



HAL
open science

Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations

Christine Poulard, Bernard Chastan, Paul Royet, Gérard Degoutte, F. Grelot,
Katrin Erdlenbruch, Yves Nedelec

► To cite this version:

Christine Poulard, Bernard Chastan, Paul Royet, Gérard Degoutte, F. Grelot, et al.. Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2008, 26, pp.5-24. hal-02591939

HAL Id: hal-02591939

<https://hal.inrae.fr/hal-02591939v1>

Submitted on 12 Dec 2024

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

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

Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations

Christine Poulard^a, Bernard Chastan^a Paul Royet^b, Gérard Degoutte^b, Frédéric Grelot^c, Katrin Erdlenbruch^c et Yves Nédélec^d

Promouvoir la gestion intégrée des inondations à l'échelle d'un bassin versant est une nécessité. En effet, des aménagements mal coordonnés peuvent conduire à simplement déplacer les inondations d'un endroit à un autre. L'article bibliographique (« Revue bibliographique : panorama de la recherche sur la prévention des inondations », page 131 de ce numéro) montre qu'un changement de stratégie est jugée indispensable par les scientifiques (par exemple : déclarations finales des « *International Symposium on Flood Defence* », ISFD3, 2005 et ISFD4, 2008) et par les décideurs (Union européenne, Commission, 2004 ; UE, 2007). Tous conviennent maintenant qu'empêcher tout débordement n'est ni réaliste au plan technique, ni souhaitable au plan écologique, ni tenable au plan économique. En revanche, il est possible de **gérer les inondations**, c'est-à-dire de fixer des objectifs raisonnables de réduction de l'aléa, déterminés au regard des enjeux humains et économiques, tout en diminuant la vulnérabilité aux inondations (réduire les dommages subis pour un aléa donné).

Une politique de gestion des inondations passe par le diagnostic du risque et de ses deux composantes, la vulnérabilité et l'aléa, afin de définir les objectifs. Il faut ensuite sélectionner les méthodes, qu'elles soient structurelles ou non, et coordonner leur mise en œuvre.

Les bonnes pratiques actuelles recommandent non seulement de considérer les effets à l'échelle

du bassin, mais aussi de prendre en compte l'ensemble des conséquences possibles : à l'échelle du régime (comportement pour des crues fortes, risque de dysfonctionnement voire de ruptures) et d'une gestion intégrée (conséquences environnementales, plans de développement).

En effet, l'Homme construit des ouvrages de protection depuis des millénaires. Endiguements et calibrage sont efficaces localement, jusqu'à un certain niveau de crue, mais ils perturbent les écosystèmes et aggravent parfois les crues à l'aval. Le principe de ralentissement dynamique (encadré 1) a été formulé pour proposer une alternative efficace, présentant *a priori* moins d'impacts négatifs que les protections localisées, par des dispositifs de rétention temporaire d'une partie des volumes de crue.

Cette introduction rappelle les concepts de base et donne quelques recommandations générales pour leur mise en œuvre. Elle renvoie au besoin vers des références où les différents points évoqués ici seront plus détaillés, et en particulier vers les autres articles de ce numéro.

Définir le risque pour savoir où et comment agir

Dans son article 2, la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (UE, 2007) définit le risque d'inondation selon ce principe : « *la combinaison de la probabilité d'une inondation et des conséquences négatives potentielles pour la*

Les contacts

a. Cemagref, UR HHLY, Hydrologie hydraulique, 3 bis quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 09

b. Cemagref, UR OHAX, Ouvrages hydrauliques et hydrologie, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

c. Cemagref, UMR G-EAU, Gestion de l'eau, acteurs et usages, 361 rue J.-F. Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

d. Cemagref, UR HBAN, Hydro-systèmes et bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex

Encadré 1

La règle de gestion intégrée du ralentissement dynamique

Le concept de « ralentissement dynamique » (RD) a été initialement proposé en 1992 dans le cadre de travaux pour le Programme hydrologique international de l'Unesco en tant que règle de gestion intégrée privilégiant l'aspect ressource (cité dès Oberlin, 1994 et formalisé dans Oberlin *et al.*, 1997). Il visait à compenser les accélérations du ruissellement provoquées par l'activité humaine. Il considère donc non seulement les problèmes d'inondation, mais aussi d'érosion, de ressource en eau et de préservation des milieux naturels. La mise en œuvre du RD implique d'utiliser au maximum les potentialités de ralentissement et de rétention temporaire en versant, dans les réseaux hydroagricoles, et enfin dans le réseau hydrographique et sa plaine d'inondation ; des exemples de techniques seront détaillées dans la partie sur les techniques d'écrêtement de crues (page 11).

La quantification de tous les effets à l'échelle du bassin versant pose problème. D'une part, les outils de modélisation hydrologique adaptés au calcul de phénomènes fins, comme les ruissellements à la parcelle, ne se prêtent pas aux simulations à l'échelle d'un bassin versant (*cf.* « Deux exemples d'inondations par ruissellement : quelles leçons en tirer pour une meilleure prévention ? », page 55 de ce numéro). D'autre part, la traduction en termes économiques de gains tels que la recharge de nappe, les effets sur les milieux ou une limitation de l'érosion est loin d'être acquise.

Les ouvrages décrits ici semblent, dans leur principe, moins drastiques que les calibrages et endiguements. Cependant, en pratique, leurs impacts sont trop rarement analysés dans le détail. Pourtant, la participation de biologistes au moment de la conception des ouvrages permettrait de réduire leurs effets négatifs, pour exploiter enfin le potentiel intégratif du concept de ralentissement dynamique (Poulard *et al.*, 2009, soumis). Il faut admettre qu'un ouvrage de type RD, de taille modeste et éventuellement très bien intégré dans le paysage, peut pourtant avoir des conséquences fortes, parce que le transit du lit mineur se fait dans un pertuis trop pentu ou trop grand, ou parce que cet ouvrage est situé dans une zone naturelle riche mais sensible. Des travaux pluridisciplinaires sont donc nécessaires pour réellement exploiter tout le potentiel de ce principe de gestion intégrée.

Nous présentons ici des résultats éprouvés, portant donc essentiellement sur des ouvrages de rétention temporaire produisant un effet significatif et quantifiable sur les inondations. Ces ouvrages de rétention, barrages à pertuis ouvert et bassins latéraux, ne répondent pas forcément à toutes les ambitions initiales du RD ; la plupart d'entre eux ont été calculés en fonction d'un objectif unique, l'écrêtement de crue. Cependant, ils constituent, dans leur principe, une alternative crédible à d'autres ouvrages bien plus perturbateurs des équilibres naturels, et ils se prêtent mieux à un plan de gestion intégrée définissant critères hydrologiques et environnementaux (*cf.* « Le Polder d'Erstein : objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental », page 67 de ce numéro).

santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique associées à une inondation ».

Cette définition fait apparaître les deux composantes, souvent appelées respectivement l'**aléa**, qui est le phénomène physique aléatoire, et la **vulnérabilité**, liée aux enjeux susceptibles d'être touchés. En conséquence, pour réduire le risque, il faut agir sur l'aléa et/ou sur la vulnérabilité.

Définir et évaluer le risque

La base de toute action est le diagnostic du risque, afin de définir dans un premier temps les objectifs de protection puis les moyens d'action appropriés.

QUELQUES DÉFINITIONS

Nous allons définir plus précisément les termes d'aléa, d'enjeux et de vulnérabilité tels qu'ils seront compris dans ce numéro.

Encadré 2

Quelques liens sur le risque – Glossaires et conseils pour réduire sa vulnérabilité

La politique de prévention des inondations : protéger les personnes, réduire la vulnérabilité : http://www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=67

Définitions, conseils pratiques et liens à l'attention des citoyens : http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/dossier_risque_inondation/pageintroduction.htm

Se préparer : http://www.prim.net/citoyen/moi_face_au_risque/222_inondation.html et réagir en cas d'inondations : http://www.prim.net/citoyen/moi_face_au_risque/223_inondation.html

Définitions et bilan des connaissances du projet FloodRisk : [http://www.floodsite.net/html/partner_area/project_docs/FLOODsite_Language_of_Risk_v4_0_P1\(1\).pdf](http://www.floodsite.net/html/partner_area/project_docs/FLOODsite_Language_of_Risk_v4_0_P1(1).pdf)

A European Flood Action programme : http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_risk.htm

L'**aléa d'inondation** correspond au phénomène physique, découlant d'événements hydrométéorologiques. Il doit être considéré indépendamment de ses conséquences en termes de dommages. Il se décrit par une probabilité d'occurrence et se représente, par exemple, par des cartes de submersion de période de retour définie.

Les **enjeux** sont la cible potentielle des inondations. Il s'agit des personnes, des biens et infrastructures, mais aussi de l'activité économique en général, ainsi que des milieux naturels.

La **vulnérabilité** est la sensibilité des enjeux à l'aléa. Elle dépend bien sûr en premier lieu de la valeur nominale des biens et du niveau de l'activité économique. Mais des biens identiques peuvent être plus ou moins affectés par la même inondation. Des dispositions constructives adaptées peuvent diminuer significativement des dommages¹. Les dommages dépendent aussi des actions de la population et des autorités pendant l'événement de crue et les jours qui suivent (cf. par exemple : Petrow, 2006) : la capacité à gérer la crise est donc un paramètre de la vulnérabilité.

Les **dommages** sont les conséquences concrètes des épisodes d'inondation. On cherche souvent à chiffrer les dommages provoqués par une inondation sur une zone définie, sous forme d'un coût. Cependant, ces dommages sont en fait difficiles à évaluer en raison du grand nombre d'acteurs en jeu (tous les propriétaires, dont l'État, les collectivités locales...), mais aussi parce qu'ils sont de natures variées :

– *les dommages directs*, dégâts aux biens liés à la submersion, paraissent faciles à évaluer

mais encore faut-il que cette information soit accessible ;

– *les dommages indirects*, comme les pertes d'exploitation et les conséquences des coupures des voies de communication, doivent être comptabilisés sur une durée suffisante, qui peut aller jusqu'à plusieurs années là où l'activité économique a été durablement affectée, voire remise en cause ;

– *certains dommages sont difficilement monétarisables* : pertes en vies humaines, préjudices moraux, perturbations de l'environnement – notamment en cas d'inondation par des eaux polluées. À cette catégorie, il faudrait ajouter également des points positifs, comme le limonage des terres ou le maintien de zones humides.

LE DIAGNOSTIC DU RISQUE

Le risque peut être évalué selon des critères subjectifs (à dire d'expert) et/ou objectifs (en intégrant différents indicateurs de mesure).

