

Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants

Inondability: a method for prevention of flood risk for a better integrated management of river catchments

O. Gilard et N. Gendreau

Volume 11, numéro 3, 1998

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705315ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705315ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

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 / Journal of Water Science*, 11(3), 429–444. <https://doi.org/10.7202/705315ar>

Résumé de l'article

Une partie de la réponse aux impacts économiques, sociaux et humains des inondations réside en une meilleure gestion de l'occupation des sols. La méthode Inondabilité permet d'apporter une réponse opérationnelle aux acteurs en charge de la gestion et l'aménagement des cours d'eau. Elle permet de mesurer dans la même unité et de comparer les deux facteurs indépendants que sont l'aléa et la vulnérabilité, pour aboutir à une quantification objective du risque. Sa mise en oeuvre sur un bassin versant consiste en une modélisation de l'hydrologie grâce aux modèles Débit-durée-Fréquence, de l'hydraulique ainsi que de l'occupation du sol pour aboutir à une représentation cartographique du risque.

L'originalité de la méthode Inondabilité tient à la quantification de l'aléa et de la vulnérabilité en une même unité, une période de retour qui permet une comparaison objective de deux grandeurs très différentes. De plus, la quantification du risque est estimée à l'aide d'une différence ($Risque = \Delta$ (aléa, vulnérabilité)) contrairement aux approches traditionnelles qui privilégient souvent un produit ($Risque = Coût \times probabilité$), permettant ainsi la définition d'un risque acceptable (Δ négatif).

Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants

Inondabilité :
a method for prevention of flood risk for a better integrated
management of the river catchments

O. GILARD, N. GENDREAU*

Reçu le 30 août 1996, accepté le 16 février 1998**.

SUMMARY

In recent years, the incidence of flood damage in France and Europe has demonstrated that we still have some progress to achieve if we are to cope with inundations. To do so, prevention, forecasting and promotion of risk culture or awareness are possible tools. They should be used together because of their complementary nature and their common field of application. In risk prevention, it seems that conceptualizing risk by dividing it between a socio-economic dimension (vulnerability) and a hydrological dimension (hazard) is a productive approach.

The first factor, "vulnerability", takes into account how a certain land use can deal with the phenomena, regardless of its occurrence. It is mostly relevant to the fields of sociology and economics. The second factor, "hazard", summarizes the natural phenomena, the occurrence of which could create human or economic damage. Both of these factors are relevant to hydrology and hydraulic sciences and have been studied for years. A given land area could be considered as "risky" when the probability of occurrence of the hazard is higher than what can be tolerated. Both hazard and vulnerability should be estimated as objectively as possible. The main difficulty in comparing these two factors is to define a similar measure for the two concepts, with a single unit. This is the purpose of the Inondabilité method: to produce a similar reference allowing an objective comparison.

The aim of Inondabilité is to define a method to quantify both hazard and vulnerability in a compatible manner and then to build easy-to-understand, synthetic maps of risks as the basis for a real negotiation in the land-use planning process. Such maps allow the comparison of different evolution scenarios, taking into account the two components of risk, and their possible changes.

Division Hydrologie-Hydraulique, 3 bis, Quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon cedex 09, France. e-mail : nicolas.gendreau@cemagref.fr.

* Correspondance.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 1999.

Hydrology should give a synthetic description of the flow regime of the studied river. This can be based on flow-duration-frequency (QdF) models which describe the statistical functioning of the catchment and facilitate the calculation of the probability of events. Such synthetic models also yield synthetic hydrographs that are useful for hydraulic modelling and allow the quantification of vulnerability. Hydraulics is specially used to calculate hazard. Using hydrological results, a hydraulic model calculates flooded areas for flows of various return periods, from frequent to extreme. Each land parcel could be affected by the return period of the first flooding discharge corresponding to its hazard level. The same model will then be used to estimate the consequences of hydraulic works.

Describing land use allows us to attribute a reasonable protection target to each land type. Varied areas such as natural (forests, grass lands,...), rural (crops fields, orchards,...) and urban (camping areas, leisure areas, cities...) should be treated differently. Each land-use type is characterized by a target expressed in terms of frequency, duration and depth of an acceptable flood, resulting from local reviews and consultations. Then, an equivalent measure could be calculated, according to flow-duration-frequency models. Its unit is a return period expressed in years.

After these two steps, that is to say hazard and vulnerability analysis, it is possible to build different maps. Hazard maps show the flooded areas for different return period flows. Vulnerability maps show the spatial distribution of this measure, equivalent to the need for protection allocated to each parcel according to its land use. The two variables being expressed in the same units, a return period in units of years, it is easy to compare them for each parcel and to convert this comparison into an easy-to-understand colour code:

- either hazard is higher than vulnerability (the hazard's return period is lower than that of vulnerability): this shows an incompatibility between the desired protection target and the actual hydraulic constraint, and the parcel is colored in red;
- or hazard is lower than vulnerability (the hazard's return period is higher...), which shows a reasonable safety of the parcel according to its land use, and the parcel is colored in green;
- or the parcel is away from the maximum flooded area: there is no risk at all, and the parcel is colored in yellow.

The same formalism allows the representation of the results for any kind of solution, structural options such as hydraulic works, or non-structural options such as changes in land-use planning, and their comparison. Synthetic maps are a more efficient way to compare management scenarios and their effect on the distribution of risk all along the river than are classical design flow studies. They should facilitate real negotiation and lead to a more sustainable river management.

The Inondabilité method offers advantages from other commonly used methods. First, it doesn't deal with only one referenced flood but with floods of various frequencies. It provides a good description of the overall regime of the catchment. Second, the definition of the risk as a difference ($Risk = \Delta(hazard, vulnerability)$) implies a search of an acceptable solution instead of an optimized solution, usually impossible to reach. Third, the projection of vulnerability and hazard in a 1D space makes it very easy to draw a risk map, and this map is easy to understand for anybody, even non technical personnel.

The originality of Inondabilité method lies in the quantification of vulnerability and hazard in the same unit, a flood return period. However, in the future more economic and social concepts have to be introduced to better fit the complex reality.

