

Gérer des inondations par des ouvrages dispersés sur le bassin versant : principes et méthodes de diagnostic d'efficacité probabiliste

La gestion intégrée des inondations à l'échelle du bassin versant offre des perspectives intéressantes pour poser un diagnostic pertinent et trouver des solutions de gestion de l'aléa, notamment à l'amont des enjeux. Cet article s'intéresse ici aux différentes étapes de l'estimation de l'aléa inondation et nous présente les principes et méthodes de diagnostic d'efficacité probabiliste pour améliorer la gestion des inondations par des ouvrages de prévention dispersés sur le bassin versant.

Du diagnostic au programme d'actions de gestion du risque d'inondation

La prévention des inondations commence par un diagnostic de l'aléa d'inondation, c'est-à-dire le ou les phénomènes physiques aléatoires à l'origine des inondations, puis du risque d'inondation, c'est-à-dire les conséquences de l'aléa, notamment économiques (dommages directs et indirects¹) et sociales (menaces pour la vie des personnes et leur santé...).

Nous allons parcourir les étapes de l'estimation de l'aléa inondation, puis du dimensionnement des ouvrages de gestion de l'aléa, en identifiant les problèmes qui se posent dès que l'on n'a plus un ouvrage unique, mais plusieurs.

Diagnostic probabiliste de l'aléa de référence, puis du risque

La figure 1 illustre le principe d'un diagnostic probabiliste d'inondation par débordement de cours d'eau. On construit d'abord des hydrogrammes représentatifs de la période de retour² étudiée, sur chaque tronçon, à partir des quantiles de débits estimés en ces points. Le débit de pointe en est souvent, logiquement, la valeur de

débit instantané dépassée en moyenne pour la période de retour étudiée T (= quantile $Q(T)$), mais il faut aussi choisir les autres caractéristiques : durée, volume... La condition initiale est importante aussi ; considérer systématiquement des ouvrages de stockage vides au début de la modélisation revient à négliger la probabilité de survenue d'épisodes rapprochés (exemple du barrage de la Rouvière en 2002, cf. liste de nos travaux³). À ces réserves près, on suppose qu'en injectant à l'amont d'un tronçon (ici B et C, en amont d'enjeux) un hydrogramme ainsi construit, l'extension spatiale de l'inondation calculée par modèle hydraulique correspondra à la zone inondée pour cette période de retour. Le modèle donne les hauteurs d'eau atteintes, plus rarement les vitesses locales. Même si ces études sont courantes, il faut garder en tête que les écoulements débordant hors du lit mineur restent difficile à modéliser (encadré 1).

Les politiques publiques incitent maintenant à aller jusqu'à l'estimation des dommages, *via* des courbes d'endommagement, pour le calcul d'indicateurs économiques intégrés sur le régime des crues (DMA : dommages moyens annualisés). Pour une description détaillée du principe et des méthodes de calcul des indicateurs

1. Les dommages directs sont causés dans la zone inondée au moment de la submersion ; les dommages décalés dans le temps et/ou l'espace sont dit indirects (perturbations des réseaux électriques, routiers..., pertes d'exploitations le temps du retour à la normale sur le site même ou chez des fournisseurs ou clients inondés).

2. La « période de retour » est l'inverse de la probabilité annuelle d'occurrence : une crue « centennale » a une chance sur 100 d'être atteinte ou dépassée au cours d'une année donnée.

3. <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00052429>

économiques – et de leurs difficultés – on se reportera par exemple à Bailly *et al.* (2010) et Commissariat général au développement durable (2014). Ce diagnostic aide ensuite à définir une stratégie de réduction du risque⁴, jouant à la fois sur la modification de l'aléa (ouvrages de laminage et de protection), et de la vulnérabilité (dispositions constructives, adaptations du bâti existant, formation des services techniques et des citoyens aux comportements adaptés avant et pendant les crises...).

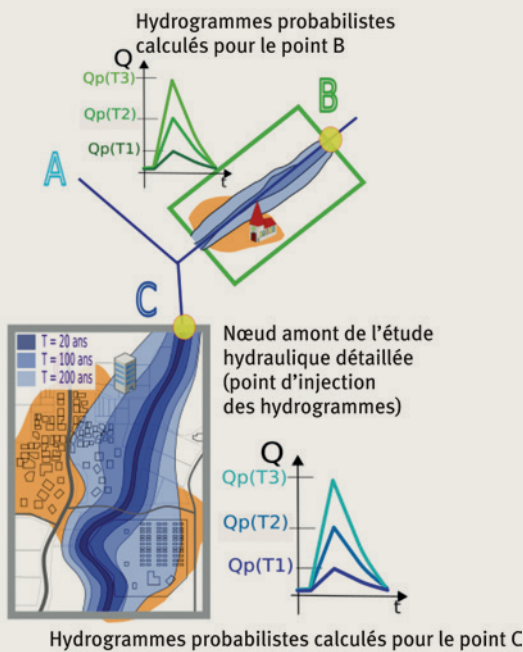
Cette approche probabiliste suppose de pouvoir estimer des quantiles de débit en amont d'un tronçon, ce qui est possible – mais pas toujours facile – dans les cours d'eau. Sur des surfaces d'apport réduites en tête de bassin ou en milieu urbain, on peut estimer un ruissellement probabiliste à partir de pluies de projet, en assimilant

la période de retour du débit à celle de la pluie qui le génère. Par contre, si on a besoin d'étudier le ruissellement sur tout un sous-bassin, cette identification est beaucoup plus problématique. L'encadré 2 présente une alternative, une méthode de détermination d'indicateurs du ruissellement intense pluvial (IRIP) qui propose une cartographie des zones susceptibles de générer, transférer et accumuler du ruissellement en se fondant des indicateurs géomatiques liés aux processus.

