

# Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice – Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations

Frédéric Grelot <sup>a</sup>, Jean-Stéphane Bailly <sup>b</sup>, Céline Blanc <sup>a</sup>, Katrin Erdlenbruch <sup>a</sup>, Patrice Mériaux <sup>c</sup>, Nathalie Saint-Geours <sup>d</sup> et Rémy Tourment <sup>c</sup>

L'évaluation économique des projets d'aménagement, notamment ceux se rattachant à la politique de prévention des inondations, est encore peu pratiquée en France. Pourtant, suite aux nombreuses inondations catastrophiques qu'a connues notre pays au cours des vingt dernières années, les aménagements de protection contre les crues se sont multipliés dans les vallées urbanisées. Les impacts de ces aménagements, tant hydrauliques que socio-économiques et environnementaux, sont nombreux, importants et complexes. Ces aménagements hydrauliques relèvent majoritairement du régime de l'autorisation qui, bien que récemment rénové (nouvelle loi sur l'eau de 2006), n'impose toujours pas la réalisation d'une évaluation économique au titre de leurs études d'avant-projet. Il n'est pas exclu qu'une telle situation change dans un très proche avenir si l'on en juge par les récentes décisions prises par le gouvernement français dans le cadre de la modernisation des politiques publiques : révision du référentiel de calcul économique des grands projets d'infrastructure, intégration d'une démarche d'évaluation socio-économique contradictoire dans le processus de décision et de sélection des projets d'envergure nationale. Par ailleurs, le « Grenelle de l'Environnement » souhaite que l'ensemble des parties prenantes soit associé.

Dans un précédent article, Erdlenbruch *et al.* (2008), nous avons présenté certaines raisons avancées de la faible pratique de l'évaluation économique des projets de gestion des inondations

en France. Nous y avons également présenté, au travers d'une étude de cas sur le bassin versant de l'Orb, la réalisation d'une telle évaluation reposant sur l'analyse coût-bénéfice (ACB), permettant d'obtenir un indicateur synthétique de la pertinence des politiques évaluées. Nous avons insisté sur deux points essentiels de la démarche : le cheminement pour obtenir cet indicateur peut apporter un éclairage complémentaire à la décision ; comme tout indicateur numérique, sa précision est une information essentielle. Dans le présent article, nous souhaitons développer particulièrement le deuxième de ces points, en proposant une analyse de la précision des indicateurs résultants d'une ACB. Nous avons choisi, pour ce faire, un cas d'étude d'une vallée aménagée dans le sud de la France, qui n'est pas celui de l'Orb et dont nous ne pouvons pas communiquer le nom car la réflexion sur les aménagements envisagés est en cours de stabilisation. Cependant, il nous a paru intéressant de présenter ce cas d'étude parce que les aménagements se faisaient en plusieurs étapes et que la validité de l'ACB peut être testée pour chacune d'entre elles.

L'objectif de l'analyse ici présentée est de tester comment les résultats d'une ACB (*outputs*) dépendent des imprécisions des paramètres d'entrée (*inputs*). Deux démarches complémentaires permettent de répondre à ces objectifs : l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité (Saltelli *et al.*, 2007). Dans cet article, nous proposons une application de ces deux démarches. Dans un premier temps, nous rappelons les principes

## Les contacts

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

b. Cemagref, UMR TETIS, Territoires, environnement, télédétection et information spatiale, 361 rue J.-F. Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

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

d. AgroParisTech-Engref, Campus d'Agropolis International, 648 rue J.-F. Breton, BP 7355, 34086 Montpellier Cedex 4

généraux d'une ACB appliquée au projet de lutte contre les inondations et dressons ensuite un panorama des expériences internationales sur la question. Une présentation synthétique de notre cas d'étude visant à présenter les différents paramètres d'entrée utilisés est réalisée. Nous présentons ensuite, pour chacune des démarches (incertitude et sensibilité), la méthode retenue, les résultats et leur interprétation. Nous concluons sur les limites de notre application qui sont autant de pistes de recherche que notre équipe se propose de suivre dans les années à venir.

## Précisions sur les méthodes

### Quelques rappels sur le critère de décision d'une analyse coût-bénéfice

L'analyse coût-bénéfice est une méthode générique d'évaluation de politiques publiques, mettant en balance les coûts et bénéfices qu'elles impliquent. L'indicateur synthétique de l'ACB est la valeur actuelle nette (VAN). Il établit cette balance sur une période d'évaluation donnée, l'horizon temporel (dénommé  $N$ ), en rendant comparables les coûts ( $C_i$ ) et les bénéfices ( $B_i$ ) anticipés aux différentes périodes  $i$ , grâce au taux d'actualisation  $r_i$  (équation 1).

$$VAN = \sum_{i=0}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} (B_i - C_i) \quad (1)$$

Si la VAN est positive, le projet est économiquement pertinent et, du point de vue de la société, souhaitable. Si elle est négative, le projet coûte davantage à la société qu'il ne lui rapporte.

Il est également possible de considérer un autre indicateur synthétique, faisant le rapport  $R$  entre les bénéfices et les coûts actualisés. Le projet est efficient, si et seulement si  $R$  est supérieur à 1 (équation 2).

$$R = \frac{\sum_{i=0}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} B_i}{\sum_{i=0}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} C_i} \quad (2)$$

Dans cet article, la politique évaluée s'appuie sur des aménagements d'atténuation des inondations. Dans ce cas, la méthode s'appuie plus

particulièrement sur l'estimation des dommages potentiels générés. En effet, les bénéfices sont estimés par les dommages évités moyens annuels (DEMA), qui correspondent à la différence entre les dommages moyens annuels (DMA) sans projet et les DMA avec projet. En pratique, les bénéfices sont considérés comme constants sur l'horizon temporel considéré, ce qui revient à effectuer l'hypothèse que l'occupation des sols est invariable sur cette durée.

$$\forall i > 1, B_i = DEMA = Cte \quad (3)$$

Cette façon de mesurer les bénéfices, appelée aussi « méthode des dommages évités », est décrite en détail dans l'article précédemment cité (Erdlenbruch *et al.*, 2008). Rappelons juste que les DMA intègrent des informations sur l'ensemble de crues possibles d'un bassin versant, en pondérant les dommages potentiels qu'elles engendrent par leur probabilité d'occurrence, selon l'équation 4.

$$DMA = \int_{T=T_d}^{T=\infty} D(T) p(T) dT \quad (4)$$

Où :

–  $D(T)$  : dommage généré par l'événement de période de retour  $T$  ;

–  $T_d$  : période de retour de la plus faible crue qui crée des dommages (désignée par première crue dommageable dans la suite) ;

–  $p(T)$  : densité de probabilité de l'événement de période de retour  $T$ .

