiques. L'étude scientifique en représente un aspect, bien sûr, mais les décideurs sont politiques et économiques.

Une question soulevée ce matin, essentiellement par MM Ripoche et Oberlin, est celui des SAGE. Le problème est politique et pas autre chose. Au niveau des politiques que nous pouvons voir, il est question d'aménagement des lits mineurs. On a parlé de système compensatoire, ce matin. Le système compensatoire fondamental reste bel et bien le lit majeur, au départ naturel. Or le lit majeur est actuellement l'objet d'emprises humaines énormes, avec le soutien des communes, pour des questions de taxes — problème essentiellement fiscal. Il ne faut pas oublier que cet aspect des crues, et surtout de leurs conséquences dans les inondations, reste quand même un phénomène politique et économique.

28. Intervention de M. Michel Ripoche

Ce que j'ai évoqué est effectivement problème de l'interaction entre limites administratives et limites d'expansion de crues.

J'ai cité une petite commune actuellement construite, au niveau de l'habitation, sur les terrains non inondables adossés à la forêt de Compiègne. Le reste est en zone inondable ; de ce fait, la commune n'ayant pas de zone industrielle, ses perspectives de budget sont complètement bouchées.

L'une des solutions envisagées, puisqu'elle fait partie d'un SIVOM : lorsqu'il y a une zone d'activité créée par le SIVOM, que 25 % de la taxe professionnelle revienne à la commune et 75% au SIVOM. C'est déjà une démarche importante en terme d'intercommunalité et de partage.

La chose dont je me suis aperçue en discutant avec les élus, c'est que cette commune, la Croix Saint-Ouen, voyait la colline voisine de l'Oise construire mais qu'elle n'en avait aucune répercussion, si ce n'est la station d'épuration qui s'est construite chez elle mais qui n'est pas tellement rentable à moins qu'il y ait une participation des communes du même SIVOM parce qu'elle a un équipement d'intérêt public.

Mais pour l'instant, ce n'est pas quelque chose qui fait rentrer des espèces sonnantes et trébuchantes dans les caisses des collectivités. Au niveau de la fiscalité, peut-il y avoir des retombées ? Je ne sais pas. Il peut sûrement y avoir des accords entre les communes, encore faut-il le vouloir ; la démarche de prendre dans son portefeuille pour donner dans celui d'à côté n'est pas spontanée !

Les outils existent, je crois qu'ils peuvent se mettre en place - je ne suis pas fiscaliste mais je pense qu'un certain nombre d'accords peuvent se créer au niveau des collectivités. La taille d'un SIVOM tel que celui de Compiègne n'est sûrement pas suffisante, puisque que ce serait plutôt au niveau interdépartemental qu'il faudrait viser, dans la mesure où pour protéger une telle agglomération par rapport aux inondations qu'elle subit, il faudrait réaliser des retenues d'eau ou des sur-stockages, encore plus à l'amont, dans le département voisin de l'Aisne. L'inondation suit un bassin hydrographique, a une logique de rivière, l'urbanisation suit une logique administrative. C'est un problème que j'ai essayé de soulever et qui concerne un certain nombre d'aménagements du territoire, mais je n'ai pas de réponse particulière à donner.

Étienne Leblois

Les crues ont inévitablement des interactions avec les sociétés humaines. Si les économistes, juristes, sociologues représentés ou présents dans la salle ne font rien, on risque d'aboutir, en fonction de la majorité des présents, à des propositions de programme de recherche qui risquent de se réfugier dans l'étude des processus du point de vue de l'hydrologie, de l'hydraulique, etc. et peut-être de clore les questions du genre de celles abordées par M. Ripoché. Il y a-t-il des personnes dans la salle pour argumenter en faveur d'une branche économique et sociale à raccorder à un futur programme de recherche sur l'influence humaine sur la genèse des crues ?

Michel Ripoché

Ajoutons : on observe dans un certain nombre de vallées, que la rivière est l'axe de propagation de l'urbanisation. Ayant rencontré un architecte de la vallée de l'Oise et je lui ai demandé s'il n'aurait pas fallu construire ailleurs que dans ces secteurs-là. Il m'a répondu que j'étais fou, que ça faisait vingt ans qu'il urbanisait dans ce sens-là, dans le sens de l'axe de la vallée. Tout un tas d'infrastructures ont été mises en place de telle manière que...

Pourquoi cet oubli de l'inondation ? La mémoire n'était-elle pas assez proche ? Les deux dernières inondations l'ont ramené fortement aux habitants de la vallée de l'Oise, mais les urbanisations sont là et maintenant il faut faire avec.

Guy Oberlin

On doit un complément de réponse à monsieur le représentant des sociétés de protection de la nature. Je vous rappelle qu'on est ici en influence humaine sur les crues. Le groupe de travail qui a préparé les exposés appartient à une action concertée, sous égide actuellement du GIP, qui est un groupe inondation. Dans ce groupe inondation, la problématique vulnérabilité (expression des questions que vous vous posez, avec pour les scientifiques le devoir d'essayer de modéliser cela, de représenter la demande sociale, les contraintes juridiques, la demande ou les réalités économiques...) est en principe prévue.

Je ne sais pas si, demain matin, la discussion sur les choses à mener va être limitée à l'influence, aux crues ou va intégrer les inondations. Comme l'a dit Étienne Leblois, ça va peut-être dépendre de la salle que le programme d'actions futures se polarise sur les crues ou élargisse au problème des inondations en général, avec des outils qui prennent convenablement en compte au moins l'interfaçage entre ces scientifiques et les usagers. Par contre, un hydrologue ne saurait devenir juriste ou élu. On peut donc, au mieux, faire l'interfaçage avec les besoins de la société, on ne peut pas, on n'a pas le droit ni la compétence pour aller au-delà.

Clôture de la première journée

Igino Tonelli

Direction de la prévention de la pollution et des risques
Ministère de l'Environnement

Je remplace M. Vesseron, directeur de la prévention de la pollution et des risques. La Direction de la prévention de la pollution et des risques doit coordonner la prévention de tous les risques majeurs aussi bien d'origine naturelle que technologique. Je suis moi-même chargé de la sous-direction de la prévention des risques majeurs et donc du risque « inondation ».

Qui dit inondation parle de crue de rivière mais aussi d'autres phénomènes : un phénomène nouveau mis en évidence depuis quelques années est celui de crues torrentielles en milieu urbanisé, dont la genèse se fait dans la ville ou tout près en amont.

En prévention des inondations, se pose le problème de la connaissance de la formation des crues, et de l'influence humaine. Les inondations de Nîmes en 1988, de Vaison-la-Romaine en 1992, celles qui, en janvier 1995, ont atteint 40 départements, ont notamment relancé la polémique sur l'origine de ces crues catastrophiques, les inondations s'accompagnant d'une dizaine, d'une vingtaine de morts et plusieurs milliards de dégâts. On a accusé l'urbanisation galopante de ces trente dernières années, l'agriculture intensive ou bien la suppression des haies, etc. Tous ces éléments participent à la création du phénomène de crue et à sa transformation, quelque fois, en catastrophe.

Quelques mots sur le problème des catastrophes naturelles. Actuellement en France, on recense environ 10000 communes qui sont atteintes par la déclaration d'état de catastrophe naturelle. La loi dit « l'intensité anormale d'un événement naturel ». Qu'est-ce que l'intensité anormale ? Pour les inondations, on a pris le phénomène décennal, on considère que c'est une bonne moyenne, tout ce qui est en dessous n'est pas catastrophe naturelle, ce qui est au-dessus l'est. Dans ce cas là, les assureurs remboursent les dégâts en tenant compte de la valeur de la police d'assurance, bien sûr, et d'une certaine franchise. Actuellement, 10000 communes sont concernées. Il y a dû y avoir, depuis une douzaine d'années que le système existe, à peu près 40 000 déclarations au titre des inondations. Cela veut dire que certaines communes y ont été plusieurs fois, le record est une commune atteinte 15 fois. Ceci souligne que certaines communes ne font rien pour diminuer leur vulnérabilité aux inondations.

Pour aider à la recherche et aux travaux, différentes études ont été lancées, à deux échelles. À l'échelle de la parcelle, sont à étudier les conditions d'écoulement, en fonction du sol, du sous-sol, de la couverture végétale, de la pente, du type d'agriculture, de son mode d'exploitation, des conditions de drainage, etc. de façon à définir les éléments pertinents à prendre en compte dans des approches plus larges et de proposer des éléments de régulation et, si possible, de mise en valeur des sols. À l'échelle du bassin versant, on utilise dans ce domaine, tout récemment, les données satellitaires, en particulier les images SPOT. Ces données doivent permettre de travailler à l'échelle du grand bassin versant -plus grand

que ceux que j'ai pu voir cet après-midi, à l'échelle approximativement départementale - et d'y déterminer des paramètres d'inondabilité. Là aussi, on revoit la pente, l'usage du sol, la surface des sous bassins et des bassins versants, les divers réseaux de drainage pour définir, cette fois-ci, les secteurs de risques et étudier l'évolution du comportement de ces bassins versants sous l'influence de l'intervention humaine. Est-ce possible ? Pourra-t-on, là aussi, mettre en évidence une intervention humaine, par extension de l'urbanisation ou par modification des conditions d'écoulement ?

Nous avons donc mené un certain nombre d'expériences et d'études. Je signale les études sur les inondations provoquées par les crues torrentielles et le ruissellement pluvial urbain dans trente départements du sud-ouest de la France. Ce sont les suites des rapports Ponton et Bourges qui avaient désigné un certain nombre de communes inondables dans le Sud de la France - les fameuses 52 communes.

Nous avons proposé une étude sur 30 départements dans lesquels examine les conséquences d'une pluie de 200 millimètres en 24 heures, incluant une pointe de 100 mm en deux heures. Nous avons mis en évidence plus de 2 000 communes sensibles à cet aléa. La gravité du risque, par contre, n'a pas été définie ; nous n'avions pas les moyens de l'étudier. Certains journalistes se sont crus autorisés à publier des cartes dans lesquelles ils ont indiqué une gravité du risque mais sans dire ce que c'était.

Des expériences ont été récemment menées dans le département des Alpes-Maritimes, d'autres sont en cours sur le bassin de l'Ouvèze, qui dispose de nombreuses données hydrauliques, pour définir des paramètres pertinents, issus justement de ces données satellitaires, et qui permettraient une modélisation de ces phénomènes. J'ai effectivement entendu parler de débit, j'ai assisté à de nombreuses réunions sur lesquelles on discutait du débit de crue au Pont Romain, à Vaison-la-Romaine, était-ce 910, était-ce 1200, des heures de palabres pour définir un débit qui est passé sous un ouvrage d'art. Ce n'est peut-être pas le phénomène le plus important (à l'époque le Pont Romain a tenu, mais le pont récent a été emporté : autrement dit, les problèmes d'érosion, de vitesse, de force de l'eau sont des paramètres dont il faut tenir compte).

Nous avons donc parlé de phénomènes pluvieux, de crue décennale. Qui dit catastrophe doit aller étudier beaucoup plus loin des phénomènes de période de retour beaucoup plus large - qu'est-ce qu'une crue centennale ou une crue millennale ? Dans les barrages, on parle de gradex, de déversoirs de crue calibrés pour la crue décennennale. Qu'est-ce que cela veut dire ?

Étienne Leblois

La crue décennennale est la crue dont on estime qu'elle a une chance sur 10000 de se produire l'an prochain (on ne prétend pas dire ce qui s'est passé il y a 10000 ans ou se passera dans 10000 ans). Pour estimer une telle crue, la méthode du gradex exploite l'idée suivante : pour les événements de pluie extrêmes, le bassin versant est saturé, il se transforme en baignoire et tout supplément de pluie donnera un supplément de débit équivalent. L'idée est simple et géniale : exploiter la connaissance que l'on a de la distribution des pluies pour fixer l'extrapolation des débits vers les événements les plus rares. Accessoirement, nous disposons de beaucoup d'observations pluviométriques. C'est ce qui a fait tout le succès de la méthode de Gradex dans les trente dernières années.

Igino Tonelli

Aujourd'hui, on a bien mis en évidence que pour les grands événements, l'influence humaine est quasi nulle.

Lorsque se produit un phénomène exceptionnel, les maires établissent un dossier envoyé au préfet qui saisit le Ministre de l'Intérieur ; une commission d'experts se réunit, dans lesquels il y a beaucoup de représentants de Météo France, définissant si l'événement est décennal ou pas. Ce n'est pas aisé parce qu'on peut avoir à partir d'une pluie décennale un écoulement vingtenal ou inversement quinquennal. Cela amène des polémiques : pourquoi une commune est incluse dans l'arrêté et pas celle commune d'à côté ? D'où des recours, quelquefois cela remonte en Conseil d'Etat. Que faut-il faire pour avoir une meilleure connaissance de ces phénomènes et être sûrs de ne léser personne, en établissant une égalité de traitement de tous les citoyens ? On apprécierait une connaissance fine des débits et des périodes de retour.

