
Modélisation de synthèse des crues : modèles hydrologiques en débit-durée-fréquence et modèles hydrauliques

Nicolas Gendreau et Guy Oberlin

Lorsque nous parlons des inondations, nous sommes amenés à distinguer deux notions bien distinctes : l'aléa et la vulnérabilité. En effet, le cours d'eau pose problème quand à la fois il déborde et qu'il crée des dommages. L'étude des débordements concerne la modélisation de l'aléa, des phénomènes physiques régissant le fonctionnement du cours d'eau et de son bassin versant associé. L'étude de la sensibilité de l'occupation des sols est souvent du domaine de l'économie, la sociologie... qui tentent de caractériser cette vulnérabilité. Nous dirons qu'il y a risque d'inondation à partir du moment où l'aléa est incompatible avec la vulnérabilité.

L'objet de ce texte n'est pas de traiter du risque d'inondation mais d'essayer de montrer en quoi les outils actuels apportent beaucoup sur la connaissance de l'aléa et quels sont les développements que nous pouvons en attendre. Nous montrerons entre autre les limites des modèles que nous proposons et les caractéristiques de leur mise en œuvre, notamment leur apport en matière de négociation.

Analyse des inondations

De tout temps, l'homme s'est préoccupé de l'aménagement de ses cours d'eau. En effet, ils sont avant tout une ressource qu'il a exploitée à des fins d'irrigation, d'alimentation en eau potable, de voie de transport ou encore de moyen de production d'électricité. Mais la variabilité naturelle des débits l'a amené à essayer de maîtriser les dé-

bordements. Et cela s'est souvent traduit par des endiguements, des recalibrages ou la réalisation de grands barrages. Les principaux inconvénients de ce type de travaux sont de ne pas avoir tenu compte de la vulnérabilité, ou tout du moins très partiellement, et de n'avoir jamais envisagé de négociation entre les acteurs pour la définition de niveaux de protection acceptables.

En effet, la crue centennale a souvent été prise comme référence pour la protection des zones urbaines. Mais aucune analyse économique et sociologique n'a permis de démontrer que ce niveau de protection correspondait à un optimum. La crue centennale est en fait une référence issue de l'histoire de l'aménagement des cours d'eau et de l'urbanisation de ses lits majeurs.

D'autre part, les éléments des analyses n'ont jamais permis de véritable négociation entre les acteurs pour les raisons essentielles suivantes : les niveaux de protection ont en général été défini nationalement pour tout le territoire français et les résultats des études sont souvent très techniques et peu intelligibles pour le tout un chacun.

Lorsque nous nous intéressons aux aménagements et à leur efficacité vis-à-vis des crues, nous devons dépasser l'événement particulier pour nous intéresser au fonctionnement global du cours d'eau et de son bassin versant. Nous devons alors privilégier une analyse fréquentielle pour pouvoir déterminer les seuils de fonctionnement nominal des ouvrages : décennal, centennal... C'est donc bien une analyse en T (période de retour) qu'il faut privilégier et non pas une analyse en t (explication des événements courants).

Nicolas Gendreau et Guy Oberlin
Cemagref
Unité de recherche
Hydrologie-
Hydraulique
3 bis, quai
Chauveau
CP 220
69336 Lyon
Cedex 09

Les modèles hydrologiques en débit-durée-fréquence

Les méthodes d'analyse hydrologique sont complexes et basées sur un certain nombre d'hypothèses qui rendent leur compréhension difficile pour quelqu'un disposant de peu de connaissance en statistique et sur les processus de genèse de la crue. Il s'agit donc de remodeliser les connaissances hydrologiques disponibles sur les crues, de manière à ce qu'elles puissent contribuer à mettre entre les mains de tous les acteurs des éléments objectifs et quantifiés de négociations. Ces éléments doivent être cartographiables, car une bonne partie de la négociation est territoriale et foncière. Ils doivent aussi être continus et inversibles, pour ne pas trop contraindre techniquement des négociations aussi délicates, qui ont besoin d'un maximum de flexibilité, et surtout d'un affichage clair des conséquences des options prises. D'autre part, il est très réducteur de ne considérer qu'une seule variable dans les décisions d'aménagement (souvent le débit de pointe centennale) car les crues sont bien mieux définies par leur débit de pointe certes, mais aussi par leur durée. D'autre part, le fonctionnement hydrologique du cours d'eau ne peut se réduire à une seule fréquence et une description du régime des crues en débit-durée-fréquence est beaucoup plus satisfaisante.