Dans la pratique, leur calcul est réalisé en ne considérant qu'un nombre limité de classes de périodicité des crues.

Les coûts considérés consistent en les coûts initiaux  $CI$  nécessaires à la réalisation des aménagements, mais également les coûts à venir d'entretien  $CE$ . Ceux-ci sont souvent considérés comme constants sur la durée, même si leur évolution possible ne pose aucun problème méthodologique particulier.

Au final, avec les hypothèses de constance des bénéfices mesurés par les DEMA et des coûts d'entretien  $CE$ , les équations 1 et 2 deviennent respectivement les équations 5 et 6.

$$VAN = \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} (DEMA - CE) - CI \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} DEMA}{CI + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} CE} \quad (6)$$

Rappelons enfin que, même si nous nous plaçons clairement dans le cadre d'une évaluation d'un aménagement visant à modifier les inondations, l'ACB ne se résume pas à la seule balance des coûts et bénéfices en lien direct avec les inondations. Même si cela n'est pas l'objet de cet article, il s'agit également de considérer tous les impacts positifs ou négatifs induits par les aménagements, dès lors qu'ils sont monétarisables, comme par exemple ceux sur l'environnement, sur le tourisme, etc.

### Analyses d'incertitude et de sensibilité dans la littérature

La prise en compte de l'incertitude dans la gestion du risque d'inondation est une préoccupation croissante à l'échelon européen (FLOODSite, 2007). Qualifier les sources d'incertitude d'un modèle, quantifier la précision des résultats et communiquer cette incertitude au gestionnaire sont autant d'axes de recherche dans le domaine de la gestion des risques.

Dans le cas d'une ACB de projets de réduction du risque d'inondation, les sources d'incertitude entachant le résultat final (la VAN du projet) sont nombreuses. Établir une typologie de ces sources d'incertitude est déjà une étape importante : outre la distinction entre *variabilité naturelle* des phénomènes et *incertitude liée au manque de connaissance*, on doit aussi établir l'origine de l'incertitude : résolution et exactitude des paramètres d'entrée du modèle, voire la structure même du modèle (Refsgaard et al., 2007). L'évolution des paramètres d'entrée au cours du temps (changement d'occupation du sol par exemple) constitue aussi un facteur majeur d'incertitude (Weichel et al., 2007).

Pour analyser ces incertitudes, de nombreux travaux s'appuient sur une approche de Monte-

Carlo (Mooney, 1997), qui consiste en plusieurs réalisations d'un même modèle suivant des jeux de paramètres d'entrée tirés aléatoirement, selon des lois de probabilité définies. Les corrélations existant entre les différents paramètres d'entrée peuvent être simulées, à l'aide de lois de distribution conjointe. L'exploitation des résultats permet à la fois de quantifier l'incertitude existant sur le résultat du modèle (*analyse d'incertitude*), et de quantifier l'influence de chacun des paramètres d'entrée sur le résultat (*analyse de sensibilité*). Divers indicateurs de sensibilité peuvent ainsi être construits (par régression linéaire, analyse de corrélation, mesures d'importance, indices de sensibilité, *screening*) (Saltelli et al., 2000 ; Helton et Davis, 2006). Ces indicateurs ont pour but d'identifier les facteurs critiques, ceux qui conditionnent la décision finale du gestionnaire, et sur lesquels il faut porter toute son attention. Les méthodes basées sur les approches de Monte-Carlo, si elles sont les plus largement utilisées pour leur accessibilité, présentent néanmoins des limites, notamment du fait de leur coût en temps de calcul.

D'autres cadres d'analyse d'incertitude existent<sup>1</sup>, notamment celui de la logique floue (Maskey et Price, 2004 ; Ahmad et Simonovic, 2007).

Même si ces méthodes sont largement répandues dans le champ de la modélisation hydrologique et hydraulique (Pappenberger et al., 2008 ; Chen, 2006 ; Weichel et al., 2007 ; Woodhead, 2007), elles sont encore rarement intégrées dans les évaluations économiques de projets de réduction du risque d'inondation. Quelques études de cas approfondies existent, notamment en Allemagne (Appel et al., 2004) et aux Pays-Bas (Kok et Cooke, 1997) : ces travaux aboutissent à des distributions de probabilité pour la VAN des différents scénarii d'aménagements envisagés. Aux États-Unis, le modèle HEC-FDA d'évaluation des dommages moyens évités, utilisé sur l'ensemble du territoire pour l'analyse du risque d'inondation, a donné lieu à une analyse d'incertitude et de sensibilité complète (Briant, 2001 ; NRC<sup>2</sup>, 2000). Ces travaux prennent en compte l'incertitude liée aux courbes débit-fréquence, aux courbes débit-niveaux et à l'évaluation des dommages (Merz et al., 2004). D'autres études s'intéressent plus spécifiquement aux incertitudes à caractère spatial (Aerts et al., 2003 ; Wilson et Atkinson, 2003 ; Werner, 2001 ; Sarmiento et al., 2008).

1. Le site [www.floodrisknet.org.uk/methods](http://www.floodrisknet.org.uk/methods) expose un grand nombre de méthodes disponibles pour l'analyse de sensibilité appliquée à la gestion du risque d'inondation.

2. National Research Council.

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

En France, malgré les travaux pionniers de Torte-rotot (1993), force est de constater avec différents rapports commandités par le MEEDDAT<sup>3</sup> (Ledoux *et al.*, 2003a ; Bournot, 2008) que la situation actuelle n'est que très peu avancée.