Key-words: flood, risk management, prevention, river management, hazard, vulnerability.

RÉSUMÉ

Une partie de la réponse aux impacts économiques, sociaux et humains des inondations réside en une meilleure gestion de l'occupation des sols. La méthode Inondabilité permet d'apporter une réponse opérationnelle aux acteurs en charge de la gestion et l'aménagement des cours d'eau. Elle permet de mesurer dans la même unité et de comparer les deux facteurs indépendants que sont l'aléa et la vulnérabilité, pour aboutir à une quantification objective du risque. Sa mise en œuvre sur un bassin versant consiste en une modélisation de l'hydrologie grâce aux modèles Débit-durée-Fréquence, de l'hydraulique ainsi que de l'occupation du sol pour aboutir à une représentation cartographique du risque.

L'originalité de la méthode Inondabilité tient à la quantification de l'aléa et de la vulnérabilité en une même unité, une période de retour qui permet une comparaison objective de deux grandeurs très différentes. De plus, la quantification du risque est estimée à l'aide d'une différence ($Risque = \Delta(\text{aléa, vulnérabilité})$) contrairement aux approches traditionnelles qui privilégient souvent un produit ($Risque = Coût \times probabilité$), permettant ainsi la définition d'un risque acceptable (Δ négatif).

Mots clés : inondation, gestion des risques, prévention, aménagement, aléa, vulnérabilité.

INTRODUCTION

Le problème des inondations n'est pas une nouveauté. De tout temps l'homme a eu de bonnes raisons de s'installer dans des zones occasionnellement inondables où il avait un meilleur accès à la ressource en eau, son potentiel énergétique, la richesse agricole des sols concernés, etc. Depuis longtemps aussi, l'homme a tenté de domestiquer ce « capital eau » au travers d'aménagements hydrauliques afin de mieux maîtriser les risques associés dont le risque d'inondation. Or les catastrophes récentes et leur retentissement médiatique laissent supposer que les réponses apportées jusqu'à aujourd'hui ne sont pas encore suffisantes, ou, tout au moins, que les méthodes d'analyse utilisées ne permettent pas à la société de prendre en compte correctement ce problème.

En matière de prévention des risques on peut dissocier trois types de mesures complémentaires (GENDREAU et GILARD, 1996). L'un d'entre eux concerne tout ce qui a trait à une meilleure efficacité dans la « **gestion des crises** », ce qui va de l'identification des zones potentiellement exposées aux mesures de suivi post catastrophes, en passant par les dispositifs d'annonce de crue et les plans d'alerte et d'évacuation. On constate que ces mesures perdent en efficacité quand les habitants concernés interprètent mal les messages qui leur sont transmis. Il s'ensuit un second type de mesures regroupées sous le terme générique de « **culture du risque** » qui consiste à éduquer les individus pour les rendre plus réceptifs aux messages de prévention ou d'alerte. Mais on se rend bien compte que l'approche « gestion de crise » est plus curative que préventive. Il faut donc développer simultanément une politique de prévention qui consiste à définir l'aménagement du territoire le plus pertinent pour ne pas s'exposer inconsidérément au risque tout en continuant à profiter des nombreux avantages que présentent ces zones occasionnellement inondables (DE LANEY, 1995). C'est

essentiellement ce troisième point de vue, celui de la « **prévention - aménagement du territoire** » auquel participe la méthode Inondabilité dont nous parlerons par la suite.

Avant d'exposer la méthode elle-même et ses fondements, il nous paraît également important de rappeler que les cours d'eau représentent d'abord une ressource collective rare, indissociable d'un milieu aquatique spécifique, et que le développement durable et équilibré d'une société doit passer par une gestion intégrée des milieux où il s'effectue. Cela nous incite, pour ce qui concerne l'aménagement des rivières, à ne pas privilégier une approche « risque » au détriment d'une approche « ressource », mais à tenter de tenir compte des deux aspects simultanément. Ce qui n'est bien entendu pas sans conséquence sur la manière d'aborder le problème du risque d'inondation (OBERLIN *et al.*, 1996).

ANALYSE CRITIQUE DES PRATIQUES TECHNIQUES ACTUELLES

La crue de projet

Une rapide analyse des pratiques traditionnelles met en évidence que l'on a toujours essayé de mieux déterminer (ou délimiter) la zone inondable, donc exposée au problème... ce qui laisse supposer que hors de cette zone, il ne se pose plus. Cette approche est de fait en contradiction avec les résultats hydrologiques qui mettent en évidence une forte variabilité inter-annuelle du fonctionnement des bassins versants, que l'on peut approcher par le biais des méthodes statistiques. Celles-ci permettent de définir des crues d'intensités variables, correspondant à différentes périodes de retour, mettant en évidence une certaine continuité du phénomène (et donc de l'extension de la zone concernée) entre les événements les plus courants et les événements les plus rares.

Cette approche classique est renforcée par la définition d'une « *crue de référence* » ou « *crue de projet* » unique, permettant de dimensionner les ouvrages de protection et de délimiter « la » zone inondable. L'illusion de sécurité apportée par un ouvrage qui permet de se protéger contre la crue de projet est trompeuse, en cela que, s'il se produit un événement d'intensité supérieure, le risque encouru n'est pas explicitement identifié ; il peut même être occulté dans certains cas. Cette illusion est d'autant plus grande que l'on a atteint un niveau de protection relativement important, c'est-à-dire que l'on a épuisé les gisements de solutions techniques facilement accessibles : recalibrages légers, endiguements localisés... La généralisation de tels travaux le long d'un cours d'eau porte en germe l'échec de telles solutions, puisque, en même temps que l'on cherche à se protéger plus, on augmente l'intensité des événements hydrométriques en supprimant l'efficacité des régulations naturelles liées au phénomène bien connu du laminage.

La spirale de l'aménagement

Enfin cette approche dichotomique entre zone inondée et zone non inondée, et son corollaire en terme de crue de projet, mène à la spirale bien connue : toujours plus d'aménagement pour protéger des usages toujours plus vulnérables.