■ Les représentations construites

L'aléa « vécu » est essentiellement une construction basée sur la chronique $x(t)$. Le paramètre fondamental en est t , qui représente le temps courant. C'est-à-dire que le fonctionnement d'une variable x est perçu à travers ses variations dans le temps, et ceci naturellement en un point de l'espace (en l'occurrence une section en travers du cours d'eau pour ce qui nous concerne ici). La grandeur de référence, x , dépend de ce que nous regardons. Ce peut être l'intensité de pluie I , le débit Q du cours d'eau, sa hauteur d'eau h , le volume de l'événement V , la durée de la crue d . Chacune de ces grandeurs est caractérisée au cours de l'événement E à un instant précis t .

De l'ensemble de ces événements observés, nous extrayons des caractéristiques représentatives. Celles-ci ne sont plus liées à un événement précis, mais sont déjà un pas vers l'analyse et la synthèse. Elles sont souvent déduites par des opérati-

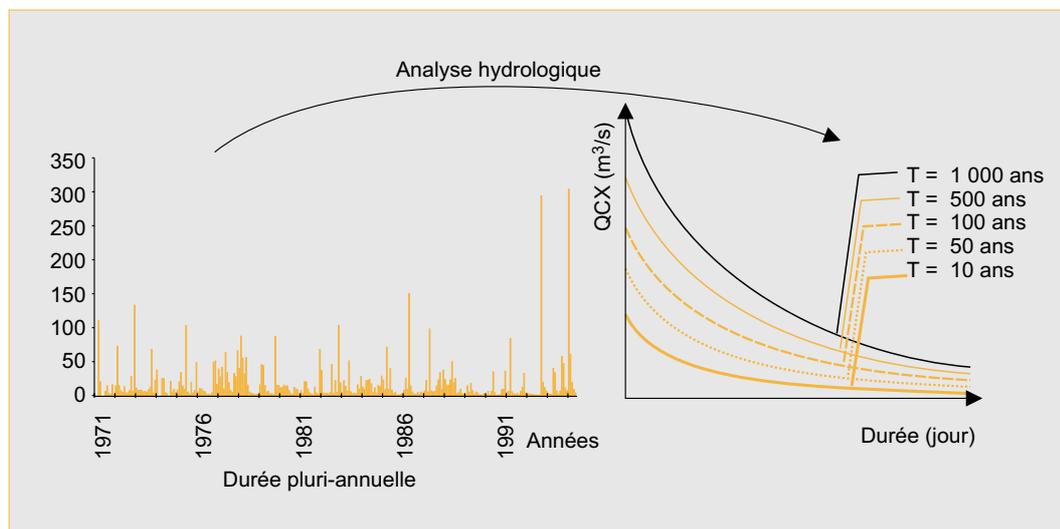
ons élémentaires : débit seuil correspondant à la valeur du débit dépassé pendant une durée d continue ($Q(x>x_s)$ sur d continue), volume moyen sur une durée d ...

Ce n'est enfin qu'à partir de ces grandeurs caractéristiques qu'une analyse hydrologique peut être élaborée, analyse qui devrait permettre de donner les éléments de décision en matière d'aménagement du cours d'eau. La synthèse se réalise à partir de l'analyse statistique qui permet d'obtenir une loi donnant la relation entre la grandeur étudiée et sa probabilité (ou sa période de retour $T = 1/p$). Ces lois sont obtenues à l'aide de modèles basés sur un certain nombre d'hypothèses sur les processus physiques et sur les propriétés statistiques des chroniques.

La robustesse de ces lois tient essentiellement à l'information utilisée. En l'occurrence, pour l'estimation des crues, nous utilisons notamment les chroniques observées en débit et en pluie, les modèles d'estimation des pluies (modèle du GRADEX notamment), l'information historique qui permet de compléter les chroniques.