Dans cet article, au travers du cas d'étude présenté dans la section suivante, nous souhaitons tester si les résultats obtenus pour la VAN sont robustes ou au contraire sensibles à la variabilité des nombreuses hypothèses ou mesures effectuées au cours de l'analyse. Nous proposons de répondre aux questions suivantes : quelle est la précision de la VAN ? Une VAN positive peut-elle facilement devenir négative en changeant nos hypothèses de départ ? Quelles sont les paramètres qui ont le plus d'impact sur la valeur de la VAN ?

## Étude et analyse du cas présenté

### Les projets évalués

L'analyse présentée dans cet article repose sur une analyse de projets d'aménagements d'un petit bassin versant du sud de la France d'environ 400 km<sup>2</sup> soumis à un risque de crues rapides. Associée à une zone karstique, la rivière possède un comportement à seuil. Le débit de pointe dans la partie aval du bassin augmente brusquement entre la crue décennale ( $Q_{10}$ ) et la crue cinquantennale ( $Q_{50}$ ), passant de 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à 300 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Il s'élève à 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour une crue centennale ( $Q_{100}$ ). En conséquence du comportement à seuil, il n'existe qu'un faible écart entre les zones inondées par  $Q_{50}$  et  $Q_{100}$ .

Globalement, l'impact des inondations est important sur le bassin versant : plus du trois quart du bassin se trouve en zone inondable et un cinquième de la zone inondable se situe en zone urbaine, où les dommages potentiels sont élevés. Pour faire face à ce risque naturel, le gestionnaire du bassin versant met actuellement en place un programme d'actions de prévention des inondations (PAPI).

L'évaluation économique présentée ici porte sur la partie aménagement du PAPI, qui comprend deux grandes phases :

– **phase 1 : aménagement morphologique de la rivière.** Cette première phase vise à supprimer les débordements les plus fréquents, liés à des crues décennales. Les coûts d'investissement de cette

phase s'élèvent à environ cinq millions d'euros hors taxes (comprenant l'aménagement et les acquisitions foncières). Les coûts d'entretien sont estimés à environ 5 % du montant des investissements hors foncier (1,5 % pour l'entretien et la surveillance des ouvrages hydrauliques ; 3,5 % pour leur maintenance ou leur remise en état suite à d'éventuelles crues) ;

– **phase 2 : création de bassins de stockage et construction d'un chenal de contournement d'un village.** Ces mesures ne sont considérées qu'après réalisation de la phase 1. Elles ont pour objectif de maîtriser les écoulements pour des crues de type  $Q_{20}$ . Les coûts d'investissement de cette phase sont estimés à environ neuf millions d'euros hors taxes, les coûts d'entretien sont calculés comme précédemment.

Dans la suite du document, nous analyserons trois scénarios d'aménagement, qui correspondent au cas suivants :

– **scénario 1** : passage de la situation actuelle (état 0) à la situation avec les aménagements phase 1 (état 1) ;

– **scénario 2** : passage de l'état 1 à l'état 2 (état 1 modifié par les aménagements de la phase 2) ;

– **scénario 3** : passage de l'état 0 à l'état 2.

Pour chacun des états précisés, l'évaluation des dommages a été réalisée en croisant l'étendue cartographiée des hauteurs maximales de submersion pour trois crues simulées  $Q_{10}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{50}$  et  $Q_{100}$  avec l'occupation du sol du territoire inondé. Dans le traitement de l'occupation du sol, trois types d'enjeux ont été distingués : habitat, activités économiques et parcelles agricoles. Les courbes d'endommagement utilisées sont semblables à celles de Erdlenbruch *et al.* (2008). Nous avons décrit le pouvoir endommageant d'une très grande crue ( $Q_{\infty}$ ) en appliquant un coefficient correcteur à la crue centennale de l'état 0. Ce coefficient est appelé le « coefficient à l'infini » dans la suite. Pour chacun des scénarios, les dommages évités ont été calculés comme la différence entre l'état de départ et l'état d'arrivée.

Le tableau 1 indique les valeurs clés de chacun des scénarios : les coûts d'investissement et d'entretien des aménagements ; le *DEMA* ; ainsi que la VAN et le ratio *R*, calculés selon les formules décrites plus haut.

▼ Tableau 1 – Valeurs clés de l'ACB de chacun des scénarios, en millions d'euros.

Projet	CI	CE	DEMA	VAN	R
Scénario 1	5,34	0,18	0,47	1,86	1,19
Scénario 2	8,75	0,25	0,80	4,62	1,31
Scénario 3	14,09	0,42	1,27	6,48	1,27

### Paramètres considérés, plages de variation et distribution

Les tableaux 2 et 3 donnent les paramètres qui ont été utilisés dans le calcul de la VAN sur notre cas d'étude. Ces paramètres ne sont pas complètement génériques d'une étude à une autre, en revanche les familles de paramètres le sont.

#### PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES

Dans notre étude, nous n'avons pas la possibilité d'avoir accès au modèle hydraulique utilisé pour générer les enveloppes de crues. Nous n'avons donc considéré comme paramètres pouvant être imprécis que les seules périodes de retour des événements simulés  $T_{12}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{100}$ . Nous considérons en outre que la période de retour de la première crue dommageable n'est pas toujours connue et, pour la plupart du temps, remplacée par la crue « débordante ». Comme la phase 2

visé à empêcher tout débordement avant la crue de période de retour 20, nous avons deux valeurs pour la crue débordante :  $Tdeb_1$  pour les états 0 et 1,  $Tdeb_2$  pour l'état 2.

Nous disposons également des informations pour la crue décennale  $Q_{10}$  que nous n'avons pas mobilisées pour cette étude. La raison tient au traitement indépendant que nous avons fait des incertitudes concernant les paramètres liés au période de retour. La prise en compte de  $Q_{10}$  impliquait un ajustement post-tirage de certains paramètres : pour des questions de cohérence, il faut que  $Tdeb_1 < T_{10} < T_{12}$ . Ces paramètres devenaient pour le coup corrélés. Cette corrélation n'est pas compatible avec la méthode de traitement que nous avons mobilisée pour l'analyse de sensibilité. Une possible façon de remédier à ce problème est discutée en conclusion.