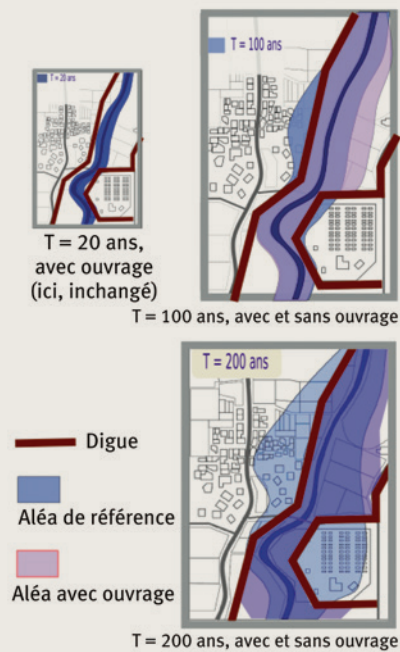
4. La directive européenne sur la gestion du risque inondation de 2007 impose d'ailleurs la rédaction d'un plan de gestion des risques d'inondation (PGRI) dans les territoires identifiés comme à risque important d'inondation (TRI) par une évaluation préliminaire du risque d'inondation nationale.

1 Principe de cartographie à partir d'hydrogrammes représentatifs de périodes de retour (d'après schémas de G-Eau).

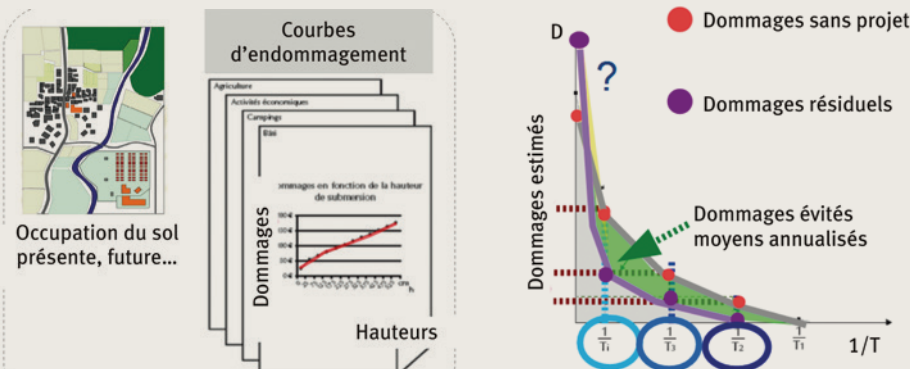
a. Aléa hydraulique par tronçon.



b. Réduction de l'aléa.



c. Passage des variables hydrauliques aux dommages via les courbes d'endommagement, et enfin aux dommages évités moyens annualisés, aire verte (à droite).



▶ Estimation de l'aléa résiduel en présence d'ouvrages et indicateurs d'efficacité

Pour limiter des dommages au droit des enjeux, on peut construire des digues, contrôler des écoulements (dérivation d'une partie des écoulements, calibrage, suppression d'obstacles qui provoquaient une surélévation de la ligne d'eau...) ou laminier les crues en amont (principe des barrages à pertuis ouverts, figure 2 et nos travaux). Comme pour l'aléa de référence, on caractérise d'abord le fonctionnement de ces infrastructures par des indicateurs hydrologiques et hydrauliques (figure 1b). Au centre de la figure 1a, les zones d'extension d'inondation calculées sur le tronçon C sans et en présence de digues, pour plusieurs périodes de retour, illustrent bien leur fonctionnement. Le même type de carte est tout aussi pertinent pour un barrage écrêteur, mais pour mettre en évidence ses phases de fonctionnement il est important de tracer aussi les hydrogrammes de référence et en présence de l'ouvrage, à son aval (figure 3a : les hydrogrammes de référence sans ouvrage sont en vert, avec ouvrage en rose). Il faut insister pour que les effets des ouvrages soient estimés sur une gamme de de périodes de retour décrivant bien la plage d'efficacité. Pour un barrage à pertuis ouvert, cela comprendra la transition entre une crue projet non modifiée par l'ouvrage et une crue qui le sera (fin de la « transparence » hydraulique), des crues sans surverse puis avec déclenchement de surverses, avec des pics de crue de moins en moins bien écrêtés, et enfin une crue dont le débit de pointe ne sera plus du tout atténué. Certaines actions visent à agir sur

des « petits » événements (réduction des pollutions diffuses ou des rejets urbains de temps de pluie), d'autres cibleront au contraire des événements plus rares. Il faut également caractériser les effets sur tout le domaine spatial où ils se font sentir : les digues et des calibrages (3 et 4 sur la figure 2) peuvent déplacer le problème des inondations sur la rive opposée et/ou vers l'aval.

