
Gestion du risque d'inondation et méthode Inondabilité : une perspective socio-économique

Nicolas Gendreau, Marion Longhini et Pierre-Marie Combe

Les cours d'eau ont toujours été utilisés pour leurs richesses. Tout d'abord, ils constituent de façon évidente une ressource en eau pour les besoins alimentaires et d'hygiène ainsi que pour les prélèvements agricoles et industriels. Mais ils assurent aussi une voie de transport, une puissance mécanique et des activités ludiques, ainsi que la vie d'espèces végétales et animales et une production paysagère. De plus, les plaines alluviales sont des endroits idéaux pour le développement d'activités notamment urbaines : ce sont en général des lieux plaisants où il fait bon vivre et dont la topographie plane permet des installations faciles.

Mais les cours d'eau sont l'objet de variations de débit avec des périodes de basses eaux et de hautes eaux. Au cours de fortes crues, la capacité du lit mineur n'est alors pas suffisante pour canaliser les flux d'eau et ces débordements sont à l'origine des inondations.

Les conséquences de ces inondations sont considérables. Leur impact économique direct (dégâts causés par le contact direct avec l'eau) en fait le risque naturel le plus dommageable (en France, 66 %, soit 18,31 milliards de F sur 27,8 milliards, des indemnités ont été versées au titre des inondations pour la période 1982-1995, selon la Fédération française des sociétés d'assurance). Les coûts économiques indirects (liés aux conséquences des dommages directs, comme les perturbations dans les productions et les transports) peuvent aussi, de la même façon, être qualifiés de très importants, du moins localement. De plus, les impacts sociaux (déstabilisation des personnes et

des collectivités) sont loin d'être négligeables, même s'ils ne peuvent pas être quantifiés précisément.

La méthode Inondabilité

Élaborée au travers de nombreux travaux de recherches, mise en avant à la suite des dégâts causés par les inondations en Europe de l'Ouest et particulièrement en France ces dernières années, la méthode Inondabilité (Chastan *et al.*, 1995) a été conçue pour fournir un cadre d'analyse du risque d'inondation cohérent avec les concepts émergents (notamment la définition du risque par confrontation de l'aléa et de la vulnérabilité).

Elle reprend les résultats des progrès récents de l'hydrologie régionale ainsi que les outils traditionnels de l'hydraulique, en particulier les modèles numériques de simulation hydraulique, pour les utiliser dans un cadre plus complet, intégrant des concepts de nature socio-économique indispensables pour jeter les bases de décisions d'aménagement aux conséquences économiques évidentes.

L'un des principes de base de la méthode repose sur l'axiome suivant : « le risque zéro n'existe pas ». Les crues de ces dernières années en France et en Europe l'ont, parfois brutalement, rappelé à notre mémoire. Un corollaire immédiat de cet axiome est que l'on doit donc définir un niveau de risque acceptable (donc accepté). Ce dernier traduit cette reconnaissance de ne pas pouvoir se prémunir contre tous les événements possibles et, en particulier, la nécessité d'accepter les événe-

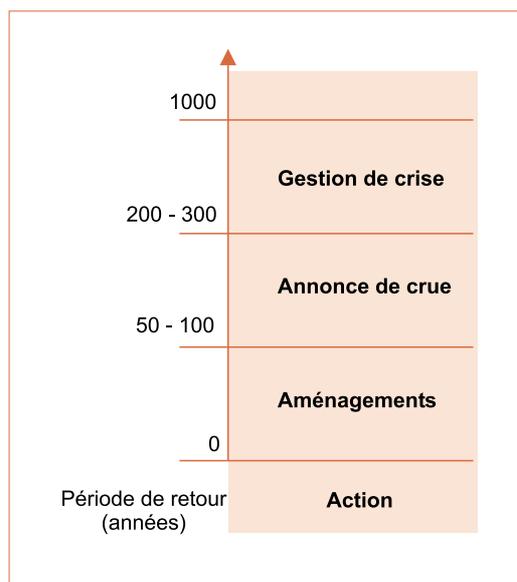
Nicolas Gendreau
Cemagref
3, bis Quai
Chauveau
CP 220
69336 Lyon
Cedex 09

**Marion Longhini
et Pierre-Marie Combe**
LATEC
UMR 5601 CNRS
Université de
Bourgogne
2, bd Gabriel
21004 Dijon
Cedex 4

ments extrêmes et leurs conséquences dommageables (figure 1) (Givone, 1995). Les contraintes naturelles incontournables doivent être rendues supportables par des mesures autres que les mesures d'aménagement : les dispositifs d'annonce de crue et de gestion de crise, et le développement de la culture du risque (Gendreau et Gilard, 1996).

Ce préliminaire étant posé, la méthode Inondabilité proprement dite propose un moyen de quantifier le risque associé à une parcelle (au sens de surface élémentaire et pas nécessairement au sens cadastral ou foncier du terme) comme résultant de la confrontation, sur cet élément de surface, de deux grandeurs traduites en termes comparables : l'aléa et la vulnérabilité (Molin Valdes, 1994).

Figure 1. – Les niveaux d'intervention (exemple).



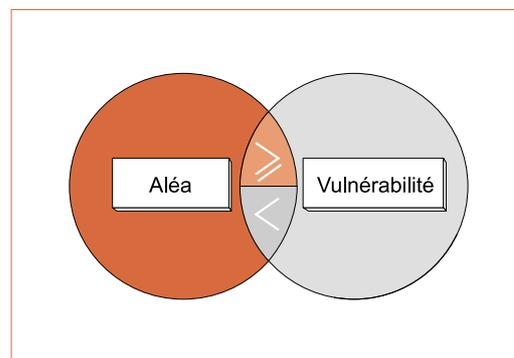
■ Le risque

L'aléa, relativement bien connu, traduit la réalité de la contrainte objective qui pèse sur une parcelle donnée. Il dépend donc exclusivement du régime hydro-météorologique du bassin versant étudié et est analysé par les outils plus ou moins classiques dans ce domaine.

La vulnérabilité, moins bien connue, traduit la sensibilité d'une parcelle au phénomène, les dommages potentiels encourus et l'acceptabilité, au sens socio-économique, de ces dommages.

Une situation est définie à risque (figure 2) lorsque, sur le même élément de surface, l'aléa subi est plus fort que la vulnérabilité affichée. À l'inverse, lorsque l'aléa est moins fort que la vulnérabilité, le risque est considéré comme négatif (soit acceptable... et accepté).

▼ Figure 2. – La définition du risque.



■ La comparaison entre la vulnérabilité et l'aléa.