#### PARAMÈTRES LIÉS AUX COÛTS

Nous sommes partis des valeurs estimées pour les coûts d'investissement (comprenant les coûts liés à la réalisation des aménagements et des acquisitions foncières). Pour les coûts d'entretien, nous rappelons qu'ils sont calculés comme un certain montant  $TE$  des seuls coûts des aménagements. Nous avons considéré que ce taux  $TE$  était le paramètre imprécis.

Paramètres hydrologiques					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$Tdeb_1$	8	6	10	Année	Première crue dommageable (état 0 et 1)
$Tdeb_2$	20	16	24	Année	Première crue dommageable (état 2)
$T_{12}$	12,5	10	15	Année	Période de retour d'une crue historique
$T_{50}$	50	40	60	Année	Période de retour de la crue intermédiaire
$T_{100}$	100	80	120	Année	Période de retour de la crue forte
Paramètres liés aux coûts des scénarios					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$CI_1$	5,34	4,27	6,41	Millions €	Investissement (scénario 1)
$CI_2$	8,75	7	10,5	Millions €	Investissement (scénario 2)
$CHF_1$	3,5	2,8	4,2	Millions €	Investissement hors foncier (scénario 1)
$CHF_2$	4,9	3,92	5,88	Millions €	Investissement hors foncier (scénario 2)
$TE$	0,05	0,03	0,07	%	Taux d'entretien
Autre paramètre					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$N$	60	30	90	Année	Durée de vie du projet

◀ Tableau 2 – Plage de variations des paramètres hors ceux liés aux dommages.

▼ Tableau 3 – Paramètres intervenant dans l'estimation des dommages.

Nous aurions pu décomposer les coûts d'investissement selon leurs deux composantes : coûts liés à la réalisation des aménagements d'une part et coûts d'acquisition foncières d'autre part, et faire varier ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Nous ne l'avons pas fait. Concernant le calcul des coûts d'entretien, ceci revient à considérer que, même si les coûts totaux d'investissements sont imprécis, le rapport

entre les coûts des aménagements et coûts totaux d'investissement est un paramètre fixé.

#### PARAMÈTRES LIÉS À L'ÉVALUATION DES DOMMAGES

Le calcul des dommages comprend de nombreuses étapes où interviennent de multiples facteurs d'incertitude. À chaque enjeu est appliqué un modèle particulier, qui explique les dommages

Paramètres liés aux dommages sur le bâti					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$bati_0$	100	80	120	€	Intersect de la courbe des dommages
$bati_p$	48	39	57	€/m	Pente de la courbe des dommages
surelevation_Q1	0,35	0,28	0,42	m	Surélévation centre-ville commune 1
surelevation_Q2	0,3	0,24	0,36	m	Surélévation vieux lotissement
surelevation_Q3	0,6	0,48	0,72	m	Surélévation lotissement récent
surelevation_Q4	0,2	0,16	0,24	m	Surélévation autres quartiers
surelevation_Q5	0,15	0,12	0,18	m	Surélévation centre-ville commune 2
surelevation_Q6	0,3	0,24	0,36	m	Surélévation lotissement année 70
rdc_Q1	0,5	0,4	0,6	%	% RdC habité centre-ville commune 1
rdc_Q2	0,95	0,76	1	%	% RdC habité vieux lotissement
rdc_Q3	0,92	0,74	1	%	% RdC habité lotissement récent
rdc_Q4	0,95	0,76	1	%	% RdC habité autres quartiers
rdc_Q5	0,7	0,56	0,84	%	% RdC habité centre-ville commune 2
rdc_Q6	0,95	0,76	1	%	% RdC habité lotissement année 70
Paramètres liés aux dommages hors bâti					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$DA0_{010}$	0,09	0,07	0,11	Millions €	Dommage état 0 pour $T_{10}$
$DA0_{012}$	0,13	0,1	0,16	Millions €	Dommage état 0 pour $T_{12}$
$DA0_{050}$	0,2	0,16	0,24	Millions €	Dommage état 0 pour $T_{50}$
$DA0_{100}$	0,31	0,25	0,37	Millions €	Dommage état 0 pour $T_{100}$
$DA1_{010}$	0,03	0,02	0,04	Millions €	Dommage état 1 pour $T_{10}$
$DA1_{012}$	0,05	0,04	0,06	Millions €	Dommage état 1 pour $T_{12}$
$DA1_{050}$	0,25	0,2	0,3	Millions €	Dommage état 1 pour $T_{50}$
$DA1_{100}$	0,36	0,29	0,43	Millions €	Dommage état 1 pour $T_{100}$
$DA2_{050}$	0,13	0,1	0,16	Millions €	Dommage état 2 pour $T_{50}$
$DA2_{100}$	0,2	0,16	0,24	Millions €	Dommage état 2 pour $T_{100}$
Autre paramètre					
Nom	Valeur	Minimum	Maximum	Unité	Intitulé
$C_\infty$	2	1	3		Coefficient pour $Q_\infty$

potentiels des crues en fonction des caractéristiques de submersion. Ainsi, pour les dommages aux bâtis, la même courbe d'endommagement a été appliquée sur la zone (une fonction affine avec pour valeur à l'origine  $bati_0$  et pente  $bati_p$ ). Mais comme les dommages sont liés à la hauteur de la submersion effective au niveau du premier plancher habité, des paramètres comme la hauteur des planchers (*surelevation*) ou le taux d'occupation des rez-de-chaussée (*rdc*) prennent alors toute leur importance. Ces paramètres ont été définis par enquête suite à un découpage de la zone en quartiers homogènes.

Nous rappelons que pour évaluer les dommages évités, l'occupation du sol a été caractérisée par groupe d'enjeux comprenant, outre le bâti, les cultures agricoles, les activités économiques et commerciales et les réseaux. Toutefois, comme les dommages autres que ceux liés au bâti n'étaient pas importants en valeur, nous avons décidé de simplifier l'analyse en ne considérant finement que les paramètres explicatifs des dommages aux bâtis. Pour les autres postes, nous avons considéré comme paramètres d'imprécision les valeurs calculées (*DA*) avec les valeurs initiales.