Les variables hydrauliques ne suffisent pas à évaluer et comparer des solutions techniques (vaut-il mieux écrêter les petites ou les grosses crues ? Vaut-il mieux protéger ici ou là ?) ; là encore, les indicateurs économiques permettent de raisonner sur les conséquences des inondations. La figure 1c résume le principe de calcul des dommages évités moyens annualisés (DEMA), par différence entre les DMA de référence et les DMA résiduels après projet. Ces DEMA mesurent donc la réduction du risque à la « bonne échelle », en prenant en compte les dommages pour toute une gamme de périodes de retour, cumulés sur le domaine spatial – en gardant la possibilité de calculer des cumuls partiels par sous-bassins ou par commune. De plus, les DEMA peuvent intégrer l'effet conjoint de mesures structurelles (qui modifient les variables hydrauliques), mais aussi d'actions non structurelles (qui modifient les courbes d'endommagement utilisées pour convertir ces variables en dommages attendus). Les DEMA sont ensuite utilisables comme mesure des bénéfices de l'aménagement dans une analyse coût-bénéfice pour en évaluer la pertinence à long terme. La différence entre les coûts et les bénéfices actualisés sur une certaine durée, ainsi que

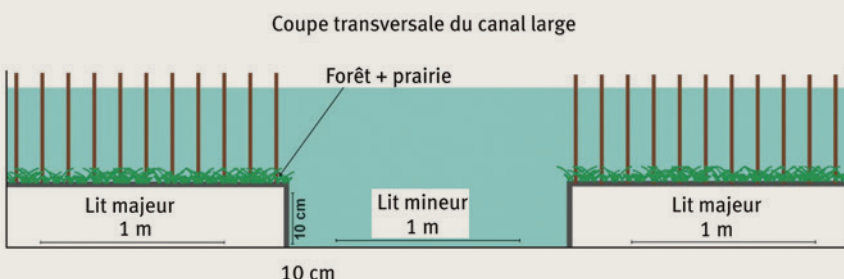
1 QUELQUES LIMITES DES CODES HYDRAULIQUES

La cartographie des écoulements des crues rares cumule deux difficultés : l'estimation de quantiles de crues extrêmes à partir de données hydrométriques limitées, et la modélisation d'écoulements très différents de ceux qui ont servi à caler le modèle (voir liste de nos références).

Certaines conditions peuvent atteindre les limites des codes hydrauliques « classiques » :

- des géométries d'ouvrages complexes (seuils de prise d'eau ou de déversement, pertuis...) peuvent donner lieu à des écoulements ne pouvant pas être réduits a priori à une loi d'ouvrage connue : des modèles physiques sont alors très utiles pour les caractériser, en complément avec la modélisation numérique (barrage de la Lurberria, casiers de la Savoureuse, zone de rétention de crue de Mouzon...);
- les simplifications des calculs de perte de charge des codes 1D et 2D classiques ne sont plus valides pour des écoulements débordant en plaines d'inondation, notamment lorsque leurs largeurs varient, ou en présence de microtopographies et états de surface hétérogènes et d'obstacles (forêts, bâtiments) : le projet en cours ANR FlowRes (2015-2018) s'attache à mieux comprendre et quantifier les pertes de charge liées aux variations d'occupation du sol (e.g. arbres et maisons) des plaines d'inondations lors de crues extrêmes à partir d'expériences sur des canaux expérimentaux, en condition contrôlées, pour améliorer les modèles numériques (<http://flowres.irstea.fr/fr/>);
- les interactions entre les écoulements de surface et les réseaux urbains sont importants, mais les codes de calcul qui les caractérisent sont habituellement découplés et écrits pour répondre à des besoins différents (écoulements en rivière/dimensionnement de réseaux). Une thèse est en cours à Irstea pour modéliser les inondations en ville en prenant en compte ces écoulements et leurs interactions entre eux et avec les autres espaces urbains (bâti, jardins, cours intérieures)...

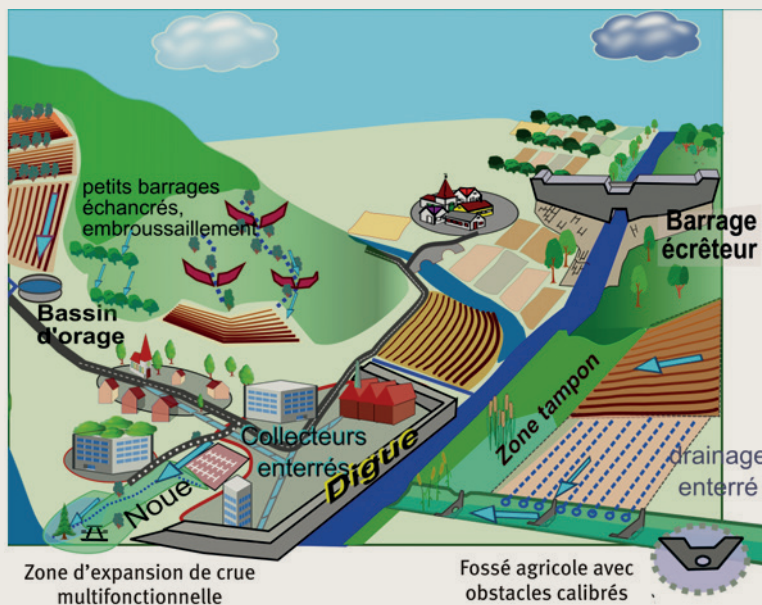
1 Utilisation du canal large Irstea pour étudier les écoulements en plaine d'inondation : coupe transversale pour une configuration d'occupation du sol et réalisation du dispositif



<http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-eaux/hall-hydraulique-crues-extremes-risque-inondation>



② Schéma de quelques infrastructures de prévention des inondations sur un bassin versant.



le ratio coût-bénéfice correctement – et prudemment – interprétés permettent de guider les étapes de dimensionnement. Le souci de la protection des personnes, les impacts sur la géomorphologie et les écosystèmes, voire la faisabilité, entrent aussi en ligne de compte dans la prise de décision. Nous évoquerons dans la troisième partie l'évaluation d'un projet au travers de plusieurs critères.