La comparaison de ces deux notions différentes que sont l'aléa et la vulnérabilité nécessite l'adoption d'une unité de mesure commune. Dans les méthodes traditionnelles, c'est une unité monétaire qui est choisie. Les crues sont alors exprimées à travers un montant de dégâts causés et leur réduction par un montant de dégâts évités et un coût d'aménagement, de sorte que le champ de l'hydrologie et de l'hydraulique se trouve déporté vers le champ de l'économie. Cette pratique n'apparaît pas satisfaisante en ce que la comparaison s'effectue sur un bénéfice et un coût de protection globaux, ne tenant aucun compte de la diversité de la situation hydraulique et du besoin de protection. La méthode Inondabilité propose la démarche inverse, à savoir rester dans le champ de l'hydrologie et exprimer la vulnérabilité en termes de hauteur d'eau, de période de retour et de durée. Nous détaillerons plus loin la façon d'apprécier cette vulnérabilité.

■ Les modèles en débit-durée-fréquence (QdF), base de la quantification.

Les modèles hydrologiques synthétiques dénommés débit-durée-fréquence (QdF) sont utilisés comme base de la quantification de l'aléa aussi bien que de la vulnérabilité (Gilard, 1995b).

Ces modèles proposent une représentation de l'ensemble du régime hydrologique en crue d'un bassin versant par l'intermédiaire de relations bi-univoques des quantiles de débit Q (définis comme débit seuil continûment dépassé ou comme débit moyen) relatifs à une durée d , obtenus pour une probabilité de non-dépassement p (Galéa et Prudhomme, 1997). Cette probabilité est exprimée par son inverse, la période de retour au dépassement ($T = 1-1/p$). On montre par ailleurs que ces abaques QdF locaux peuvent être établis en choisissant, d'une part, une typologie d'écoulement adaptée au bassin versant étudié (à choisir parmi trois pour ce qui concerne la grande majorité des bassins versants français) et, d'autre part, deux paramètres hydrologiques locaux, spécifiques du bassin versant étudié. Ces paramètres sont le débit instantané maximum annuel décennal, QIXA10, et la durée caractéristique de crue du bassin versant, D (Prudhomme, 1995, Galéa et Prudhomme, 1993).

Ces abaques QdF donnent une représentation pertinente des quantiles de débit pour toute période de retour de 1 à 1 000 ans, permettant de dépasser la notion classique de crue de référence dans les études d'aménagement de rivière. Par ailleurs, ils ouvrent la possibilité de construire des hydrogrammes synthétiques monofréquences (HSMF), cohérents en termes de volume avec les débits de pointe QIX de même période de retour et permettant de fournir les entrées hydrologiques pertinentes à un modèle hydraulique (Galéa *et al.*, 1997). C'est, là aussi, un moyen efficace de dépasser la notion de « crue de projet », trop souvent définie comme un débit de pointe unique, afin de mieux tenir compte de la complexité de la propagation d'une crue dans un réseau hydrographique.

■ *Analyse de l'aléa*

L'analyse de l'aléa repose classiquement sur une approche hydrologique et hydraulique du fonctionnement du bassin versant étudié. Si l'on se réfère aux textes réglementaires en vigueur en France (notamment les plans de prévention des risques – PPR – mis en place par la loi Environnement de janvier 1995), on définit souvent l'aléa comme la hauteur d'eau maximale atteinte pour une crue de référence donnée (crue centennale ou crue historique observée). Il peut donc être étudié en faisant appel à un modèle hydrologique

pour déterminer le débit correspondant à cette crue de référence et à un modèle de simulation hydraulique pour calculer les niveaux d'eau correspondants atteints (Gilard, 1995a).

L'existence d'une courbe de tarage locale, qui donne une relation bi-univoque entre le débit et la cote de l'eau, et d'un modèle QdF local permet de traduire cette information en une période de retour équivalente par une succession de projections mathématiques nous ramenant à une hauteur nulle et à une durée instantanée (figure 3). Cette période de retour, baptisée TAL (ou période de retour équivalente à l'aléa), est la mesure ponctuelle de l'aléa proposée par la méthode Inondabilité. C'est un équivalent – estimé en année – des autres informations disponibles sur l'aléa, en particulier sa hauteur et sa durée pour une crue de référence donnée.

Une autre façon d'obtenir la période de retour de la première crue inondante est de router dans un modèle hydraulique un ensemble d'hydrogrammes synthétiques monofréquences (issus des modèles QdF). L'analyse, sur chaque surface du lit majeur, de la période de retour de la première crue inondante (avec en conséquence une hauteur et une durée quasi nulles) nous permet de disposer du TAL correspondant affecté à la parcelle.

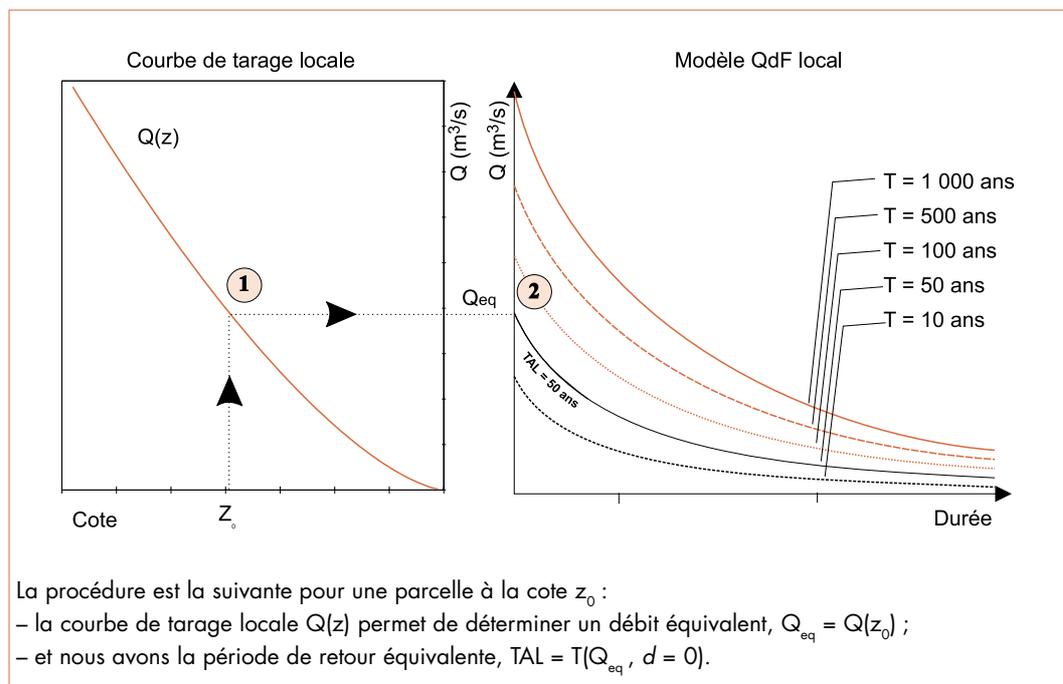
Nous pouvons montrer que le résultat obtenu est comparable à celui issu du calcul de la hauteur d'eau atteinte par une crue de référence et transformé ensuite par l'intermédiaire de l'abaque QdF recalculé, dans la section en travers considérée, en une période de retour équivalente.