Un autre phénomène important pour nous est celui de coulées boueuses. Plus d'un millier de communes ont été déclarées en état de catastrophe naturelle à la suite de coulées boueuses. C'est un problème important et non seulement en moyenne ou haute montagne mais également dans le vignoble. On pourrait s'intéresser à l'étude des conditions favorables à la création de ces coulées de boues.

Voilà donc deux sujets : connaissance des périodes de retour, condition de formation des coulées de boues, que je propose d'inclure parmi les nombreux sujets dont vous débattrez demain.

Bilan et marges de progrès

M. Daniel VIDAL-MADJAR

Directeur du GIP HydrOsystemes

Le titre de mon intervention, " Bilan et marges de progrès ", m'a paru suffisamment obscur pour que je prenne des libertés avec ce que l'on pouvait y mettre.

Je vais tout d'abord présenter ce qu'est le GIP HydrOsystemes. C'est un Groupement d'intérêt public, créé en 1993 sous tutelle du ministère de la Recherche, qui regroupe la quasi-totalité des organismes de recherche ayant des activités dans le domaine des hydrosystèmes. Il a deux grandes vocations : la première est la coordination des activités de recherche de ces organismes dans le domaine des hydrosystèmes, la seconde est de servir d'interlocuteur vis-à-vis d'utilisateurs extérieurs de la recherche quand ceux-ci ont des questions particulières à poser. Le séminaire organisé aujourd'hui et l'état de l'art réalisé relèvent de cette deuxième vocation.

Le GIP peut assurer à la demande de ses membres ou d'acteurs extérieurs - aujourd'hui le SRAE - une mission d'expertise sur l'état des connaissances. Une présentation d'état de l'art et des connaissances a été faite hier par un petit groupe de chercheurs, à la demande du GIP et du ministère de l'Environnement, en ce qui concerne l'influence humaine sur les crues, comme préalable à la définition d'un programme finalisé sur ces questions.

Le GIP va s'employer maintenant à proposer un programme de recherche, dans des délais raisonnables, de façon à ce que l'on puisse tendre vers des demandes de financement et vers un démarrage effectif de travaux de recherches finalisées. Ce programme de recherche devra faire l'objet de discussions avec la communauté scientifique et la communauté des utilisateurs ou des « clients » de ce programme de recherche.

Je vais juste donner des grandes lignes qui apparaissent à la lecture de l'état de l'art, et ensuite d'exprimer comment on pourrait concrétiser ce programme de recherche.

Il va y avoir certainement deux volets : un volet de recherche sur les processus et leur modélisation, un autre de recherche en matière d'outils pour la prise de décision, ce deuxième volet constituant probablement le gros du programme.

La recherche sur les processus et leur modélisation

On a au moins deux approches possibles. La première étant l'approche de l'expérimentation, approche largement utilisée à l'heure actuelle, et une autre, également largement utilisée mais qui mériterait de l'être un peu plus, qui est l'exploitation des données historiques de façon à mettre en évidence une éventuelle influence de l'action de l'homme sur une modification du régime des crues.

– de l'expérimentation (à l'échelle du bassin versant élémentaire, c'est un peu difficile de faire autrement) on peut comprendre, suite aux exposés d'hier, en particulier celui de Vazken, que c'est une chose extrêmement difficile. Il faut faire les études à la bonne échelle, et pas à l'échelle d'un processus ! Une roue de tracteur aura certes une influence intégrée sur les crues, mais à l'intérieur d'un paysage dont il faut tenir compte. L'échelle de l'expérimentation doit être suffisante pour que les processus majeurs intervenants dans la formation des crues soient intégrés de façon représentative. On doit en plus pouvoir faire des expérimentations sur des bassins modifiés et sur des bassins pas modifiés. Il faut le faire pendant suffisamment longtemps pour distinguer l'influence humaine, relativement mineure, des fluctuations spontanées imposées par les forçages atmosphériques. Cela veut donc dire qu'il faut le faire sur un temps suffisamment long, à moyen et long terme.

Si ces recherches sont mal conduites, elles peuvent facilement aboutir à des conclusions totalement erronées, ce qui serait bien dommage. Dans tous les cas de figure c'est une recherche qui va nécessiter un effort budgétaire et humain important. En tant que « gestionnaire » de la recherche, il faudra que l'on se pose la question de savoir si nous voulons effectivement demander à la communauté scientifique de se consacrer pendant un temps assez long à ces sujets alors que d'autres, sur lesquels ils travaillent déjà, sont peut-être d'un abord plus simple.

– l'exploitation des données historiques. Je crois qu'on peut aller plus avant que ce que l'on a fait jusqu'à maintenant dans l'exploitation des données historiques pour mettre en évidence des influences réelles des actions de l'homme sur les crues, inondations et autres aléas. Il faut essayer de faire rendre aux données et enregistrements existants, aux diverses bases de recherche ou opérationnelles, ce qu'elle peuvent. Dans un pays comme la France, on dispose de plusieurs dizaines d'années de données sur l'ensemble du territoire, pour des climats différents, avec une évolution de l'occupation du sol et des aménagements qui n'est pas négligeable. On devrait donc pouvoir arriver, en pressurant ces données plus qu'elles ne l'ont été jusqu'à maintenant, ou en le faisant selon une démarche plus scientifique, à obtenir des informations certainement plus pertinentes que celles issues d'études de processus à l'échelle d'un tout petit bassin. La seule question, qui est une question de principe, est pour mettre en place un projet de ce type il faut que les données soient disponibles. C'est à peu près aussi difficile que de mettre en place une expérimentation sur un bassin versant élémentaire, la difficulté ne vient pas nécessairement des organismes ou des instituts que l'ont pourraient accuser de ne pas vouloir donner accès à leurs bases de données. La mise à disposition de toutes les bases de données est nécessaire, qu'elles soient gérées par le ministère de l'Environnement, l'I.G.N., l'IFEN, ou EDF, sinon on ne pourra pas y arriver.

Maintenant, j'arrive à la partie de la proposition de programme de recherche qui me paraît être la plus utile : le développement d'outils pour la prise de décision

On en sait en effet assez sur l'influence des actions de l'homme sur les crues ou sur les inondations pour essayer de prendre des mesures. Du travail fait par le groupe de scientifiques qui vous a proposé hier un bilan, il résulte que visiblement il va falloir changer d'attitude et passer d'une attitude qui privilégie systématiquement l'écoulement de l'eau vers l'aval, à une attitude qui prenne en compte l'ensemble du bassin, et qui tolère que des zones soient inondées, pour ralentir la crue en intervenant sur la totalité de la surface du bassin. Ce changement de culture relève plus de la sociologie ou des sciences humaines

que directement des sciences qui étudient les processus hydrologiques. Il faut donc insister sur trois axes :

Il y aura probablement un axe de recherche socio-économique parce qu'il faudra mettre en place un certain nombre d'instruments pour parvenir à ce changement d'attitude. Parmi les points à étudier, d'abord un problème sociologique : il faut essayer de comprendre ce qui fait la perception des crues, de leurs origines. Là encore, une bonne méthode pour y arriver, c'est d'essayer de faire l'analyse historique des crues précédentes, sur les quelques dizaines d'années passées et essayer d'analyser ce qui fait que la crue est considérée comme ceci ou comme cela, que l'on accuse plutôt ceci ou plutôt cela d'être responsable de quelque chose. Ce problème est essentiellement sociologique et il faut l'analyser correctement sinon nous n'arriverons pas à définir des moyens d'action. Ensuite, des recherches plus typiquement économiques sur les coûts directs et induits des moyens de lutte. Il faut les évaluer de façon à voir s'ils sont compatibles ou non avec l'objectif à atteindre. Le troisième axe de recherche est plutôt d'ordre juridique. Il va falloir se poser la question de comment changer les règlements, les incitations gouvernementales ou étatiques de façon à aider, autant que possible, au changement d'attitude dont je parlais au début de mon intervention. Ce travail ne s'adresse pas forcément aux personnes auxquelles on s'adresse d'habitude lorsqu'on pense à l'influence humaine sur les crues, et qui viennent des sciences de la nature, mais plutôt à des personnes qui viennent des sciences humaines et sociales.

En matière d'outils d'aide à la décision, on pourrait aussi proposer de construire quelque chose qui simule l'écoulement d'une crue dans un bassin fictif, bien entendu, mais suffisamment réaliste pour qu'on comprenne comment il réagit. On peut imaginer un modèle numérique permettant à deux échelles – de l'échelle très locale du B.V.R.E. à celle d'un département – de voir comment s'écoule la crue, avec à la fois ses problèmes d'hydrologie et ses problèmes d'hydraulique, de façon à bien comprendre comment intégrer la totalité du bassin dans la prévention des crues. La construction de ce modèle hydrologique implique des progrès dans la représentation spatiale des hydrosystèmes, chose loin d'être terminée aujourd'hui. On est là dans les sciences de la nature.

Mentionnons encore deux axes indispensables :

Le premier axe est la formation. Il va falloir que se développe, dans les années à venir, la formation nécessaire pour que les acteurs de la gestion des hydrosystèmes qui sont confrontés à cette problématique de crue enregistrent les progrès qui ont été faits, enregistrent les solutions proposées aujourd'hui et, peu à peu, les mettre en oeuvre.

Je ne reviendrai pas sur l'éducation : ce n'est pas directement de la recherche. Mais c'est un axe absolument nécessaire, impliquant publication de rapports, de cours à tous les niveaux, de formation initiale et permanente, dans les universités ou dans les écoles... Il faut faire passer le message adéquat pour aider à ce changement d'attitude.

Que compte faire le GIP dans les prochains mois ?

D'abord terminer la mise en forme du document sur l'état de l'art et des connaissances. Nous vous invitons donc réellement à faire part de vos réflexions, de vos contributions ou de vos demandes d'explications au GIP HydrOsystèmes, en fonction de ce que vous vou-

driez voir mettre, modifier ou enlever du document que vous avez reçu, qui pour l'instant n'est que le projet auquel on est arrivé aujourd'hui avec les contributions que nous avons pu obtenir depuis le mois de juillet.

Nous allons également essayer de discuter avec la communauté scientifique et avec la communauté des acteurs présents sur les hydrosystèmes, qui s'intéressent directement à cette question des crues et de l'influence humaine, pour élaborer un programme de recherche, un programme cadre plutôt, qui permettra de lancer un appel à propositions, vers la communauté scientifique mais également vers une communauté qui est peut-être plus directement concernée par une recherche finalisée. Ceci permettra d'identifier les équipes, d'identifier leurs moyens, les choses qu'elles veulent faire et de proposer un programme construit, bâti, les équipes identifiées pour lequel on espère trouver le soutien financier nécessaire pour le mener à bien. Je vous remercie.

Table ronde

29. Introduction de M. Dunglas, président de la table ronde

Monsieur Roussel m'a demandé de le suppléer momentanément pour l'animation de cette table ronde. Cette table ronde est un dialogue entre scientifiques, gestionnaires et aménageurs sur les perspectives de la recherche ; sur ce que nous savons déjà, elle pourra porter une première conclusion, la conclusion définitive appartenant tout à l'heure à Monsieur Laurent. Nous avons devant nous deux heures, une heure durant laquelle interviendront les différentes personnes qui sont à cette table, puis une discussion d'une heure qui viendra essentiellement de la salle, nous comptons en effet sur vous à cet égard.

Chacun d'entre-nous va parler huit minutes en moyenne et la démarche générale va être de l'amont vers l'aval, ce qui est logique dans le cas de la crue et de son écoulement. Nous allons donc voir au départ comment les gens de terrain voient le problème. Monsieur Langenfeld, de l'agence de l'Eau Rhin-Meuse va commencer, Monsieur Guyot, de la direction de l'Eau, nous dira comment il voit ces problèmes, ensuite Monsieur Fradin, Directeur Adjoint de l'Aménagement de l'Espace Rural et de la Forêt au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, nous parlera de la position de son ministère dans le domaine de l'occupation du sol et de l'influence sur les phénomènes que nous étudions. Ensuite Monsieur Plivard, de l'E.D.F., nous donnera quelques éléments sur la manière dont E.D.F. voit maintenant la chose, tant au niveau de la gestion de ses propres ouvrages que de la gestion des rivières dont E.D.F. gère le débit d'eau.

Nous aurons ensuite des points de vue de scientifiques, proprement dit, c'est-à-dire des personnes du Gip Hydrosystèmes, Monsieur Pointet puis Monsieur le Professeur De Marsily. Je vous dirai enfin quelques mots en guise de conclusion.