Sur quels paramètres jouer pour améliorer l'efficacité ?

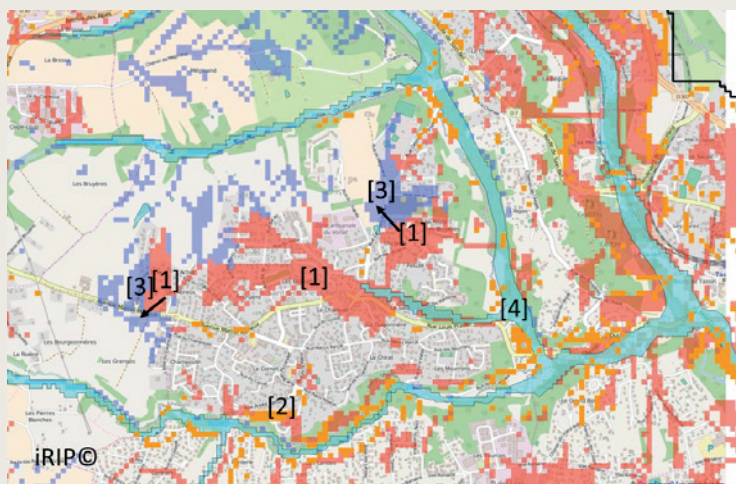
Le projecteur peut moduler le fonctionnement hydrologique des infrastructures ; pour une digue, il s'agira de la localisation et de la hauteur du corps de digue, ainsi que de l'emplacement des déversoirs et de la cote des seuils le cas échéant. Pour les ouvrages écrêteurs de crue, c'est un peu plus complexe (voir nos communications récentes) :

- la forme et les dimensions de l'orifice. Le barrage peut être échançré (« meurtrière ») ou percé d'un pertuis de fond. À volume de stockage égal, un petit pertuis va écrêter plus tôt et donc mieux atténuer les crues fréquentes qu'un pertuis plus grand, mais en contrepartie le volume de stockage sera saturé plus rapidement ; pour les crues plus rares, les surverses surviendront plus tôt. Les barrages échançrés ont un débit sortant qui varie plus progressivement avec la hauteur d'eau, alors que la variation est brutale au moment de la surverse d'un barrage à pertuis ouvert ;

② IRIP, UNE MÉTHODE GÉOMATIQUE D'ESTIMATION DES ZONES SUSCEPTIBLES DE PRODUIRE, TRANSFÉRER ET GÉNÉRER DU RUISSELLEMENT

Selon les conditions topographiques, d'occupation et de nature du sol, les pluies intenses pourront ruisseler plus ou moins rapidement, et produiront des effets divers comme le montre la figure ci-dessous. La capacité à produire une inondation (zone [3]) ou encore des coulées boueuses (zone [2]) dépendra de ces conditions qui varient selon les lieux. La méthode IRIP (voir liste de nos travaux) permet de cartographier les trois étapes du ruissellement, que l'on résume par sa production [1], son transfert [2] et son accumulation [3]. La connexion entre les zones les plus propices à la production avec des zones de transfert ou d'accumulation révèle les situations qui peuvent s'avérer critiques en cas de pluies intenses. Ainsi, les zones urbaines en situation [2] ou [3] (flèches dans figure ci-dessous) devraient faire l'objet d'un diagnostic local. Ce type de cartographie permet d'imaginer où et quelles mesures de prévention seraient les plus appropriées pour limiter le risque d'inondation ou encore d'ensevelissement de secteurs vulnérables.

② Il faut savoir cartographier les étapes du ruissellement intense pluvial afin d'imaginer des moyens de prévention adaptés.



L'inondation par ruissellement intense.

- [1] zone de production – la lame d'eau peut atteindre quelques centimètres tout en s'écoulant.
- [2] zone et axe de transfert – le ruissellement peut se concentrer, prendre de la vitesse et éroder les parties meubles, devenir boueux.
- [3] l'écoulement est ralenti ou bloqué, la hauteur d'eau peut augmenter, inonder et les matières transportées se déposer, ensevelir.
- [4] la limite de la zone inondable (EAIP) par débordement des cours d'eau.

la localisation de ou des ouvrages. L'écrêtement réduit le pic, mais il le retarde également ; le débit et la hauteur d'eau résultants en un point situé à l'aval dépendent donc aussi de la manière dont les différentes contributions arrivent dans le temps ;

les dimensions de l'évacuateur de crue.

Des actions plus « naturelles » peuvent également être adaptées pour renforcer l'effet sur les crues dommageables. Une « zone d'expansion de crues », créée par remise en connexion du lit majeur, écrêtera beaucoup au moment des premiers débordements vers la ZEC, et l'effet s'atténuera au fur et à mesure que l'eau envahira le volume disponible : il n'y aura pas d'écrêtement du pic de crue s'il survient alors que la ZEC est déjà « remplie ». Une diguette munie de déversoirs peut retarder la mise en connexion, et la cote des seuils déversants peut être ajustée pour réduire au mieux les inondations dommageables en aval.