#### PARAMÈTRES LIÉS À L'ACTUALISATION

Le calcul de la VAN suppose le choix d'un horizon temporel du projet et l'application d'un taux d'actualisation. Le Commissariat général du plan (maintenant remplacé en 2006 par le Centre d'analyse stratégique) a préconisé en 2005 un taux d'actualisation pour des projets publics (Lebègue *et al.*, 2005), que nous adoptons par la suite comme paramètre fixé. L'horizon temporel ne peut être changé que dans la mesure où l'hypothèse de l'invariabilité de l'occupation du sol peut être maintenue.

#### PRINCIPES DE VARIATION DES PARAMÈTRES

En plus des valeurs considérées dans le calcul initial de la VAN, les tableaux 2 et 3 donnent également les plages de variation des paramètres pour les analyses d'incertitude et de sensibilité.

En l'absence d'une spécification précise des marges d'imprécision dans l'estimation des valeurs des différents paramètres, l'idée générale retenue a été d'affecter une variation de plus ou moins 20 % aux valeurs de base. Certains paramètres ont des variations plus importantes, comme  $C_\infty$  qui varie de 1 à 3, le taux d'entretien de 3 % à 7 % ou l'horizon temporel de 30 à 90 ans. Ces variations sont indépendantes les unes des autres.

Le choix de ces taux de variations ne s'appuie pas sur une estimation précise des plages de variation des différents paramètres. Nous avons choisi des paramètres d'imprécision comparables pour les différents paramètres pour mesurer, à imprécision égale l'importance de chacun des paramètres dans le calcul final.

## Analyse d'incertitude

### Principes

Le principe de l'analyse d'incertitude d'un output (par exemple la VAN) consiste à considérer que les paramètres utilisés pour son calcul sont en fait des valeurs particulières tirées dans une loi de distribution propre à chaque paramètre. Ces valeurs particulières sont celles qui nous semblent les plus probables. Mais nous aimerions analyser les valeurs que prendraient la VAN si nous prenions d'autres valeurs pour les paramètres. Pour tenir compte du fait qu'il est fort peu probable que tous les paramètres soient à leur valeur minimum (ou maximum) en même temps, une façon rigoureuse de procéder est d'effectuer des tirages aléatoires des valeurs de paramètres une fois leur loi de distribution donnée.

Il a été choisi de considérer une distribution de type triangulaire (avec comme paramètres les valeurs minimales, maximales et centrées du tableau 2), ce qui revient à considérer que les valeurs minimales et maximales de chacun des paramètres d'entrée sont des valeurs qui ne peuvent pas être dépassées et qu'il est plus probable de rencontrer des valeurs proches de la valeur centrée.

Nous avons procédé à un tirage de 100 000 jeux de paramètres, ce qui nous a semblé un bon compromis entre temps de calcul (de l'ordre de l'heure) et précision (sur une moyenne, on s'attend à une précision supérieure à 1 %.) Pour chacun des paramètres, les tirages se font indépendamment des autres paramètres.

### Résultats

Le tableau 4 donne les principales statistiques des différents outputs que nous avons considérés. Une représentation graphique sous forme d'histogramme est disponible sur la figure 1.

Dans le tableau 4, nous pouvons constater que ce sont les VAN qui ont les distributions les plus étalées et les plus dispersées. La VAN totale est

d'ailleurs elle-même plus étalée que les VAN des étapes 1 et 2, alors que cette caractéristique ne se retrouve pas pour les DMA, DEMA et R. Nous constatons également que les valeurs calculées avec les paramètres initiaux ne sont pas sensiblement différentes des moyennes et médianes des distributions correspondantes, sauf pour les VAN où les valeurs moyennes et médianes sont plus faibles.

Concernant plus particulièrement les VAN (respectivement les rapports R), une certaine proportion de leur distribution est dans le négatif (respectivement inférieure à 1), ce qui est représenté en bleu sur les graphiques de la figure 1. Dans ce cas, le projet ne remplit pas la condition d'efficacité économique. Une première conclusion est donc que l'efficacité des projets n'est pas garantie à 100 %. Cette proportion négative n'est pas la même selon les étapes : la VAN de l'étape 1 a 21 % de ses valeurs négatives, contre environ 9 % pour les VAN des étapes 2 et 3. Il apparaît donc clairement que les résultats trouvés pour l'étape 1 sont beaucoup plus fragiles que ceux des étapes 2 et 3.

Nous insistons d'ailleurs particulièrement sur un point : la fragilité des résultats de l'analyse n'est pas directement corrélée aux valeurs calculées ni en valeur absolue (VAN) ni en relatif (R). Ainsi, la VAN de l'étape 3 est supérieure à celle de l'étape 2, alors que ces deux outputs ont la même proportion de valeurs négatives ; les différents rapports calculés pour les différentes étapes ont des distributions qui peuvent paraître semblables de prime abord, alors que la proportion de valeurs inférieures à 1 est très différente entre l'étape 1 et les autres étapes.

Suite à cette première analyse des incertitudes, nous pouvons également nous demander quels paramètres de la VAN ont le plus d'impact sur son résultat final.