Avant de commencer, je vous rappelle que dans les phénomènes que nous étudions il y a deux aspects qui ne sont pas seulement sémantiques :

- un aspect hydrologique et hydraulique qui est la crue, avec sa genèse et la collecte du débit, puis son transfert vers l'aval et qui se traduit par une onde de crue le long de la rivière, avec les différents types de modélisation que nous pouvons en faire ; et l'influence des actions humaines sur la genèse, puis sur la propagation de cette crue ;

- un aspect qui est l'impact social résultant de cette crue, via l'inondation, avec ses effets sur les installations humaines, vis-à-vis duquel les notions d'occupation du sol dans les zones inondables et de vulnérabilité des installations humaines jouent à plein.

Il faut donc garder à l'esprit ces aspects, en se rendant bien compte qu'ils sont indissociables. Pour autant, et le nom du colloque le dit clairement, nous étudions aujourd'hui seulement l'influence humaine sur l'origine des crues. Gardons bien cela dans notre esprit de façon à éviter toute confusion sémantique et dans la discussion et dans les concepts.

30. Exposé de M. Langenfeld, agence de l'Eau Rhin-Meuse

Rappelons les domaines d'intervention traditionnels des agences de l'Eau. Jusqu'à présent, elles se sont occupées essentiellement de lutte contre la pollution, d'améliorations en quantité et qualité des ressources en eau, et d'eau potable ; plus récemment, et de manière plus globale, elles se préoccupent de la préservation du milieu naturel et des écosystèmes aquatiques. Elles ne s'occupaient pas directement des inondations, ou de leur prévention, parce qu'il n'y avait pas de décret qui le permettait, même si c'est bien prévu dans la loi de 1964.

Au début de l'année 1994, le Ministère de l'Environnement a demandé aux Agences de travailler cette question " prévention des inondations " en vue d'inscrire ce domaine également dans leur programme d'activité. À la suite d'un séminaire des directeurs avec le directeur de l'Eau, qui s'est passé au printemps 1994, ont été mis en place des groupes de réflexion où étaient identifiés un certain nombre de thèmes d'action, d'une manière très globale, avec ensuite un tri ou une hiérarchisation en essayant d'identifier ce qui devrait rester du ressort de l'État ou ce qui serait plutôt du ressort des Agences, ce qui relevait d'interventions techniques ou d'interventions financières. Le rapport a été déposé il y a dix-huit mois environ. Indépendamment de cette identification de thèmes, une des conclusions était la nécessité de réaliser des études méthodologiques et de mettre au point des outils d'aide à la décision. Trois études ont donc été engagées dans la foulée.

La première étude était tout simplement la mise à disposition de la méthode inondabilité du Cemagref, bien connue par les spécialistes et les scientifiques, déjà beaucoup moins par les bureaux d'études, pas du tout au niveau des bénéficiaires potentiels. Ce travail a donc été engagé et est pratiquement terminé ; le guide de la méthode est terminé et va sortir prochainement. Il a été mené sous maîtrise d'ouvrage de l'agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Il est encore prévu sur ce volet de faire une petite plaquette de compréhension pour que les décideurs puissent prendre connaissance de cet outil et le comprendre.

La seconde étude engagée concerne la gestion des vallées alluviales, toujours sous l'aspect inondation. C'est un sujet très vaste, très compliqué. Nous avons décidé de faire, en première phase, un point sur les connaissances, une étude bibliographique. L'agence d'exécution était l'agence Adour-Garonne. Là, également, l'étude est terminée, le rapport est disponible mais non encore diffusé.

La troisième étude prévue, à la charge de l'agence de l'Eau Loire-Bretagne, s'intitulait « Impact des interventions humaines dans les bassins versants sur la dynamique des écoulements ». Il y a eu un dégrossissage en interne, une revue bibliographique rapide. Comme le ministère de l'Environnement a demandé au Gip HydrOsystèmes d'engager des réflexions et d'organiser le séminaire d'aujourd'hui, nous avons donc décidé de différer cette étude, et à la conclusion de ce séminaire, il se confirme que cela eût fait double emploi.

Quelles suites donner à tout ceci ?

Les agences, comme l'État, sont amenées à financer et aider un certain nombre d'actions sur le terrain, soit de manière assez traditionnelle pour tout ce qui concerne la protection des ressources en eau et la protection des écosystèmes aquatiques, soit - plus spécifiquement côté État - pour la prévention des inondations. Je crois de plus en plus à des actions qui seront transversales en vue d'une gestion globale, intégrée, conformément à la loi sur l'eau de 1992.

Lorsqu'on parle d'aide financière, il faut avoir des outils d'évaluation du projet, pour ne pas financer des choses allant à contresens des besoins. Ces outils doivent inclure l'état des connaissances.

Un champ d'action nouveau s'ouvre pour de tels outils : vous savez que les schémas directeurs de gestion des eaux prévus par la loi sur l'eau sont en cours d'approbation ces temps-ci. À l'aval, il y a les schémas d'aménagement et de gestion des eaux locaux, qui commencent à se préparer, et là nous avons absolument besoin d'avoir, non seulement la connaissance scientifique mais aussi, des documents prêts, clarifiant ce qui est connu, et sur quoi nous pouvons agir en toute connaissance de cause. Un séminaire comme aujourd'hui me paraît très important, qui a permis de clarifier beaucoup de choses.

Troisième volet, il nous faut gérer cela dans le temps. Ces nouveaux schémas d'aménagement et de gestion des eaux ne sont pas seulement des schémas, de beaux documents qu'on range dans une bibliothèque. Ce sont des schémas servant à gérer, à moyen et à long terme, qui doivent vivre. Ceci veut dire que dans tous les cas, il faudra mettre au point des tableaux de bord à destination des décideurs. Il y a deux ans nous avions dit " il va falloir mettre en place un observatoire de l'occupation des sols ", mais bien sûr nous ne l'avons pas meublé, nous avons simplement dégrossi un certain nombre de thèmes. Ce n'est pas reproduire le contenu des RGA, il ne suffit pas d'avoir des données statistiques, il faut savoir comment cela fonctionne.

S'il y a quelque chose d'important à creuser ? Il y a certes un volet recherche, mais surtout un volet de mise à disposition : faire connaître l'état des connaissances.

31. Exposé de M. Guyot, ministre de l'Environnement, direction de l'Eau

Quand on parle de crues, la direction de l'Eau se sent naturellement concernée. Depuis 1994 un nouvel élan à la politique de prévention des inondations a été donné et le ministère de l'Environnement y participe très activement, avec la direction de l'Eau, aux côtés de la SDPRM (Sous-direction de la prévention des risques majeurs).

Nous avons trois volets principaux d'intervention : le premier, grossièrement, est l'intervention sur la vulnérabilité. Il consiste à ne plus accroître la vulnérabilité en zone inondable - c'est déjà un objectif important. Pour ceci, il convient d'abord d'identifier les zones inondables. Or là qu'il y a beaucoup de travail à faire. C'est toute la démarche de cartographie, de création d'un atlas des zones inondables, engagée depuis 1994 et déjà un peu avant sur la Loire.

Le second volet important de notre politique est l'alerte pour les populations déjà installées, pour leur permettre de se mettre en sécurité.

Le troisième volet, le plus important sur le plan financier, c'est l'intervention sur l'aléa lui-même, par la restauration des cours d'eau, des capacités d'extension des crues - quelque chose qui n'est pas évident - et des travaux plus ponctuels de protection des lieux habités.

La manière dont ces actions sont conduites aujourd'hui est différente d'avec celle qui prévalait autrefois. On a coutume de dire que le but était d'écouler l'eau le plus possible de l'aval. Aujourd'hui on dit plutôt qu'il faut ralentir l'eau, l'étendre : l'objectif est complètement différent. L'intervention souhaitée aujourd'hui (il faut naturellement que les techniques s'adaptent et que les esprits évoluent) est la restauration des champs d'expansion des crues. Tel est pour nous l'enjeu majeur des années à venir. Cela dit, lorsqu'on s'intéresse à la restauration des champs d'expansion des crues, à la lumière de ce qui a été dit hier, on ne s'intéresse finalement qu'à une partie du problème puisqu'on ne s'intéresse qu'à la fonction de stockage et de transfert de l'eau dans le bassin versant. En revanche, il y a la partie production, dont on a beaucoup parlé, thème du séminaire d'aujourd'hui, sur laquelle le plan de prévention des risques naturels ne se concentre guère mais sur lequel on se pose un nombre de questions :

- la crue, comme beaucoup de phénomènes naturels, est un phénomène cumulatif produit à partir de sous-phénomènes diffus. Ces sous-phénomènes diffus, il faut les connaître pour agir dessus. Nous avons aujourd'hui des moyens juridiques qui nous donnent la possibilité, éventuellement, d'intervenir sur les zones de production de la crue. Je veux parler du plan de prévention des risques dont il est dit dans la loi de février 1995 qu'il peut non seulement réglementer sur les parties exposées aux risques mais également sur les parties susceptibles de créer ou d'aggraver l'aléa (innovation par rapport aux anciennes procédures !). Mais pour réglementer dans ces parties là, les services de l'État se sentent un peu démunis : que faut-il interdire, que faut-il autoriser, que faut-il recommander ? Voici une partie des questions que l'on se pose. Lorsque l'on passe à la réglementation, il faut des arguments qui soient simples et qui soient justifiés.

- la deuxième interrogation, qui fait que le séminaire d'aujourd'hui nous intéresse particulièrement, c'est l'interrogation sociale. Nous en avons longuement parlé hier : après une crue, il y a des mises en cause systématiques au sein de la société. C'est la faute de l'agriculteur, du gestionnaire du barrage, de la DDA ; on entend des discours variés, qui comportent du bien et du moins bien. Le bien, c'est déjà que l'inondation en elle-même n'est pas acceptée comme une fatalité : dès lors que l'on dit que la crue a été aggravée c'est que l'on pense que l'on peut agir dessus. Cette notion sous-jacente d'intervention possible est plutôt encourageante, la population ne se résigne pas. En revanche, la mise en cause systématique est plus gênante, on cherche un coupable. C'est une non-acceptation du phénomène naturel en lui-même, et un moyen commode pour la société de rejeter sur quelques boucs émissaires la responsabilité de l'inondation. Peu de gens se posent la question " mais pourquoi me suis-je installé ici ? ". Naturellement, ils diront que c'est la faute de l'État qui leur a accordé leur permis de construire. Donc, il y a ainsi du bien et du moins bien.

Il faut donc des messages, des réponses, voire des non-réponses (dire " je ne sais pas "), mais en tous cas qu'on puisse expliquer pourquoi les choses ne sont pas si simples et comment la responsabilité, si responsabilité il y a, est collective.

Au sujet de l'influence humaine sur les crues, le voeu de la direction de l'Eau - plutôt opérationnelle - est d'avoir des réponses qui soient simples et si possible quantifiées. Il serait souhaitable que l'on puisse avoir des idées de l'impact de tel ou tel aménagement en fonction de certains paramètres, à un endroit donné, et donc comment on peut agir pour conseiller, émettre des recommandations, réglementer éventuellement. On a besoin d'éléments de réponse à ces questions là, tournés vers l'action.

Il ne faut pas se focaliser uniquement sur la crue. La direction de l'Eau a toujours une vision très globale et intégrée de la gestion de l'eau, dont d'autres aspects ont été évoqués hier : la ressource en eau, les milieux naturels à ne pas oublier. Tous ces aspects doivent être approfondis de manière à ce que l'on ne prenne pas des décisions uniquement axées sur un aspect particulier au détriment des autres aspects de la gestion de l'eau. Nous souhaiterions avoir à l'issue des programmes de recherche des solutions techniques : quelles mesures de compensation peut-on trouver à certains aménagements, quelles mesures de correction ?

Si nous sommes très intéressés par la poursuite de la recherche là dessus, attention ! En premier lieu, nous avons besoin de choses simples. La doctrine de l'État, dans le cas de la mise en oeuvre de la réglementation, c'est qu'il faut partir des études les plus simples possible parce que finalement la complexité n'apporte pas grand chose ; au contraire, elle peut nous apporter une certaine vulnérabilité : plus on est précis, plus on est attaquant. Il est donc préférable de parfois s'en tenir à une certaine simplicité pour agir vite et non pas se délayer dans des études trop complexes. Une des conclusions de la journée d'hier, que j'ai personnellement cru comprendre, c'est que l'influence humaine n'est plutôt visible que sur les petits bassins versants et également plutôt sur des crues moyennes. Sur les grands événements, l'influence humaine est plutôt délayée, et il faut plutôt agir sur la gestion des stocks d'eau ; c'est un problème différent.