L'analyse de l'évolution passée de la prévention du risque d'inondation nous laisse penser que c'est bien l'absence d'une prise en compte explicite de tout le régime hydrologique en crue, ainsi que l'absence d'une définition objective de la vulnérabilité (concept socio-économique sur lequel nous reviendrons) qui explique pour partie les difficultés rencontrées actuellement. La focalisation de l'attention sur le terme d'aléa était pertinente tant qu'il existait encore de nombreuses potentialités structurelles pour améliorer la situation. Plus ces solutions sont exploitées, c'est-à-dire plus des travaux hydrauliques ont été réalisés, et moins efficaces sont les nouvelles interventions programmées. Il est donc urgent de définir de nouvelles méthodes d'aménagement permettant d'englober toute la complexité du problème posé à une échelle adaptée à sa gestion, à savoir celle du bassin versant.

C'est l'ambition de la méthode Inondabilité que d'apporter des éléments de réponse à cette question, et de mettre à disposition du plus grand nombre les résultats issus de champs techniques spécialisés. Il convient que les gestionnaires des bassins versants puissent interpréter convenablement des résultats techniques et la manière de les mettre à disposition n'est pas neutre quant à leur utilisation ultérieure.

DÉFINITION DU CONCEPT DE RISQUE

Le concept de risque est en soi assez complexe puisque l'on sent bien qu'il ne peut se définir qu'en considérant simultanément, et sur une même parcelle d'espace, un phénomène physique (en l'occurrence, la présence d'eau) et une utilisation sociale de ce même espace qui souffre (ou tire profit) de cette présence d'eau. Cela a amené les théoriciens de la cyndinique à définir le **risque** comme résultant de deux facteurs réputés indépendants que sont l'**aléa** et la **vulnérabilité**, approche à peu près admise par tous aujourd'hui (GENDREAU et GILARD, 1997 ; MOLIN-VALDES, 1994]. Il doit être bien entendu que cette décomposition du risque est une première modélisation conceptuelle de l'objet étudié, qui comporte donc sa part de simplification (GILARD *et al.*, 1996).

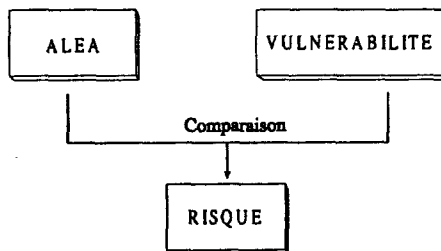


Figure 1 Définition du risque.
Definition of risk.

L'aléa

L'aléa est défini comme lié uniquement au phénomène physique considéré, la crue, et fait l'objet de l'essentiel des travaux en hydrologie et hydraulique appliqués à la gestion des risques d'inondation. Il dépend du comportement hydrologique du bassin versant et du fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique. Il peut être quantifié sur une parcelle (avec une précision plus ou moins bonne) grâce aux variables hydrologiques classiquement utilisées que sont la profondeur d'eau et la durée d'inondation associées à une période de retour. Insistons sur cette dimension probabiliste de l'aléa que traduit la notion de fréquence ou de période de retour.

On utilise parfois la vitesse du courant comme paramètre complémentaire de caractérisation de l'aléa mais elle est encore assez mal connue, sa mesure ou sa modélisation posant des problèmes théoriques et pratiques mal résolus puisque actuellement, seule la vitesse moyenne par section en travers, peu pertinente en terme d'aléa, est accessible.

La vulnérabilité

La vulnérabilité de l'occupation des sols aux inondations traduit le fait que des dommages économiques directs et indirects, et plus ou moins sévères, apparaissent lorsque l'eau inonde une parcelle. De façon classique, on peut théoriquement construire des courbes de dommages qui relient entre eux les paramètres de profondeur d'eau et le coût des dommages correspondants.

Dans le cadre de la méthode Inondabilité, il est nécessaire de rajouter à la définition de la vulnérabilité un terme de probabilité (ou fréquence, ou période de retour) qui caractérise l'acceptabilité des différents seuils de dégâts mis en évidence par la courbe des dommages. Cette recherche d'un terme supplémentaire se justifie par le constat, admis par tous, que « *le risque zéro n'existe pas* » (ou plus précisément, « risque zéro à coût infini »), lui-même résultant du caractère non borné des événements hydrologiques (la méthode du Gradex l'illustre bien (CFGB, 1994)) et de considérations économiques évidentes. Le corollaire de cette affirmation est qu'il est nécessaire de définir un risque acceptable, socio-économiquement parlant, indépendamment de la contrainte hydraulique subie, et traduisant la reconnaissance sociale de l'impossibilité de maîtriser tous les risques.

Dans ce cadre, la vulnérabilité se définit dans le même espace que l'aléa précédent, à savoir en terme de profondeur, durée, période de retour (p , d , T).

C'est sans doute là l'une des originalités de la méthode proposée qui consiste à traduire en termes hydrologiques une information d'ordre socio-économique à l'inverse des démarches classiques qui traduisent en termes économiques (francs) des informations d'ordre hydrologiques (hauteur d'eau en crue...).

La définition du risque comme résultant des deux composantes précédentes

La définition du risque résulte de la combinaison des deux concepts précédents. La méthode classique consiste à assortir la courbe des dommages du paramètre probabiliste traduisant la réalité de la contrainte hydraulique (ou aléa) (PENNING-ROUSELL *et al.*, 1995 ; TORTEROTOT, 1993). Le risque se quantifie alors

par le coût annuel moyen des dégâts, espérance mathématique du produit scalaire du coût des dommages par leur probabilité.

$$\text{Risque} \approx \int_0^1 \text{coût}(p) \times p \times dp \quad (1)$$

L'inconvénient majeur (à notre point de vue) de cette définition est de n'aboutir qu'à une définition positive du risque qui se traduit inévitablement par une recherche en terme de « minimisation » et qui conduit à s'approcher autant que possible du risque zéro, même si on le sait inaccessible. Ceci se traduit dans les faits par deux éléments :

- des ouvrages de protection de plus en plus importants pour se protéger contre des crues de plus en plus rares,
- une urbanisation ou l'installation d'activités sensibles dans les plaines inondables, en principe protégées.