Nous pouvons alors établir la carte des TAL, qui correspond à la carte d'aléa.

■ *Analyse de la vulnérabilité*

Même si l'analyse de la vulnérabilité relève principalement de la socio-économie, l'un des choix faits dans la méthode est de l'exprimer par l'intermédiaire de paramètres hydrologiques similaires à ceux utilisés pour qualifier et quantifier l'aléa. Aussi avons-nous retenu la hauteur d'eau, la durée de submersion et la période de retour comme paramètres permettant de définir l'objectif de protection associé à un certain usage des sols. La hauteur d'eau et la durée sont les deux principaux paramètres discriminants pour l'apparition des

Figure 3. –
Calcul du TAL.



dommages, notamment en zone rurale, et la période de retour équivalente correspond à un seuil d'acceptabilité associé à ces dommages.

Pour obtenir, pour chaque élément de surface, une estimation de ces trois grandeurs, la méthode propose des valeurs guides, établies sur la base d'une analyse des publications nationales et internationales sur les risques d'inondation. Ces valeurs guides doivent servir de point de départ à un processus de validation locale qui permet aux différents acteurs locaux (riverains, responsables politiques, associations diverses) d'exprimer leur point de vue sur le sujet et de négocier les objectifs à rechercher par l'aménagement. On arrive relativement facilement à affecter un tel triplet à tous les types d'occupations des sols.

Le même mécanisme que celui décrit pour l'aléa permet de traduire ce triplet de valeur (h, d, T) en une variable équivalente, baptisée TOP (pour période de retour équivalente à l'objectif de protection), qui traduit quantitativement cet objectif (figure 4). Le modèle QdF associé à la courbe de tarage locale permet en fait d'élaborer une relation d'ordre dans l'espace à trois dimensions représentées par h, d et T , qui servira elle-même à

affecter aux différentes parcelles une mesure quantifiée de leur vulnérabilité (exprimée en années) et à hiérarchiser ces vulnérabilités différenciées. Cette mesure est directement comparable à celle précédemment décrite pour l'aléa.

Aussi, disposant maintenant d'une seule valeur pour caractériser la vulnérabilité, nous pouvons aisément la cartographier. Nous obtenons alors une carte de vulnérabilité, la carte des TOP.

■ Synthèse du risque et restitution cartographique

Les deux grandeurs précédentes, TAL et TOP, mesurant respectivement l'aléa et la vulnérabilité, peuvent être calculées pour tout élément de surface du lit majeur, défini en fonction de la précision recherchée, des informations disponibles et de l'homogénéité relative vis-à-vis du risque d'inondation. Une carte d'aléa s'apparente peu ou prou aux documents intitulés « atlas des zones inondables » dans la réglementation française ; une carte de vulnérabilité traduit à la fois l'occupation des sols et leur sensibilité relative vis-à-vis des inondations. Ces deux documents sont déjà très intéressants pour guider la réflexion des aménageurs.

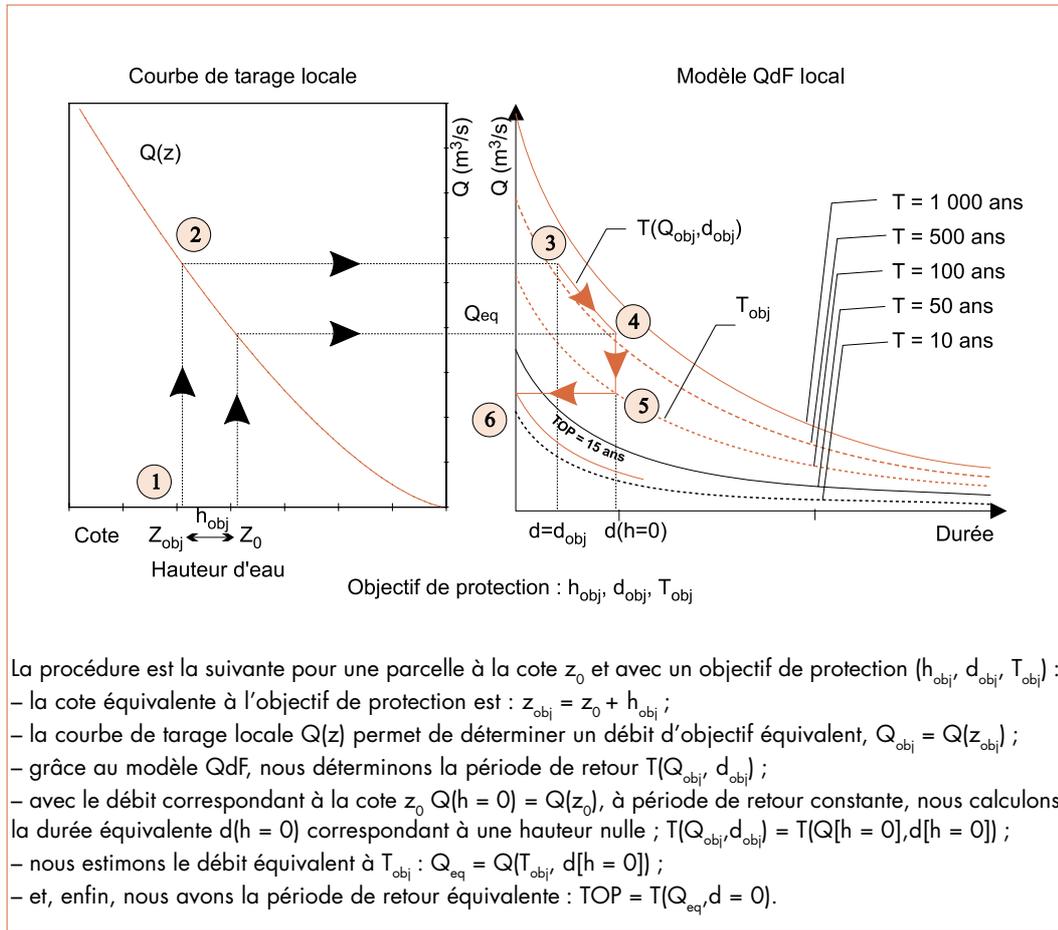


Figure 4. – Calcul du TOP.