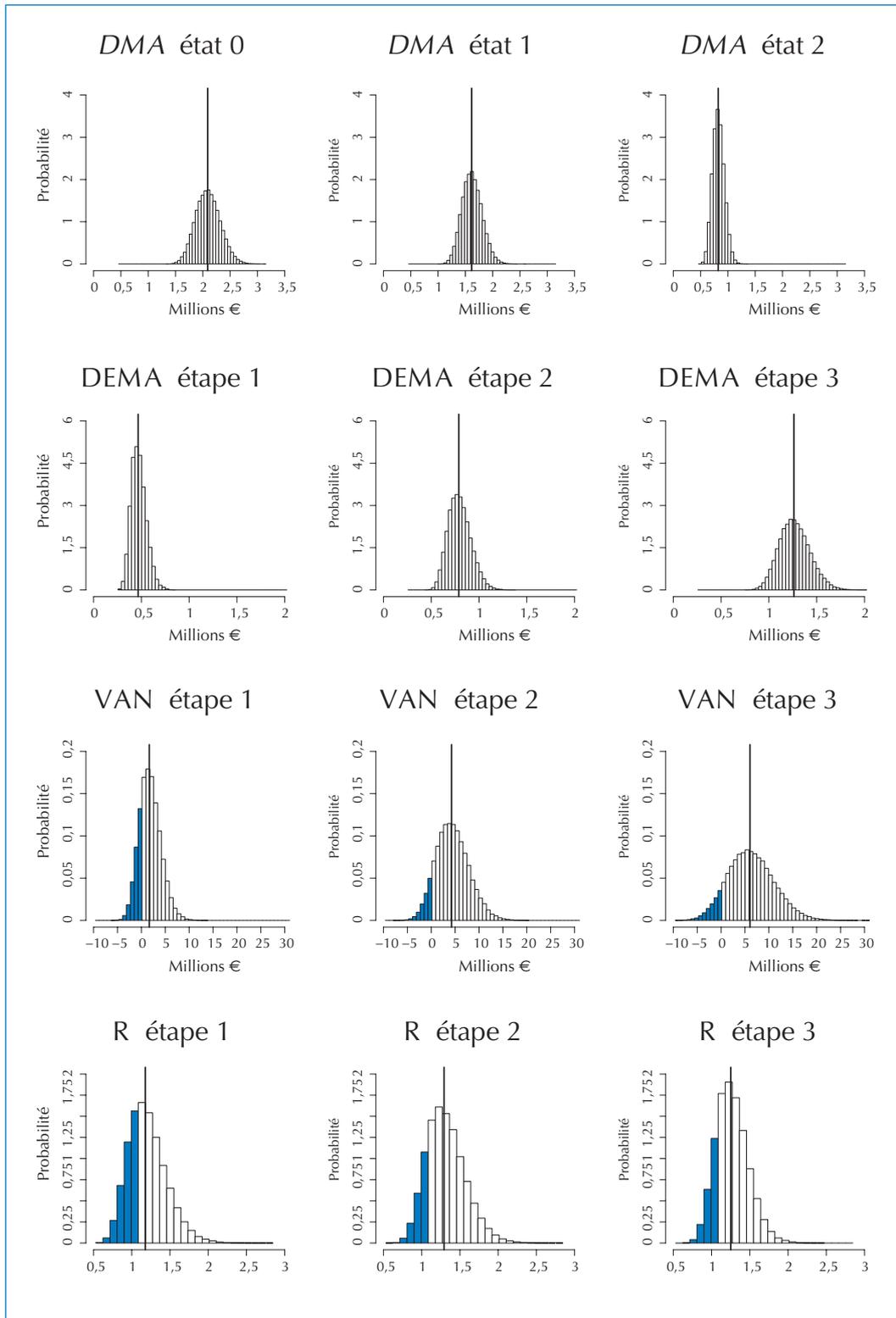
## Analyse de sensibilité

### Principes

Le principe de l'analyse de sensibilité consiste à expliquer la variance des outputs par celles des paramètres. L'output est sensible à un paramètre,

▼ Tableau 4 –  
Statistiques des  
différentes variables  
cibles (millions €).

Principales statistiques des DMA pour les différentes étapes							
	Valeur initiale	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum	
DMA état 0	2,10	2,10	0,22	2,09	1,33	3,16	
DMA état 1	1,63	1,63	0,18	1,61	1,02	2,57	
DMA état 2	0,83	0,83	0,11	0,82	0,46	1,34	
Principales statistiques des DEMA pour les différentes étapes (millions €)							
	Valeur initiale	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum	
DEMA état 1	0,47	0,47	0,08	0,47	0,26	0,82	
DEMA état 2	0,80	0,80	0,12	0,79	0,44	1,37	
DEMA totale	1,27	1,27	0,16	1,26	0,77	2,02	
Principales statistiques des VAN pour les différentes étapes							
	Valeur initiale	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum	% négatif
VAN état 1	1,86	1,81	2,24	1,67	- 5,68	13,38	21 %
VAN état 2	4,62	4,44	3,42	4,26	- 7,19	20,43	9 %
VAN totale	6,48	6,26	4,79	6,04	- 9,62	31,06	9 %
Principales statistiques des rapports pour les différentes étapes							
	Valeur initiale	Moyenne	Écart-type	Médiane	Minimum	Maximum	% < 1
R état 1	1,19	1,20	0,25	1,18	0,53	2,85	21 %
R état 2	1,31	1,32	0,25	1,29	0,60	2,81	9 %
R totale	1,27	1,27	0,21	1,25	0,64	2,42	9 %



▲ Figure 1 – Histogrammes des différents outputs.

si une bonne partie de sa variance est expliquée par celle du paramètre. Ceci sert à caractériser les paramètres dont il est stratégique de préciser la valeur.

D'un point de vue technique, nous avons suivi la méthode présentée par Saltelli *et al.* (2007) qui consiste à calculer les indices de sensibilité de chacun des paramètres. L'intérêt de la méthode présentée par Saltelli est que l'indicateur calculé est valable en considérant l'ensemble des distributions de chacun des paramètres. Dans ce sens, sa signification est globale. Nous aurions pu également (et nous l'avons fait dans une étape préliminaire) regarder des indicateurs valables pour un paramètre lorsque les valeurs des autres paramètres sont fixées, mais cette façon de procéder masque les effets impliqués par la relation non linéaire entre les *DMA*, *DEMA*, *VAN* et les paramètres d'entrée.

Les indices de sensibilité proposés par Saltelli sont donnés par la formule suivante.

$$S_i = \frac{\text{Var}(E(Y|x_i))}{\text{Var}(Y)} \quad (7)$$

4. Le seuil choisi était que  $S_i > 0,01$ . Si toutes les paramètres avaient la même importance, on aurait  $S_i = 0,03$  uniformément.

▼ Tableau 5 – Sensibilité des *DMA*, *DEMA*, *VAN* aux paramètres (seuls les paramètres influents sont présentés).

Où :

–  $Y = f(x_1, \dots, x_n) = f(X)$  est l'output dépendant des paramètres  $(x_1, \dots, x_n)$  ;

–  $\text{Var}(E(Y/x_i)) = \text{Var}_{x_i}(E_{x_{-i}}(Y/x_i))$  ;

–  $S_i$  est l'indice de sensibilité du paramètre  $i$ .

Ces indices ont la propriété suivante.

$$\sum_i S_i \leq 1 \quad (8)$$

Pour le calcul effectif de ces indices, nous avons utilisé une technique d'estimation inspirée de Saltelli *et al.* (2007, p. 164-167) basée sur des échantillonnages des paramètres suivant des tirages de Monte-Carlo.