Estimer sommairement des DEMA dès les phases de dimensionnement peut guider ces choix techniques, et aboutir à une proposition réduisant mieux le risque.

Les méthodes mises au point pour les grands ouvrages conviennent-elles aux petits ouvrages ?

Des dispositifs de limitation de débit analogues aux barages écrêteurs décrits plus haut peuvent se décliner à différentes échelles : sur un grand cours d'eau, dans un thalweg sec ou même dans un fossé routier ou agricole (figure 2). Les méthodes de calcul seraient en principe les mêmes, sauf qu'en dehors des cours d'eau l'estimation de quantile de débits est moins évidente (pour les têtes de bassin, on pourra chercher à travailler à partir de

pluies de projet). La conception d'un petit ouvrage n'est pas moins exigeante que celle d'un grand, les problèmes liés à l'érosion et aux dépôts de sédiments sont même plus délicats. De même, la modélisation des effets d'un changement d'occupation du sol ou de création de talus en versant, de reméandrage et de l'embroussaillage de petits thalwegs est plutôt complexe.

On pose très souvent la question de l'effet d'ouvrages petits mais en grand nombre sur un bassin versant. La littérature scientifique montre parfois des résultats contrastés, mais les articles de synthèse tendent plutôt à conclure que les effets d'actions « diffuses », c'est-à-dire de petites actions dispersées sur le bassin, ont un effet local sur les « petites » crues, mais que cet effet s'estompe vers l'aval et pour les « grosses » crues. Ces limites en termes de distance et d'intensité varient d'un cas à un autre, en fonction du contexte physique et climatique, mais aussi de la topologie du réseau (selon les décalages temporels entre les pics des différentes contributions, retarder une crue sur un affluent sera plus ou moins pertinent).

De plus, on définit un « effet » par rapport à un objectif. Or, les actions en versant en ont souvent plusieurs, parmi lesquels : lutter contre l'érosion, réduire et/ou différer l'arrivée de polluants au cours d'eau, atténuer les inondations par ruissellement, pour des enjeux situés en versant sur des chemins de l'eau temporaires, mais aussi accroître la biodiversité. En milieu urbain, les techniques alternatives affichent également plusieurs objectifs : éviter la surcharge des réseaux d'assainissement existants, limiter les rejets urbains de temps de pluie dommageables pour les milieux naturels récepteurs, réintroduire l'eau pluviale dans le paysage (noues, petites zones d'expansion de crue) pour entretenir la culture du risque...

Il faut donc, comme pour les « grands » ouvrages, interpréter les retours d'expérience dans leur contexte (une réalisation a été jugée « efficace », mais pour quel objectif et quel type de crue ?), et ne pas sous-estimer la difficulté de la quantification *a priori* (simulations) ou *a posteriori* (mesures). Nous exposons dans la suite pourquoi l'estimation de l'effet d'ouvrages dispersés sur le réseau hydrographique pose des difficultés méthodologiques, même quand on ne considère que des ouvrages placés sur le réseau hydrographique.

Estimation de l'efficacité d'un ensemble d'ouvrages

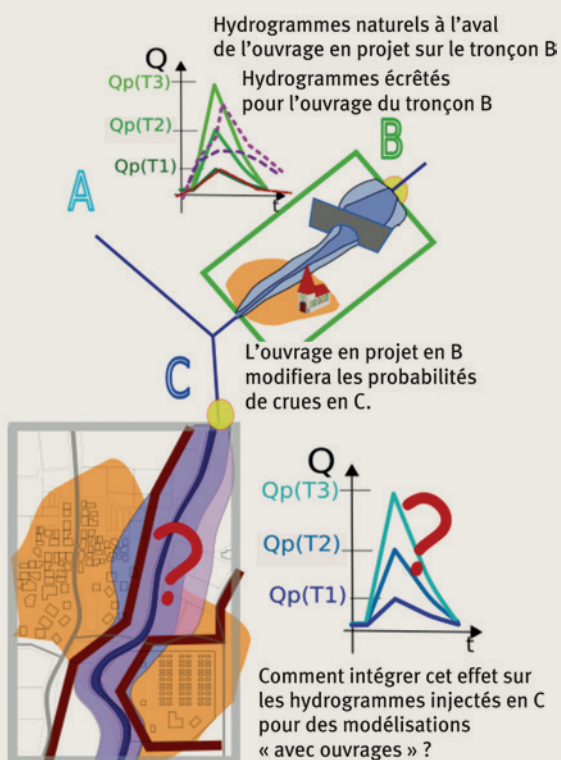
Tant que les enjeux et les ouvrages sont portés par le même tronçon, la méthode résumée sur la figure 1 est correcte. On assimile la période de retour des variables hydrauliques calculées au droit des enjeux à celle de l'hydrogramme amont construit pour la modélisation, et on admet que l'on peut également attribuer cette période de retour aux dommages calculés.

Dès que l'on étend le domaine d'étude, avec des ouvrages localisés sur des affluents différents, et/ou en présence d'affluents entre les ouvrages et les enjeux, il n'est plus possible de raisonner avec un « hydrogramme représentatif d'une période de retour ».