Ces lois permettent d'obtenir une description fréquentielle des événements et de décrire le fonctionnement global du cours d'eau et de son bassin versant. Cette synthèse en $f(x)$ ou $T(x)$ permettent alors des estimations d'événements rares (f petit ou T grand). Enfin, ces lois sont consolidées par le fait que nous utilisons des grandeurs x qui sont déjà fonction de la durée d (Débit continu dépassé pendant une durée d , volume moyen pendant la durée continue d ...). Les modèles obtenus sont donc des modèles en xdF , modèles à trois variables. Lorsque nous choisissons le débit Q pour x , nous obtenons une description en débit-durée-fréquence qui permet d'avoir une bonne connaissance du régime hydrologique du cours d'eau et de son bassin versant (figure 1).

Mais, malheureusement, cette modélisation n'est pas possible en tout point de l'espace car les données n'existent qu'en quelques points particuliers. Or, en matière d'aménagement, nous avons besoin d'une information partout puisque a priori, la totalité du cours d'eau est concerné. Nous disposons alors de méthodes de régionalisation qui permettent le transfert d'une information en tous points d'un territoire. En effet, la normalisation



◀ Figure 1. – Transformation du signal en t en une représentation en T.

des grandeurs (par exemple en x/S^k) permet leur conservation spatiale et une simple opération de dénormalisation à l'aide de paramètres locaux facilement calculables nous permet d'obtenir l'information souhaitée.

Enfin, un opérateur représentatif de synthèse est construit. Ce dernier permet de résumer toute l'information que nous voulons et sert d'entrée à d'autres modèles. Pour le calcul des zones inondables, la connaissance du régime hydrologique (QdF) est nécessaire mais pas suffisante. En effet, c'est un calcul hydraulique qui va permettre de calculer l'étendue des zones inondables.

■ **L'exploitabilité de ces représentations**

La construction des Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence (HSMF) à l'aide des modèles QdF en débit seuil, va donner une entrée au modèle hydraulique. Cette entrée présente l'intérêt d'être monofréquence, et sous réserve de composition en monofréquence (par différence ou par correction), nous pouvons alors calculer des débits monofréquenciel sur l'ensemble du cours d'eau.

Ceci devient alors très utile pour les représentations cartographiques. La monotonie structurelle et l'univocité forcée des modèles en xdf permettent des « projections », par exemple à $d = 0+$ (pointes de crues...) ou à $z = 0+$ (débit juste inondant d'un lieu...). Nous pouvons alors construire

des variables équivalentes exploitées notamment pour les aléas mais aussi pour les vulnérabilités ce qui permet la cartographie aisée du risque par comparaison. La méthode Inondabilité est une application remarquable de ces concepts.

Mais nous pouvons aussi aller plus loin. À savoir, qu'à partir de ces représentations en xdf, nous avons la possibilité de construire facilement des variables équivalentes qui peuvent :

- être cartographiées ;
- mesurer des différences, notamment des volumes d'eau en excès ou en déficit, ce qui est précieux en matière d'aménagement ;
- de caractériser de façon intelligible les impacts des aménagements et de pouvoir boucler sur T, d, p.

■ **L'exploitabilité pour l'analyse de la vulnérabilité**

Ces représentations en xdf permettent, comme nous l'avons vu, de caractériser de façon pertinente l'aléa, élément constitutif de la définition du risque d'inondation (figure 2). Mais ces modèles permettent aussi d'aller plus loin et de donner des informations intéressantes en matière de vulnérabilité. En effet, si nous posons comme hypothèse que nous pouvons caractériser les objectifs de protection à l'aide de variables hydrologiques telles que la durée, la fréquence..., alors les modèles en xdf nous donnent par un jeu de

projection une variable équivalent qui définit de façon objective cette vulnérabilité. Ainsi, par comparaison entre deux notions mesurées dans la même unité, nous allons pouvoir disposer d'une mesure du risque. Et tous les scénarios de modification de l'aléa et de la vulnérabilité vont trouver leur traduction dans la modification de cette valeur ce qui va fortement aider à la décision publique.