Finalement, on peut se poser la question de savoir si on répond totalement au problème en étudiant l'influence humaine sur l'aggravation des crues et, naturellement, je crois que la réponse est largement partagée : " non ". L'influence humaine n'est qu'une petite partie du problème, prépondérante dans certains cas, mais il faut aller plus loin, et notamment, parler de la vulnérabilité. Ce qui nous paraît prioritaire et préoccupant, c'est l'installation humaine dans les zones inondables, la préservation des zones inondables qu'il reste et qui peuvent être préservées aux fins de stockage, éventuellement remédier aux problèmes pour protéger l'existant. Ainsi le problème paraît un peu plus compliqué : il n'est pas uniquement du ressort de l'hydraulicien. Il faut éduquer, persuader, il faut également se concerter, ceci implique un certain nombre de partenaires, il faut également réglementer, agir vertement lorsque les limites du jeu ne sont pas assez marquées. À ce niveau, le problème apparaît du ressort politique local. Monsieur Langenfeld a bien insisté sur le fait que la loi sur l'eau a introduit un certain nombre d'outils, le SAGE notamment, qui permet d'intervenir à l'échelle du bassin versant. Le SAGE sera cependant ce que l'on en fera. Pour qu'il soit utile, il faudrait que l'on puisse donner des outils d'aide à la décision aux acteurs locaux. Le SAGE est un bon outil aussi pour aborder une gestion intégrée qui prenne en compte les autres aspects (la ressource en eau, les milieux, les écosystèmes) ; une vision uniquement sur

l'angle hydraulique, de transfert d'eau et de négociation de son stockage ne serait qu'un des aspects de ce que l'on attend.

Si effectivement aujourd'hui un certain nombre d'outils existent (mesures environnementales, mesures contractuelles), il serait nécessaire de fédérer un peu tout cela, d'avoir une vision plus claire de ce qui existe, de ce qui peut être mis en oeuvre, essentiellement sous forme de concertation.

On a cité hier quelques causes qui dépassent peut-être le cadre de la recherche, notamment la parcellisation des communes, le fait qu'il soit difficile pour des communes de se mettre d'accord pour inonder l'une et protéger l'autre. On a cité les outils fiscaux comme faisant obstacle à une bonne gestion. Je ne suis pas certain, sur ces aspects, que la recherche soit la seule à pouvoir apporter des solutions. Si elle peut apporter des outils d'aide à la décision, il faudra aller plus loin et notamment sur le domaine politique, en n'hésitant pas à remettre en cause un certain mode de fonctionnement, un certain mode de développement de la société. On évoquait hier le cas d'une commune qui ne peut plus se développer car complètement en zone inondable : je dois vous dire que l'on se pose souvent la question " mais finalement, pourquoi le développement spatial urbain ? ". Pourquoi le développement d'une zone industrielle, d'une zone artisanale à la périphérie d'une commune serait-elle forcément la solution du développement communal ? N'y a-t-il pas d'autres solutions ? Je ne dis pas cela uniquement pour les problèmes de gestion de l'eau mais aussi pour les impacts paysagers et éventuellement sociaux. Notre mode lui-même de développement ne nécessite-t-il pas d'être revu avant ou en tout cas pendant que l'on évoque des solutions plus techniques de transfert de l'eau ou autre ?

Pour conclure, je dirais que le projet de recherche dont on parle aujourd'hui répond à une réelle préoccupation, mais qui est partielle : il y en a d'autres. Je crois qu'il faut répondre concrètement aux attentes locales, des services de l'État mais aussi des maires, des aménageurs qui ont peut-être eux besoin d'outils plus complexes. Au-delà, on peut toujours fournir des outils d'aide à la décision sur les aspects de stockage de l'eau, de transfert et non plus de production uniquement.

Le réel problème, dont Monsieur Oberlin a parlé hier, c'est plutôt l'inondation elle-même, faire accepter l'inondation à la population. Ensuite, utiliser les outils existants et peut être en développer d'autres pour protéger les champs d'extension des crues et aller plus loin. Je dois dire que pour la direction de l'Eau la priorité est la préservation des champs d'extension des crues. Ce n'est pas facile politiquement, et un revirement assez important a été fait ; actuellement nous préconisons l'inconstructibilité totale dans les champs d'expansion des crues, dans les zones inondables non urbanisées. Mais nous ne pouvons pas laisser ensuite les élus avec des terrains « gelés », on va être obligés de leur proposer autre chose ; la priorité pour l'instant, c'est déjà de sauvegarder l'existant, et croyez-moi, ce n'est déjà pas facile.

32. Exposé de M. Fradin, direction de l'espace rural et de la forêt, ministère de l'Agriculture, de la pêche et de l'alimentation

Lorsqu'on parle de crues et d'inondations le ministère de l'Agriculture, de la pêche et de l'alimentation, qui est aussi chargé de la forêt, se sent concerné. Et s'il ne se sentait pas concerné, on le lui rappellerait. Lorsque ces événements arrivent, on l'a vu au cours des dernières inondations, le premier accusé est le remembrement, le second le défrichement et l'arasement des haies et des talus. Immédiatement, les aménagements de l'espace rural sont donc accusés même lors qu'il ne sont à l'évidence pas en cause. Nous sommes donc interpellés et c'est très concrètement ainsi que le ministère de l'Agriculture est confronté à ce problème.

Au-delà d'une certaine irritation ressentie, la population a peut-être raison de nous interpellé : après tout, le ministère de l'Agriculture, indirectement, via les agriculteurs et les forestiers s'occupe de près de 90 % du territoire. Agriculteurs et forestiers gèrent ce territoire, leurs activités ont un impact sur une partie importante, jouent un rôle à la fois par leur influence sur le développement des crues, et aussi parce que c'est souvent aussi sur leurs terrains que vont se faire les inondations. Dans la prévention des crues, l'ensemble des propriétaires agricoles et forestiers jouent donc un rôle et ont un rôle à jouer dans le futur.

Tout ceci amène à une réflexion sur l'opportunité, que nous évoquons aujourd'hui, de la gestion de crues et de la prévention des inondations. Quelle est attitude avoir, quelle politique et quelle mise en oeuvre de cette politique au travers des aménagements devons-nous adopter ? Nous pouvons agir par toutes les dispositions d'ordre législatif et réglementaire en matière de gestion du territoire - j'évoquais les remembrements, les défrichements, donc la politique forestière, la politique d'aménagement foncier, mais aussi la politique agricole. Comment telle ou telle évolution de la politique agricole commune va-t-elle modifier l'occupation et le type d'occupation du territoire ? On peut mentionner aussi l'aménagement et l'entretien des cours d'eau, etc.

Second volet aussi, quand même : comment définir les origines et responsabilités de chacune des parties dans cette affaire ? Nous aussi, nous avons intérêt à communiquer avant et après les crises pour expliquer ce qu'on fait, ce qui se passe, comment tout cela s'intègre dans une vraie politique d'Etat de la prévention des risques. Sur ce point, on s'est aperçu que les directions départementales de l'agriculture et de la forêt (DDAF), souvent en première ligne lors de crises, manquaient à la fois d'éléments de fond pour faire leur choix et d'éléments de fond pour pouvoir communiquer et anticiper vis-à-vis du public.

A la suite des dernières inondations, nous avons décidé de mettre en place un programme d'appui technique à nos DDAF pour les assister dans la gestion de ces problèmes, et améliorer la participation du Ministère de l'Agriculture à la résolution de ces crises. C'est un programme que nous avons élaboré avec le Cemagref et j'ai été intéressé de voir qu'il rejoignait en de nombreux points ce qui a été évoqué par l'introduction du Directeur du GIP HydroSystèmes. C'est heureux. Nous avons ainsi élaboré en 1996 des sessions de formation mises en oeuvre et réalisées à la fois par le Cemagref et l'ENGEES de Strasbourg, à l'attention des D.D.A.F. mais aussi des D.D.E. et des DIREN. Cette action a eu beaucoup

de succès auprès de ces services déconcentrés et a permis, d'une façon assez rapide, de faire un point sur l'état de l'art en la matière et de faire le recueil de toutes les questions que se posent les aménageurs, tant en matière de choix généraux, que d'options pour la conception des ouvrages. On s'est cependant aperçu que ces sessions de formation manquaient cruellement de documents de synthèse ; en parallèle à la poursuite de ces sessions, nous allons, avec le Cemagref, essayer de faire une synthèse des connaissances accumulées depuis un certain temps, donnant lieu à des guides : un guide technique, un guide des bonnes pratiques d'aménagement au niveau d'un bassin versant, un guide opérationnel sur la conception des ouvrages.

Il y a un troisième volet à ce programme qui est un volet de communication, sur lequel je n'insisterai pas.

Un quatrième volet qui rejoint le débat d'aujourd'hui est un volet recherche. À l'heure actuelle ce volet n'a pas de contenu bien défini, le débat restant à mener. Sur ce volet recherche le Ministère de l'Agriculture souhaite évidemment – ce sera pour moi une des conclusions de cette table ronde - la possibilité de se retrouver à plusieurs partenaires autour d'une demande en la matière. Ce volet recherche s'articulerait autour des points évoqués par le Directeur du GIP HydroSystèmes : un recueil des données, des travaux de modélisation, pour nous aussi des travaux d'expérimentations, et en aval un volet de développement et de transfert des connaissances que l'on aura pu recueillir, pour les faire passer de façon opérationnelle dans les choix d'aménagement, dans les politiques, dans les conceptions d'ouvrages.

Cette action a démarré en 1996, sur une base pluriannuelle. Evidemment les financements disponibles ne sont pas très importants et il faudra certainement pas mal de temps pour arriver à mettre en oeuvre quelque chose de consistant.

Voilà comment le Ministère de l'Agriculture s'associera aux efforts des autres partenaires présents aujourd'hui dans cette salle.

33. Exposé de M. Plivard, EDF

Dans une grande discussion sur l'aménagement, on peut se demander comment E.D.F. peut être concernée. J'y répondrais en deux mots. D'abord, en étant un bon gestionnaire et ensuite un bon partenaire.

Pour la gestion, il est certain que nous sommes dans un univers très incertain, et devons arbitrer entre des intérêts contradictoires. Pendant l'épisode de crue, nous sommes presque les premiers opérationnels à agir, en temps réel. Dans cet arbitrage, nous n'avons pas de mandat, ni envie de nous mettre dans une position d'arbitre ce qui impose un certain nombre de règles en ce qui concerne la communication.

Nous sommes par ailleurs très observés. Je dirais à Monsieur Fradin, qui a cité les deux premiers éléments mis en cause à l'occasion d'une crue, qu'E.D.F. est au moins le troisième. Comment l'exploitant réagit-il face à cela ?

D'abord, il s'organise, pour éviter d'avoir à gérer dans le stress. Il considère qu'il reçoit l'hydrogramme de crue, qui vient à l'amont, et doit le gérer. Pour le gérer correctement, il

doit s'être préparé au niveau de la conception, en particulier en dimensionnant ses ouvrages avec des méthodes que vous connaissez bien, en particulier celle du Gradex. D'autre part, en appliquant un certain nombre de consignes qu'il a préparées avec l'autorité de tutelle et les différentes administrations, une consigne générale de crues, une consigne d'exploitation, des instructions de permanence d'exploitation, et enfin, dans les cas catastrophiques, s'il faut y arriver, des consignes d'alerte des populations. Tout ceci nécessite de gros efforts de formation de son personnel, en permanence à renouveler.

Une fois donc qu'il s'est préparé, il surveille et il alerte - en particulier vous connaissez tout le rôle de la D.T.G. (Division technique générale) à Grenoble qui exploite 600 stations pour permettre de surveiller et de donner l'alerte - ensuite, il gère la crise et enfin il fait son retour d'expérience.

Dans ce cadre, je voudrais me livrer à quelques réflexions. La première concernant le sujet qui nous préoccupe aujourd'hui : E.D.F. n'utilise finalement qu'une zone relativement faible du réseau hydrographique. Si toutes les gouttes d'eau qui tombent en France étaient utilisées à faire de l'énergie, on ferait 270 MW à peu près. Or on produit aux alentours de 70 MW. Cela vous donne une idée. Quant aux réservoirs dont on pense qu'ils peuvent avoir un rôle très important, deux choses doivent être mentionnées. Tout d'abord, une certaine confusion règne dans l'esprit de beaucoup quant au rôle des grands réservoirs, qui ne sont pas placés d'abord en fonction de leur rôle potentiel en matière de gestion des crues. Ensuite, quant aux consignes d'exploitation : à l'heure actuelle, elles visent essentiellement à assurer la sécurité des ouvrages sans aggraver la pointe de la crue. Lorsque ceci est réglé, en temps réel et quelquefois dans des situations un peu stressantes, nous nous posons la question de savoir si nous pouvons écrêter la pointe, en transformer une crue triangulaire en un beau trapèze allongé, tout en limitant la vitesse d'accroissement du débit à l'aval. Accessoirement, nous aimons bien que les retenues soient pleines à la fin de la crue et que pendant la crue, quelques sédiments aient été évacués. On voit que dans ce domaine de l'établissement des consignes, après une large concertation avec ceux qui sont intéressés par ces problèmes, on peut développer un certain partenariat.