Genèse de l'aléa à l'échelle du bassin

La figure 2 résume les difficultés en réseau ramifié : on peut estimer le futur régime des crues à l'aval immédiat

Difficultés d'évaluer plusieurs actions distribuées sur un bassin versant : limites du raisonnement probabiliste en présence d'ouvrages.



d'un projet d'ouvrage pour une crue de projet, mais après une confluence, il est difficile de répercuter l'effet de la présence de l'ouvrage, car évidemment les quantiles ne sont pas additifs, ils dépendent de la combinatoire entre les différentes contributions.

Conséquences de la variabilité de la pluie

La première difficulté est donc l'hétérogénéité spatiale du phénomène. Une crue « centennale » après une confluence peut être générée par une infinité de combinaisons d'hydrogrammes amont, avec des périodes de retour plus ou moins contrastées sur les affluents, et des décalages temporels liés aux temps de concentration des bassins, mais aussi à la dynamique de l'épisode de pluie...

La figure 4 représente ce qui peut se passer lors d'un épisode de pluie réel, hétérogène : soumis à des pluies modérées, le bassin versant qui alimente l'ouvrage en (1) ne génère pas de crue significative ; l'ouvrage (2) est supposé fonctionner à son optimum, tandis que celui en (3) reçoit une crue exceptionnelle et se met à surverser : c'est la combinaison de ces trois fonctionnements spécifiques qui va déterminer la crue en entrée de la ville (4). Les inondations en (6) dépendent en outre d'inondations par ruissellement schématisées en (5), de l'effet des digues dans la ville, et éventuellement localement du comportement des réseaux.

Conséquences de la structure spatiale d'un aménagement

Modéliser un aménagement composé d'infrastructures de nature et de taille différentes demande de travailler sur de grands domaines mais de manière précise (en prenant en compte tous les chemins de l'eau y compris en réseau, les seuils de déversement...), de concilier des échelles de temps différentes (montée des crues en cours d'eau et temps de vidange de grands ouvrages vs surverse des réseaux d'eau pluviale) et de prendre en compte un grand nombre de processus (infiltration, ruissellement, écoulements en lits majeurs...). Ces modélisations « complètes » sont donc encore relativement

4 Difficultés d'évaluer plusieurs actions distribuées sur un bassin versant : exemple d'événement possible, avec pluie hétérogène.



rare, et supposent en outre la construction de scénarios d'apport distribués à l'échelle du bassin.

Méthodes de construction de scénarios d'apport à l'échelle du bassin versant

Dans la littérature, l'effet de l'hétérogénéité de la pluie sur la genèse des écoulements et le fonctionnement des ouvrages est bien identifié, y compris sur des domaines d'étude réduits (communauté urbaine).

Une fois cette prise de conscience acquise, comment générer des scénarios à l'échelle du bassin ? Nous avons trouvé dans des rapports d'étude plusieurs approches (tableau 1).

1 Des approches différentes pour générer des scénarios à l'échelle du bassin versant.

	Avantages et limites (références)
A. « Rejouer » des événements passés, à partir d'observations de pluie (y compris des informations issues de radar) utilisées ensuite en entrée d'un modèle pluie-débit, ou de mesures de débit en cours d'eau.	Avantage : la structure spatio-temporelle est réaliste, puisqu'observée. Limite : le nombre de configurations observées disponibles est réduit et ne constitue qu'un ensemble de cas particuliers. Des auteurs modulent parfois des observations pour générer des crues d'intensités variées. Exemples : Étude de la Lèze (http://www.smival.fr), de la Vilaine et de l'Oust (http://www.eptb-vilaine.fr).
B. Construire des scénarios en combinant des crues de projet probabilistes sur les tronçons amont ; on n'affecte pas de probabilité a priori à chaque scénario, mais on peut estimer une période de retour en un point donné connaissant le débit maximum calculé et une distribution statistique des débits en ce point.	Avantage : construire un grand nombre de scénarios permet de montrer et d'analyser la variabilité de la réponse. Limite : il est difficile d'estimer la vraisemblance des combinaisons proposées, à moins d'une étude poussée des liaisons et des concomitances. Il faudrait considérer aussi les combinaisons de décalages temporels des crues amont. Exemple : deuxième étude de la Savoureuse, décrite dans nos travaux.
C. Construire des longues chroniques de champs de pluie stochastiques, les injecter dans un modèle pluie-débit puis si nécessaire un modèle hydraulique, et estimer a posteriori les périodes de retour des débits aux points étudiés par une analyse statistique des chroniques de débit ainsi calculées.	Avantage : les scénarios sont pertinents à l'échelle du bassin (avec un générateur de pluie validé) et la longueur des chroniques garantit de disposer d'une population d'événements variés (en pointe, en volume, en durée, en concomitance...) et la robustesse des quantiles estimés. Limite : il faut disposer d'un générateur de pluie (outil de recherche) et de l'expertise et des données pour le caler, et adapter les codes de calcul au traitement de longues chroniques [notre communication à FloodRisk 2016].