À cette définition, nous opposons une autre définition en terme de comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité, qui consiste à faire la différence entre les deux.

$$\text{Risque} = \Delta (\text{aléa, vulnérabilité}) \quad (2)$$

Dans ce cas on définit un risque positif quand l'aléa est supérieur à la vulnérabilité et négatif quand il lui est inférieur. La recherche d'une solution passe non plus par une minimisation du risque mais par une recherche de risque « négatif », c'est-à-dire « acceptable », c'est-à-dire « accepté ». L'explicitation sociale et économique du risque acceptable devrait permettre une recherche de protection plus raisonnable dont les effets bénéfiques sont nombreux. Des travaux importants de recherche sont encore nécessaires pour atteindre une forme aboutie de l'expression du risque acceptable.

Définir une mesure commune des deux variables pour pouvoir les comparer

Il reste cependant une difficulté dans cette définition puisque nous avons vu que l'aléa comme la vulnérabilité se définissent dans un espace à trois dimensions : profondeur, durée, période de retour, dans lequel l'établissement d'une relation d'ordre n'est pas évident a priori. Il importe donc d'en définir une ou, ce qui revient au même, de définir une unité de mesure commune sur une base aussi objective que possible.

Nous verrons ci-après comment les modèles synthétiques dits QdF (Débit-durée-Fréquence) associés à des modèles hydrauliques classiques (modèles de Saint-Venant en monodimensionnel) permettent de le faire. Ils servent à déterminer parcelle par parcelle les deux variables que sont l'aléa et la vulnérabilité avec une unité de mesure équivalente à une période de retour (l'année) qui facilite ensuite leur cartographie sur la zone étudiée et permet leur comparaison (GILARD, 1995).

Quel niveau d'intervention ?

La définition d'un niveau de risque acceptable a pour conséquence opérationnelle des aménagements raisonnés et dimensionnés à la hauteur des vulnérabilités identifiées, elles-mêmes fonctions de l'occupation des sols (OBERLIN, 1995).

Le risque ainsi accepté (correspondant aux occurrences de l'aléa dépassant le niveau des protections structurelles réalisées) doit être géré par des mesures complémentaires que sont les processus d'assurance, de prévision et de gestion de crise, et ne sera toléré par les individus que si la culture du risque est assurée à leur propre niveau.

On comprend que ces différents seuils entre prévention par l'aménagement (structurel ou non) et mesures d'assurance – prévision – gestion de crise dépendent de la réalité des vulnérabilités en place et qu'il faut les diversifier autant que possible tout le long du cours d'eau (GILARD et GIVONE, 1996).

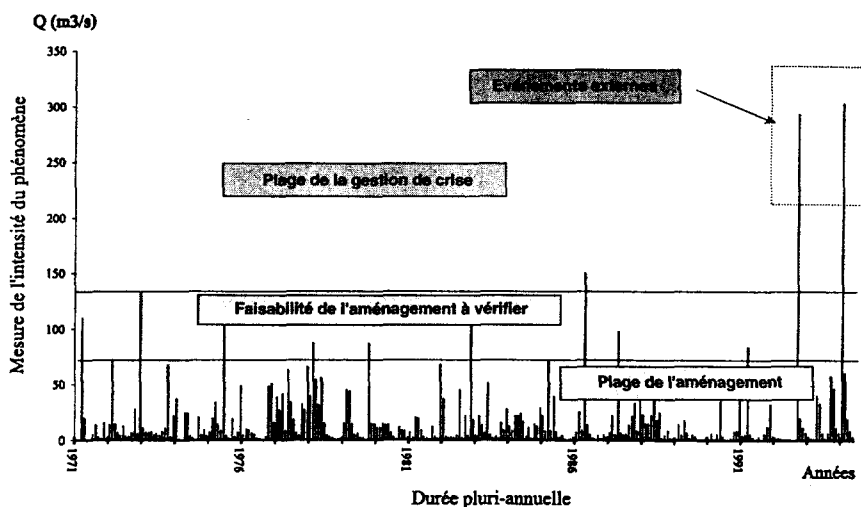


Figure 2 Les niveaux d'intervention.
Levels of intervention.

LA QUANTIFICATION ET LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Un modèle hydrologique

L'analyse hydrologique statistique montre qu'il est possible, à partir d'un échantillonnage multi-durées de chroniques hydrométriques supposées stationnaires, de décrire les caractéristiques de crue du bassin versant étudié en Débit-durée-Fréquence, de façon analogue à ce qui est réalisé pour les pluies (courbes intensité-durée-fréquence). On constate que, à durée donnée, les débits suivent une fonction croissante de la période de retour, et que, à période de retour donnée, les débits suivent une fonction décroissante de la durée. Les intervalles de confiance sont bien sûr fonction de la durée des observations, qui est donc un paramètre important de l'analyse.

Les travaux menés sur la base des concepts du GRADEX (CFGB, 1994) et des méthodes dérivées (la méthode AGREGEE notamment (MARGOUM *et al.*, 1994 ;

LANG, 1997)) montrent que cette description en Débit-durée-Fréquence peut être étendue en extrapolation aux périodes de retour rares et extrêmes, en conservant la régularité des dépendances (GALÉA *et al.*, 1997).

Enfin, les travaux de synthèse réalisés sur ces descriptions en Débit-durée-Fréquence mettent en évidence la possibilité de modéliser les courbes Débit-durée-Fréquence d'une station hydrométrique quelconque (sous réserve de certaines contraintes de régularité locale) à partir de deux paramètres locaux que sont le débit instantané maximum annuel décennal (noté QIXA₁₀) et la durée caractéristique de crue du bassin versant (notée D) et d'un modèle adimensionnel rendant compte de la typologie des écoulements, de la forme donnée par les équations suivantes (GALÉA et PRUDHOMME, 1993 ; GALÉA et PRUDHOMME, 1997).