La procédure est la suivante pour une parcelle à la cote z_0 et avec un objectif de protection (h_{obj} , d_{obj} , T_{obj}) :

- la cote équivalente à l'objectif de protection est : $z_{obj} = z_0 + h_{obj}$;
- la courbe de tarage locale $Q(z)$ permet de déterminer un débit d'objectif équivalent, $Q_{obj} = Q(z_{obj})$;
- grâce au modèle QdF, nous déterminons la période de retour $T(Q_{obj}, d_{obj})$;
- avec le débit correspondant à la cote z_0 $Q(h=0) = Q(z_0)$, à période de retour constante, nous calculons la durée équivalente $d(h=0)$ correspondant à une hauteur nulle ; $T(Q_{obj}, d_{obj}) = T[Q[h=0], d[h=0]]$;
- nous estimons le débit équivalent à T_{obj} : $Q_{eq} = Q(T_{obj}, d[h=0])$;
- et, enfin, nous avons la période de retour équivalente : $TOP = T(Q_{eq}, d=0)$.

Il est cependant possible de synthétiser encore cette information et de dresser une carte de risque (figure 5) par comparaison des deux cartes précédentes et composition mathématique des deux variables TAL et TOP (Oberlin *et al.*, 1996). Un code de couleurs simple traduit le résultat de ce travail :

– en jaune, nous identifions les parcelles qui ne sont jamais inondées. Elle sont hors de portée des plus fortes crues ($TAL = +\infty$),

$$\text{risque} = TOP - TAL = -\infty$$

– en vert, nous identifions les parcelles qui ont une vulnérabilité plus faible que l'aléa. Ces parcelles sont en fait bien protégées, voire surprotégées et disposent d'un crédit de protection,

$$\text{risque} = TOP - TAL < 0$$

– enfin, nous avons les parcelles rouges, qui correspondent à une situation à risque. Ces parcelles sont inondées de façon inacceptable et doivent être protégées.

$$\text{risque} = TOP - TAL \geq 0$$

Le concept de risque maximal acceptable

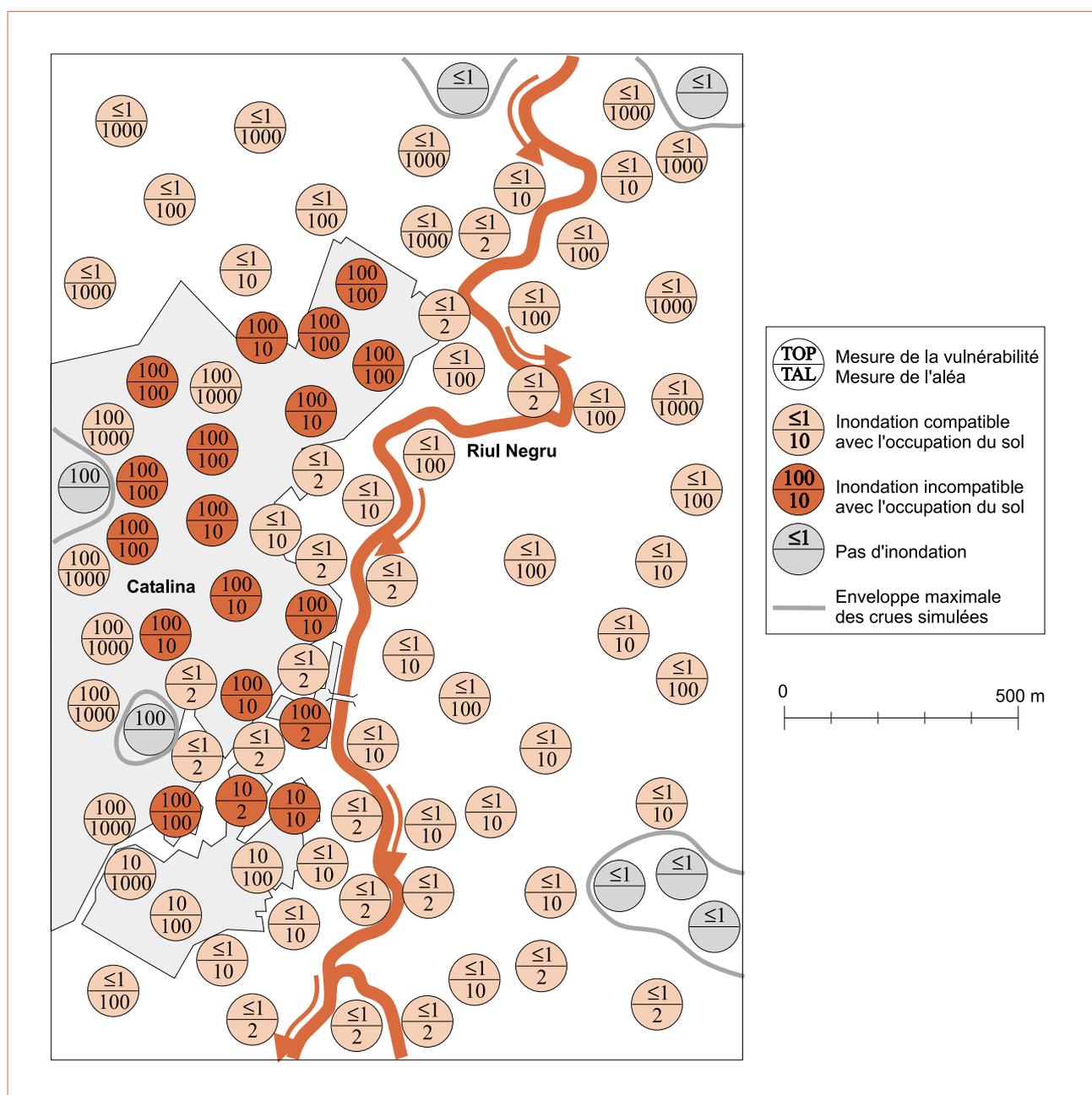
L'originalité de la méthode tient sans doute à l'affirmation de la nécessité d'afficher explicitement un niveau de risque maximal acceptable, sans s'illusionner sur la capacité des techniques même les plus modernes à maîtriser les événements les plus extrêmes... qui malheureusement, et conformément à leur représentation probabilisée, se produiront toujours, ici ou là, dépassant du même coup les références historiques connues.

Il faut prendre garde à l'interprétation sémantique de l'expression « risque maximal acceptable ».

En effet, l'adjectif maximal ne se rapporte pas aux paramètres physiques de l'aléa – hauteur d'eau, vitesse ou durée d'inondation – mais bien à la fréquence d'occurrence de ce phénomène, à paramètres physiques donnés. L'analyse hydrologique permet effectivement de quantifier (avec toutes

les réserves d'usage) la fréquence d'apparition d'un événement, mais en aucun cas, du moins dans des approches non bornées comme celles dérivant du Gradex (Lang, 1995), de garantir que tel paramètre ne sera jamais dépassé. C'est l'une des difficultés bien connues de la compréhension de

Figure 5. – Carte de risque, rivière Riul Negru, Roumanie. ▼



N. Gendreau d'après photo de Radu Preorian

ces problèmes de risques naturels par les acteurs sociaux que de percevoir la signification de ces probabilités présentées par les hydrologues.