Des travaux en cours implémentent l'approche « C », par simulation continue, pour tester sa faisabilité et confronter ses résultats avec les méthodes par tronçon et par événement. Cette approche convient pour appréhender l'effet global d'un ensemble d'aménagements disposés sur un réseau ramifié, et comparer des solutions entre elles. Nous évaluons aussi la durée de simulation requise pour parvenir à des résultats (quantiles de débit avec et sans ouvrages) robustes, c'est-à-dire variant peu d'une simulation à une autre. La figure 5 montre des débits de pointe maximum annuels, échantillonnés à partir d'une longue chronique simulée, et placés sur le graphe de la période de retour empirique. En-dessous de chacun de ces points, on a placé le maximum de chacun de ces épisodes de crue en présence d'ouvrages écrêteurs, l'un sur le cours d'eau et l'autre sur son affluent principal : l'efficacité du laminage ne dépend pas que de la seule valeur du débit de pointe, mais de la durée et du volume de la crue – constituée éventuellement par deux pics successifs ou plus – et de la distribution spatiale et temporelle de la pluie (l'un des ouvrages peut être sous ou sur-sollicité, en fonction des intensités locales). Si on n'avait travaillé qu'avec une crue « de projet » pour un

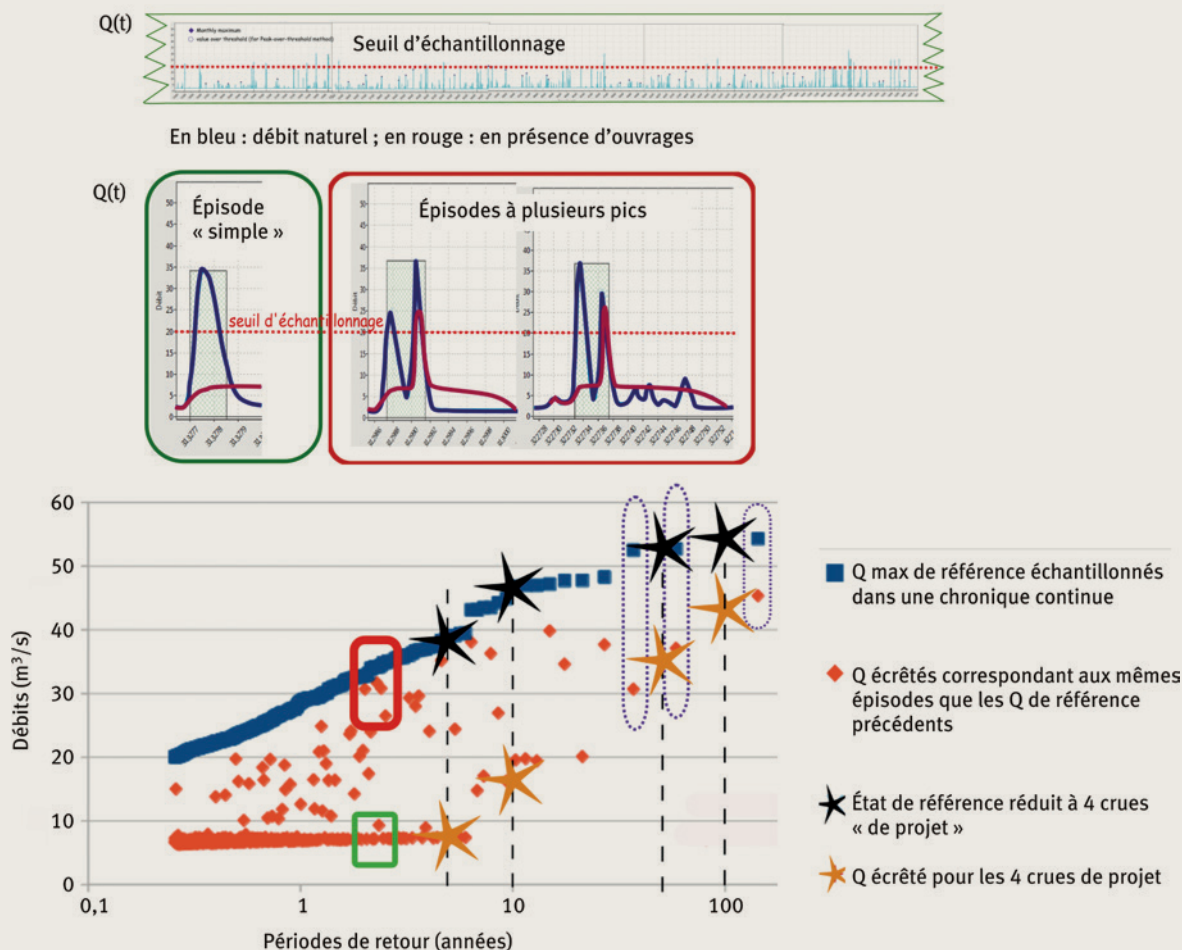
petit nombre de périodes de retour, on aurait beaucoup moins d'informations (représentées par des étoiles), et la fausse impression qu'il existe une relation simple entre le débit de pointe et l'écrêtement.

Choix préliminaire des scénarios d'aménagements à tester

On peut s'interroger sur l'arbitrage entre « gros ouvrages » et « ensemble de petits ouvrages » :

- un « gros ouvrage » est plus facile à dimensionner et à exploiter, on peut s'attarder à chercher à améliorer la conception et réduire les impacts négatifs (transport sédimentaire, écosystèmes, paysages...) à travers des collaborations pluridisciplinaires, s'appuyant sur des études locales. Les gros ouvrages peuvent cependant inquiéter les riverains autant qu'ils les rassurent : la probabilité de rupture est faible, mais les conséquences en seraient dramatiques ;
- un « ensemble de petits ouvrages » permet de réduire les inondations sur des enjeux locaux, en plus des enjeux principaux, et semblent moins impacter le paysage et les écosystèmes. Les actions les plus modestes ne sont pas cependant ni les plus faciles à concevoir (multiplication

5 Débits à l'aval du modèle avec une chaîne de modélisation champs de pluie/modèle pluie-débit/modèle hydraulique. En bleu : débits sup-seuils calculés sur 100 ans en fonction de leur période de retour empirique. En rouge, en dessous : débit de pointe après laminage par deux ouvrages à pertuis ouverts situés sur deux branches parallèles à l'amont.



des dossiers, donc des chantiers, des sites à vérifier et entretenir, surtout si on multiplie les actions, en terrain public mais aussi privé...), ni à évaluer ! Il ne faut sans doute pas négliger non plus les impacts environnementaux des petits ouvrages, modestes mais répétés, et qui sont localisés en amont, où le fonctionnement écologique est sans doute encore très intéressant.