Pour 0,5 ≤ T(an) ≤ 10

$$\frac{Q(T, d)}{QIXA_{10}} = \frac{A_q\left(\frac{d}{D}\right) \cdot \ln(T) + B\left(\frac{d}{D}\right)}{QIXA_{10}} \tag{3}$$

Pour 10 < T(an) ≤ 1 000

$$\frac{Q(T, d)}{QIXA_{10}} = \frac{Q(10, d)}{QIXA_{10}} + \frac{A_p\left(\frac{d}{D}\right)}{QIXA_{10}} \cdot \ln \left[1 + \frac{A_q\left(\frac{d}{D}\right)}{A_p\left(\frac{d}{D}\right)} \cdot \left(\frac{T-10}{10}\right) \right] \tag{4}$$

où :

$$\frac{A_q\left(\frac{d}{D}\right)}{QIXA_{10}} = \left(\frac{1}{x_1 \cdot \frac{d}{D} + x_2} \right) + x_3$$

$$\frac{B\left(\frac{d}{D}\right)}{QIXA_{10}} = \left(\frac{1}{x_4 \cdot \frac{d}{D} + x_5} \right) + x_6$$

$$\frac{A_p\left(\frac{d}{D}\right)}{QIXA_{10}} = \left(\frac{1}{x_7 \cdot \frac{d}{D} + x_8} \right) + x_9$$

avec A_q : Pente de la distribution des débits A_q = $\frac{dQ(T)}{d\text{Log}T}$.

A_p : Pente de la distribution des pluies A_p = $\frac{dP(T)}{d\text{Log}T}$.

d : Durée.

QIXA₁₀ : Débit instantané maximum annuel décennal.

T : Période de retour.

Q(d, T) : Quantile de crue relatif au débit moyen (VCXd).
ou au débit seuil (QCXd).

Q(10,d) : Quantile de crue décennal.

VCXd : Débit moyen caractéristique maximal sur une durée continue d.

QCXd : Débit seuil caractéristique maximal continûment atteint ou dépassé sur une durée d.

Le modèle adimensionnel (Vandenesse, Florac ou Soyans), caractérisé par un jeu de neuf paramètres x_i donnés dans les tableaux 1 et 2, est choisi en fonction de critères utilisant des informations pluviométriques (Gradex) et des informations locales, en l'occurrence QIXA₁₀ et D (GALÉA et PRUDHOMME, 1993).

Tableau 1 Paramètres pour les modèles en débit moyen (VCXd).

Table 1 Parameters for the models under conditions of average discharge (VCXd).

Modèles en VCX	Paramètres X_i								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Vandenesse	2,635	6,19	0,016	1,045	2,385	0,172	1,083	1,75	0,00
Florac	1,12	3,56	0,00	0,95	3,18	0,039	1,56	1,91	0,085
Soyans	0,87	4,60	0,00	1,07	2,50	0,099	0,569	0,69	0,046

Tableau 2 Paramètres pour les modèles en débit seuil (QCXd).

Table 2 Parameters for the models under conditions of threshold discharge (QCXd).

Modèles en QCX	Paramètres X_i								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Vandenesse	3,97	6,48	0,01	1,91	1,91	0,097	3,674	1,774	0,013
Florac	3,05	3,53	0,00	2,13	2,96	0,010	2,78	1,77	0,04
Soyans	2,57	4,86	0,00	2,10	2,10	0,05	1,49	0,66	0,017

Le modèle de Vandenesse caractérise un régime hydrologique en crue soutenu sur les fréquences observables. Les événements exceptionnels sont peu différents des événements rares, et les crues sont plus volumineuses que pointues. Le modèle de Florac définit un régime d'écoulement rapide, avec un certain stockage des pluies. Cela conduit à des événements très courants différents des événements moyens, eux même très différents des événements rares. Les crues sont pointues, peu volumineuses, mais s'inscrivent dans la durée (restitution du stockage pendant les crues). Le modèle de Soyans définit un régime d'écoulement rapide, mais avec un très faible stockage sur le bassin versant. Les événements exceptionnels sont très différents des événements moyens, les crues étant très pointues et peu volumineuses ; en général, la durée caractéristique de crue est relativement faible.

À l'aide des équations et des deux paramètres locaux QIXA₁₀ et D caractéristiques du bassin versant étudié il est possible de reconstituer des abaques QdF locaux décrivant de manière continue le régime hydrologique de la rivière pour toute durée comprise entre 0 et 30 jours et pour toute période de retour comprise entre 1 et 1 000 ans. On conçoit que, si l'on peut décrire ces paramètres QIXA₁₀ et D de manière continue tout le long de la rivière, il est possible, sans difficulté autre que pratique, de reconstituer l'abaque QdF local au droit de chaque section en travers.

Ces abaques vont être utilisés pour quantifier l'aléa et la vulnérabilité comme nous allons le montrer maintenant.

Un modèle hydraulique classique de type « Saint-Venant »

L'utilisation désormais classique des modèles numériques en mécanique des fluides appliquée aux écoulements à surface libre dans les cours d'eau permet de résoudre les équations dites de Saint-Venant, valables pour décrire la plupart des écoulements observés dans les cours d'eau (à quelques exceptions près).

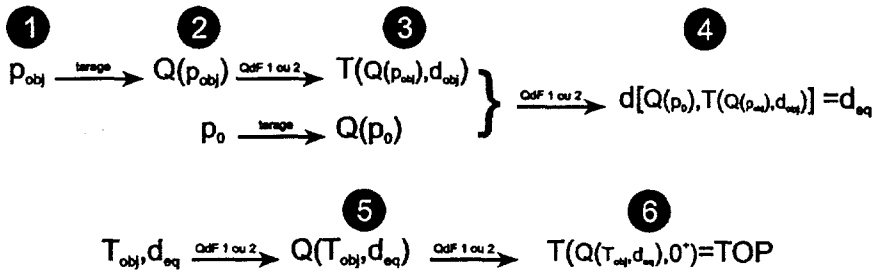
Ces modèles permettent notamment, sur la base d'une modélisation de la topographie de la vallée et de ses paramètres hydrauliques (rugosité, conditions aux limites amont et aval), de calculer en tout point la cote z atteinte par la ligne d'eau. En faisant varier les conditions aux limites, et spécifiquement les débits entrant à l'amont du système, il est donc possible de reconstituer en toute section en travers une courbe de tarage $Q(z)$.