## Résultats

Le tableau 5 présente les résultats de l'analyse de sensibilité. Seuls les paramètres ayant effectivement une importance pour l'un des outputs sont retenus<sup>4</sup>.

Les paramètres liés aux périodes de retour sont plus importants pour les faibles périodes de retour ( $T_{deb_1}$ ,  $T_{deb_2}$ ,  $T_{12}$ ). Concernant l'impor-

	<i>DMA</i> <sub>0</sub>	<i>DMA</i> <sub>1</sub>	<i>DMA</i> <sub>2</sub>	<i>DEMA</i> <sub>1</sub>	<i>DEMA</i> <sub>2</sub>	<i>DEMA</i> <sub>3</sub>	<i>VAN</i> <sub>1</sub>	<i>VAN</i> <sub>2</sub>	<i>VAN</i> <sub>3</sub>
<i>Tdeb</i> <sub>1</sub>	0,08	-	-	0,66	-	0,16	0,45	-	0,10
<i>Tdeb</i> <sub>2</sub>	-	-	0,05	-	0,04	0,02	-	0,03	0,01
<i>T</i> <sub>12</sub>	0,17	0,27	-	-	0,64	0,34	-	0,42	0,21
<i>T</i> <sub>50</sub>	0,01	0,02	0,04	0,01	-	-	0,01	-	-
<i>T</i> <sub>100</sub>	-	0,01	0,04	-	-	-	-	-	-
<i>Cl</i> <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	0,12	-	0,03
<i>Cl</i> <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0,12	0,06
<i>TE</i>	-	-	-	-	-	-	0,10	0,09	0,13
<i>N</i>	-	-	-	-	-	-	0,08	0,12	0,15
<i>C</i> <sub>∞</sub>	0,09	0,14	0,40	-	-	-	-	-	-
<i>bati</i> <sub>0</sub>	0,38	0,33	0,26	0,20	0,18	0,28	0,14	0,12	0,19
<i>bati</i> <sub>p</sub>	0,02	0,02	0,01	-	0,01	0,01	-	0,01	0,01
<i>rdc</i> _Q4	0,21	0,17	0,14	0,12	0,09	0,15	0,08	0,06	0,10
<i>rdc</i> _Q6	0,01	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-
<i>h</i> _Q6	0,01	0,01	0,02	-	0,01	-	-	-	-
Total	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98

tance relative de  $T_{12}$  par rapport à celle de  $T_{50}$  et  $T_{100}$ , l'interprétation doit être tempérée. Il est en effet important de signaler qu'une analyse de sensibilité dépend des lois de distribution utilisées (mécaniquement, plus un paramètre est précis, moins il aura d'importance dans l'analyse de sensibilité). Nous avons considéré que  $T_{12}$ ,  $T_{50}$  et  $T_{100}$  avaient la même imprécision, alors qu'il est fort probable que  $T_{12}$  soit connu avec une meilleure précision. Par contre, comme les événements créant les premiers dommages ne sont pas connus avec une grande précision, nos résultats permettent de montrer que ces événements sont effectivement très importants pour tous les indicateurs présentés. Ceci est d'autant plus valable lorsque, comme dans notre exemple, les scénarios évalués visent à prévenir les crues les plus faibles.

Les paramètres liés aux coûts des projets et à l'actualisation, qui n'interviennent que dans le calcul des VAN, sont systématiquement importants. À ce titre, notons que l'importance de l'horizon temporel  $N$  milite pour l'établissement d'une norme nationale, afin de pouvoir comparer aisément entre eux les projets de même nature. Nous remarquons également que la connaissance des coûts liés à l'entretien ( $TE$ ), très souvent négligée dans les projets, est systématiquement importante.

Comme nous pouvions nous y attendre, les paramètres liés aux dommages des autres secteurs que l'habitat n'ont pas d'importance, ce qui justifie *a posteriori* le choix de ne pas rentrer dans le détail des paramètres sous-jacents à leur calcul. Ceci n'est bien entendu valable que sur notre site d'étude.

Dans les paramètres liés à l'habitat, le paramètre qui a le plus d'importance est  $bati_v$ , qui correspond au dommage pour une hauteur de submersion faible. Notons toutefois que les paramètres de typologie de l'habitat peuvent également avoir leur importance, notamment  $rdc\_Q4$ , le % de premier niveau utilisé pour l'habitat dans la zone 4, dont la superficie inondée est la plus importante.

Cette analyse permet de confirmer, avec rigueur, que les paramètres importants ne sont pas les mêmes selon qu'on cherche à effectuer un diagnostic d'un territoire exposé aux inondations ( $DMA$ ) ou à analyser la pertinence d'une politique de gestion des inondations ( $VAN$ ). Ceci est particulièrement frappant pour les dommages

générés par la crue dite infinie. Ce paramètre est systématiquement important pour le calcul des  $DMA$ , d'autant plus que le risque résiduel est expliqué par les crues les plus rares. Ce paramètre n'a aucune influence sur les  $DEMA$  et donc les  $VAN$ .

Nous remarquons également que la précision des périodes de retour est plus importante pour le calcul des bénéfices des projets ( $DEMA$ ) et de leur efficacité ( $VAN$ ) que pour celui des seuls  $DMA$ .

## Conclusion

Prendre des décisions d'aménagement à partir d'un indicateur synthétique, comme celui issu de l'ACB, signifie se fier à la fiabilité de la valeur calculée. L'analyse d'incertitude a permis de quantifier la précision de cette valeur. Certes, la VAN des différentes étapes du projet est positive avec les valeurs de départ et chacune de ces étapes est donc considérée comme économiquement efficiente. En admettant que la marge de précision des différents paramètres est à  $\pm 20\%$ , les différentes VAN peuvent alors devenir négatives : dans 21 % des cas, pour l'étape 1 qui évalue la mise en place d'un aménagement morphologique de la rivière ; dans 9 % des cas, si l'on y ajoute avec l'étape 2 la création de bassins de stockage et d'un chenal de contournement d'un village. Qui plus est, on peut considérer que ce résultat est issu d'un cas favorable, car dans le traitement des incertitudes, les valeurs initiales des paramètres ont été considérées comme les valeurs centrales de leurs variations. Notre analyse a montré que la VAN est un indicateur relativement étalé en comparaison d'autres indicateurs, comme les  $DMA$  ou  $DEMA$ . Ceci signifie que la combinaison des imprécisions des coûts (investissement et entretien), de l'horizon temporel et des dommages, influent de façon importante sur la dispersion des résultats.