Il n'y a pas de bonne réponse dans l'absolu, toutes les conclusions sont à tirer dans le contexte physique du bassin, et en fonction des priorités. Pour réduire au mieux des DMA, il sera sans doute judicieux de rechercher les complémentarités entre d'une part des actions répondant à des problématiques locales (érosions, ruissellement dommageables) pour des épisodes courants, et d'autre part des structures plus importantes en cours d'eau, visant explicitement le laminage des crues fortes au droit des enjeux principaux. Cependant, plus un aménagement comporte d'ouvrages, plus l'évaluation des effets sera complexe, surtout s'ils sont de nature différentes.

La co-construction multicritères : une difficulté ou une opportunité ?

Le programme PAPI (programme d'actions de prévention des inondations), tout comme le concept de « GEMAPI » (gestion intégrée des milieux aquatiques et prévention des inondations) vont maintenant répandre et généraliser les analyses multicritères.

Les décideurs et financeurs raisonnent forcément déjà dans un cadre multi-objectifs, en fonction des politiques locales et nationales de protection des biens et des personnes, mais aussi de développement économique, d'équité entre territoires, de préservation des milieux naturels et du cadre de vie... Les projets multi-objectifs et pluridisciplinaires (par exemple : Schmitt *et al.*, 2009...) sont toujours extrêmement intéressants : au minimum, il s'agit d'éviter les antagonismes et trouver des compromis, et si possible des synergies entre gestion du risque inondations et préservation des écosystèmes. La nouveauté réside surtout dans la formalisation de l'exercice, avec un premier guide méthodologique disponible en ligne (Commissariat général au développement durable, 2014), mais qui donne à ce stade peu de détails, alors que cette approche est difficile et mal connue en France par les opérationnels.

Une analyse multicritères suppose une définition explicite des objectifs (du porteur du projet, des financeurs, des autres acteurs locaux participant à la concertation), des critères qui en découlent, quantitatifs ou non, et de règles de décision. La représentation des critères sur plusieurs axes (graphes « en radar ») offre une vision synthétique mais complète des résultats, et permet de comparer des solutions. Il faut aussi des règles de décision explicites, pour savoir ce qui est important et comment classer des propositions de manière objective et consensuelle. À condition d'être explicités dès les premières étapes d'un projet, ces critères et leurs règles de priorisation pourraient aussi guider les choix techniques, surtout dans un contexte de co-construction faisant intervenir des spécialistes de différentes disciplines. On peut aussi espérer qu'associer les citoyens à ces premières phases d'un projet, où les objectifs seraient définis et déclinés en critères, permettra d'exposer les raisons des projets de gestion du risque, et de recueillir leurs avis et demandes à un stade où il sera facile de les prendre en compte dans la définition de la stratégie, pour prévoir d'éventuelles adaptations et compensations. ■

Les auteurs

Christine POULARD, Étienne LEBLOIS, Jean-Baptiste FAURE, Pascal BREIL et Sébastien PROUST

Irstea, UR HHLY, Centre de Lyon-Villeurbanne
5 rue de la Doua, BP 32108,
69616 Villeurbanne Cedex, France.

✉ christine.poulard@irstea.fr

✉ etienne.leblois@irstea.fr

✉ jean-baptiste.faure@irstea.fr

✉ pascal.breil@irstea.fr

✉ sebastien.proust@irstea.fr

Paul ROYET

Irstea, UR RECOVER,
3275 Route de Cézanne, CS 40061,
13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France.

✉ paul.royet@irstea.fr

Luc DEROO

ISL Ingénierie,
75 Boulevard Macdonald, F-75019 Paris, France.

✉ deroo@isl.fr

EN SAVOIR PLUS...

✉ **BAILLY, J.-S., GRELOT, F., LAVERGNE, C., SAINT-GEOURS, N.**, 2010, Analyse de sensibilité spatiale de l'outil ACB. Plan Rhône, Séminaire ACB, http://www.planrhone.fr/external-data/data/Files/Inondations/3_Donnees_et_methodes/methode/1_Analyse_cout_benefice/n2_presentation_CEMAGREF.pdf

✉ **COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE**, 2014, *Analyse multicritères des projets de prévention des inondations, Guide méthodologique*, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 86 p.

✉ **SCHMITT *et al.***, 2009, Le « Polder » d'Erstein: objectifs, aménagements et retour d'expérience sur cinq ans de fonctionnement et de suivi scientifique environnemental (Rhin, France), *Ingénieries-EAT, numéro spécial « La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues »*, p. 67-84, <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/DG2008-PUB00026460.pdf>

✉ **Liste bibliographique complémentaire** : <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00052429>