L'introduction du concept de risque maximal acceptable et sa déclinaison dans le cadre de la méthode Inondabilité par l'analyse différenciée de la vulnérabilité en fonction de l'occupation des sols ont deux conséquences principales :

- au niveau de l'occupant, maintenir vivace la réalité de la contrainte hydraulique objective qui menace toute utilisation de parcelle dans une zone de lit majeur de cours d'eau ;
- au niveau de la collectivité, amener le décideur public à hiérarchiser les enjeux et à faire des choix, toujours difficiles, parfois douloureux, entre différents objectifs soutenus par différents groupes de pression aux intérêts parfois contradictoires.

Quantification économique de la vulnérabilité : enjeux et méthode

La vulnérabilité entrant à part égale avec l'aléa dans la détermination du risque, sa quantification constitue un enjeu important de la méthode Inondabilité. Appréhendée en termes de risque maximal acceptable, elle permet en effet de définir *a contrario* le niveau de l'objectif de protection requis, compte tenu de l'occupation du sol qui prévaut sur la parcelle.

■ *Risque maximal acceptable et analyse économique traditionnelle*

Même s'ils reposent sur une combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (concepts maintenant largement partagés), la plupart des modèles utilisés en analyse du risque sont fondés sur une combinaison « multiplicative » de ces deux paramètres. C'est particulièrement le cas des modèles économiques, construits sur la notion de dommages dus aux inondations, qui « mesurent » l'intensité du risque en multipliant le coût des dommages escomptés par la probabilité d'occurrence de ces dommages (Penning-Rowsell et Chatterton, 1977). Ce faisant, le risque est évalué sur la base d'un dommage moyen associé à la réalisation d'un événement aléatoire.

Risque = Coût des dommages x probabilités des dommages

Un tel modèle peut être décliné en plusieurs variantes, dont la plus répandue consiste à calculer

le coût moyen annuel des dégâts, par le biais d'une intégration de la fonction risque précédemment définie sur un champ de probabilités complet.

$$Risque \approx \int_0^1 Coût(p) \cdot p \cdot dp$$

Sur cette base, il s'agit d'évaluer l'intérêt économique d'un aménagement, à l'aide d'une analyse avantage-coût (Parker *et al.*, 1987, Torterotot, 1993). Dans cette procédure, un projet de lutte contre les inondations est reconnu « faisable » dès l'instant où le coût d'aménagement est couvert par un bénéfice en dommages potentiels évités au moins équivalent. Toutefois, en pratique, utilisé sans certaines précautions, ce test peut conduire à justifier n'importe quel aménagement et par là-même à entretenir une logique de risque minimum, puisqu'à la limite tout se passe comme si tout niveau de risque, même faible, était économiquement inacceptable... Force est de constater aujourd'hui que la protection contre les inondations n'a pas nécessairement pour effet de réduire les dommages – bien au contraire. En effet, lorsqu'une protection est mise en place afin de garantir les occupations existantes contre un événement de type donné (dit « crue de projet »), elle induit une intensification des activités économiques (par exemple, les agriculteurs se reconvertissent dans des cultures à haut revenu). Ainsi, il est courant que la diminution de l'aléa se trouve plus que compensée par une augmentation de la vulnérabilité, d'où, en définitive, une aggravation du risque.

Telle est la spirale des aménagements hydrauliques en chaîne, bien connue et maintes fois dénoncée, qui conduit à l'impasse tant économique qu'hydraulique et écologique, et à laquelle une certaine pratique du calcul économique n'est sans doute pas étrangère.

À l'inverse, la méthode Inondabilité propose une définition du risque qui repose sur une combinaison « additive » des deux facteurs que sont l'aléa et la vulnérabilité (unité : période de retour en années).

$$Risque = Vulnérabilité - Aléa$$

Cette définition permet de définir à la fois des risques « positifs » contre lesquels il convient de

se protéger, ainsi que des risques « négatifs », qui sont jugés acceptables. Dans cette optique, les aménagements répondent à un objectif de diminution des risques positifs, sans qu'ils ne resurgissent ailleurs et sans modification (ou de manière acceptable) des risques négatifs.

Une telle définition (à condition de trouver les moyens opérationnels de l'appliquer) peut aider à reconsidérer la gestion du risque d'inondation (Combe, 1997a) dans le sens d'un nouvel équilibre entre les aménagements structurels et les mesures non structurelles de prévention. Il s'agit, en définitive, non de minimiser les dommages en tant que tels mais de les optimiser en réduisant les aménagements et en ajustant les protections aux besoins économiques objectifs, dans le cadre d'une gestion durable de l'hydrosystème et de ses différentes fonctions (Combe, 1997b).

■ Valeurs guides et évaluation de la vulnérabilité

Les concepts centraux présentés précédemment conduisent donc à définir la vulnérabilité d'une parcelle sur des bases nouvelles. Traditionnellement, la vulnérabilité est essentiellement appréciée à partir des dommages engendrés par l'inondation de la zone considérée. Ainsi, plus le coût des dommages potentiels est élevé, plus la vulnérabilité de la zone considérée est grande – et donc plus importante est la protection à lui apporter.

Cette définition – relativement intuitive et donc facilement partagée par la plupart des acteurs travaillant sur ces questions – pose cependant un certain nombre de problèmes tant sur le plan conceptuel (la notion de dommages étant péjorative, elle incite à rechercher leur minimisation) que sur le plan opérationnel (la détermination des dommages potentiels n'est pas aisée et la prospective sur l'évolution de l'occupation des sols, traduite en termes de dommages, est aussi délicate). Il reste que si un raisonnement fondé sur le seul critère des dommages ne va pas sans limites, l'évaluation des dommages constitue une étape incontournable dans toute entreprise de quantification de la vulnérabilité.

Dans l'état actuel de la méthode Inondabilité, les difficultés rencontrées par les analyses classiques ont été contournées par une approche empirique et pragmatique du problème, fondée sur une analyse bibliographique importante, complétée par

une démarche de validation locale. L'approche bibliographique a ainsi permis, au cours d'une première étape, d'identifier des valeurs guides (Desbos, 1995) en proposant, pour une variété d'occupations du sol, des paramètres hydrologiques traduisant leur vulnérabilité (ou risque maximal acceptable) (tableau 1).

Ces valeurs guides sont destinées à servir de base de discussion en vue d'une validation plus représentative de la sensibilité locale aux inondations. Elles expriment, par l'intermédiaire des paramètres descriptifs de l'aléa (hauteur d'eau, durée et période de retour), le risque maximal acceptable par différents types d'occupations du sol et donc, *a contrario*, l'objectif de protection pouvant raisonnablement être revendiqué par les riverains d'un cours d'eau lors d'un processus de négociation collective.