La mesure de l'aléa et de la vulnérabilité

L'aléa et la vulnérabilité étant définis par des triplets (profondeur p , durée d , fréquence F ou période de retour T), les résultats du modèle hydrologique et du modèle hydraulique permettent de définir une mesure équivalente de ces deux variables, et ce pour toute parcelle du territoire étudié. La procédure est la suivante pour une parcelle à la cote z_0 et avec un objectif de protection (p_{obj} , d_{obj} , T_{obj}) traduisant sa vulnérabilité :

1. la profondeur objectif p permet de déterminer une cote équivalente à cet objectif $z_{obj} = z_0 + p_{obj}$;
2. la courbe de tarage $Q(z)$ permet de déterminer un débit d'objectif équivalent, $Q_{obj} = Q(z_{obj})$; cette même courbe de tarage permet aussi de déterminer le débit équivalent à une profondeur nulle sur la parcelle considérée : $Q(z_0)$;
3. le couple (Q_{obj} , d_{obj}) permet grâce au modèle QdF de déterminer une période de retour correspondante, $T(Q_{obj}, d_{obj})$; cf. équations (QdF1) et (QdF2) ;
4. pour qu'une inondation maintienne une profondeur p_{obj} pendant une durée d_{obj} , il faut qu'elle maintienne une profondeur nulle pendant une durée que l'on peut déterminer grâce aux modèles QdF : en se déplaçant à période de retour T constante sur la courbe de l'abaque QdF correspondant à $T(Q_{obj}, d_{obj})$, on calcule la durée équivalente correspondant à une profondeur nulle ; on a donc maintenant une durée équivalente $d(p = 0)$ au couple (p_{obj} , d_{obj}) ;
5. on peut donc reprendre la démarche énoncée dans le cas précédent, à savoir, trouver le débit équivalent à ce couple (T_{obj} , $d(p = 0)$), $QIEO = Q(T_{obj}, d(p = 0))$;
6. et enfin, déterminer la période de retour de ce débit instantané équivalent, $T(QIEO, 0)$, qui quantifie l'objectif : $TOP = T(QIEO, 0)$.

Cette démarche, illustrée par la figure précédente (*figure 3*), est rappelée sur la figure suivante (*figure 4*). Elle est applicable aussi bien au triplet définissant l'aléa, et permet de calculer sur une parcelle une variable baptisée TAL (pour période de retour équivalent à l'aléa), qu'au triplet définissant la vulnérabilité, et permet de calculer une autre variable baptisée TOP (pour période de retour équivalente à l'objectif de protection).



Tarage = équation de la loi de tarage et QdF 1 ou 2 correspond aux équations du modèle QdF branche observée ou extrapolée.

Figure 3 Équation à utiliser pour déterminer la période de retour équivalente à un triplet (p, d, t) objectif.
 Equations to be used for the calculation of the equivalent return period of a target triplet (p, d, t).

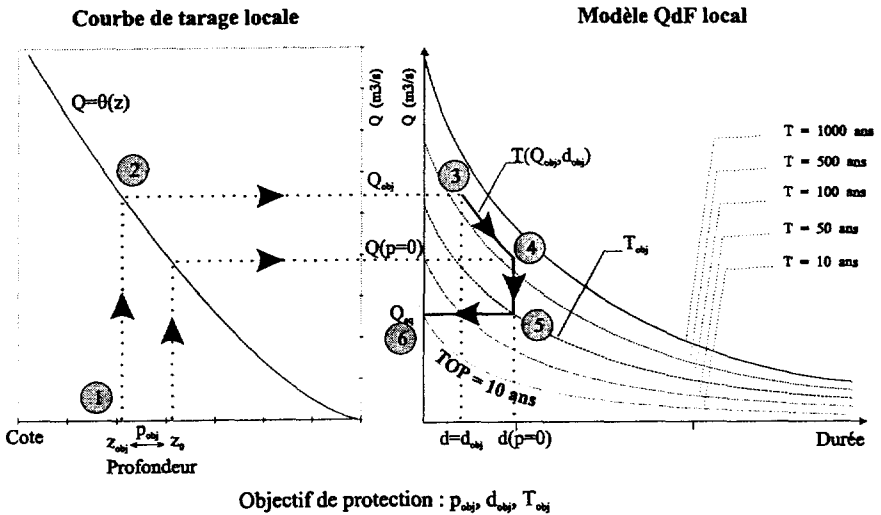


Figure 4 Détermination du t équivalent.
 Determination of the equivalent t.

La cartographie

Le travail précédent, permettant de calculer les deux variables TAL et TOP, peut être réalisé pour chacune des parcelles du territoire considéré. On peut donc de manière assez simple cartographier indépendamment l'aléa (cartographie du TAL), et la vulnérabilité (cartographie du TOP).

La première carte est classique, et l'on peut montrer qu'elle s'apparente à une carte des profondeurs d'eau (pour le débit maximal simulé, à savoir le débit de période de retour 1 000 ans), ou encore à une carte des durées d'inondation

(pour la même référence hydrologique). La seconde carte est beaucoup plus originale puisque qu'elle retrace spatialement les objectifs de protection que l'on peut déterminer par des approches de type socio-économique.

Les deux variables étant mesurées dans la même unité, la comparaison parcelle par parcelle est rendue très facile. Un code de couleur permet de cartographier et de visualiser très rapidement les résultats :

- soit l'objectif de protection est inférieur à l'aléa (sa période de retour TOP est donc inférieure à celle de l'aléa TAL), cela dénote que la parcelle est certes inondée mais de manière compatible avec les objectifs affichés ; on la colore d'une pastille verte ;
- soit l'objectif de protection est supérieur à l'aléa (sa période de retour TOP est donc supérieure à celle de l'aléa TAL), cela dénote que la parcelle est inondée de manière incompatible avec les objectifs affichés ; on la colore d'une pastille rouge ;
- soit la parcelle est hors de la zone maximale inondée ($TAL > 1\ 000$) et on colore la pastille en jaune.