Ce partenariat peut se développer dans une grande variété de thèmes. D'abord par la connaissance du réseau hydrographique - je lisais dans les documents distribués hier qu'il était mal connu en montagne, or l'établissement E.D.F. À une vaste connaissance d'un certain nombre de comportements d'ouvrages en montagne, plus un certain nombre d'éléments concernant la formation et la genèse des crues, et des informations historiques sur les grandes crues. M. Caneill, de la D.E.R., s'est engagé à fournir quelques éléments concernant les équipements hydrauliques, leurs contraintes, leurs degrés de liberté : je crois qu'ici, il y a une collaboration importante à avoir.

Comment réaliser cela ? Bien sûr, en liaison avec les agences de l'eau dans le cadre du SDAGE et des SAGE, en développant un certain nombre de conventions - nous avons, dans différentes régions, signé des conventions avec les agences de l'Eau pour mettre au point des outils méthodologiques, nous avons signé une convention pour mise à disposition et échange d'informations avec le Cemagref - peut-être d'autres voies sont-elles à rechercher. Au niveau national, la direction de l'Eau développera certainement un certain nombre d'études dans le cadre de la contribution apportée par les budgets des agences à la protection des inondations.

Je terminerai juste en rappelant les quelques mots que M. Cazenave, ouvrant le congrès de Nîmes en 1982 ou 1983, avait dits : il faut voir ces problèmes avec une grande lucidité. On pourra certainement contribuer à réduire les crues mais on ne les éliminera certainement jamais ; il faut aussi une forte volonté politique - cela Monsieur Guyot l'a évoqué précédemment -. Les contributions scientifiques et techniques auxquelles E.D.F. contribuera dans la mesure de ses capacités et de ses moyens pourront certainement nous aider à faire des progrès dans ces domaines.

34. Exposé de M. Pointet, GIP Hydrosystèmes

Je me propose de revenir à la dimension scientifique, et d'identifier quelques pistes pour un programme de recherche, puisque c'est une des choses attendues. Comment connaître - pour reprendre le mot utilisé par Monsieur Guyot précédemment - les sous-phénomènes diffus, tous les aspects contributifs à la crue que l'on examine usuellement dans des ordres divers et avec des soucis de détails divers, au hasard des compétences des uns et des autres ?

Je parlerai des zones contributives, qui président à la production de la crue et à sa propagation, et l'aspect physique des choses. Parmi ce qui a été vu hier, que peut-on retenir ?

J'ai essayé de lister tous les facteurs influençant la production de la crue :

- nature des sols, état de surface des sols, lithologie, couverture végétale, capacité d'absorption (du sol, de sa couverture, des annexes, des débris végétaux), rugosité, etc.

- aspects morphologiques : pente, rugosité, distribution des parcelles au sein du bassin versant (on a vu l'importance de cet aspect hier, y compris par des phénomènes très locaux comme l'état des surfaces aux voisinages des cours d'eau)

- repérage de ces zones sur des fonds cartographiques et qui préside un peu à la question sur l'aménagement du territoire.

Ces facteurs étant listés, il faut en estimer la sensibilité : comment jouent-ils dans la réponse du bassin versant à une pluie, dans quelles limites peuvent-ils varier, comment peut-on les faire varier intentionnellement ? Peut-on estimer cette sensibilité en procédant par analogie ? On a vu hier comment conduire de telles évaluations analogiques, ou empiriques, par une étude à caractère comparatif entre des bassins similaires que l'on teste, l'un avec une modification d'un facteur, l'autre sans modification, sous les mêmes séquences de pluies.

À quel stade faut-il procéder de façon plus analytique, comme j'avais déjà commencé à l'ébaucher hier ? À quel niveau de connaissance peut-on prétendre pouvoir procéder à une modélisation, comme l'évoquait Daniel Vidal-Madjar tout à l'heure ? Comment, au départ, peut-on exploiter tous les travaux anciens de manière à en relire les résultats en les classant et en les organisant selon cette chaîne causale, qui formera un guide pour la réflexion ?

Pour la modélisation, il faut absolument lister ce qui a été fait et mettre à profit les réponses déjà disponibles, relatives au ruissellement selon les états de surface ou à la partition entre ruissellement et infiltration, aux différentes formes d'écoulement, de la montée en saturation de la zone non saturée, aux écoulements en nappes : tout ceci a déjà donné lieu à des modélisations plus ou moins abouties, plus ou moins intégrées. Surtout, il convient d'intégrer modèles hydrologiques et hydrogéologiques de manière à les exploiter de façon conjointe.

Peut-être faut-il extrapoler au-delà des concepts nés de l'hydrologie - qui est, si je résume grossièrement, une conception soit 1D, pour le linéaire des segments de cours d'eau, soit 2D, pour les ruissellements de surface. Or il conviendrait d'aller plus loin, non pas vers du 3D - il n'est pas forcément utile ou possible de tout modéliser aussi finement - , mais d'aller au moins vers du 2D1/2, c'est-à-dire avoir des approches volumiques, en relief.

Les modélisations à caractère analytique devront certainement être ensuite dégradées pour évoluer vers des outils opérationnels : ceci se fera, au moins dans les cas les plus complexes, en testant la sensibilité à chaque paramètre, pour sélectionner ce qui est le plus sensible et renoncer à distinguer ce qui l'est moins. Cette opération devra être répétée peut-être bassin par bassin, ou de manière générique si l'on peut repérer des ensembles réduits de paramètres permettant de créer des modèles relativement simples d'usage et significatifs, pouvant être exploités comme des outils d'aide à la décision, d'utilisation rapide, qui permettraient de tester, de simuler les réactions d'un bassin à un input de telle ou telle nature. Notons que si nous évoluons vers d'étude de scénarios de changement climatique, nous aurons certainement à travailler à cette échelle d'extrapolation au-delà des situations actuellement connues.

Les objectifs à terme sera l'aménagement, à travers un schéma d'occupation des sols, non au sens administratif du POS; mais en visant à concevoir l'occupation des sols de façon que le bassin lui-même amortisse les ondes de crue qu'il génère ; peut-être aussi l'objectif pourrait-il être une gestion active, au sens où il s'agirait s'armer pour opérer sur les phénomènes en temps réel pour en contrôler et limiter les effets dommageables.

La demande pour l'instant a été formulée par le ministère de l'Environnement, demande que l'on a essayé de faire coïncider avec une offre de recherche - vous jugerez si nous y sommes parvenus. Au-delà, dans l'aspect opérationnel et au quotidien, quelles demandes ? M. Bourrelier aura peut-être quelques propos à nous donner sur ce point de vue. Et aussi, quels production, quel produit opérationnel? Je reprends ce qui a déjà été évoqué : produire des méthodes, repérer et organiser des compétences, les mobiliser en interaction entre les services de l'État et les organismes de recherche qui, au moins pendant un temps, doivent effectuer un travail de recherche préalable pour produire ces méthodes.

35. Exposé de M. De Marsily

Je regrette de dire que autant la direction de l'Eau peut construire une doctrine de service, autant l'université a du mal à faire de même, comme vous pouvez l'imaginer. Je vais cependant essayer de donner un point de vue d'universitaire sur cette affaire.

Je commencerai par une petite anecdote qui m'est venue à l'esprit en écoutant Monsieur Guyot parler du problème de la réglementation. Il s'agit de l'affaire de la Chaudanne, longuement étudiée par notre collègue le professeur Bravard, qui enseigne à Paris et à Lyon. Cette plaine d'expansion des crues du Rhône était la frontière entre la France et la Savoie jusqu'à ce que Napoléon III, dans sa grande sagesse, réunisse la Savoie à la France. Tant que la France était séparée de la Savoie, français et savoyards se battaient et chacun essayait d'endiguer le Rhône pour qu'il aille chez l'autre, en tout cas la chose n'était pas réglée de façon consensuelle. Est arrivé Napoléon III, et de l'argent pour endiguer le Rhône et dompter la Chaudanne et en faire une plaine agricole exploitable, dans l'intérêt commun des savoyards et des français. Quelques années plus tard est survenue une crue qui a inondé Lyon. Ceci ne s'était pas vu jusque là, la Chaudanne jouant son rôle d'expansion et empêchant que le Rhône ne déborde dans Lyon. À l'époque, on était sous Napoléon III. Je me souviens d'avoir vu dans la mairie de ma commune un arrêté de l'époque disant « Tout chasseur qui chassera pendant les périodes interdites sera mise à mort ». La réglementation du XIXe siècle était donc autoritaire vis-à-vis de ses administrés. On a dit « vous allez détruire tout ce que vous avez fait » : on a rendu à la Chaudanne son rôle d'expansion des crues. Je crois donc que l'administration est là pour, quand il le faut, pouvoir imposer des mesures d'intérêt général et il faut reprendre cette vision de la puissance publique.

Pour autant nous abordons un problème difficile car beaucoup plus diffus. En d'autres termes : endiguer ou ne pas endiguer la Chaudanne, c'est simple et visible. Mais les débats d'hier ont montré que le problème de la génération des crues dans les bassins versants est un problème beaucoup plus complexe, et la décision est également diffuse, portant sur de micro-aménagements de plus en plus importants à comprendre.

J'en viens à l'aspect recherche et je dirai deux choses.

La première c'est que l'outil de recherche majeur du chercheur est le bassin versant de recherche expérimentale (BVRE). Je ferai un plaidoyer pour que soient maintenus et développés ces BVRE, et que le financement qui leur est attaché soit effectivement disponible, d'une part pour équiper, d'autre part pour observer ces BVRE. Ceci est en cours de discussion, quant à la permanence d'observateurs, et quant à la façon de mettre à la disposition des BVRE, outils collectifs de la recherche, les moyens humains nécessaires pour faire ces observations. Tout le monde comprendra que les problèmes que nous essayons de régler aujourd'hui sont des problèmes qui demandent une observation à long terme du fonctionnement des bassins !

Un autre problème se posant au niveau de la recherche est celui du changement d'échelle : comment est-ce que l'on passe d'une observation de recherche faite à une certaine échelle à une conclusion à une échelle plus grande, l'échelle de gestion permettant de prendre des décisions ? C'est un sujet de recherche sur lequel, avec Guy Oberlin et d'autres, nous avons beaucoup parlé, essayé de réfléchir, et sur lequel il reste énormément de choses à faire. Il est un point fondamental à avoir à l'esprit, quand on veut faire de la recherche dans ce domaine de fonctionnement des bassins versants : il est indispensable que les données permettant de décrire ce fonctionnement soient cohérentes entre elles en ce qui concerne leurs échelles spatiales. Si nous voulons observer finement le comportement, il faut d'abord avoir des observations fines de la nature du terrain. On a parlé hier de l'importance que revêt le RGA, mais le RGA n'est pas spatialisé, il est en pourcentage. Si on veut comprendre le fonctionnement de tel type d'aménagement ou de tel type de végétation ou de traite-

ment des sols sur la genèse des crues, il faut avoir une observation spatiale distribuée, mais aussi avoir à la même échelle la distribution des pluies, sinon on ne peut rien faire. Autrement dit, si dans un bassin on a une connaissance parfaite de la distribution de l'aménagement de l'espace mais qu'en revanche on a un seul pluviomètre, on ne fera rien. Il est nécessaire que l'on ait à la même échelle, une information spatialisée sur les pluies. Je me retourne là vers les collègues de la météorologie, c'est avec eux qu'il faut travailler et utiliser les outils les plus modernes de spatialisation des distributions des précipitations pour faire ces observations.

Dans le même esprit de cohérence des informations entre elles, pour comprendre le fonctionnement des bassins versants, il faut avoir une connaissance parfaite de la nature du fonctionnement qu'engendre chacune des discontinuités du paysage que sont les haies, les fossés, les drains - je regarde ici mademoiselle Carluer qui travaille au Cemagref sur ces sujets, à propos du bassin expérimental du Naizin. On s'aperçoit que c'est difficile, tant du point de vue de la modélisation que déjà de la compréhension ; mais c'est indispensable. Il faut donc avoir une observation, à l'échelle des bassins versants de recherche, de la nature de ces objets et de leur fonctionnement hydrologique particulier, qui n'est pas clair : est-ce qu'un fossé ralentit, accélère, draine, infiltre, ruisselle, est-ce qu'une haie joue le rôle de fossé dans certains cas ou au contraire laisse passer des choses dans d'autres cas, tout ceci demande observation...

Il n'est absolument pas clair de savoir comment passer de cette observation fine, nécessaire à l'échelle du bassin versant de recherche, à l'échelle de l'espace rural, c'est-à-dire à l'échelle qui intéresse les aménageurs et les décideurs. La demande est forte : j'ai entendu Messieurs Guyot et Fradin : « on a besoin d'outils pour aider à la prise de décision donc de savoir ce qui va se passer » ; pour moi, chercheur, cela veut dire être capable de prédire, donc de modéliser. Or modéliser cet objet qu'est le bassin versant à taille intermédiaire, c'est ce qu'il y a de plus difficile, parce qu'on demande au changement d'échelle de prendre en compte de plus en plus d'irrégularités et d'hétérogénéités à l'intérieur du paysage.