Critères qualitatifs

Des grilles croisant aléa et vulnérabilité, comme illustré par le tableau 1, fournissent un diagnostic qualitatif, donné à dire d'expert. Elles se basent sur des critères quantitatifs, comme la vitesse, la hauteur ou la durée de submersion. Cependant, le niveau de risque n'est pas issu d'un calcul mais d'une expertise fondée en général sur un découpage en classes. Cette approche permet de hiérarchiser les besoins de protection.

Dans l'animation grand public « Vivre avec les inondations », présentée dans l'article « Commu-

1. Cf. encadré « Liens sur le risque » : site www.prim.net

► Tableau 1 – Principe d'un tableau de risque à dire d'expert.

	Aléa faible (hauteur et vitesses faibles)	Aléa moyen (faible hauteur et vitesses localement fortes ou vitesses faibles et forte hauteur)	Aléa fort (hauteur d'eau et vitesses fortes)
Vulnérabilité faible (enjeux agricole)	--	-	+
Vulnérabilité moyenne (habitat dispersé, peu d'activités économiques)	-	+	++
Vulnérabilité forte (habitat dense ou activités économiques importantes)	+	++	+++

niquer sur les inondations : quelques propositions pour adapter une expérience de maquette interactive grand public » (page 121 de ce numéro), l'aléa et la vulnérabilité sont évalués de manière qualitative, avec des mots simples (tableau 2). L'aléa d'inondation sur la maquette est caractérisé par « souvent inondé », « rarement inondé », « quasiment jamais inondé ». Pour la vulnérabilité, il s'agit de déterminer pour chaque zone si c'est « grave » qu'elle soit inondée, en fonction de l'occupation du sol. Puis, sur la base de ces éléments, les participants sont invités à choisir une zone prioritaire pour agir, ce qui constitue un diagnostic simplifié du risque.

Échelles quantitatives

Les conséquences liées à un événement particulier constituent une information intéressante, qu'il faut replacer dans leur contexte. Elles dépendent des caractéristiques de l'épisode de pluie – intensité, durée, répartition spatiale, des conditions initiales d'humidité sur le bassin versant et de remplissage des retenues, mais aussi de la survenue d'incidents éventuels – rupture de digue, dysfonctionnement d'une vanne, présence d'embâcles, comblement d'un bassin lié à un

défait d'entretien. À aléa égal, les conséquences peuvent aussi dépendre de la saison (occupation de camping, cycle des cultures...) et du comportement des acteurs.

Des indicateurs synthétiques de diagnostic du risque sont donc nécessaires. Deux voies existent : la méthode « Inondabilité » s'appuie sur la mesure des conséquences physiques exprimée de façon hydrologique, tandis que les dommages moyens annualisés (DMA) reposent sur une estimation monétaire des conséquences. Cette deuxième voie peut former une étape de l'analyse coût-bénéfice.

Dans les deux méthodes, la vulnérabilité est définie pour des types d'enjeux ; elle est donc la même sur le bassin versant étudié pour une occupation du sol donnée (par exemple habitat dispersé, habitat dense, forêt, cultures, routes principales, routes secondaires...).

Dans la méthode « Inondabilité » (Gilard, 1998), la vulnérabilité est exprimée dans la même unité que l'aléa. Pour un enjeu donné, elle correspond à la période de retour moyenne acceptable de l'inondation, et donc à un besoin de protection. Il existe des « normes guides » pour faciliter son expression, mais, *in fine*, cette vulnérabilité

► Tableau 2 – Exemple de tableau de risque sommaire élaboré lors de l'animation « Vivre avec les inondations » sur le modèle du tableau 1.

	Quasiment jamais	Rarement	Souvent
« Pas grave » (zones naturelles peu sensibles)	--	-	+
« Gênant » (champs, prairies)	-	+	++
« Grave » (ville, village, route)	+(le vieux village)	++ (une partie de la ville)	+++ => zone d'intervention prioritaire (un lotissement)

exprimée doit être le résultat d'une négociation impliquant le maître d'ouvrage et tous les acteurs concernés. Le principe d'équité (même vulnérabilité pour une occupation du sol donnée) doit contribuer à la réussite des négociations, parce qu'il facilite la mise en œuvre d'une décision validée par tous.

La figure 1 montre l'établissement du diagnostic, sur la base d'une carte d'aléa (1, valeurs T aléa) et d'une carte de vulnérabilité (2, valeurs T objectif de protection). La superposition fait apparaître les zones à risque, visibles sur la carte grâce à un système de pastilles de couleur.

Dans la méthode des dommages moyens annualisés (DMA), la vulnérabilité correspond à la fonction de dommages, qui donne, pour chaque enjeu, une estimation monétaire des conséquences de l'ensemble des crues potentielles. Ceci permet de calculer, à l'échelle du bassin versant, les dommages liés à chaque événement particulier. L'intégration des données fréquentielles sur l'aléa permet en plus de calculer un indicateur synthétique : les dommages moyens annualisés (Erdlenbruch *et al.*, 2008). Ces dommages moyens annualisés peuvent être spatialisés et donc être cartographiés, comme pour la méthode « Inondabilité ». Ils peuvent également être exprimés à l'échelle du bassin versant, constituant alors un indicateur global.

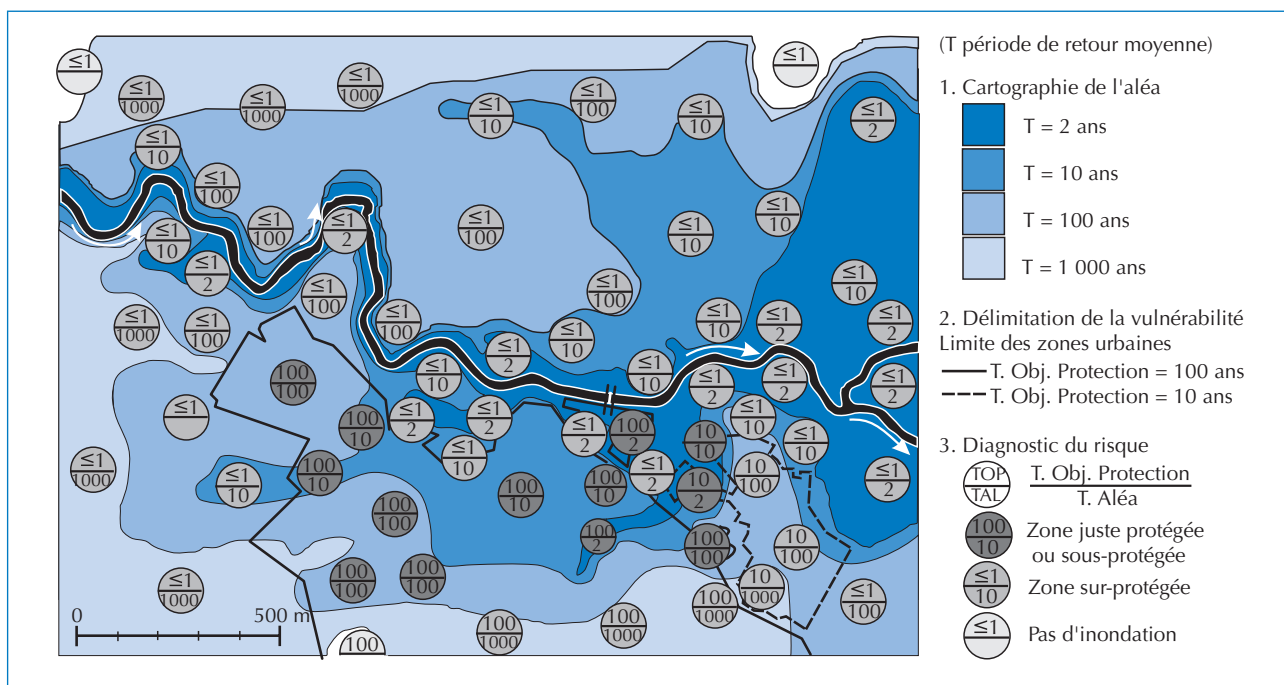
ANALYSER LES POLITIQUES DE GESTION DU RISQUE

La méthode « Inondabilité » et l'ACB² sont des supports d'aide à la décision pour juger des politiques de gestion des inondations. L'objectif de la méthode « Inondabilité » est d'afficher le risque pour permettre la négociation, à l'échelle d'un bassin versant, des politiques de gestion des inondations. L'objectif de l'ACB est de fournir un indicateur de la pertinence d'une politique de gestion des inondations à un décideur en charge de l'intérêt général.

Dans la méthode « Inondabilité », les négociations portent sur les objectifs de protection des politiques de gestion des inondations. À partir de cartes comme celle de la figure 1, les participants discutent d'une politique devant éliminer les zones sous-protégées. Dans cette étape, les aménagements supports de la politique décidée ne sont pas précisés, ni leurs coûts ni leurs éventuels effets secondaires. Pour ce faire, une méthode comme l'ACB est un complément intéressant. La prise en compte des coûts peut conduire à la réévaluation des besoins de protection. En effet, il faut s'attendre à ce que les négociations soient âpres, et que lors des premières étapes, les besoins de protection exprimés soient très élevés. L'absence de quantification économique *a priori* est donc un inconvénient certain ; cependant, il faut accepter que ce diagnostic soit un préalable aux réflexions,

2. Analyse coût-bénéfice.

▼ Figure 1 – Exemple de diagnostic du risque à partir des cartes d'aléa et de vulnérabilité (d'après Gendreau et Pretorian, 1998).



permettant d'identifier les zones où il est raisonnable d'intervenir. La méthode ne dispense pas d'une évaluation économique, en validation, une fois que les solutions techniques découlant du diagnostic de risque ont été dimensionnées.

La méthode « Inondabilité » a été rarement appliquée de manière intégrale. Le plus souvent, le besoin de protection est exprimé de manière ponctuelle, sans concertation, souvent en référence à une crue récemment subie, et les zones sous-inondées n'apparaissent donc pas systématiquement.

Dans l'analyse coût-bénéfice, la pertinence d'une politique est jugée grâce à sa valeur actuelle nette qui met en balance les coûts et bénéfices d'une politique de gestion du risque. La plupart du temps, les bénéfices sont calculés par la différence des dommages moyens annualisés avant et après projet.

Dans les pays anglo-saxons, cette méthode est très utilisée, en France beaucoup moins, mais elle effectue une percée. L'ACB est encore principalement utilisée pour juger une politique donnée et non pour définir des besoins de protection. Pourtant, la spatialisé des dommages moyens annualisés permet l'identification des zones « à protéger » (Erdlenbruch, 2008).

Réduire le risque

Pour réduire le risque, il est donc possible de jouer sur ses deux composantes. La **gestion des inondations** comprend donc l'ensemble des mesures possibles, sur l'aléa et sur la vulnérabilité.