Les aménagements recherchés doivent viser à faire passer toutes les parcelles au vert ou au jaune. Ils peuvent consister soit à modifier l'hydrologie et l'hydraulique (mesures structurelles classiques) ce qui a pour conséquence de modifier l'aléa, donc la répartition de la variable TAL, soit à modifier l'occupation des sols ou les demandes de protection qui y sont associées (mesures non structurelles) ce qui a pour conséquence de modifier la vulnérabilité, donc la répartition de la variable TOP (CHASTAN *et al.*, 1995).

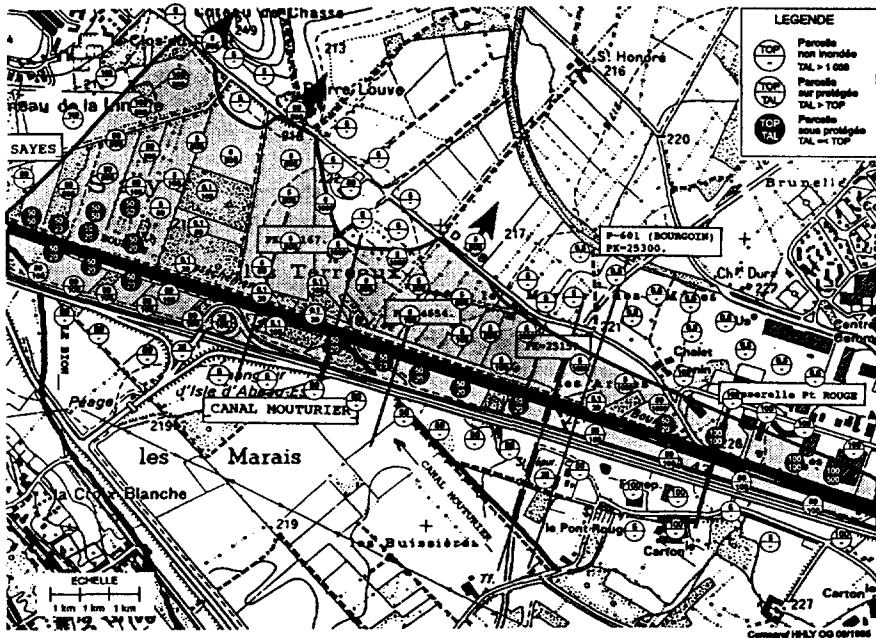


Figure 5 Carte de risque.
Flood risk map.

DISCUSSION

L'indépendance entre l'aléa et la vulnérabilité

La démarche ainsi proposée permet réellement une définition indépendante de l'aléa et de la vulnérabilité et donc une comparaison objective de ces deux variables. La vulnérabilité n'est plus considérée comme le résultat d'un aléa subi mais bien comme une caractéristique intrinsèque à chaque occupation des sols. Toute modification de celle-ci doit passer au préalable par une vérification de l'adéquation entre la contrainte subie (l'aléa) et l'usage de la parcelle. On peut supposer que cette réflexion débouchera sur des comportements plus constructifs en matière d'aménagement du territoire, la question étant clairement explicitée (RASMUNSEN, 1994). L'indépendance de la variable de vulnérabilité permet de définir un seuil d'acceptabilité du risque, reposant sur un raisonnement purement économique et social ; on peut penser qu'il correspond à un optimum plus pertinent que celui résultant d'une comparaison entre coût des dommages et coût des travaux de protection et intégrant une dimension macro-économique globale. Mais cela reste encore à démontrer et fait l'objet de travaux de recherche en collaboration avec des économistes et des sociologues. Enfin, cette définition du risque permet d'introduire le concept de risque négatif ce qui doit permettre de concilier les approches dédiées de la gestion de la ressource en eau et celles de la gestion des risques et éviter d'éventuelles contradictions entre ces deux visions et les conclusions qu'on peut en tirer en matière d'aménagement des rivières.

La pertinence du choix du modèle hydrologique

Sans revenir sur les fondements théoriques des modèles Débit-durée-Fréquence, qui sortent du cadre de cet article, on peut constater qu'ils fournissent une solution élégante et opérationnelle pour dépasser la traditionnelle et réductrice crue de projet : ces modèles tiennent compte de tout le régime hydrologique tel qu'on peut l'analyser aujourd'hui. Cette facilité d'utilisation (dans le cadre des hypothèses de validité) est un atout indispensable à la généralisation opérationnelle d'une méthode d'analyse des risques sans laquelle seul un petit nombre d'opérateurs serait à même de mener à bien des études de ce type. De plus, ces modèles permettent de quantifier aussi bien la variable d'aléa que celle de vulnérabilité, assurant ainsi leur homogénéité et leur comparaison. C'est là un avantage dont les autres modèles hydrologiques disponibles ne disposent pas, à notre connaissance, et qui constitue sans doute un point essentiel de l'originalité de la méthode.

Le problème des incertitudes

Le problème des incertitudes reste posé comme dans tous les problèmes hydrologiques. On peut cependant affirmer que l'utilisation des modèles Débit-durée-Fréquence pour quantifier l'aléa comme la vulnérabilité entraîne des erreurs comparables. Si l'on sous-estime les quantiles de débit, on sous-estime autant la variable d'aléa que celle de vulnérabilité. En revanche, l'écart entre les deux, et en particulier son signe (+ ou -), n'est pas affecté par cette imprécision. Ces incertitudes devraient donc avoir des conséquences limitées sur les conclusions obtenues en terme d'aménagement. De plus, dans l'état actuel de nos con-

naissances, l'incertitude est beaucoup plus grande sur le terme de vulnérabilité que sur le terme d'aléa. La détermination du risque maximal acceptable n'est pas encore appuyée sur une méthode socio-économique très précise. Il faut donc continuer à œuvrer à la réduction de cette source d'incertitude, bien entendu, mais cela ne contredit pas la pertinence de la méthode ici présentée.