Il faut réfléchir aussi dès aujourd'hui à la façon dont on pourra collecter, de façon plus globale et plus statistique, une information à l'échelle du département, de la région, d'un bassin versant entier, sur les discontinuités citées, celles qui ont un fonctionnement difficile à modéliser. D'où l'importance de la cohérence des échelles d'observation, de l'existence de laboratoires et de l'existence donc de moyens en personnel pour pouvoir suivre ces affaires. Je crois qu'au sein de certains organismes, comme le C.N.R.S. par exemple, il y a une réflexion qui se pose sur l'érection des bassins versants expérimentaux en outils de connaissance de la planète auxquels pourraient être affectés un quelques-uns des postes d'observateurs qui existent dans la communauté scientifique.

Je finirai par deux petites observations.

La première est sur l'organisation de la recherche en France dans le domaine de l'eau. Nous sommes assez fortunés d'avoir un assez grand nombre d'organismes scientifiques et techniques qui travaillent dans ce domaine - je pense en particulier au Cemagref, à l'Orstom, à l'INRA, au BRGM. Tous ont vocation de faire de la recherche dans le domaine de l'eau et il est à se féliciter que soit créé un organisme le GIP HydrOsystemes afin de coordonner ces différents établissements. Si nous regardons ce qui se passe à l'étranger, je pense à l'Angleterre, le problème de l'eau est plus étudié par un seul organisme, l'Institut d'Hydrologie, qui essaie de couvrir l'ensemble du problème ; aux États-Unis, c'est plutôt

l'U.S. Geological Survey, qui traite à la fois les eaux souterraines et les eaux de surface, et qui a une mission d'observatoire : c'est donc plus concentré. En France, nous avons créé le GIP HydrOSystèmes, et c'est très bien. Si j'en viens cependant à ce que je connais mieux, à la recherche universitaire et au C.N.R.S., je constate que les priorités définies là par les instances de tutelle sont assez peu favorables aux recherches finalisées vers les problèmes de l'eau tels que nous les connaissons. Si vous vous interrogez quant à la façon dont la recherche publique scientifique et fondamentale, représentée par l'université et le C.N.R.S., s'intéresse à ces problèmes d'hydrologie, vous constatez que la perception qu'en ont les instances de recherches, les instances nationales, est assez négative. Elle dit très simplement : « c'est un problème qui a de la demande, c'est-à-dire qu'il y a une demande sociale, il est donc normal que la société finance ce type de recherche indépendamment des canaux de la recherche publique, et donc nous, C.N.R.S. ou nous, universités, nous n'allons pas nous mettre à faire ce genre de chose ».

C'est le discours que nous entendons au C.N.R.S. : « puisque vous avez accès à des financements publics venant des secteurs sociaux qui le demandent, nous, qui nous intéressons à l'astronomie ou au noyau de la terre, par exemple, et qui n'avons pas accès à ce genre de financement, nous devons avoir la quasi totalité des financements, et vous, qui vous intéressez à des choses qui ont une importance sociale, débrouillez-vous pour trouver votre argent ailleurs ». C'est cela la philosophie qui règne aujourd'hui, il faut le savoir, je ne sais pas si je partage totalement ce point de vue.

Dernière idée, à propos de l'influence humaine sur les modifications éventuelles du climat : je n'aurais pas le temps ni la compétence de traiter ce vaste sujet, mais je pense que nous vivons aujourd'hui en réfléchissant à ces problèmes de crue, de genèse de crue, d'inondation, avec en tête ce que nous ont appris nos parents et nos maîtres - que le climat est à peu près stationnaire et qu'on peut plus ou moins faire des statistiques et vivre sur ce que l'on a observé dans le passé pour prédire ou concevoir ce qui va se passer dans le futur. Cependant nous savons, par ailleurs, que nous sommes dans une phase où la modification anthropique de la consistance de l'atmosphère, et la modification des facteurs régissant l'effet de serre, est en train d'avoir des conséquences climatiques importantes. On ne sait pas exactement les chiffrer aujourd'hui mais nous savons qu'elles existent. Le point sur lequel j'aimerais attirer votre attention c'est que les découvertes les plus récentes en matière d'étude des variations climatiques par étude des carottes glaciaires du continent antarctique ou du Groenland ont montré que lorsque variation climatique il y a eu, elles se sont certes produites par une lente dérive conduisant d'un climat chaud à un climat froid ou inversement en quelques milliers d'années, mais en s'accompagnent d'une augmentation de la variance des phénomènes. Autrement dit, quand on va passer d'un climat stable avec une certaine variance à un autre stable à nouveau avec une autre variance, nous pensions que cela se faisait lentement et progressivement. Et il est vrai que cela se fait progressivement. Mais ce qui est nouveau, qu'on ne savait pas, c'est que la variance, la variabilité, devient énorme pendant la phase d'évolution. En terme de récurrence des événements extrêmes, ceux même qui nous préoccupent, les statistiques antérieures peuvent peut-être nous permettre de dire qu'on aura une fois tous les cent ans des phénomènes qualifiés de centennaux, mais on appuie ce raisonnement sur des bases qui sont totalement indigentes ; on devrait plutôt admettre que la variabilité des phénomènes climatiques qui nous intéresse est totalement inconnue si on essaie de se baser sur les éléments les plus récents de la recherche. C'est un point fondamental : les récurrences d'événements extrê-

mes, quels qu'ils soient, sécheresse ou pluie extrême, peuvent être à attendre avec une fréquence plus importante dans les années à venir que dans le passé. Je vous remercie.

M. Dunglas.

Merci, Monsieur De Marsily, de nous avoir rappelé ces choses fondamentales et que nous avons un peu tendance à ignorer, ayant tendance à projeter le passé sur l'avenir, même dans l'application hydrologique de tous les jours. Merci aussi de nous avoir rappelé les difficultés auxquelles nous nous heurtons au niveau de la recherche. Un point m'avait choqué lorsque j'étais au Cemagref : entendre un conseiller d'un niveau très élevé du Ministère de la Recherche de l'époque dire que " l'hydrologie n'est pas une science, ce n'est qu'une technique d'ingénieurs ; il est donc inutile d'avoir des D.E.A. et des thèses en hydrologie". Supprimer le D.E.A. d'hydrologie c'était une véritable catastrophe : nous savons maintenant que les principales avancées dans le domaine correspondent à des travaux de D.E.A. et des thèses. Il faut se battre sur ce point et bien souligner que tous ces travaux auxquels nous nous livrons, certes de recherche appliquée, ont une importance fondamentale même si les difficultés de financement existent.

Nous voilà au terme de cette table ronde. Peut-être certains d'entre-vous ont-ils été frustrés car ils espéraient entendre " telle chose a une influence tout à fait manifeste, il faut agir là-dessus ". Malheureusement, à l'heure actuelle, nous sommes démunis : nous savons que l'homme peut agir sur les crues, à divers titres, que son influence est diminuée à mesure que les phénomènes deviennent de plus en plus exceptionnels. Nous avons un certain nombre d'orientations en tête, nous savons ce qu'il faut faire ou éviter de faire même si nous n'avons pas toujours la quantification correspondante. Il faut donc continuer à aller de l'avant et essayer de préciser cela. Les principaux problèmes sont le changement d'échelle, et le passage de la connaissance scientifique aux règles de gestion que doivent mettre en œuvre l'administration et les gestionnaires des rivières et des fleuves. Je crois qu'il est temps de donner la parole à la salle.

36. Débat

36.1 Intervention de M. Gilles Somméria, Directeur Adjoint de la Recherche à Météo France

La météorologie est un partenaire évident dans tous les problèmes d'études de crue, monsieur De Marsily l'a bien souligné. J'aimerais dire en quoi elle peut compléter le travail des hydrologues. La météorologie intervient au niveau de l'estimation et de l'observation des précipitations, input essentiel pour les crues, l'eau étant ensuite redistribuée au sol. La météo intervient par son réseau d'observation de pluviométrie au sol, ainsi que par le réseau radar et les estimations de précipitations qui peuvent en être déduites. Les mesures déduites de l'observation radar sont encore sujettes à caution, des travaux de recherche se poursuivent pour leur usage quantitatif. La météorologie intervient également dans l'estimation du couvert neigeux, qui joue beaucoup dans certaines zones en France, grâce

au Centre d'Etude de la Neige, à Grenoble, qui fait des mesures et des estimations quantitatives d'accumulation du manteau neigeux tout au long de l'hiver.

La météorologie intervient ensuite dans la prévision des précipitations, aussi bien quant aux événements violents à très court terme – orages, qui peuvent être dévastateurs – que quant à la prévision normale des précipitations à échéance de 48 heures – demeure le problème des échelles, bien sûr, les mailles de prévision les meilleures obtenues pour l'instant étant de l'ordre de 30 kilomètres. La météo intervient au niveau des études de modélisation générale qui peuvent être couplées au modèle hydrologique. Il s'agit de modèles de recherche pouvant aller à une échelle plus détaillée que les mailles de prévision, jusqu'à quelques kilomètres pour les modèles non-isostatiques, qui font une prévision détaillée des mouvements atmosphériques dans les trois dimensions.

La météo intervient en dernier lieu sur le problème des variations climatiques. C'est l'un objet de recherche très important pour Météo-France. Nous travaillons d'abord sur les problèmes d'effet de doublement du CO₂, d'une part en tant qu'effet de serre, d'autre part quant aux impacts au niveau régional sur les températures, les précipitations, etc. Un autre domaine de modifications possibles par l'homme des régimes de crue est lié aux modifications du couvert végétal, qui induit des changements de rugosité et d'albédo des sols. À grande échelle, ils ont un impact sur le régime des précipitations.

M. De Marsily

Un thème de recherche important, même si ce n'est pas un thème de cette table ronde, c'est la prédiction à court terme. La coopération entre Météo France et les hydrologues est là très importante : à mon sens, on peut à court terme et en temps réel, corriger les prévisions météorologiques, entachées d'un certain nombre d'incertitudes et d'erreurs, à partir des mesures au sol du débit et donc du ruissellement. Il y a un retour nécessaire et possible, en matière de prédiction météorologique, qui demande des développements mathématiques, entre ce que la météo a prévu et ce que les hydrologues observent au sol : ce que nous voyons arriver dans les rivières met en évidence l'erreur faite par la prévision météorologique. Ceci permet de corriger la prévision météorologique sur l'heure suivante. Le lien peut être fait par la méthode des filtres de Kalman qui permet, en combinant les deux approches, d'améliorer, me semble-t-il, la prévision météorologique en essayant de corriger l'erreur.

36.2 Intervention de M. Vazken Andréassian

Monsieur Fradin a parlé d'un guide méthodologique à rédiger pour aider les aménageurs, les gestionnaires de terrains, les D.D.A.F. à agir dans une meilleure direction, afin que leurs actions n'aient pas d'influence sur les crues. Si ce guide est écrit et appliqué, dans une quinzaine d'années tous les auteurs seront en prison : dans l'état actuel des connaissances, ce que l'on peut dire est trop imprécis, et toute recommandation se révélera forcément erronée quelque part. Si on ne fait pas d'étude de terrain qui amènent des convictions fortes, si on ne travaille pas sur des bassins versants réels selon un protocole bien préparé, on va forcément dire beaucoup de bêtises.

M. Roussel

Juste un mot avant de passer la parole à Guy Fradin. Je ne crois que ce soit le chercheur qui finira en prison. Pour moi et un certain nombre d'autres, on peut espérer que la loi du 16 mai 1996 nous répondra en partie : il est acté que « il appartient aux juges d'apprécier si tout le possible a été fait en fonction des connaissances disponibles ». Si on a donc fait toutes les diligences normales, on peut théoriquement échapper à la pendaison, ce qui est rassurant.

Ceci posé, le fait que l'on n'ait pas les connaissances qui nous permettent de prendre les décisions les meilleures ne nous dispense pas de faire le mieux possible dans le cadre de ce que l'on sait actuellement. Ce type de guide est justifié. On en prépare d'autres, par exemple avec la Direction des Routes sur l'art et la manière de prendre en compte les problèmes d'eau et notamment d'inondations lors des projets de grandes infrastructures : c'est exactement le même type de problèmes. On ne sait pas si on arrivera à faire des autoroutes qui n'aient pas incidence sur les inondations, mais en tout cas, on peut déjà essayer de faire le mieux possible, à un coût économiquement supportable, dans le cadre des connaissances actuelles. Nous sommes bien obligés d'avancer comme cela sinon on ne fera jamais rien.