L'aléa peut être modifié par des aménagements, visant à empêcher les débordements (diges calibrages...) ou à écrêter les crues (cf. « Enseignements et retours d'expérience de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours », page 33 de ce numéro et « Le Polder d'Erstein : objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental », page 67 de ce numéro).

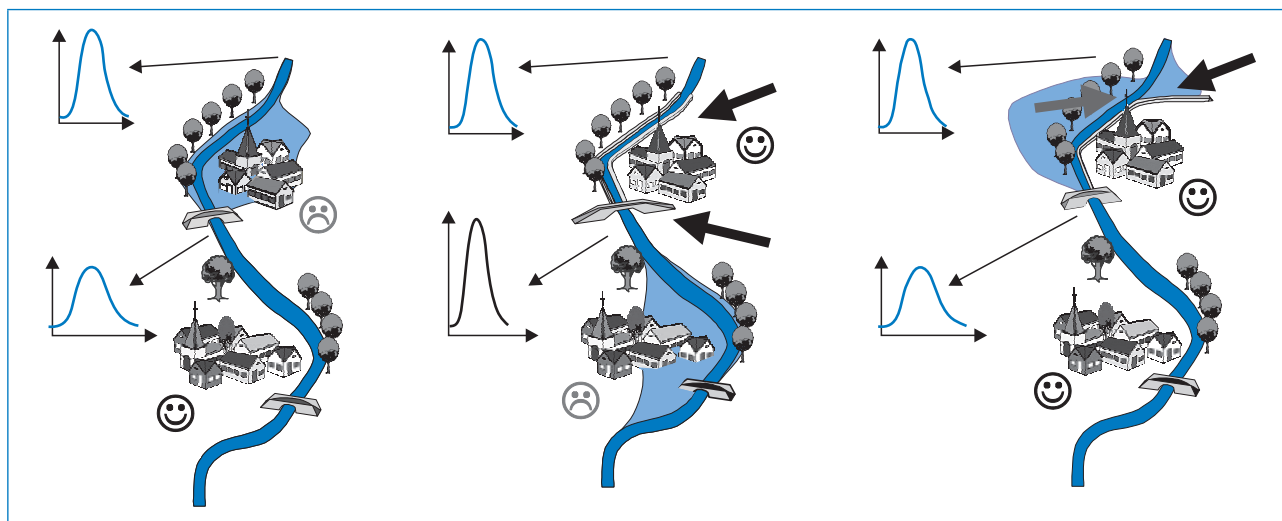
La vulnérabilité peut être également réduite, soit en réduisant les enjeux (établissement de documents d'urbanisme), soit en cherchant à minimiser les conséquences d'un événement, par des dispositions constructives adaptées, des systèmes de prévision des crues et d'alerte, par des plans de gestion des crises, par la promotion de la culture du risque...

Ces deux groupes de moyens d'action sont parfois qualifiés respectivement de mesures structurelles et mesures non structurelles.

L'ensemble de ces mesures doit naturellement être coordonné et conçu :

- **de manière intégrée** pour éviter de remplacer un problème par un autre, souvent plus ou moins caché, comme la dégradation écologique des milieux ou la descente des niveaux de nappe ;
- à la bonne **échelle d'espace** : sur le bassin versant. Les aménagements conçus pour faciliter l'évacuation risquent de reporter le problème à l'aval (figure 2), mais ce ne sont pas les seuls : une crue peut paradoxalement être aggravée par des aménagements de rétention installés dans un de ses sous-bassins, si le retard qu'ils induisent

▼ Figure 2 – Comparaison de deux solutions d'aménagement en amont et en aval d'un enjeu, pour une crue de projet donnée (d'après Gilard).



fait coïncider l'arrivée de leur pic avec celui des autres contributions (horloge des crues) ;

– à la bonne **échelle de temps** : il faut estimer les conséquences sur le long terme, en tenant compte de la durée de vie des ouvrages. Cela nécessite de connaître le plan de développement futur, les coûts d'entretien et le vieillissement des ouvrages, ainsi que des conséquences pour toutes les crues, y compris les crues extrêmes.

Ces définitions et principes étant rappelés, la suite va être consacrée plus spécifiquement à la modification de l'aléa de crue par écrêtement en amont. L'accent sera mis sur la détermination du cahier des charges et le suivi par le maître d'ouvrage de l'étude de dimensionnement.

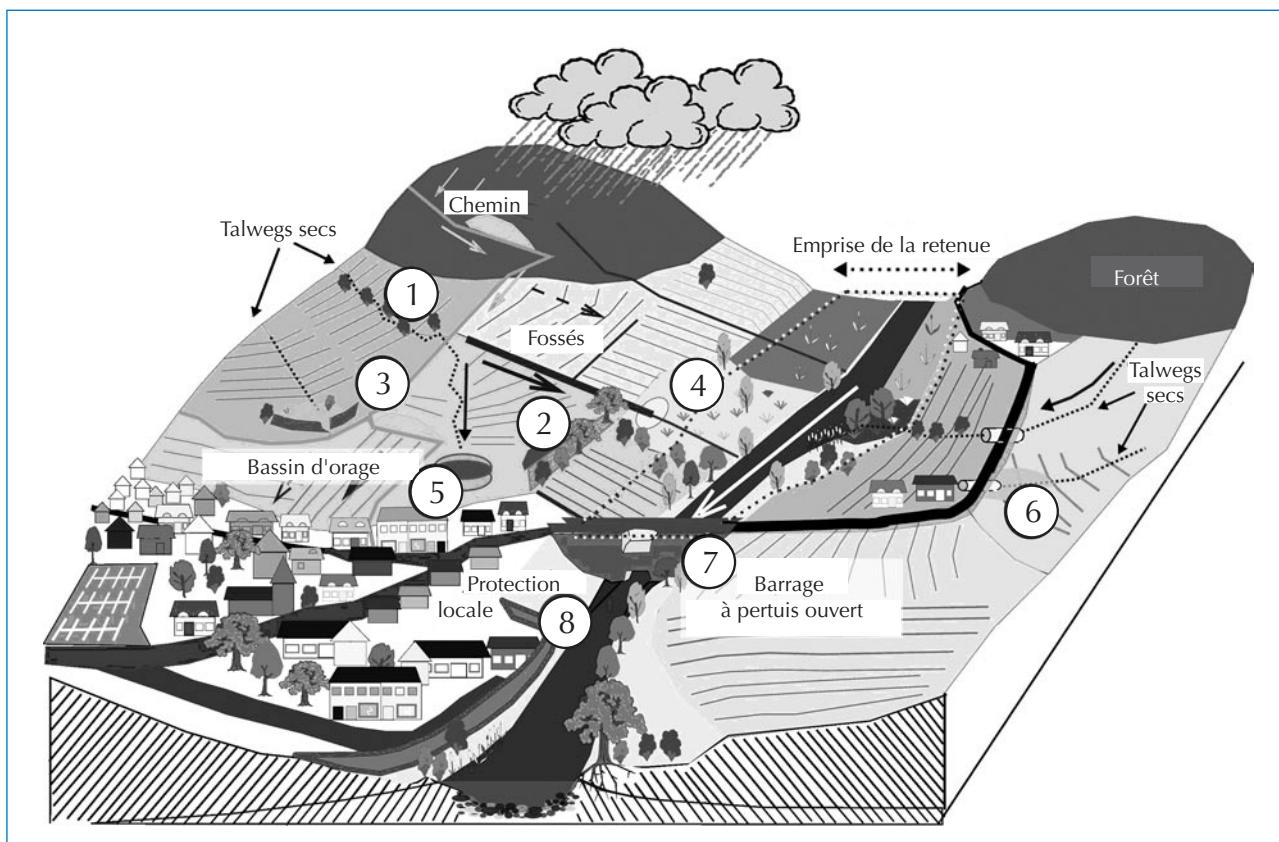
Les techniques d'écrêtement de crues

Nous cherchons à **écrêter les crues en amont des enjeux** pour limiter le recours aux protections locales et aux calibrages. La figure 2 illustre l'avantage de ces techniques : elles traitent le problème à la source, et sont le plus souvent davan-

tage pertinentes à l'échelle du bassin versant. Le mode d'action est de ralentir les écoulements ou de limiter ponctuellement le débit, en prévoyant un stockage temporaire des volumes retenus. En modifiant les écoulements uniquement durant les crues et en respectant leur continuité longitudinale, les ouvrages doivent perturber au minimum les flux d'eau, de sédiments et les déplacements de la faune aquatique.

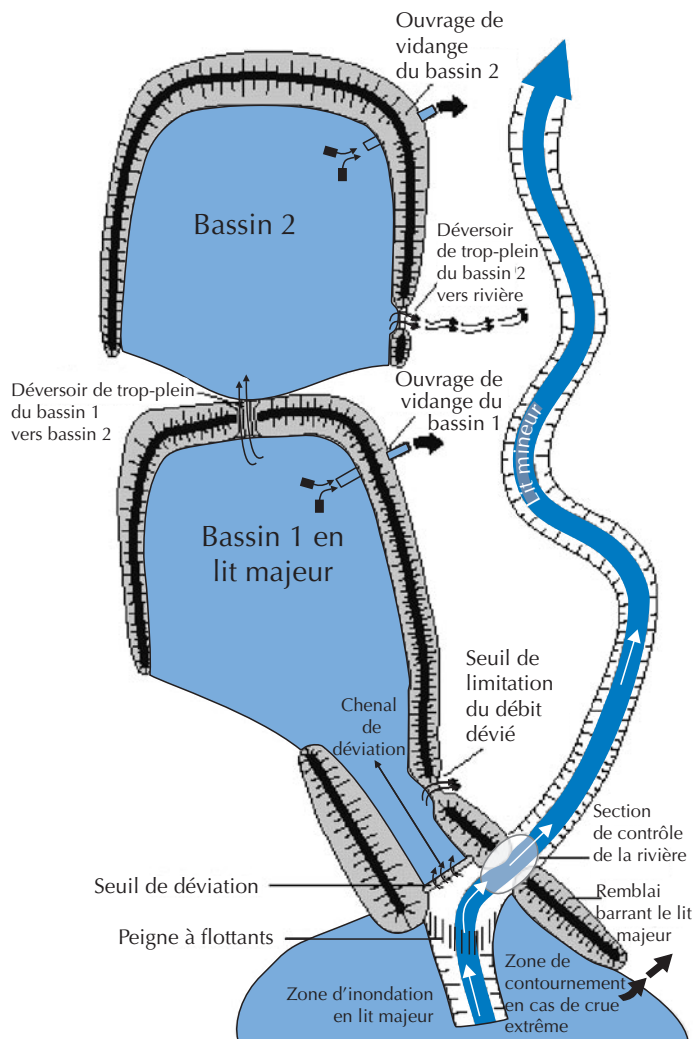
En pratique, il faut repérer les cheminements de l'eau et les emplacements convenant à la mise en œuvre de ces techniques. Il faut notamment vérifier que l'occupation du sol soit compatible et que les capacités de stockage soient suffisantes. Selon les besoins et les opportunités existant sur le bassin, ce principe peut être mis en œuvre de multiples manières, ce qui est illustré par la figure 3. Les pastilles 1 et 2 montrent un ralentissement des ruissellements en versant, 3 et 6 une rétention modeste par un petit ouvrage ou derrière un talus routier, 4 une limitation locale de débit en réseau hydroagricole – avec débordement accepté, 5 un bassin d'orage et 7 un barrage à pertuis ouvert sur un cours d'eau. Des protections

▼ Figure 3 – Exemples de techniques de ralentissement dynamique (1 à 7).





a)



b)

localisées restent parfois indispensables et sont complémentaires des actions de RD (pastille 8 : protection rapprochée par digues).