L'intérêt d'une bonne cartographie

Le fait de pouvoir exprimer l'aléa à l'aide d'une seule variable (TAL) permet une cartographie simple. Chaque parcelle est affectée d'une seule valeur représentative de l'aléa subi. Il en est de même pour la vulnérabilité avec la variable TOP. Nous disposons alors de deux cartes lisibles, qui permettent une bonne vue synthétique des deux composantes du risque. Une carte supplémentaire, résultant de la comparaison entre l'aléa et la vulnérabilité, avec un code de couleur très simple à interpréter (TAL > TOP, vert, risque acceptable, TAL < TOP, rouge, situation à risque) donne aux aménageurs et aux décideurs, ainsi qu'à tout un chacun, un outil d'analyse et de décision compréhensible et réellement utilisable. De plus, le résultat cartographique de chaque nouveau scénario d'aménagement permet de saisir immédiatement son impact sur le risque à travers l'évolution des zones rouges et vertes. Cette interactivité permet une prise de décision motivée et acceptable par les riverains, disposant ainsi du moyen d'analyser ce choix.

Mises à jour à chaque aménagement ou modification de l'occupation du sol, ces cartes deviennent alors de véritables outils d'aide à la décision. Elles permettent une gestion cohérente et affichée du bassin versant qui devrait éviter certaines erreurs passées.

CONCLUSION

La méthode Inondabilité, méthode d'aménagement intégré du territoire à l'échelle du bassin versant, apporte des réponses face au risque d'inondation. Mais elle nécessite des développements et fait encore l'objet de recherches, notamment pour une meilleure quantification de la notion de vulnérabilité avec des instruments de mesure économiques et sociologiques ou pour des procédures de cartographie automatique des scénarios envisagés.

Un des fondements de la méthode repose sur une analyse du risque qui s'exprime par le croisement entre la vulnérabilité et l'aléa, deux variables indépendantes. Complexe, la méthode Inondabilité n'en permet pas moins une appropriation par l'ensemble des acteurs du fait de résultats cartographiques facilement lisibles et compréhensibles

Ne se limitant pas simplement à la crue de projet, utilisée sur la totalité d'un bassin versant, et exprimant la vulnérabilité des parcelles, cette méthode permet une réelle gestion intégrée avec des aménagements proposés qui prennent en compte de nombreuses fonctions de la rivière : ressource en eau, risque d'inondation, milieu aquatique...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CFGB, 1994, *Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX ; Design flood determination by the Gradex method*, 18^e Congrès CIGB-ICOLD, n° 2, Nov. 1994, Bulletin du Comité Français des Grands Barrages, français-anglais, 96 p.
- CHASTAN B., GILARD O., GIVONE P., OBERLIN G., 1995. *La prise en compte du risque d'inondation*, Ingénieries-EAT, 2, 13-20.
- DE LANEY T. A., 1995. *Benefits to downstream flood attenuation and water quality as a result of constructed wetlands in agricultural landscapes*, Journal of soil and water conservation, 620-626.
- GALÉA G., GENDREAU N., LANG M., 1997. *The AGREGEE and QdF hydrological models*, Floodaware Meeting, Gembloux, 13-14 January 1997, 11-22.
- GALÉA G., PRUDHOMME C., 1993. *Characterization of ungauged basins floods behaviour by upstreaming QdF models*, 2nd international conference on FRIEND « Flow regimes from international experimental and network data », Technische Universität Braunschweig, RFA, IAHS Publication, n° 221, 229-240.
- GALÉA 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 modèle QdF*, Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 10, n° 1, 83-101.
- GENDREAU N., GILARD O., 1996. *Flood risk management support system*, Ribamod Concerted Action, Proceedings of the first expert meeting, European Commission, EUR 17456 EN, 141-152.
- GENDREAU N., GILARD O., 1997. *Structural and non structural measures implementation : choice's arguments provided by Inondabilité method*, Ribamod Concerted Action, Proceedings of the first workshop, European Commission, EUR 18019 EN, 241-250.
- GILARD O. et al., 1998. *Guide pratique de la méthode Inondabilité*, coll. des cahiers techniques Inter-Agences, Etude Inter-Agences n° 60.
- GILARD O., 1995. *The « INONDABILITE » method*, Sistema Terra, Year IV issue 3, 61-64.
- GILARD O., GIVONE P., 1996. *Flood risk management : new concepts and methods for objective negotiation*, Conference on Destructive Water, Anaheim, 13 p.
- LANG M., 1997. *New developments with AGREGEE, a statistical model using hydrometeorological information*, in « FRIEND projects H-5-5 et H-1-1., third report 1994-1997 », Ed. Oberlin G. et Desbos E., Cemagref Editions, 431 p., 181-191.
- MARGOUM M., OBERLIN G., LANG M., Weingartner R., 1994. *Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle AGREGEE*, Hydrologie Continentale, vol. 9 (1), 85-100.
- MOLIN-VALDES H., 1994. *The international decade for natural disaster reduction and the link with agenda 21*, Ecodecision, 42-45.
- OBERLIN G., 1995. *Les outils disponibles de la prévention des inondations dommageables*, Ingénieries-EAT, spécial risques naturels, 35-50.
- OBERLIN G., GILARD O., GIVONE P., 1996. *The potentialities of a risk disaggregation between vulnerability and hazard : example of the relative stability induced for flooding risk alleviation*, Course on « Floods and Landslides - Interacted Risk Assessment », Commission of the European Communities, Orvieto, 17 p.
- PENNING-ROUSELL E. et al., 1995. *Flood Hazard Assessment, Modelling and Management : Results from the EURO-flood Project*, Proceedings of the Hydrological and hydrogeological risk meeting, European Commission, Brussels, 30-31 January 1995.
- RASMUNSSSEN J.L., 1994. *Floodplain management into the 21st century : a blueprint for change - sharing the challenge*, Water International 19, 166-176.
- TORTEROTOT J.P., 1993. *Le coût des dommages dûs aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 361p + annexes.