Guy Fradin

J'allais dire exactement la même chose. Nous sommes des décideurs, nous devons nous doter des moyens disponibles les meilleurs possibles ; nous faisons appel aux institutions compétentes pour cela. Ces guides vont être rédigés dans un premier temps par le Cemagref, qui dispose de savoir-faire et de la capacité de compiler les connaissances sur lesquelles il paraît indispensable de faire le point puis de les mettre à disposition des aménageurs. C'est nécessaire.

Pour répondre à votre interrogation, j'ai quand même insisté sur le quatrième volet de ce programme, qui est le volet recherche : il y a un travail de recherche à faire auxquels nous, Ministère de l'Agriculture, devons participer pour ce qui nous concerne.

Daniel Vidal-Madjar

J'aimerais répondre sur deux points :

- La responsabilité du chercheur : si l'on est pas sûr de ce que l'on dit, il faut le dire, insister sur le fait que ce que l'on a dit est modifiable et imprécis, et indiquer quelles sont les zones d'ombre sur lesquelles il faut que l'on travaille. Mais il faut absolument que le chercheur fasse passer l'état actuel de ses connaissances, et collabore pour que ces connaissances soient effectivement prises en compte. Sinon, on va avoir une ignorance entre les deux milieux ; dans dix ans, ce sera bien pire : on accusera les chercheurs de ne pas avoir fait ce qu'il fallait pour que les aménageurs comprennent.

- La question des observations de terrains. C'est une vraie question, qui n'est pas simple. Aujourd'hui, au sein des organismes de recherche, on y réfléchit sur la notion d'observatoires de terrain, tels que les BVRE, pour la recherche en hydrologie. Nous nous heurtons non seulement à un problème de financement, mais aussi à un problème de for-

ces humaines pour arriver à maintenir ces sites, à les faire fonctionner, leur donner des programmes.

Dans mes futures fonctions de directeur adjoint de l'INSU, je trouverais néfaste que par une pression extérieure, on détourne les chercheurs de ces sites. Ceci aboutirait à une situation où la totalité des observatoires à long terme pour l'hydrologie aurait disparu parce que les gens sont allés n'importe où et n'importe comment, sans direction, faire leurs observations.

Ce pour quoi je plaide, c'est que si l'on doit mettre en place des observations concernant le sujet de ce jour (l'effet des actions de l'homme sur la genèse des crues), on réfléchisse longtemps et que l'on ne disperse pas les moyens et les forces de la communauté hydrologique.

36.3 Intervention de Mme Evangelia Ralli, Secrétaire général de l'association de la Vallée de l'Oise Val des Genêts

J'ai entendu ce matin que les outils d'aide à la décision, en ce qui concerne le modèle hydraulique, restent à faire. Or que se passe-t-il dans les enquêtes publiques ? Comme citoyen, nous allons voir les études d'impact hydraulique : on nous présente des modèles qui fonctionnent apparemment très bien ; à la fin de chaque projet, on nous dit que l'impact hydraulique est négligeable. Or vous avez dit aujourd'hui - et la fine fleur de l'hydrologie et de l'hydraulique en France est ici - qu'on ne connaît rien, que tout est à faire.

Une deuxième question : on a appris que l'eau potable va être frappée d'une redevance sur les inondations. En tant que consommateur d'eau, certes intéressé aussi par les problèmes d'inondation, nous pensons qu'il y aura opacité si on mélange inondations et redevance pollution.

M. Roussel

Je vais répondre à la question des modèles. Dans l'état actuel, on sait faire des modèles hydrauliques, des modèles hydrologiques, on sait les coupler. Mais pas suffisamment bien pour répondre à toutes les questions. Prenons une études d'impact concluant que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes : si cette étude avait été réalisée par des chercheurs, ils auraient dit qu'on ne peut pas conclure à un quelconque, mais auraient précisé dans le paragraphe suivant que c'est compte tenu de l'état des connaissances, de l'outil utilisé, que rien ne préjuge de l'avenir, qu'avec le progrès technique et technologique concernant les outils de simulation, qu'on pourrait très bien arriver quelques années ensuite à une conclusion opposée, etc.

Il faut effectivement un dialogue permanent entre le milieu de la recherche et les utilisateurs. Aujourd'hui, on trouve trop souvent une rupture entre ces deux milieux ; les utilisateurs ne sont absolument pas conseillés comme ils devraient l'être vis-à-vis des outils mis à leur disposition par la recherche. C'est une question d'éducation, de patience, et de disponibilité du chercheur.

Quant au prix de l'eau, il n'est pas envisagé d'augmenter les redevances des agences de l'eau de quelque façon que ce soit et pour quel que but que ce soit, ceci dans les cinq prochaines années, en francs constants. Ce qui a été décidé par le gouvernement est de demander aux agences de contribuer, à hauteur de 1% de leurs moyens, au budget de l'État pour ce qui concerne la restauration des cours d'eau et l'aménagement de champs d'expansion de crue, ceci à enveloppe budgétaire constante pour les agences. 1 % sur cinq ans, nous sommes dans l'épaisseur du trait : il n'est pas envisagé d'augmenter le prix de l'eau à ce titre.

M. Dunglas

Pour contribuer à répondre au sujet des modèles. Les modèles utilisés aujourd'hui pour voir l'effet d'un aménagement sont purement hydrauliques. Ils sont utilisés depuis plus d'une trentaine d'années ; testés avec une expérience réelle, ils montrent une extrême fiabilité. L'aspect hydraulique ne recèle plus vraiment de mystère à l'heure actuelle.

Il peut y avoir par contre une difficulté dans l'application de ces modèles purement hydrauliques à l'écoulement d'une crue dans un cours d'eau : l'imprécision de la topographie, ses variations, la non prise en compte d'un certain nombre de phénomènes, et l'imprécision de l'hydrogramme que l'on injecte à l'amont du modèle, en définitive la définition même de la crue contre laquelle on veut se protéger. Il y a effectivement des discussions sur la cette crue de projet, sur la topographie et sur la précision de description des aménagements intégrés dans le modèle.

36.4 Intervention de M. Leynaud

Les doutes font partie de la démarche scientifique ; mais en ce qui concerne les interventions humaines, on a quand même mis en évidence certains processus, des influences potentielles, et on a quelques notions de ce que ces effets se cumulent. Il ne faudrait pas laisser entendre que les influences humaines ne jouent qu'à la marge, car ils se cumulent. Or certains sont prêts à franchir allègrement le pas de dire que quoi qu'on fasse cela ne changera rien.

Lorsque l'on dit que les influences humaines s'effacent totalement devant les phénomènes les plus intenses, je ne suis pas non plus d'accord. Certaines pointes de crue ont une localisation spatiale réduite, se produisent dans un temps réduit, et mettent en œuvre des volumes d'eau qui ne sont pas faramineux, mais sont les épisodes dommageables. Les influences humaines ne s'effacent pas totalement dans ces cas là. Evidemment l'écueil inverse, de laisser croire au public que l'on est capable, vraiment, de maîtriser les eaux, est à la limite de l'imposture. Il faut que le public sache qu'on ne peut pas maîtriser tous les phénomènes.

Monsieur De Marsily a soulevé une question importante : jusqu'à présent, on se croyait dans la " stationnarité " climatique. Tout laisse à penser, au contraire, que les événements dits exceptionnels ont des chances d'augmenter en fréquence et par conséquent il faut être extrêmement prudent.

Dans les enquêtes publiques, l'objectivité voudrait que, quel que soit le modèle employé, on fasse apparaître la marge d'incertitude qui les accompagne.

En ce qui concerne la formation : le passage des connaissances actuelles dans l'action me paraît très lent à cause de la faible disponibilité des maîtres d'œuvre et des maîtres d'ouvrage, peu réceptifs aux actions de formation développées à leur intention. Pour ne citer qu'un exemple : l'ENGREF avait organisé des sessions de formation avec le concours du Ministère de l'Environnement. Pour nombre d'entre elles il n'a pas été possible de faire le plein. Faut-il aller jusqu'à délivrer un brevet de capacité aux gestionnaires, y compris ceux sortis d'école depuis 20-25 ans ? Le problème est grave. Les personnes qui décident actuellement ont-elles les compétences techniques nécessaires, et présentent-elles ces compétences avec l'objectivité souhaitable ?

36.5 Intervention de M. Michel Robert, SRAE, ministère de l'Environnement

Je trouve que les interventions de Messieurs Vidal-Madjar et De Marsily se complètent en une ébauche de programme de recherche. Il faut effectivement utiliser les bassins versants de recherche - il y a eu un gros investissement fait au niveau du Gip Hydrosystèmes au bénéfice de cet outil à la fois d'observation et d'expérimentation. Ce sera très intéressant de voir l'occupation des sols, etc. dans ces différents bassins. Ensuite, il va bien sûr falloir se pencher sur le changement d'échelle puisque ces bassins versants sont élémentaires. Le troisième niveau est celui de la modélisation. Aurons-nous un modèle ou des modèles ? Monsieur Pointet a parlé de dénaturation des modèles, pour simplifier, en fonction des processus majoritaires.

On a peu parlé de typologie des crues : une crue étant un agglomérat de phénomènes diffus, est-il possible de dégager des processus dominants au niveau des petits bassins versants et de faire ensuite une typologie au niveau des actions humaines, pour faire ensuite une gestion active de ces bassins ?

Guy Oberlin

Ce que l'on croit savoir - mais le débat n'est pas fini entre scientifiques - c'est que lorsque l'on change d'échelle, il faut probablement changer de type de modélisation, de concept, etc. Le problème est d'assurer une cohérence d'ensemble. Je ne pense ainsi pas qu'un modèle sur la Loire puisse être la simple intégrale sur x, y, z et t de modèles des processus élémentaires. Théoriquement, c'est faisable, pratiquement cela ne l'est pas.

Quels sont donc les modèles à grande maille ? Hier j'ai parlé de synthèse, tout à fait en aval.

La typologie est une autre réponse. Il y a des recherches en cours, certaines financées par le ministère de l'Environnement, pour voir si l'on peut faire des typologies de régimes, y compris de crue. C'est probablement possible, mais avec de forts degrés d'incertitude. La typologie d'une crue faible ne sera pas forcément la même que celle d'une crue forte pour un bassin donné : à la limite, en Bretagne, le processus de génération des crues excep-

tionnelles pourra être méditerranéen - je prend exprès l'image pour choquer un peu. Il faudra ensuite valider...

Il y a ensuite une difficulté de composition des risques dans l'espace. C'est un énorme problème, j'aimerais bien que dans le programme de recherche que nous allons lancer, il soit abordé. Ceci présente des aspects mathématiques et conceptuels. Notons que le terme de composition va au-delà de la simple terme agrégation de phénomènes localisés. Donc oui à une approche typologique... mais nous n'en avons pas encore fait le tour.

36.6 Intervention de M. Michel Guillot, enseignant de Droit Public à l'Université Lyon II

Monsieur Vidal-Madjar, dans le bilan présenté en début de matinée et à propos du programme de recherche du Gip Hydrosystèmes, a parlé d'entamer une réflexion sur le changement de réglementation en matière de gestion des crues. Messieurs Langenfeld et Guyot nous ont ensuite dit que par des dispositions législatives récentes (loi sur l'eau de janvier 1992, loi du 2 février 1995 et loi du 16 mai 1996 notamment), les schémas d'aménagement des eaux et les plans de prévention des risques avaient apporté de véritables innovations et représentaient un réel progrès en la matière.

Ma question est : y a-t-il des lacunes législatives et réglementaires persistantes en matière d'encadrement des comportements générateurs de crues, une inadaptation des instruments juridiques existants, ou bien est-ce la mise en œuvre de l'arsenal juridique par les autorités locales déconcentrées et décentralisées qui pose problème ?

M. Laurent.

Je ne crois pas qu'on ait un problème d'instruments juridiques – à voir dans le détail. On a un problème de culture. Les gestionnaires n'ont pas la culture qu'il faut parce que les scientifiques n'ont pas élaboré de concepts opérationnels. Il faut reconstituer le sens physique des gestionnaires : " quand je pousse dans ce sens là, cela va dans ce sens là : est-ce bon, est-ce mauvais ? ". On a réellement une difficulté qui est de savoir si faire tel travail a telle influence ou pas. Si les scientifiques restent dans leur tour d'ivoire, ne disent pas où ils en sont, on n'alimentera pas le sens physique des gestionnaires. Après il faudra donner faim aux gestionnaires et c'est un autre débat. Je ne crois pas qu'on ait un problème d'instruments juridiques. Une fois que l'on sait ce qu'il faut faire, on a encore peut-être un petit problème pour trouver de l'argent, mais le principal problème est d'avoir des recettes opérationnelles pour un plan d'action.

Si l'on doit recommencer un jour ce colloque, il faudra peut-être d'ailleurs parler du régime des eaux plutôt que simplement des crues : on voit bien que l'influence humaine est importante sur le régime des eaux, non seulement les crues mais aussi les étiages et l'alimentation des nappes.