Typologie des ouvrages

De multiples variantes existent, selon la position des ouvrages dans le bassin et la conception des dispositifs de stockage. Nous donnons aussi quelques références aux pratiques en milieu urbain, dans la mesure où des principes tout à fait similaires y sont mis en oeuvre.

AIRES DE STOCKAGE EN LIGNE OU EN DÉRIVATION

Les deux grands types d'ouvrages sont les barrages à pertuis ouvert et les casiers latéraux (figure 4).

Les barrages à pertuis ouvert sont construits en travers des lits mineur et majeur (pastille 7 sur la figure 3 ; figure 4a). L'organe d'évacuation peut être un pertuis ou une échancrure³. Leurs dimensions sont calculées en fonction des capacités d'évacuation de l'aval et des besoins de protection. Quand les débits entrants sont supérieurs à la capacité d'évacuation de cet organe, ils sont écrêtés et l'excédent est stocké derrière le barrage. Des seuils de surface garantissent la pérennité de l'ouvrage en évacuant les excédents de crues exceptionnelles qui pourraient provoquer une surverse et entraîner la rupture de l'ouvrage.

L'emprise en lit majeur de la cuvette, utilisée potentiellement pour le stockage, est définie en référence au niveau d'eau après déclenchement de la surverse, et avec en général une revanche. Mais on peut préciser les probabilités de submersion dans la cuvette, par calcul. La mise en valeur des terrains de la cuvette reste possible, mais elle doit être pensée en considérant toujours sa fonction de stockage, même temporaire et peu fréquente. Puisque cette emprise n'est pas en eau, sauf pour certaines crues, les barrages à pertuis ouvert sont souvent appelés barrages secs.

3. L'ouvrage de Mouzon, récemment construit par l'Établissement public d'aménagement de la Meuse et des affluents, présente les deux types sur le même barrage : http://www.epama.fr/files_fr/epama_projets/mouzon/epama6_mouzon_intro.php4

◀ Figure 4 – Deux exemples d'ouvrages écrêteurs de crues : a) barrage à pertuis ouvert en thalweg sec (bassin de l'Austreberthe, Seine-Maritime) ; b) ouvrages en dérivation sur un cours d'eau (illustration de la fiche Sinfotech, Poulard *et al.*, 2008).

Les bassins latéraux sont des structures de stockage délimitées dans l'espace par des digues et placées en dérivation (figure 4b). Pendant les crues, ils sont alimentés par déversement latéral à partir du lit mineur, via un seuil dont la cote et la largeur sont calculées en fonction des besoins de laminage. Ils peuvent être construits en cascade, afin d'utiliser au mieux les surfaces disponibles. Des déversoirs de surface évacuent les volumes excédentaires après remplissage des bassins ; les ouvrages de décharge doivent toujours ramener les flux de surverse vers le lit mineur.

Selon la taille et les usages des emprises, le nom de « polder » est parfois employé (cf. « Le Polder d'Erstein : objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental », page 67 de ce numéro), bien qu'à tort puisque un vrai polder est en fait une zone où l'aléa inondation a été fortement réduit.

Sur ces deux modèles, ouvrage en dérivation et barrage à pertuis ouvert, un grand nombre de variantes se rencontrent.

VARIANTES SELON L'EMPLACEMENT : EN VERSANT, EN THALWEG SEC, EN RIVIÈRE

Ces ouvrages peuvent être construits à toutes les échelles, du versant au fleuve. Dans ce numéro sont cités des ouvrages pouvant stocker de quelques milliers à plusieurs millions de mètres cubes :

- sur un versant, il peut s'agir de bassins de rétention localisés dans un thalweg sec en amont d'un enjeu (Lézarde ; cf. « Enseignements et retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours », page 33 de ce numéro) ;
- dans un fossé d'assainissement agricole, il est possible d'implanter des dalots-meurtrières pour limiter le débit quand le calibre de ce fossé permet un stockage suffisant, et là où les débordements éventuels sont tolérables ;
- sur des cours d'eau drainant de quelques hectares à plusieurs milliers de km² (exemples dans l'article « Enseignements et retours d'expérience de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours », page 33 de ce numéro).

EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL : MILIEU RURAL ET MILIEU URBAIN

Les méthodes analogues en milieu urbain sont appelées les techniques alternatives par opposition au « tout-tuyau », ou encore gestion à la parcelle et

gestion des eaux pluviales. Ces techniques ne sont pas traitées dans ce numéro, mais les références sont nombreuses, par exemple Chocat *et al.* (2004). La spécificité du milieu urbain est le manque de place – mais puisque ces techniques agissent sur les zones de production, la mise en œuvre est toutefois possible dans l'espace restreint disponible.

Du reste, c'est en milieu urbain que ce principe de rétention en amont est poussé à l'extrême, en raison de la densité des enjeux. L'objectif est d'éviter de surcharger les réseaux d'assainissement, en collectant les eaux pluviales au plus près de leur point de chute. Elles seront soit infiltrées sur place, là où la nature du sol le permet, soit acheminées vers les réseaux d'assainissement ou les cours d'eau de manière retardée, grâce à des dispositifs de stockage avec limitation de débit de fuite. En pratique, les eaux pluviales sont collectées dans des bassins plus ou moins artificiels : des réservoirs poreux sous des routes pour collecter le ruissellement, des noues à ciel ouvert, mais aussi de la rétention à la source, par des toits – terrasse (*green roofs*), des réservoirs sous des parkings à revêtement perméable, des cuvettes modestes mais nombreuses sur le bas-côté de la route ou dans des terrains privés (*rain-gardens*). Les dispositifs sont variés, et doivent être déclinés et adaptés localement en fonction de la place des chemins de l'eau dans le paysage.

Critères de conception et de dimensionnement

Les grands principes de prévention des inondations sont posés et connus ; encore faut-il les traduire en réalisations efficaces et durables.

Pour cela, il faut définir précisément le besoin de protection et le cas échéant les autres contraintes, par exemple environnementales. C'est une étape délicate mais très importante. Les objectifs doivent s'appuyer sur un diagnostic de risque effectué au préalable, et faire référence dans la mesure du possible aux périodes de retour de :

- la première crue inondante à l'aval, et de la crue acceptable à l'aval si elles diffèrent ;
- la gamme de crues pour laquelle une protection optimale est demandée ;
- la crue à partir de laquelle surviendront les premières surverses, entraînant une moindre efficacité de l'ouvrage.

Une autre façon de définir les objectifs serait de demander une réduction optimale des dommages,

en supposant d'intégrer l'évaluation économique dans le processus de dimensionnement.

Travailler avec une crue de projet unique ne suffit donc pas, il faut que le maître d'ouvrage soit informé des effets des aménagements sur toute une gamme de crues, y compris les crues extrêmes pour lesquels les ouvrages sont inefficaces, voire dangereux. Au minimum, il faut connaître les niveaux de fonctionnement des ouvrages définis dans le tableau 3 (Royet *et al.*, 2009). Nous préconisons de tester l'effet des aménagements sur un plus grand nombre de scénarios de crues, afin de connaître en détail le fonctionnement et de mieux estimer les conséquences en terme économiques (*cf.* la partie « Étudier l'efficacité sur le régime des crues et à l'échelle du bassin versant »). Cela, comme la définition explicite des besoins et des contraintes, doit être spécifié dans le cahier des charges (*cf.* la partie « Quelques recommandations pratiques à l'attention des maîtres d'ouvrages » page 18).

La période de retour des crues mettant en charge le pertuis (ou, pour les casiers, celle qui provoque les premières surverses vers les casiers), est un peu différente de la période de retour de la crue acceptable à l'aval. Elle détermine la gestion des emprises : quelle occupation du sol est possible, quels seraient les coûts moyens d'entretien et de dédommagements à prévoir.

Décrire le régime des crues

Pour caractériser l'effet d'un aménagement sur le régime des crues, il existe plusieurs approches possibles : modéliser son fonctionnement sur l'ensemble de la chronique de pluie ou de débit ou construire un échantillon d'événements supposés représentatifs du régime.

La première approche suppose de connaître ou reconstituer la ou les chroniques nécessaires, mais aussi que le modèle utilisé puisse router une chronique longue. C'est sans doute la plus rigoureuse, dans la mesure où elle prend en compte la succession d'épisodes parfois rapprochés, avec la possibilité qu'une crue survienne alors que les capacités de stockage sont en partie remplies (*cf.*, par exemple, Michel, 1989).

La seconde approche, par épisodes, est la plus utilisée pour des raisons techniques (mise en œuvre des logiciels de calculs), mais aussi parce qu'il est moins difficile de constituer un jeu d'hydrogramme qu'une chronique sur un bassin non jaugé. Elle repose sur des hypothèses pas toujours bien explicitées en pratique. En effet, le jeu d'événements doit être représentatif du régime, donc contenir des événements de différentes intensités, mais il devrait aussi tenir compte de la variabilité des crues. On trouve dans la chronique des crues de même débit de pointe présentant des formes et des volumes différents, et l'effet des ouvrages sur ces crues sera bien entendu différent. Il existe aussi une variabilité dans la répartition spatiale des crues, qui sera évoquée dans la partie « Décrire les effets de manière objective à l'échelle du bassin » (page 16). Mais surtout, quand on travaille par épisode, on suppose en général que les volumes

▼ Tableau 3 – Niveaux de fonctionnement définis en fonction de la période de retour des crues (Royet *et al.*, 2009).

Étudier l'efficacité sur le régime des crues et à l'échelle du bassin versant

Cette partie illustre et met en évidence la nécessité de travailler en se référant au régime des crues et à la bonne échelle d'espace.