Malgré son intérêt opérationnel – qui a été confirmé par les différents tests d'application de la méthode Inondabilité –, le caractère imparfait et incomplet de cette démarche est évident :

– d'une part, un jugement d'expert ne saurait suppléer à une véritable analyse des conditions techniques, humaines et économiques de l'activité en question, ni à une expression directe des intéressés ;

– d'autre part, certaines combinaisons pertinentes de paramètres nous sont peut-être encore inconnues, faute d'observations ou d'analyses.

Mais si les valeurs guides se révèlent insuffisantes pour quantifier objectivement le niveau de risque acceptable pour une parcelle donnée, leur mobilisation est néanmoins indispensable comme base d'évaluation des dommages potentiels (indépendamment de toute référence à un aléa observé).

■ Vers une quantification économique du risque maximal acceptable

La quantification objective de la vulnérabilité appelle donc une consolidation méthodologique. Une réflexion théorique a ainsi été engagée sur l'expression économique de la notion de risque maximal acceptable – jusqu'alors appréhendée par les seuls paramètres physiques de l'inondation – qui respecte les principes fondamentaux de la méthode Inondabilité. L'occupation du sol en tant que telle n'est dès lors plus considérée comme le déterminant de la vulnérabilité d'une parcelle.

Occupation du sol de la parcelle	Saison de l'inondation	Hauteur de submersion maximale acceptable (m)	Durée de submersion maximale acceptable	Période de retour de submersion maximale acceptable (an)
Zone rurale				
Maraîchage légumes en plein champ, horticulture	Printemps	0	instant à 1 jour	5
	Été/automne	0	1 à 3 jours	5
Vignes	Été	0	instant	10
	Automne	0	instant	10
	Hiver	0	1 mois	5
Vergers	Printemps/été :	- houppier	1 jour	10
		- sol	3 à 5 jours	1
	Hiver	0	1 mois	1
		0		
Prairies permanentes	Printemps	0	10 jours	1
	Automne/hiver		1 mois	
Bois, forêts		0	1 semaine à 1 mois	1
Zone urbaine				
Service du centre urbain (secours, médical...)		0	instant	1 000
Résidentiel : caves RDC 1 ^{er} plancher		-2 à 0	instant	10
		0 à 0,5	instant	100
		1	instant	1 000
Industries		0,3 à 0,6	instant	1 à 100
Commerces		0,3 à 0,6	instant	5
Camping	Printemps/été	0,5	instant	10
Terrains de sport		0	1 jour	1

De plus, il semble que la détermination du niveau de risque susceptible d'être jugé acceptable par le propriétaire et/ou l'exploitant d'une parcelle inondable doit s'inscrire dans une vision positive de la mise en valeur de l'espace concerné.

Sauf à faire preuve d'un fatalisme annihilant, il faut reconnaître que l'augmentation des dommages dus aux inondations provient essentiellement d'une modification de la vulnérabilité (les occupations du sol) qui s'avère incompatible avec l'aléa. Est-ce à dire que les agents économiques sont à ce point irrationnels qu'ils optent pour des décisions sous-optimales, tant sur le plan individuel que

collectif ? Loin s'en faut, et ces comportements individuels générateurs de risque additionnel peuvent s'expliquer de manière tout à fait rationnelle. En effet, le choix de détenir une parcelle inondable est loin de se réduire à une source de risque ; c'est avant tout un moyen de réaliser un bénéfice, puisque l'affectation d'une parcelle à une activité est une source de revenu (si elle est marchande) ou a une utilité (cas de services non marchands).

Dès lors, le choix du mode de valorisation économique d'une parcelle inondable est rationnel en ce qu'il répond à un principe de maximisation d'une valeur économique, compte tenu de l'oc-

▲ Tableau 1. – Valeurs guides d'objectif de protection.

currence potentielle d'une inondation, des préférences de l'individu et de son aversion plus ou moins prononcée pour le risque (par exemple de sa préférence pour les gains certains, relativement aux gains aléatoires) (Brown, 1972). Ce mécanisme est illustré par la figure 6 : le propriétaire doit décider d'une affectation pour son terrain parmi un ensemble $\{d_i\}$; mais son résultat R_{ij} dépendra de la survenance d'inondations $\{e_j\}$; suivant son attitude vis-à-vis du risque (préférences), il évalue les résultats aléatoires alternatifs $\{V(R_{ij})\}$, puis sélectionne l'activité lui procurant la valeur attendue la plus élevée, $\text{Max}[V(R_{ij})]$.

prévalant sur la parcelle considérée est mise en faillite. Les déterminants objectifs de cette perte seuil dépendent alors essentiellement des caractéristiques de l'activité : profils temporels des coûts et recettes, sensibilité physique de la production et des équipements productifs aux inondations (interviennent ici les valeurs guides évoquées précédemment) notamment. Cette perte seuil peut être assimilée à un montant maximal de dommages instantanés que l'agent économique est capable d'autofinancer (soit une perte contre laquelle il peut s'auto-assurer), compte tenu des bénéfices cumulés de l'exploitation de sa parcelle. Afin

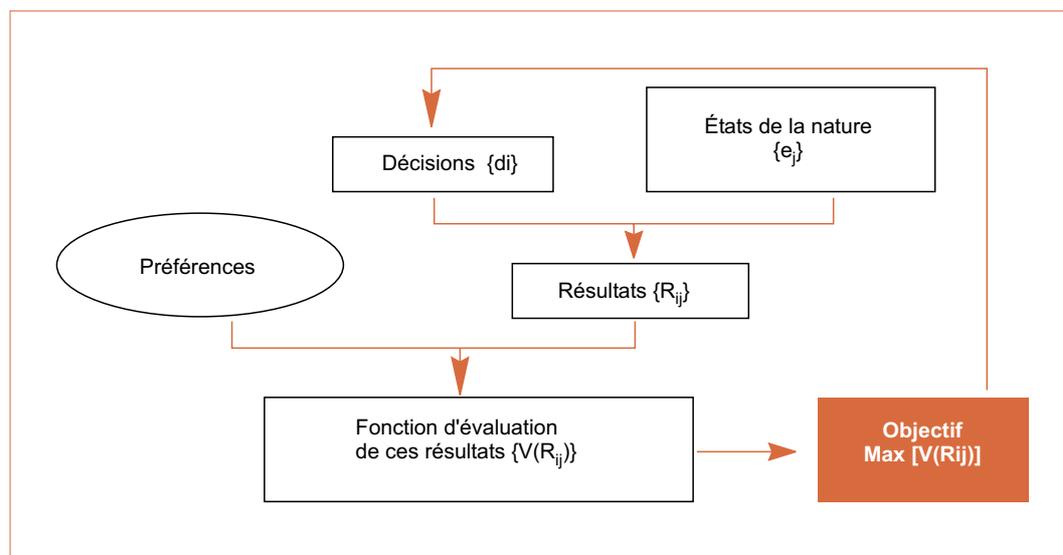


Figure 6. – Triptyque Décisions-États-Résultats.