36.7 Intervention de Mme Anne-Véronique Auzet

J'avais un certain nombre de commentaires à faire. Nous avons un certain nombre de connaissances sur les processus. Mais ce n'est pas pour autant que nous avons assez de connaissances pour dire comment ces processus s'organisent dans l'espace, et dire comment l'influence de l'homme sur ces processus aurait une traduction au niveau du cours d'eau. Ceci parce que cette influence est principalement de type diffus. C'est donc un premier constat : la recherche sur les processus est totalement nécessaire mais ne suffira pas à apporter des réponses, surtout simples et facilement applicables.

Seconde chose : il m'a semblé en regardant la bibliographie qu'il y a aussi des problèmes d'hydraulique, en raison de processus au sein même du cours d'eau qui sont loin d'être simples et qui jouent beaucoup sur la modification de la crue au sein du système. Il s'agit notamment d'interactions entre dynamique des lits et transfert liquide, sans parler ici des transferts solides.

Si l'on veut voir comment les processus s'organisent dans l'espace et finalement donner des réponses en terme d'aménagement de l'espace, il y a un problème de données spatiales. A-t-on ces données spatiales ou sommes-nous capables de les avoir, et en connaît-on suffisamment la qualité ? Il faut bien avoir conscience, que l'on a des systèmes - par exemple des systèmes d'information géographique, très intéressants - qui donneront des réponses erronées voire dangereuses si on ne tient pas compte de l'incertitude liée aux données.

La démarche typologique, telle qu'elle a été présentée, est une solution possible. Mais il est possible pour classer types de crues et types d'influence d'agir à plusieurs niveaux et le problème est de savoir sur quoi va-t-on se baser pour classer ces situations. Les observations sur bassin versant expérimental touchent un niveau d'espace nécessaire mais limité, et ne répondront pas à l'ensemble des questions. Y a-t-il dans les connaissances des services opérationnels des observations qui donneraient du grain à moudre à la réflexion, qui permettraient de construire un certain nombre de types par rapport à des hypothèses touchant à l'influence de la distribution de certaines activités de l'homme ?

M. De Marsily.

Si j'avais la réponse je serais en train de le faire ; mais on peut quand même réfléchir. En matière de modélisation, les phénomènes locaux ont une influence importante. Pour passer à une échelle de gestion, il y a deux approches.

La première est d'espérer que ces phénomènes locaux, se moyennant l'un l'autre, finissent à une loi statistique simple, une loi des grands nombres qui permet de dire " dans le détail, je ne sais pas comment cela fonctionne mais cela doit avoir un comportement global tel ou tel ". On essaie d'approcher ce comportement à partir de l'observation du comportement lui-même c'est-à-dire " si je mesure ce qui se passe à l'exutoire, ou dans la rivière, je peux en déduire une espèce de comportement moyen global. "

L'autre approche est finalement de suivre à une échelle beaucoup plus fine le comportement local, ces fameuses positions de fossés, etc., en recourant à des systèmes

d'informations géographiques, des méthodes de mesure, d'observation ou de détection au moins par géophysique lointaine (photo aérienne, image radar, image aéroportée...). Ceci permet d'avoir accès à une certaine densité, une certaine structure de ces anomalies et j'essaie de les représenter dans les modèles avec une certaine incertitude - on sait tenir compte par modélisation stochastiques d'une connaissance imparfaite des paramètres -. On fait alors du changement d'échelle en modélisant, avec une connaissance imparfaite, ces systèmes complexes locaux qu'on a du mal à déterminer.

Pour l'instant les scientifiques n'ont pas tranché : est-ce qu'on fait la première approche, la seconde, est-ce qu'on marie les deux ? Mais je sais que c'est l'une de ces deux approches qui nous permettra de répondre à la question que vous posez.

36.8 Intervention de Mme Brigitte Lancelot, agence de l'Eau de Seine-Normandie

J'insisterai dans le sens de Messieurs Guyot et Langenfeld lorsqu'ils ont dit qu'il ne fallait pas séparer quantité et qualité : lorsqu'on arrivera à des propositions d'actions il faudra donner la priorité à celles qui agissent dans les deux sens. La loi sur l'eau a rappelé qu'il faut viser une gestion intégrée et non pas traiter du problème des crues uniquement sous l'angle de la quantité. On peut effectivement parler de régime hydrologique, comme l'a dit Monsieur Laurent, mais outre que la période d'étiage dépend de ce qui se passe au moment des inondations, quand on cherche à trop régulariser les cours d'eau, cela peut se faire aux dépens de la vie biologique. Je rejoins là un peu une autre préoccupation du GIP HydrOsystèmes, en gestion des milieux aquatiques et des zones humides.

J'insisterai également sur le fait que les propositions d'actions techniques devront s'accompagner de propositions socio-économiques : il faut non seulement savoir ce qu'il faut faire mais également comment mettre en pratique ces propositions. Cela va dans le sens de moyens, de conventions éventuellement, de mesures compensatoires... Tous ces volets forment un tout et doivent faire partie de vos travaux de recherches.

Clôture du séminaire

Jean-Luc Laurent

Directeur général de l'Administration et du financement,
Ministère de l'Environnement

J'ai un rôle un peu bizarre, puisqu'il me convient de conclure sur des débats auxquels je n'ai pas assistés. Je m'appuierai sur les questions posées par la salle.

Le projet de ce colloque était de confronter des chercheurs avec les utilisateurs des travaux ; un tel colloque est donc, clairement, un instrument de pilotage de la recherche.

Si vous avez la curiosité de regarder le début du document du GIP HydrOsystemes, vous trouverez quelque chose qui m'effraie, un résumé de ce qui se disait en 1872 à propos du bassin de la Meuse : " Il y a des inondations parce qu'il pleut et on prétend que c'est aggravé parce que les agriculteurs font des choses ". C'est un peu ce que disent les chercheurs encore maintenant.

Si on ne change pas rapidement le dialogue entre les gens d'action et les chercheurs, il y a bien un jour où le public nous dira de rembourser. Ce n'est pas une plaisanterie : il faut que l'on soit en mesure d'améliorer la compétence des gens qui agissent et que l'on soit en mesure de leur donner une culture technique, un sens physique.

Si on est capable de dire « à partir du moment où l'eau a rejoint la rivière, le débat est de savoir si on la retient en amont ou si on accélère le transit, égoïstement, vers l'aval », des personnes feront tourner des modèles numériques. Au moins on aura fabriqué des instruments, on aura un débat social, et un débat sur la décision. Ensuite, on rajoutera que l'on ne peut pas isoler les crues du régime des eaux, et que la vie de la rivière c'est aussi qu'il y ait de temps en temps des grandes pointes de débit pour renouveler les habitats. On aura alors commencé à créer un certain nombre de concepts qui montrent les dangers des solutions technicistes qui disent soit « on arrivera bien à maîtriser la rivière et il suffit de mettre des barrages partout, cela marchera bien », ou, comme l'ont dit certains élus « c'est un scandale que l'eau douce rejoigne la mer et donc il faut faire des barrages parce que c'est moral ».

Mais tant que l'on n'a pas obtenu des chercheurs un certain nombre d'affirmations qui alimentent le processus de décision, on n'a pas complètement fait le travail.

Ce qu'a dit Monsieur Dunglas des modèles est vrai, avec une limite : il a parlé de l'écoulement de l'eau dans la rivière, et non pas dans les bassins versants. Cela fait un certain temps que l'on sait modéliser les écoulements de l'eau dans un canal ouvert, à l'aide de coefficients de Strickler ou autres pour décrire la rugosité, etc. Mais l'écoulement de l'eau sur un bassin versant et l'équilibre de la rivière entre sa nappe sont beaucoup plus compliqués à mon avis : on n'est pas au point de perfectionner des modèles numériques, mais de créer des concepts, des catégories, des typologies - en tout cas, d'apprendre à

réfléchir. Rien n'est pire que de commencer un modèle numérique avant d'avoir réfléchi, en raison de la confiance attribuée à l'ordinateur.

Je suis aussi convaincu que la priorité, plutôt que de lancer de grands programmes de recherche (ce que l'on fera aussi), c'est d'organiser un dialogue entre chercheurs et gens d'action. Les chercheurs savent plus de chose qu'ils n'en disent, et plus que les gens d'actions, y compris sous forme de leurs doutes. Pour que les gens d'action ne disent pas la même chose qu'en 1872 - ce qui fait un peu mauvais genre, sur un sujet qui a des enjeux sociaux, financiers et humains réels, il faut donc impérativement organiser un dialogue entre chercheurs et gens d'action de façon à avoir des outils, et à organiser la réflexion. Cela nous guidera dans la conception de programmes de recherche, pour bien expérimenter, pas uniquement dans les bassins versants, peut-être aussi en regardant comment fonctionnent les rivières, comment les nappes s'alimentent.

Je crois à l'utilité des synthèses, livrées de façon provisoire à des gens d'action, en interaction. C'est pour cela qu'on a souhaité aujourd'hui inviter une salle assez mélangée, de façon à ce que le dialogue soit le plus riche possible.

Il y a une grande attente de la part du ministère de l'Environnement, qui a inscrit la prévention des risques au niveau de ses priorités, y compris budgétaires, et d'autres acteurs du secteur public. En ce moment, se termine une évaluation des politiques publiques sur les risques naturels. Les inondations représentant 80 % des dégâts en termes monétaires, on est donc bien au centre du problème. Les grandes crues de fin 1993 et début 1994 ont réalimenté le débat quant aux influences humaines sur les crues, le public étant convaincu que la façon dont on a fait évoluer l'aménagement de la France les a aggravées. C'est vrai ou pas, mais quand le public est convaincu de quelque chose ce n'est pas la peine de lui dire qu'il a tort, sauf à argumenter. Nos amis du ministère de l'Agriculture ayant été mis en première ligne, ils se mobilisent et cherchent à argumenter - on ne peut pas avoir une réaction de défense disant « non, cela ne peut pas être vrai ». Le programme de travail que nous avons devant nous, programme de travail qui doit se faire en dialogue entre les chercheurs et les gens qui agissent, c'est d'essayer de faire une typologie des différentes modifications que l'homme apporte au bassin versant, et d'analyser les processus ; les modéliser le plus tard possible. Je crois qu'il y a un danger psychologique dans la modélisation. On finit par y croire et on finit par faire tellement d'efforts et de calculs qu'on y perd la réflexion sur le sens physique.

Le but de tout ceci est d'alimenter un débat social sur l'équilibre à établir entre les intérêts de l'amont et ceux de l'aval, sur l'équilibre entre la rivière à l'étiage et les inondations, et ensuite de disposer d'un dispositif de prévision.

Je crois très profondément que l'on n'arrivera pas à domestiquer les rivières, et ce n'est pas le but. Il faut faire la part de l'eau comme on fait la part du feu, expliquer aux gens que c'est normal que l'eau monte, et que c'est même plutôt bien qu'elle monte de temps en temps parce que cela régénère la rivière. Mais il faut que l'on soit assez solide pour leur expliquer cela, parce que ce n'est pas l'idée qu'on leur a donnée auparavant, lorsque les ingénieurs ont prétendu être capables de tout maîtriser.

Je crois très profondément que le rôle d'un ministère, en terme de recherche, n'est pas de représenter la communauté scientifique mais d'être à l'expression d'un besoin social. Dans

le cas de la maîtrise des eaux, le besoin social est clair, mais il faut encore le conceptualiser : le but, n'est pas d'empêcher l'eau de monter, mais d'éviter les dégâts humains. Dans certains cas, la solution sera d'empêcher les gens de s'installer dans des endroits à l'évidence dangereux.

Il faut à ce sujet essayer d'extraire des scientifiques le plus de choses qu'ils savent. J'étais ce matin aux côtés du Directeur du Cemagref qui me disait qu'il sentait profondément qu'il y avait, chez ses chercheurs, une difficulté à dire les choses. D'abord parce que le doute est consubstantiel à la vie des scientifiques, ensuite parce que si on commence à publier les résultats, on sera obligé de passer sur un autre sujet et c'est toujours un peu dérangeant. Il n'est donc pas aisé de faire dire aux scientifiques ce qu'ils savent, et on n'a pas forcément, non plus, d'écoute des autres acteurs.

C'est cela notre programme de travail. Soyez convaincus que c'est réellement une priorité pour le ministère de l'Environnement, quelle que soit la direction concernée.

Voilà quelques choses que je souhaitais vous dire. Il me reste à vous remercier pour votre attention et votre participation, puisque le but de ce colloque était de mettre en contact des gens de culture différente pour procéder à un enrichissement réciproque.

ISBN 2-85362-509-5



9 782853 624909

Cemagref
EDITIONS

Prix : 185 F TTC (28,20 €)