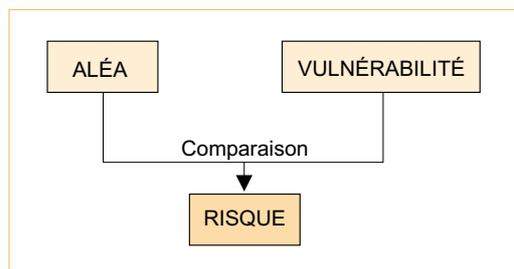


Figure 2. – Définition du risque.

Nous disposons alors maintenant d'un excellent outil de négociation qui va permettre aux différents acteurs concernés par l'aménagement du cours d'eau de prendre la mesure de l'impact des décisions et d'avoir un critère de choix compréhensible par tous.

Les modèles hydrauliques

Les modèles hydrauliques se situent à l'aval de l'analyse hydrologique. Ils permettent de définir les zones inondables pour une fréquence donnée à l'aide des HSME. Mais de même que la construction des entrées hydrologiques nécessite une analyse et une modélisation, la réalisation du

calcul hydraulique dont le résultat final est présenté sous forme cartographique est l'aboutissement de choix de modèles et d'hypothèses sur les processus physiques.

Contrairement à l'hydrologie, les équations régissant les écoulements en cours d'eau sont connues depuis le siècle dernier et ont été établies par Barré de Saint-Venant (voir ci-dessous). Les variables en sont le débit $Q(t)$ et la hauteur d'eau $h(t)$. Néanmoins, ces équations étant différentielles et non linéaires, leur résolution analytique n'existe que dans des cas bien particuliers. D'autre part, malgré les progrès de calcul des ordinateurs, la topographie et la topologie parfois complexes des cours d'eau font que de nombreuses questions quant à la résolution numérique de ces équations sont toujours d'actualité.

La première difficulté consiste en la bonne représentation de ce que nous cherchons à modéliser, à savoir le fonctionnement du cours d'eau et son lit majeur (figure 3).

La topographie du cours d'eau est essentielle. Mais c'est surtout de l'information orientée qui nous intéresse, c'est-à-dire ce qui est important hydrauliquement. Les sections en travers, les valeurs de la pente, les ouvrages en travers tels que les ponts, les seuils... seront donc naturellement pris en compte. Mais la topologie du cours d'eau est aussi fondamentale : quels sont les écoulements préférentiels, quels sont les biefs principaux d'écoulement...

Nous avons aussi besoin de connaissances hydrauliques sur le fonctionnement de notre cours d'eau

Équation de Barré de Saint-Venant. ▼

Conservation de la masse	Conservation de la quantité de mouvement	
$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{S} \right) + g \cdot S \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot S \cdot \left(I - \frac{Q^2}{S^2 \cdot K^2 \cdot R_h^{4/3}} \right) + k \cdot q \cdot V$	
	x : abscisse curviligne S : section mouillée t : temps I : pente longitudinale du fond Q : débit K : coefficient de Strickler q : apports latéraux	b : coefficient de quantité de mouvement h : hauteur d'eau V : vitesse g : accélération de la pesanteur k : coefficient valant 0 ou 1 en général R_h : rayon hydraulique

telles que la condition aval, ou encore les valeurs du coefficient de Strickler qui caractérise la dissipation d'énergie. Outre les valeurs préconisées par la littérature ou les rares cas où nous disposons de mesures, c'est souvent l'expertise de l'hydraulicien qui résout ces problèmes et qui affecte les bonnes valeurs des paramètres.

Enfin, mais c'est probablement le choix le plus fondamental, il existe plusieurs modèles : des modèles en une dimension (1D) et des modèles en deux dimensions (2D), des modèles en régime permanent et des modèles en régime transitoire, des modèles maillés ou des modèles ramifiés... Et c'est en fonction du problème à résoudre et de la nature du cours d'eau que là encore, l'hydraulicien fait son choix.