La rationalité du choix économique n'est donc pas de se protéger *a priori* des inondations, mais bien d'adopter une stratégie d'activité optimale compte tenu de l'environnement. C'est ce dont rendent compte les modèles micro-économiques de choix d'affectation foncière en avenir incertain, qui permettent également de spécifier le degré de risque que l'individu accepte de supporter en réalisant telle activité plutôt que telle autre et, donc, de s'exposer à telle perte potentielle plutôt qu'à telle autre.

Dans un tel cadre d'analyse – qui formalise une vision plus positive des zones inondables –, le concept de risque maximal acceptable peut être identifié à la notion de perte seuil. Il s'apparente ainsi à un seuil de ruine au-delà duquel l'activité

de satisfaire aux principes de la méthode Inondabilité, cette perte monétaire doit être convertie en un équivalent hydrologique. Il s'agit donc de déterminer *in fine* à quelle fréquence d'aléa ce niveau de dommages correspond (Longhini, 1997). En effet, outre l'inversion du sens de conversion (d'une perte économique en sa traduction hydrologique et non plus, comme usuellement, d'une donnée hydrologique en un dommage associé), l'originalité de la méthode Inondabilité est de convertir des notions issues du champ économétrique (et plus largement socio-économique) en paramètres de nature hydrologique pour les rendre compatibles et comparables aux variables traduisant le niveau d'aléa pesant sur un espace donné.

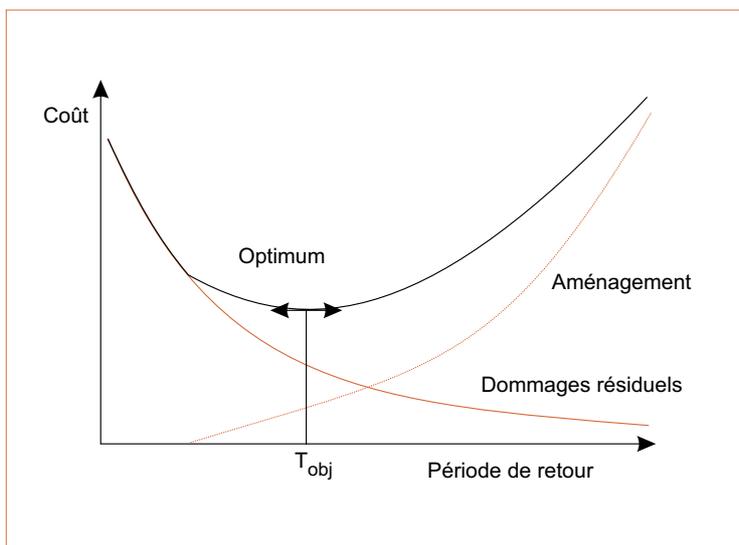
Déterminé de la sorte, le risque maximal acceptable propre à chaque type d'occupation du sol est donc défini indépendamment de la réalisation d'un événement particulier. En d'autres termes, la vulnérabilité est reliée à la nature de l'activité économique considérée (tableau 1), et non à sa localisation géographique (distance au cours d'eau), sans reposer sur le seul critère des dommages anticipés.

■ Des aménagements adaptés aux besoins des parcelles

La prise en compte du niveau de risque acceptable par chaque parcelle lors de l'analyse du risque a de fortes incidences sur les mesures de gestion au niveau du bassin versant.

Dans les analyses coût-avantage traditionnelles, l'optimum économique fondé sur la comparaison globale entre le coût des travaux et le bénéfice (figure 7) ne permet pas d'intégrer les estimations individuelles du risque maximal acceptable. En effet, cette comparaison prend en compte l'ensemble des dommages causés par une crue et le coût global des travaux hydrauliques qui concernent la même zone. Or, la diversité des modes de valorisation des parcelles qui se traduit par des acceptations différentes du risque n'est pas respectée. Une école, une route, une maison ou un champ de maïs seront alors traités de la même façon et la période de retour de la protection « optimale » retenue satisfera la demande globale mais pas les demandes individuelles.

En revanche, en calant le besoin de protection sur le bénéfice économique, on se donne la possibilité d'identifier le niveau de risque maximum acceptable à l'échelle individuelle. La comparaison de cette vulnérabilité avec l'aléa permet alors d'identifier de façon précise les parcelles à risque (positif). Les aménagements proposés, qu'ils soient individuels, collectifs ou mixtes (notamment chapelet de petites zones tampons mobilisables en bassin temporaires d'écroulement), sont ainsi mieux adaptés à la demande exprimée (au niveau local) et l'optimum économique global peut s'en trouver amélioré (aucune parcelle ne se trouve surprotégée ni sous-protégée, et le coût global des aménagements à réaliser en est réduit, voire minimisé).



Conclusion

Le caractère opérationnel de la méthode Inondabilité, méthode d'aménagement intégré du territoire à l'échelle du bassin versant, a déjà fait ses preuves sur un certain nombre de bassins versants (Bourbre, Rival, Savoureuse, Riul Negru...). Constituant une véritable solution de remplacement aux politiques de gestion traditionnelles, elle apporte en effet aux acteurs locaux de nombreuses réponses face au risque d'inondation.

Nécessitant néanmoins des développements supplémentaires, elle fait encore l'objet de recherches qu'enrichissent la mobilisation de modèles comportementaux participant du champ de la socio-économie. Il s'agit en effet de consolider la quantification de la vulnérabilité, actuellement évaluée sur la base de valeurs guides (consistant en des seuils de tolérance aux eaux inondantes, déclinés suivant le type d'occupation du sol), tout en respectant l'originalité de sa définition. Aussi est-il fait appel à des éléments de calcul économique (centraux en analyse de la décision) ainsi qu'à des hypothèses comportementales permettant de saisir l'attitude des individus par rapport au risque d'inondation, son changement à travers l'apprentissage, et sa répercussion sur la vulnérabilité et sa mesure (figure 8).

Traditionnellement réduite à l'évaluation du coût des dommages générés par les crues, l'estimation économique de la vulnérabilité est ici reliée aux

▲ Figure 7. – Calcul de l'optimum.