Période de retour	-	de 10 à 50 ans environ	« Crue(s) de protection », crue(s) provoquant un remplissage jusqu'à la cote de protection, en l'occurrence celle du déversoir de surface ; le fonctionnement de l'ouvrage écrêteur de crue est alors optimal.
	↓	de 100 à 10 000 ans selon taille et type d'ouvrage	« Crue(s) de sûreté », crue(s) entrante(s) provoquant un remplissage jusqu'à la cote de sûreté, en l'occurrence celle des plus hautes eaux laissant encore une revanche pour se protéger de l'effet des vagues. La période de retour correspondante doit être fixée en fonction des caractéristiques et des enjeux.
	+	Extrême	« Crue(s) de danger de rupture », crue(s) entrante(s) associées à la cote de danger de rupture, celle au-delà de laquelle on ne garantit plus la tenue de l'ouvrage (généralement la cote de la crête dans le cas d'un barrage en terre). Nous proposons que la probabilité de dépassement de cette cote soit de l'ordre de dix fois inférieure à celle de la cote de sûreté.

de stockage sont vides et donc entièrement disponibles au début de la modélisation.

Quelle que soit l'approche employée, les méthodes d'analyse hydrologique probabiliste seront utilisées pour calculer les quantiles permettant de décrire le régime des crues ; la critique des données, l'échantillonnage et l'ajustement de lois statistiques doivent être effectués avec rigueur (cf. « Quelques erreurs que l'on ne voudrait plus voir dans les études hydrologiques », page 25 de ce numéro, et par exemple : Sauquet, 2003 ; Lang *et al.*, 2007). Une attention particulière sera portée à l'extrapolation aux quantiles rares.

Décrire les effets sur le régime des crues

Une fois le régime naturel défini, il faut concevoir les ouvrages (Degoutte coord., 1997). Leurs caractéristiques (géométrie, organes hydrauliques...) doivent être déterminées pour obtenir le fonctionnement souhaité pour les différentes gammes de période de retour. En général, c'est une **modélisation hydraulique** qui permet de simuler avec et sans ouvrages un ensemble d'événements, et ce jusqu'à la rupture (figure 8).

Réduire de manière optimale une crue donnée va conduire à un dimensionnement performant pour ce type d'événement, mais le résultat est

trompeur car il met l'accent sur un seul cas de figure. La figure 5, tirée de l'étude d'un barrage à pertuis ouvert situé en tête de bassin, montre bien que l'effet d'écrêtement est très réduit sur les « petites » crues, celles qui peuvent passer par le pertuis, puis devient significatif pour une gamme donnée – ici autour d'une période de retour de vingt ans environ. Enfin, il diminue de nouveau jusqu'à être négligeable pour des crues plus fortes. En effet, pour les crues de soixante-dix ans, le barrage est rempli et l'excédent passe par le déversoir.

Sur la figure 6, les effets de plusieurs dimensions de pertuis sont comparés. On remarque que chaque solution donne un comportement global différent : les petits diamètres d'orifice de sortie écrêtent les crues plus tôt, donc sont plus efficaces pour les crues modestes, mais saturent également plus rapidement les capacités de stockage, donc sont moins efficaces pour les crues fortes.

Cette figure permet d'illustrer ce qui se passe quand une crue de projet unique est utilisée : le choix de sa période de retour est tout à fait déterminant. Autrement dit, selon la crue considérée, une solution différente sort du lot.

Au contraire, tester les effets sur une gamme suffisante de crues permet de choisir globalement la meilleure solution, en s'appuyant si possible

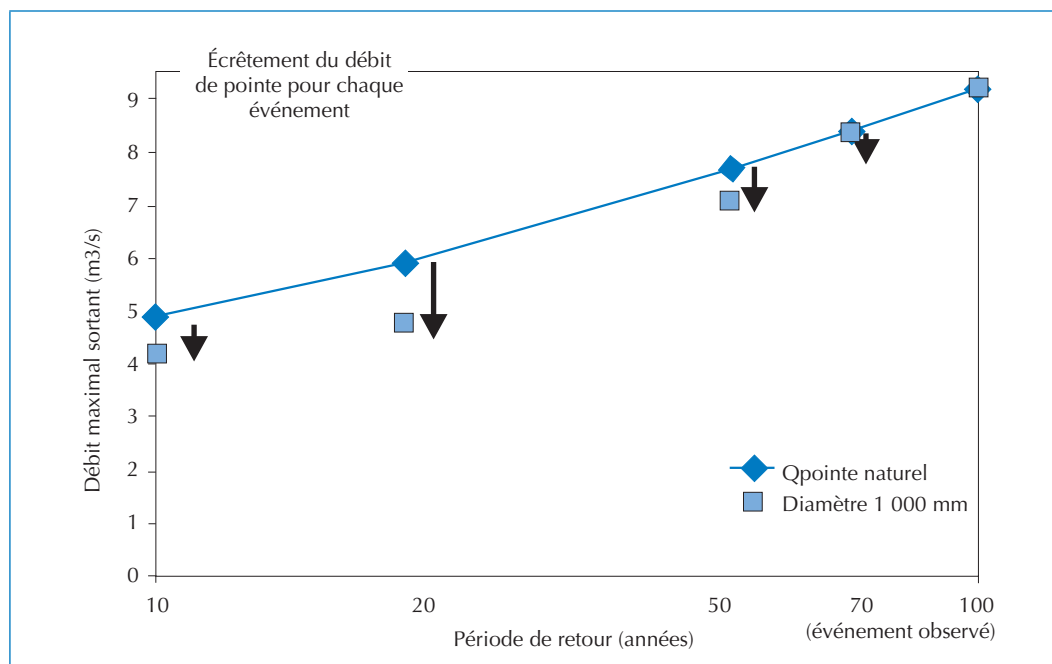
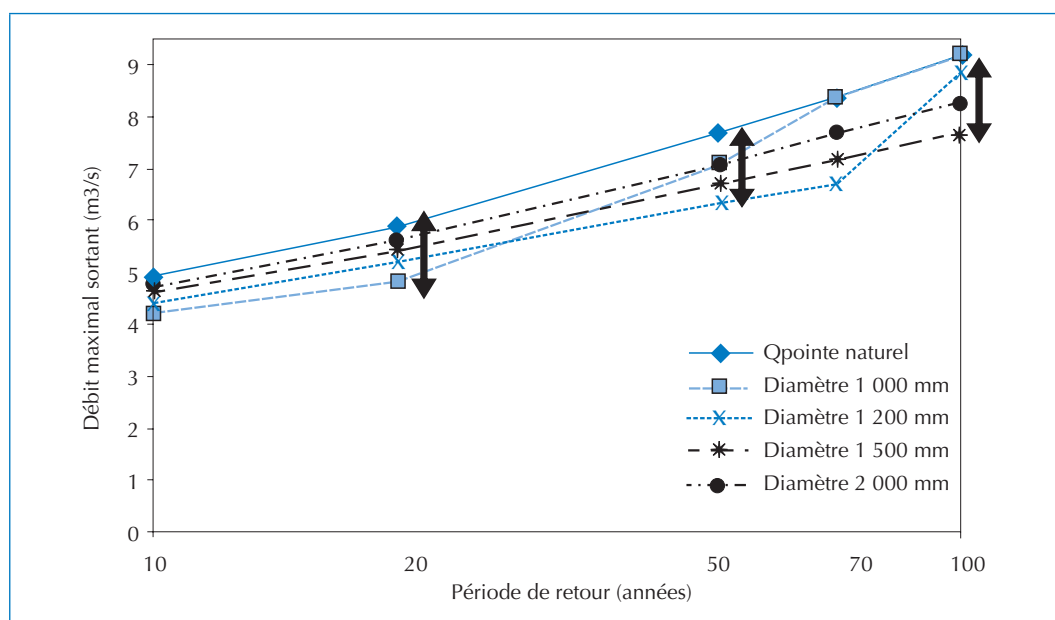


Figure 5 – Description des effets d'un barrage muni d'un pertuis ouvert de diamètre 1 000 mm sur le débit de pointe d'une série d'hydrogrammes (d'après une étude B&R pour la ville de Fontaine, Isère).

► Figure 6 – Description des effets de quatre barrages différant par la dimension de leur pertuis ouvert sur le débit de pointe d'une série d'hydrogrammes (d'après une étude B&R pour la ville de Fontaine, Isère).



sur l'évaluation économique objective des coûts et des gains attendus sur la durée de vie de l'ouvrage.

À noter que combiner plusieurs ouvrages aux caractéristiques différentes permet d'élargir la plage d'efficacité et la portée de l'ensemble (Nédélec *et al.*, 2004).

Décrire les effets de manière objective à l'échelle du bassin

Le ralentissement dynamique, parce qu'il s'attache à profiter de toutes les opportunités de stockage, peut impliquer plusieurs ouvrages dispersés sur une large surface. La dispersion des ouvrages complique la modélisation, mais aussi l'évaluation des effets sur les enjeux.

MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN

La difficulté majeure de modélisation ne vient pas tant de la représentation d'un réseau hydrographique ramifié portant plusieurs ouvrages, mais de la constitution de scénarios d'apport à l'échelle du bassin.

La figure 7 présente très schématiquement les deux grandes approches qui sont utilisées pour construire un scénario d'apport à l'échelle du bassin :

– figure 7a : définition d'un champ de pluie, stationnaire ou non, homogène dans l'espace ou non, et utilisation d'un modèle pluie-débit pour évaluer les ruissellements résultants ;

– figure 7b : définition des hydrogrammes d'entrée, correspondant aux conditions amont pour chacun des nœuds amont du modèle, ainsi que des hydrogrammes d'apport latéraux entre deux nœuds. La difficulté est de construire un scénario cohérent à l'échelle du bassin : les périodes de retour sur chacun des sous-bassins doivent tenir compte des corrélations spatiales.