Une fois le modèle hydraulique établi et les résultats obtenus, ceux-ci sont utilisés pour la représentation cartographique (figure 4). Ce lien entre modèle hydraulique et cartographie fait encore l'objet de recherche car le modèle topographique doit être utilisé comme pré-processeur et post-processeur du modèle hydraulique. Or il n'y a pas forcément compatibilité entre l'information topographique du modèle hydraulique et du fond de carte utilisé pour la représentation.

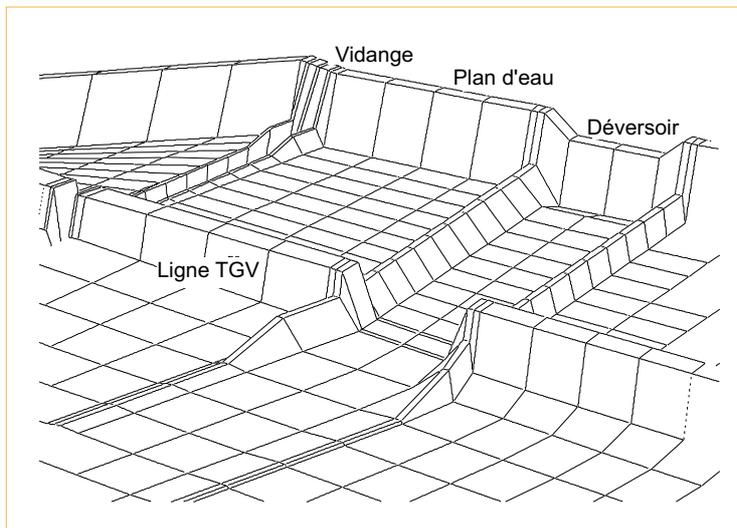
Validité de ces représentations

Pour ce qui est de la modélisation hydraulique et de la représentation cartographique, les résultats ont été largement validés par la simulation d'événements particuliers.

Pour ce qui est des modèles en xDF, des validations ont été faites, et à une échelle internationale pour les xDF (avec notamment $x = Q$ et $x = I$).

Des incertitudes aléatoires demeurent bien évidemment. Certaines d'entre elles peuvent être partiellement quantifiées, d'autres aujourd'hui ne le peuvent malheureusement pas. Néanmoins, certaines incertitudes nécessitent une analyse très complexe alors que d'autres s'avèrent actuellement d'une relative inutilité.

Enfin, de nombreuses applications des concepts décrits précédemment ont été réalisées avec la méthode dite Inondabilité. Les résultats nous montrent le caractère opérationnel, à savoir leur réelle traduction finale en terme de stratégie d'aménagement du bassin versant. Évidemment,



dans leur exploitation, certaines incertitudes sont « forcées », et donc volontairement introduites, pour garder la simplicité et la facilité d'usage. Mais cela nous permet de gagner en négociabilité : sous ces contraintes, nous pouvons donner un réel outil de gestion négociée entre les acteurs. Aujourd'hui, une version avec moins d'incertitude est réalisable, mais nous risquons alors de retomber dans les travers que nous avons jusqu'à maintenant essayer d'éviter. Nous préférons en l'occurrence privilégier une information quantifiée du risque d'inondation pour une gestion intégrée et négociée.

▲ Figure 3. – Représentation topographique.

Conclusion

Tous les ans, les médias nous rappellent que les cours d'eau sont sujets à de fortes variations de débit et que la nature reprend ses droits. Aucun aménagement ne pourra nous mettre complètement à l'abri de toute inondation : le risque zéro, n'existe pas. Aussi, nous sommes condamnés à déterminer des niveaux de débordement acceptables. Et pour cela, une analyse hydrologique et hydraulique complétée par une représentation cartographique est nécessaire. Cette analyse nous permet de caractériser le fonctionnement du cours d'eau en terme fréquentielle, seul critère pertinent de l'aménagement.

Les méthodes d'analyse en xDF (grandeur étudiée



▲ Figure 4. – Carte de l'aléa.

– durée – fréquence) semblent bien adaptées. Elles permettent de passer d'une représentation du fonctionnement du cours d'eau et de son bassin versant en t (temps courant) à une représentation en T (période de retour). De plus, la variable d nous permet de mieux appréhender la complexité des processus et d'obtenir une synthèse pertinente pour l'aménagement.