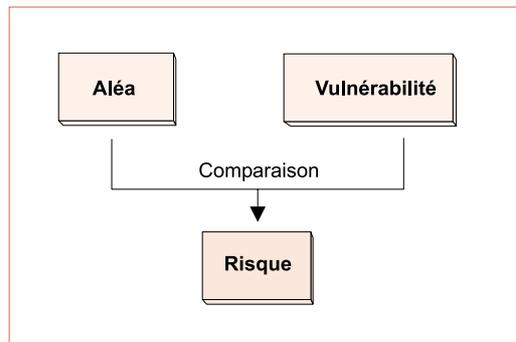


Figure 8. – Le risque.

revenus dégagés par la mise en valeur des parcelles inondables (la notion de valorisation est prise dans sa plus large acception, de sorte que même la mise en jachère d'une parcelle constitue une activité économique). Ainsi, la plaine inondable

n'est plus l'objet de dommages potentiels mais bien la source de revenus, en avenir incertain. Une telle approche de la vulnérabilité véhicule une vision plus positive du risque d'inondation, où la détermination de niveaux de risque acceptables est rendue plus aisée, et permet surtout de rallier plus facilement les riverains concernés.

Cette approche est certes prometteuse et devrait contribuer à fournir des outils d'aide à la décision intéressants. Néanmoins, il convient de noter que cette méthode de quantification économique de la vulnérabilité, pour séduisante qu'elle soit, n'est pas moins dans une phase exploratoire. Les résultats des travaux en cours devraient permettre de justifier l'estimation de la vulnérabilité pouvant être mobilisé par les acteurs de terrain lors de l'élaboration des cartes de vulnérabilité. □

Résumé

Dans cet article, nous rappelons les grandes lignes de la méthode Inondabilité (Chastan *et al.*, 1995). À partir des modèles hydrologiques en débit-durée-fréquence (QdF), nous pouvons quantifier aussi bien l'aléa et la vulnérabilité. Et grâce à une unité de mesure commune (une période de retour), nous pouvons comparer ces deux grandeurs et obtenir *in fine* une carte de risque. Ces résultats facilitent une négociation objective permettant de définir des aménagements « raisonnables » et par là même « optimisés » en considération des multiples enjeux liés aux cours d'eau : risque mais aussi ressource en eau et environnement.

Nous tentons ensuite de mettre en évidence l'originalité de la méthode Inondabilité par rapport à certaines méthodes classiques utilisées jusqu'à présent en matière de gestion des risques, particulièrement dans le domaine de l'estimation économique des aménagements de protection. Le concept de coût moyen annuel des dommages, en tant que principal estimateur de la vulnérabilité, ne nous paraît pas en effet adapté à la situation actuelle de l'occupation des sols dans les fonds de vallée et de l'aménagement de nos rivières. Nous préférons une analyse en termes de risque maximal acceptable, qui s'inscrit dans une vision positive de la mise en valeur de l'espace. Cette approche permet de donner des réponses d'aménagements adaptés aux besoins locaux de l'occupation du sol et d'améliorer l'optimum économique global.

Abstract

To deal with flood risk management, it is now accepted to consider the risk as the comparison between vulnerability and hazard. The Inondabilité method uses this concept in order to provide tools for river management. In order to compare the two notions of vulnerability and hazard, we use a discharge-duration-frequency (QdF) hydrological model. It allows the transformation of the two previous components in the same unit and we can finally have a risk map. These results help for an objective negotiation for an adapted river management taking into account many stakes: flood risk but also water resource and environment.

We try to show the particularity of the Inondabilité method, compared to some classical methods used for risk management, especially in the field of economic valuation. The concept of average annual damage cost, as the main estimator of vulnerability, seems not to be very well adapted to the nowadays situation of land use and river management. We prefer an analysis of the maximum acceptable risk, that allows a positive management of land use. This approach gives appropriate answers for river management, adapted to local land use and improves the global economic optimum.

Bibliographie

- BROWN, J. P., 1972. *The economic effect of floods. Investigations of a stochastic model of rational investment behavior in face of floods*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag.
- CHASTAN, B., GILARD, O., GIVONE, P., OBERLIN, G., 1995. Éléments de réflexion pour une meilleure prise en compte du risque d'inondation, *Ingénieries-EAT*, n° 2, p 13-20.
- COMBE, P.-M., 1997a. *Economic evaluations and their role in flood risk management*, Proceedings of the Floodaware Meeting, Gembloux, 13-14 January 1997, p 117-133.
- COMBE, P.-M., 1997b. *De la lutte contre les inondations à la gestion globale d'inondabilité : les bénéfices économiques*, LATEC, 35 p. + annexes (Évaluation économiques-SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse).
- DESBOS, E., 1995. *Qualification de la vulnérabilité du territoire face aux inondations*, mémoire de DEA, Cemagref Lyon/INSA Lyon, 59 p.
- GALÉA, G., GENDREAU, N., LANG, M., 1997. *The AGREGEE and QdF hydrological models*, Proceedings of the Floodaware Meeting, Gembloux, 13-14 January 1997, p 11-22.
- GALÉA, G., Prudhomme C., 1993. Characterisation of ungauged basins floods behaviour by upstreaming QdF models, 2nd international conference on FRIEND « Flow regimes from international experimental and network data », 11-15 October 1993, Technische Universität Braunschweig, RFA, *IAHS Publication*, n° 221, p. 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 modèles QdF, *Revue des sciences de l'eau*, n° 1, p. 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, p. 141-152.
- GILARD, O., 1995a. Connaître les inondations : l'exemple de la Bourbre, *Ingénieries-EAT*, n° spécial risques naturels, p. 7-16.
- GILARD, O., 1995b. The « Inondabilité » method, *Sistema Terra*, IV (n° 3), p. 61-64.
- GIVONE, P., 1995. La négociation du risque, une étape nécessaire, *Ingénieries-EAT*, n° spécial risques naturels, p. 87-95.
- LANG, M., 1995. *Les chroniques en hydrologie*, thèse de doctorat, Université Joseph-Fourrier, Grenoble, Cemagref Lyon, 296 p.
- LONGHINI, M., 1997. *Analyse micro-économique de la vulnérabilité aux inondations : recherche d'un cadre théorique ; cas agricole*, rapport Cemagref et LATEC, 82 p.
- MOLIN VALDES, H., 1994. *The international decade for natural disaster reduction and the link with agenda 21*, Ecodecision, p. 42-45.
- 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.
- PARKER, D. J., GREEN, C. H., THOMSON, P. M., 1987. *Urban flood protection benefits. A project appraisal guide*, Aldershot, Gower Technical Press, 284 p.
- PENNING-ROUSELL, E. C., CHATTERTON, J. B., 1977. *The benefits of flood alleviation. A manual of assessment techniques*, Aldershot, Gower Technical Press, 297 p.
- PRUDHOMME, C., 1995. *Modèles synthétiques des connaissances en hydrologie : application à la régionalisation des crues en Europe alpine et méditerranéenne*, thèse de l'Université de Montpellier II, 397 p.
- TORTEROTOT, J.-P., 1993. *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*, thèse de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 361 p. + annexes.