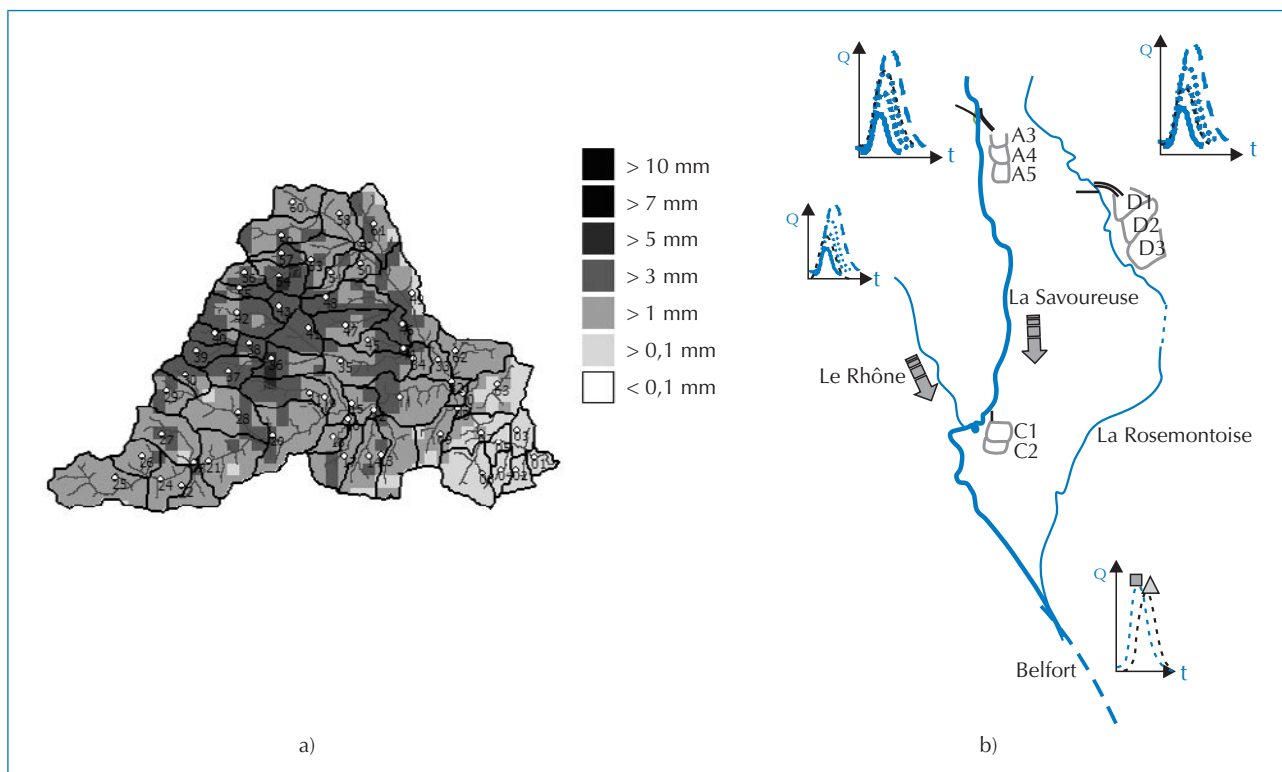
Dans les deux cas, il faut – comme indiqué précédemment – travailler avec une chronique ou construire un jeu de scénarios permettant de couvrir une large gamme du régime des crues.

Pour l'exemple de l'étude de la Savoureuse (2007), SAFEGE a défini un jeu de scénarios en choisissant pour chacun trois hydrogrammes amont, de périodes de retour semblables ou différentes ; la figure 7b illustre cette méthode : sur chaque branche l'un des hydrogrammes de projet est sélectionné en orange et l'ensemble définit donc un scénario.

REPRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La représentation des résultats peut toujours se faire sous forme d'hydrogrammes ou de graphes $Q_{\text{pointe}}(T)$ comme les figures 5 et 6, mais il faut donner en plusieurs points, surtout là où les enjeux sont forts. Des cartes sont également utiles.

La figure 7b reproduit un réseau ramifié sur lequel trois séries d'ouvrages ont été étudiées. Le régime



▲ Figure 7 – Illustration de deux types d'approches pour définir un scénario d'apport à l'échelle du bassin versant : a) définition de champs de pluie (ici, cumul d'un champ de pluie distribué sur le bassin) – Poulard *et al.*, 2009 ; b) définition de scénarios par des hydrogrammes aux nœuds et latéraux (d'après une étude SAFEGE de 2007).

des crues a été étudié en plusieurs points, et en particulier sur chacune des branches amont ; des hydrogrammes de projets de différentes périodes de retour en ont été dérivés (hydrogrammes figurés en vert). Un modèle hydraulique calcule les débits résultant à l'aval, avec puis sans ouvrages pour chacun des scénarios définis selon la manière exposée ci-dessus. Puisque le régime des crues a été estimé en tout point, par l'analyse hydrologique préalable, il est possible d'évaluer la période de retour des hydrogrammes résultants, par exemple au droit des enjeux (à Belfort sur l'exemple). Il est donc possible de replacer pour chacun des scénarios étudiés les hydrogrammes résultants en régime : c'est la figure 8, réalisée d'après les résultats de cette étude SAFEGE.

Ce type de figure met en évidence les stades de fonctionnement des ouvrages. Elle illustre en plus l'effet de la variabilité des événements : deux crues de période de retour quasiment identique en débit de pointe et en un endroit donné (débit de 200 m³/s environ, période de retour centen-

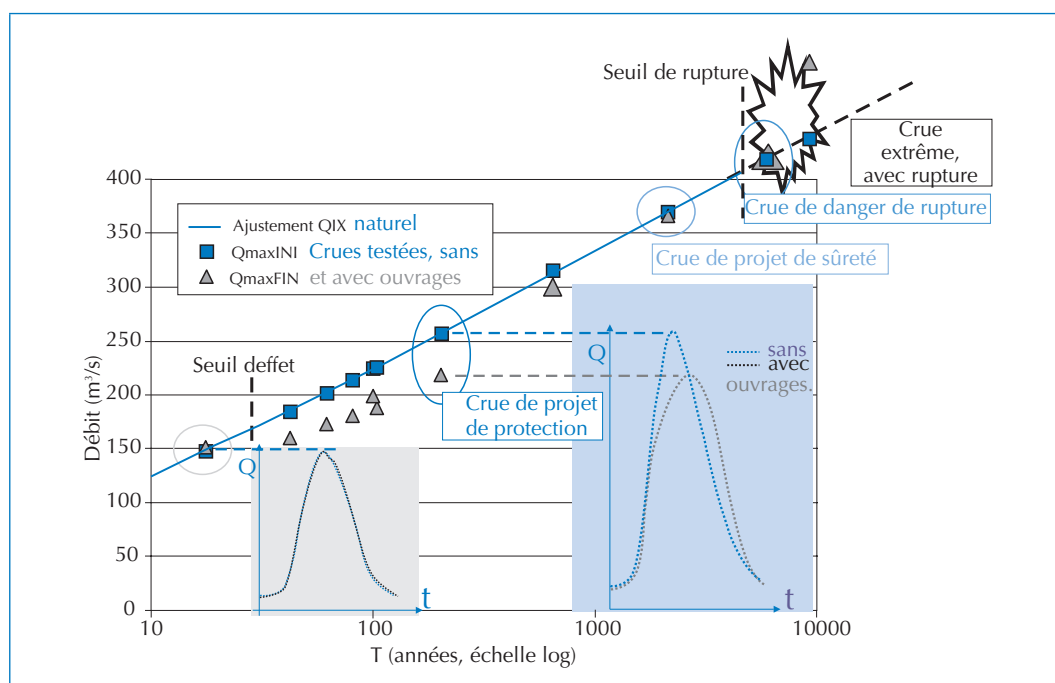
nale), vont être écrêtées de manière significative-ment différente, tout simplement parce qu'elles sont générées par deux scénarios très différents en amont, et les ouvrages ne sont donc pas sollicités de manière identique.

Décrire les effets économiques

Les principes de l'évaluation économique s'appliquent aux mesures de ralentissement dynamique, comme à toute autre mesure de gestion de l'aléa. Il y a très peu d'applications à ce jour car les effets hydrauliques, pré-requis de l'évaluation économique, ne sont pas souvent disponibles.

Toutefois, ces mesures sont souvent accompagnées de mesures non structurales visant à réduire la vulnérabilité, qui sont plus difficiles à évaluer. Une compréhension fine des enjeux exposés est nécessaire. Les mesures de ralentissement dynamique entraînent également une redistribution de l'exposition au risque, dont l'évaluation économique doit tenir compte (encadré 3).

► Figure 8 – Représentation synthétique de l'effet d'ouvrages de laminage en un point donné sur le régime. Exemple des débits de pointe : quantiles notés QIX ; débit maximal d'un hydrogramme donné noté Qmax.



Quelques recommandations pratiques à l'attention des maîtres d'ouvrages

Le rôle du maître d'ouvrage (MO) est crucial pour tout projet d'aménagement. La figure 9 représente un déroulement schématique d'une étude, pour faire ressortir les étapes et la complexité. Le rôle du maître d'ouvrage est représenté par le bandeau supérieur : à chaque étape, c'est lui qui définit les objectifs et valide les résultats.

La carte blanche donnée à Arthur Morgan au début du XX^e siècle par les autorités de la Miami River est *a priori* un contre-exemple de ce que l'on recommandera ici : « La vallée a subi une catastrophe qui ne doit plus se produire ; trouvez une solution » (cf. « Enseignements et retours d'expérience de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours », pages 33 de ce numéro). Et pourtant, malgré l'impatience liée au traumatisme provoqué par l'inondation, Arthur Morgan a pris le temps d'analyser la situation. Il a commencé par un diagnostic approfondi de la crue, puis une analyse de l'ensemble des solutions possibles ; cette démarche a permis d'aboutir à un projet final pertinent.

Il est délicat de formuler des recommandations générales, car certaines paraîtront triviales pour les maîtres d'ouvrages spécialisés dans la pré-

vention des inondations, tandis que les petites communes ou les syndicats généralistes trouveront difficile la mise en pratique de ces conseils. Pourtant, il est important de diffuser au maximum le fruit des expériences et de la recherche, et cette partie présente quelques conseils formalisés. Ce n'est pas une check-list exhaustive, et les remarques sont à prendre autant comme matière à réflexion que comme suggestions.

Première étape : le diagnostic

Même si celle-ci est souvent l'objet de toutes les attentions, il n'est pas judicieux de chercher à se protéger contre la dernière inondation subie. Les inondations étant aléatoires, celle-ci peut très bien être exceptionnelle, ou au contraire de période de retour modeste, ou bien être très spécifique – à cause, par exemple, d'une concomitance de crues en un point, ou d'une rupture de digue accidentelle. Il faut donc d'abord replacer les événements passés, récents ou non, dans le contexte du régime. De plus, les aménagements ont un coût, donc les ambitions doivent être raisonnables. Tout ceci doit être analysé lors de l'étape de diagnostic. Elle définira l'aléa, puis les enjeux. Ensuite, le maître d'ouvrage s'appuiera sur ces informations pour déterminer où il est possible et raisonnable de réduire l'aléa et pour quelle gamme de crues.