Les méthodes de résolution des équations de Barré de Saint-Venant nous permettent d'avoir une bonne connaissance des écoulements dans les cours d'eau. De plus, l'utilisation en entrée de ces modèles d'une description hydrologique monofréquence à l'aide d'hydrogrammes synthétiques monofréquences autorise l'élaboration de cartes synthétiques.

Si nous ajoutons à cela le fait que nous pouvons

aussi, de manière duale, caractériser la vulnérabilité, alors nous allons avoir une vraie mesure intéressante du risque d'inondation.

Ces représentations fournissent alors un cadre de négociation à l'ensemble des acteurs concernés par les aménagements des cours d'eau. Leur implication dans les processus de décision et une approche de la complexité des phénomènes permettent une meilleure acceptation des choix. Cet ensemble devrait notamment favoriser une meilleure analyse des événements, éventuellement catastrophique en ce sens qu'ils sont au-delà des seuils de dimensionnement. Nous devrions ainsi concourir à une meilleure gestion des cours d'eau et de leurs bassins versants. □

Résumé

Il s'agit de remodeliser les connaissances hydrologiques et hydrauliques disponibles sur les crues, de manière à ce qu'elles puissent contribuer à mettre entre les mains de tous les acteurs des éléments objectifs et quantifiés de négociations, d'une part directement sur les risques, et d'autre part sur leurs deux composantes de base (aléa et vulnérabilité). Ces éléments doivent être cartographiables, car une bonne partie de la négociation est territoriale et foncière. Ils doivent aussi être continus et inversibles, pour ne pas trop contraindre techniquement des négociations aussi délicates, qui ont besoin d'un maximum de flexibilité, et surtout d'un affichage clair des conséquences des options prises.

Abstract

We need to modelize the available hydrological knowledge on floods, in order to give to all the concerned people objective and quantified elements for the negotiation, concerning flood risk but also hazard and vulnerability. These elements must be mapped, because a large part of the negotiation is territorial and landed. These elements need also to be continuous and reversible, to not constraint too much the negotiation that need flexibility and also a clear display of the consequences of the different choices.

Bibliographie

- DESBOS, E., OBERLIN, G., 1997. De l'analyse à la synthèse en Hydrologie : des niveaux pertinents de modélisation, *FRIEND*, third report : 1994-1997, pp. 410-416.
- GALEA, G., PRUDHOMME, C., 1997. Notions de base et concepts utiles pour la compréhension de la modélisation synthétique des régimes de crue des bassins versants au sens des modèles QdF, *Revue des Sciences de l'Eau* n° 1, pp. 83-101.
- GENDREAU, N., 1998. *La gestion du risque d'inondation et l'aménagement des cours d'eau*, Annales des Ponts, n° 87, pp. 53-59.
- GENDREAU, N., LONGHINI, M., COMBE, P.-M., 1998. Gestion du risque d'inondation et méthode Inondabilité : une perspective socio-économique, *Ingénieries-EAT*, n° 14, juin 1998, pp. 3-15.
- GILARD, O., GENDREAU, N., 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants, *Revue des Sciences de l'Eau*, volume 11, n° 3, pp. 429-444.
- GILARD, O., 1998. *Les bases techniques de la méthode Inondabilité*, Cemagref Éditions, 207 p.
- GIVONE, P., 1995. La négociation du risque, une étape nécessaire, *Ingénieries-EAT*, n° spécial « Risques naturels », pp. 87-95.
- GIVONE, P., GENDREAU, N., 1997. *Le concept du ralentissement dynamique pour une gestion intégrée des eaux*, 4^e rencontre hydrologique franco-roumaine, Suceava, Roumanie, 2-4 septembre 1997.
- Guide pratique de la méthode Inondabilité*, coll. Des cahiers techniques Inter-Agence, Étude Inter-agences n° 60, 1998.
- OBERLIN, G., 1995. Les outils disponibles de la prévention des inondations dommageables, *Ingénieries-EAT*, n° spécial « Risques naturels », pp. 35-50.