Encadré 3

Indemnisations des effets négatifs induits par le ralentissement dynamique

Les mesures de ralentissement dynamique impliquent une redistribution de l'exposition au risque sur le bassin versant : certaines zones, plutôt en amont et rurales, sont davantage exposées pour mieux en protéger d'autres, plutôt en aval et urbaines. La loi 2003 sur le risque permet aux gestionnaires de bassin versant de mettre en place des servitudes de sur-inondation, à la condition explicite de compenser les sur-dommages occasionnés. Selon un retour d'expérience auprès des 48 PAPI⁴ opérationnels début 2007, réalisé pour le MEEDDAT⁵, ceci pose plusieurs problèmes.

Selon les aménagements prévus, deux cas sont à distinguer. Dans les cas de sur-inondation proprement dit, les zones sont surexposées par la mise en place d'un ouvrage de rétention d'eau (par exemple, des retenues sèches). Dans les cas de restauration, les zones sont surexposées par un abaissement d'une protection existante (par exemple, de l'abaissement de digues). Les sur-dommages sont définis par rapport à une « situation de référence » (sans aménagement). Celle-ci est connue pour les cas de sur-inondation, mais difficile à évaluer pour le cas des restaurations de zones d'expansion de crues.

Dans les bassins versants les plus avancés, les gestionnaires de bassins versants ont réfléchi à plusieurs options : acheter les zones concernées, compenser la surexposition par une protection rapprochée ou compenser financièrement les sur-dommages.

Dans ce dernier cas, des protocoles d'indemnisation sont négociés entre les gestionnaires des bassins versants et le monde agricole. L'évaluation des sur-dommages nécessite des scénarios de fonctionnement des aménagements et de l'occupation du sol. Elle se fait à partir d'une estimation forfaitaire des dommages potentiels, basés sur les barèmes des calamités agricoles ou sur des estimations d'experts.

Le paiement des sur-dommages en cas de sinistre constitue un risque financier supplémentaire pour le gestionnaire de bassin versant qu'il a du mal à transférer à des assurances. Souvent des fonds de compensation sont mis en place, mais le gestionnaire manque de visibilité sur leur pérennité.

L'articulation avec les fonds de compensation existants (catastrophes naturelles, fonds national de garantie des calamités agricoles, et assurance récolte) reste à construire. Du coup, le monde agricole craint de ne plus être couvert par ces mécanismes en cas de surexposition, ce qui ne facilite pas la négociation avec les gestionnaires de bassin.

4. Programme d'action de prévention des inondations.

5. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.

Ce diagnostic du risque peut faire l'objet d'un appel d'offre spécifique (étape 1 sur la figure 9). Cela permet de bien poser la réflexion comme une étape préalable et indépendante de toute proposition d'aménagement.

Outre les éléments habituels (aléa et vulnérabilité), ce diagnostic peut comporter des éléments d'appréciation utiles pour la définition des objectifs : par exemple, un tableau récapitulatif des volumes des crues de différentes périodes de retour permettra de se faire une idée de la faisabilité d'un ouvrage de rétention en amont, en fonction des objectifs d'écrêtement.

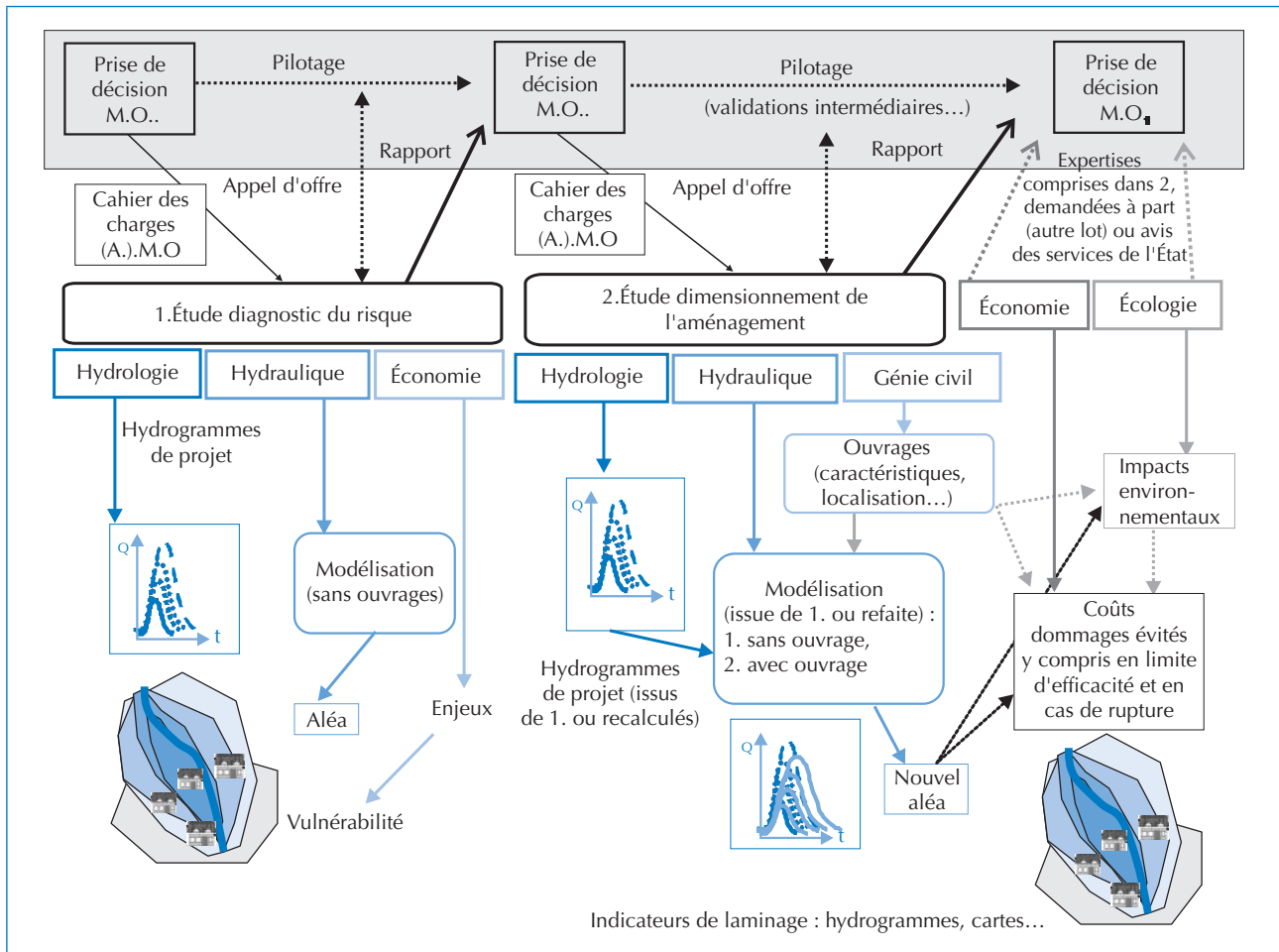
D'autres études peuvent être commandées indépendamment de l'étude principale. Par exemple, il est utile de recueillir le plus tôt possible toutes

les données relatives à un événement de crue : calendrier des événements, lasses de crues, photographies, noms et coordonnées des témoins, type de dégâts et montants...

Le diagnostic conduit à la définition des objectifs, qu'il vaut mieux exprimer en se référant aux périodes de retour d'inondation, et des contraintes.

Formuler le cahier des charges pour les réalisations

En pratique, un cahier des charges bien conçu et précis est un préalable essentiel pour obtenir des rapports d'étude complets et des projets pertinents par rapport au contexte et aux attentes. Bien entendu, en cas de litige, le cahier des charges fera foi ; le maître d'ouvrage n'a pas de recours si les



▲ Figure 9 – Exemple schématique du déroulement d'une étude de réduction de l'aléa : étapes clés pour le maître d'ouvrage (MO), mise en évidence des compétences nécessaires.

résultats sont conformes aux spécifications, même s'ils s'avéraient en fait inexploitable. Il n'existe malheureusement pas de cahier des charges type. La pratique de l'assistance aux services de contrôle et de l'expertise nous a donné l'occasion de recueillir bonnes idées et mises en garde, et nous a convaincus de formuler quelques recommandations pour partager ces expériences. Une fiche Sinfotech en résume les principaux points (Poulard *et al.*, 2008) ; nous allons les développer davantage ici, et les mettre en relation avec les articles où se trouveront des éléments complémentaires.

Il faut bien poser les bases de l'étude, et pour cela nous recommandons de :

a) s'appuyer sur un diagnostic, comme décrit plus haut, pour fixer les objectifs. Ces objectifs ainsi que les contraintes doivent être décrits explicitement dans le cahier des charges. Les ambitions doivent être raisonnables, et différenciées en

fonction des enjeux. Les variables importantes doivent être explicitées : l'étude a-t-elle pour mission de diminuer les dommages, les vitesses, les durées de submersion... En effet, les ouvrages de rétention écrètent les pointes de crue, mais ils augmentent également leur durée.

Si d'autres préoccupations sont affichées, il faut également les expliciter et inclure dans l'étude des spécialistes de ces volets : environnement, ressources en eau, paysage...

Il ne faut pas non plus négliger l'étude du transport solide et de la morphologie fluviale. En effet, dans certains cas, il existe un risque de sédimentation dans les ouvrages de stockage ou de perturbations morphologiques sur le profil en long du cours d'eau ;

b) assurer un pilotage des études. Le maître d'ouvrage doit s'appuyer sur un assistant à

maîtrise d'ouvrage (AMO) s'il ne dispose pas en interne des compétences nécessaires. Il doit si possible s'entourer aussi d'un comité de pilotage – en y associant les services de l'État – et, pour les cas complexes, d'un comité scientifique.

Il est important d'établir un calendrier d'exécution avec des réunions de validation intermédiaires pour que le maître d'ouvrage – ou son représentant – puisse rectifier au besoin une étape avant que la suivante ne débute ;

c) faciliter l'analyse des résultats en exigeant que les méthodes et références choisies soient décrites ou fixer le cas échéant les méthodes recommandées. On s'appuiera sur les documents de référence, par exemple les documents techniques de synthèse et de recommandations cités dans l'article bibliographique, page 131 de ce numéro). L'article « Quelques erreurs que l'on ne voudrait plus voir dans les études hydrologiques » (page 25 de ce numéro) souligne que lors d'une expertise, il n'est pas possible de donner un avis sur des résultats si on ne connaît pas les méthodes utilisées, la qualité des données, ou encore les hypothèses posées. Ces éléments doivent donc être demandés explicitement ;

d) effectuer une analyse de sensibilité. Elle permet de tester l'influence des variables d'entrée, parfois incertaines, sur les variables de sortie, ou résultats (cf. « Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice – Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations », page 95 de ce numéro) ;

e) envisager l'exploitation ultérieure des résultats. Il faut s'assurer de disposer à la fin de l'étude de tous les éléments utiles, sous une forme facilement exploitable et réutilisable. Par exemple, pour une étude de dimensionnement, il est nécessaire de :

- prévoir d'être propriétaires des données recueillies ou calculées, gage d'indépendance vis-à-vis des prestataires ;

- baliser la présentation des résultats : demander que les hypothèses soient explicitées et justifiées, que les annexes nécessaires soient jointes (par exemple, en hydrologie : critique des données, graphe des ajustements... ; en hydraulique : calage des rugosités...), et que tous les éléments utiles soient fournis. Certains documents seront demandés au format numérique pour être réutilisables (topographie, calculs...) ; il faut exiger des formats faciles à exploiter. Si des compétences

existent en interne, il faut même demander la fourniture des fichiers utilisés dans les modèles, hydrauliques notamment, ainsi qu'une formation à l'utilisation des outils utilisés afin de pouvoir se l'approprier et tester des variantes ou intégrer ultérieurement des modifications (autres aménagements...) ;

- demander tous les éléments utiles en prévision de la prise de décision : les effets des ouvrages sur les inondations dans le bassin versant (extension des inondations, éventuellement hauteurs d'eau et vitesses), **pour l'ensemble du régime** (cf. la partie « Étudier l'efficacité sur le régime des crues et à l'échelle du bassin versant », page 14), ainsi que **leur traduction socio-économique** (par exemple en dommages annualisés et perturbations évités). L'évaluation des coûts doit être aussi complète que possible, incluant la construction, les travaux connexes (création de chemins...), le foncier ou les indemnisations (y compris emprise des sur-inondations) ainsi que les coûts d'entretien et de gestion. Le cas échéant, un diagnostic écologique doit être prévu ; idéalement, des « coûts environnementaux » y seraient évalués et intégrés au calcul économique ;

- le domaine d'étude doit aller suffisamment loin à l'aval, pour vérifier que l'on ne déplace pas le problème en dehors de la zone d'action du maître d'ouvrage. L'horloge des crues doit être étudiée, c'est-à-dire la manière dont un retard – ou une accélération – des écoulements va modifier les probabilités de concomitances aux confluences (figure 2) ;

- prévoir une étude de dangers, désormais imposée par la nouvelle réglementation pour les ouvrages les plus importants – étude qui comporte principalement une analyse de risques, basée sur les méthodes de la sûreté de fonctionnement (Peyras et al., 2006).

Enfin, les effets des ouvrages ne sont pas arithmétiquement additifs : si une étude propose le dimensionnement d'un ensemble d'ouvrages, il n'est pas possible de n'en réaliser qu'un sous-ensemble sans passer par une nouvelle étude de diagnostic d'effet.

Dans un projet intégré, il faut en outre coordonner le travail des différents intervenants (figure 9). Trop souvent, économistes ou écologistes n'interviennent que pour juger un projet dans sa phase finale. Instaurer le dialogue dès la conception améliorerait considérablement les propositions.

Conclusion

L'écrêtement des crues par des aménagements répartis est une solution efficace et pertinente, sous réserve de disposer de suffisamment de potentialités de stockage par rapport au besoin. Cependant, sa mise en œuvre est moins facile qu'il n'y paraît, notamment en raison du passage à l'échelle du bassin versant. Cela pose des difficultés diplomatiques – même si globalement il est plus judicieux de surinonder A pour protéger B, il faut faire accepter cette solution par le propriétaire A ou la commune A. Cela pose des difficultés techniques : il faut savoir calculer l'effet des ouvrages sur l'aléa de crue, mais aussi présenter les résultats de manière synthétique et facilement utilisable pour la prise de décision. Les indicateurs économiques sont des outils très prometteurs pour traduire concrètement l'effet d'un aménagement sur l'ensemble du bassin, et sur le régime grâce à la méthode de l'annualisation. Leur mise en œuvre n'est pas facile, car pour évaluer finement les dommages, il faut croiser des variables hydrologiques, issues de modèles, et des données économiques dont on ne dispose pas forcément sur tout le bassin. Cependant, il faut encourager le développement de ces pratiques, qui sont le seul moyen de comparer et valider des solutions d'aménagement.

Le pilotage des projets est indispensable. Les objectifs doivent être posés explicitement, et des

résultats complets exigés, sur lesquels les prises de décision pourront s'appuyer. Si des préoccupations environnementales sont affichées, il faut se donner les moyens de les prendre en compte, en cherchant à associer des biologistes à la conception des aménagements (Poulard *et al.*, 2009, soumis). Les résultats doivent être présentés de manière claire et synthétique, mais des annexes techniques détaillées doivent également être fournies pour suivre le raisonnement et valider la pertinence des résultats. Les études doivent s'effectuer avec rigueur quelle que soit la taille des ouvrages. Un guide méthodologique téléchargeable a été publié en 2004 pour aider les opérationnels à mettre en œuvre des aménagements de ralentissement dynamique, notamment dans le cadre de PAPI (Chastan coord., 2004). Ce guide a été complété par des fiches de retour d'expérience (Cemagref, 2005). Une nouvelle édition est en projet.

Ce numéro spécial d'*Ingénieries-EAT* est complémentaire du guide dans la mesure où il n'a pas comme ce dernier l'obligation de balayer toutes les questions, mais peut en revanche approfondir des éléments méthodologiques et détailler quelques exemples choisis de retour d'expérience. En effet, chaque cas d'étude a ses propres spécificités et contraintes, et la déclinaison de ces techniques est vaste. Chaque expérience permet de progresser dans la connaissance. □

L'adresse « guideRD@cemagref.fr » est ouverte pour recueillir les remarques des utilisateurs.

L'analyse des messages reçus à cette adresse permettra d'améliorer le contenu du guide, mais aussi au besoin d'évoquer des pistes de recherche nouvelles pour répondre à des questions en suspens.

6. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt de la Mayenne.

7. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt de la Drôme.

Remerciements

Une partie du contenu de cet article a été formalisé une première fois sous la forme d'une fiche Sinfotech et de sa présentation associée. Tous ceux qui ont contribué à améliorer ces documents sont associés à ces remerciements : M. Patrick Landrot du Cemagref, Mme Frédérique Martini du ministère chargé de l'environnement, MM. Laurent Wendling (DDAF 53⁶), Marc Chemouni (DDAF 26⁷) et Daniel Beaubatie (DDAF 27), ainsi que les participants aux sessions correspondantes des journées Sinfotech de 2008, avec qui nous avons eu des échanges très intéressants.

Résumé

Promouvoir la gestion intégrée des inondations à l'échelle d'un bassin versant est une nécessité. Le principe de ralentissement dynamique est bien adapté à cette exigence, en permettant d'écrêter les crues en saisissant toutes les opportunités raisonnables de ralentissement et de rétention sur le bassin versant, ce qui va limiter d'autant le besoin d'ouvrages de protection perturbant fortement les écosystèmes, comme les endiguements et les calibrages. Cet article rappelle l'intérêt d'un diagnostic du risque, pour poser des objectifs raisonnables et spatialisés de réduction de l'aléa dommageable. Ensuite sont décrites les techniques de ralentissement dynamique ayant un effet mesurable et significatif sur les crues. Enfin, des recommandations sont formulées pour mettre en œuvre ces techniques à l'échelle du bassin, de manière pertinente économiquement. Elles concernent les méthodes de diagnostic d'effet des ouvrages, puis le pilotage des projets en insistant sur l'étape déterminante de rédaction du cahier des charges.

Abstract

Integrated Flood Management at catchment scale is the current paradigm. Dynamic Flood Retention is a relevant principle for its requirements, by mitigating floods wherever suitable opportunities exist on the catchment. It reduces the need for protection measures which impair river ecosystems, like levees and river training. This paper advocates the need for a risk diagnosis to set reasonable objectives for hazard mitigation over the catchment. Then, Dynamic Flood Retention techniques with a measurable and significant effect on floods are described. Finally, guidelines are proposed to implement them at catchment scale when economically relevant. A first set of guidelines is devoted to efficiency assessment, and a second one to project management, with a focus on specifications drafting.

Bibliographie

Les références citées dans l'article bibliographique (page 131 de ce numéro) ne sont pas reprises ici ; on les retrouvera dans les sections « Documents techniques de synthèse et de recommandation » et « Articles de revues scientifiques et techniques, communications à des conférences ».

CEMAGREF, 2005, *Fiches de retour d'expérience RD*.
http://www.lyon.cemagref.fr/hh/panorama/Convention_MEDD.html

CHOCAT, B. *et al.*, 2004, Urban drainage : Out-of-sight-out-of-mind ? (*Assainissement urbain : loin des yeux loin du cœur ?*) Conférence de clôture, in : *Actes de la 5^e Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables en gestion des eaux urbaines*, Novatech, Lyon. CD Rom.

ISFD4, 2008, *Statement* (Déclaration finale, en anglais), International Symposium on Flood Defence ISFD, 6-8 mai, Toronto, Canada.
<http://www.flood2008.org/flood/docs/TorontoStatement.pdf>

ISFD3, 2005, *Declaration* (Déclaration finale, en anglais), International Symposium on Flood Defence, 25-27 mai 2005, Nimègue, Pays-Bas.
<http://www.flood2008.org/flood/docs/ISFD3%20Declaration.pdf>

MICHEL, C., 1989, Réservoirs passifs d'écrêtement de crue dans les petits bassins sans données hydrométriques, *Hydrologie continentale*, n° 1, p. 25-31

OBERLIN, G., 1994, *Gestion du patrimoine et protection contre les inondations - Contribution à une gestion intégrée du patrimoine des eaux continentales par une protection raisonnée et négociée contre les inondations*, Journée du Palais d'Iéna « Des aménagements hydrologiques pour répondre à la diversité des objectifs économiques, sociaux et écologiques de notre époque », Académie des Sciences, CADAS, 26 mai 1994, 6 p.

POULARD, C. *et al.* (soumis en 2009), Towards flood mitigation designs respectful of river ecosystem functions ; problematic and conceptual approach, soumis à *Ecological Engineering*.

ROYET, P. *et al.*, 2009, *Cotes et crues de protection, de sûreté et de danger de rupture*, Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crue », janvier 2009, Paris.

WASSON, J.-G., 2008, *L'arbre, la rivière et l'homme*, Conseil scientifique du patrimoine naturel et de la biodiversité.
<http://www.ecologie.gouv.fr/L-arbre-la-riviere-et-l-homme.html>

Pour en savoir plus

- AgroParisTech (Engref) et le Cemagref organisent tous les ans une session de formation continue « Ouvrages de Ralentissement Dynamique des crues et prévention des inondations » :
<http://www.agroparistech.fr/> : rubrique Formations
- Base de données OMER, Ouvrages de maîtrise des écoulements en milieu rural :
<http://omer.cemagref.fr/>