L'analyse de sensibilité a permis de définir les sources d'incertitude des résultats : les périodes de retour des faibles crues sont des facteurs d'incertitude pour le calcul de tous les indicateurs ( $VAN$ ,  $R$ ,  $DEMA$ ,  $DMA$ ). Le coefficient des crues à l'infini est important pour le calcul des dommages. Le paramètre correspondant aux dommages aux bâtis pour une hauteur de submersion faible, et dans une moindre mesure les paramètres liés à la séparation par quartiers, sont les principales sources d'incertitude dans le calcul de la VAN.

L'analyse de sensibilité milite alors pour des études supplémentaires afin de mieux qualifier ces paramètres sources d'incertitude.

De même, notre étude a mis en évidence la forte répercussion d'une variation des coûts d'entretien des ouvrages sur les valeurs de VAN calculées. Encore aujourd'hui, les coûts d'entretien annuel des ouvrages de génie civil en projet sont le plus souvent évalués très grossièrement en termes de ratio par rapport à leur coût de construction. Progresser sur la finesse d'évaluation des coûts d'entretien est devenu d'autant plus prioritaire que les obligations des propriétaires en la matière viennent d'être significativement renforcées par le tout récent décret du 11 décembre 2007 sur la sécurité des barrages et des digues et son arrêté d'application du 29 février 2008.

Au niveau méthodologique, il reste à qualifier l'impact des lois de distribution utilisées pour les paramètres sur les résultats. Lorsque c'est possible, un effort doit donc être porté sur la qualification de l'incertitude (distribution) pour chacun des paramètres considérés. Nous avons également considéré que les distributions des paramètres étaient indépendantes, ce qui peut, pour certains d'entre eux prêter à discussion. Il est par exemple envisageable que chacun des groupes de paramètres (périodes de retour, coûts et bénéfices) aient une part d'imprécision commune. Ceci nous semble particulièrement être le cas pour les périodes de retour qui sont calées sur une même famille de chroniques pour un bassin versant donné.

Nous n'avons pas complètement pris en compte toutes les incertitudes spatiales. Il serait par exemple intéressant de faire varier les limites spatiales (position des enjeux, limites des enveloppes de crues) en se basant sur des méthodes de représentation des incertitudes d'objets ou champs géographiques (Chilès et Delfiner, 1999 ; Brown et Heuvelink, 2007) ou d'effectuer une analyse de sensibilité en se basant sur un échantillonnage dans l'espace des paramètres (Helton et Davis, 2006 ; Saltelli *et al.*, 2000). Ceci serait un moyen d'introduire une analyse de sensibilité qui comprendrait les sorties du

modèle hydraulique, ce que nous n'avons pas fait dans cette étude.

Les modèles sous-jacents à l'analyse coût-bénéfice peuvent également être affinés : par exemple, la connaissance de l'aléa de rupture d'ouvrage est un élément-clé, tant au niveau hydraulique qu'au niveau des dommages économiques. Dans le modèle présenté ici, aucune distinction n'a été faite entre la crue de projet de protection (celle pour laquelle l'efficacité des ouvrages hydrauliques est maximale vis-à-vis des enjeux à protéger) et la crue de danger de rupture (celle pour laquelle l'aménagement hydraulique commence à connaître des désordres, pouvant conduire à sa rupture). Cette simplification est particulièrement réductrice pour certaines digues existantes, pour lesquelles, en l'absence de déversoir de sécurité « crue de projet de protection » et « crue de danger de rupture » sont très proches en intensité. Pourtant, l'aléa d'inondation résultant d'une rupture de l'ouvrage a des conséquences bien plus sévères pour les enjeux à proximité qu'une simple submersion.

La relative imprécision de la VAN ne doit surtout pas être considérée comme une condition rédhibitoire à son utilisation pour appuyer la décision publique, bien au contraire. La VAN représente de la façon la plus synthétique possible la balance entre les avantages et les inconvénients d'une politique qu'il s'agit d'évaluer. Bien qu'il soit, de prime abord, plus confortable de ne discuter que sur un chiffre précis, la représentation de l'imprécision combinée de toutes les expertises nécessaires à son élaboration apporte un éclairage instructif sur les limites d'une décision reposant sur la seule expertise scientifique. Dans notre exemple, il s'avère que les marges de précision des paramètres impliquent que les VAN aient une partie de leur distribution dans le négatif ; rien n'interdit, *a priori*, d'obtenir des résultats montrant que sur un autre cas d'étude la distribution soit entièrement dans le positif. Travailler sur les analyses d'incertitude et de sensibilité demande aussi une réflexion sur la bonne manière de communiquer les résultats. À l'heure actuelle, les commanditaires ont peu l'habitude de manier des intervalles de confiance, plutôt que des résultats uniques. □

---

#### Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été en partie financés par le programme de recherche « Risque, décision, territoire » du MEEDDAT, l'autre partie provenant du syndicat du bassin versant qui nous a servi de cas d'étude.

---

### Résumé

L'analyse coût-bénéfice basée sur la simulation des dommages évités permet d'obtenir des indicateurs synthétiques sur l'exposition d'un territoire aux inondations (les dommages moyens annualisés), ainsi que l'intérêt ou non de mener une politique de prévention des inondations (les dommages évités moyens annualisés, la valeur actuelle nette). Ces indicateurs sont issus de la combinaison de modélisations hydrologiques, hydrauliques, géographiques et économiques d'un territoire. Bien qu'il soit recommandé d'en étudier la précision et la sensibilité, cette étape n'est que très rarement effectuée en pratique, notamment du fait de la complexité de la combinaison des différents modèles mobilisés. Dans cet article, au travers d'un exemple, nous proposons une approche reposant sur la technique de Monte-Carlo et analysons les enseignements concernant la validité des indicateurs.

### Abstract

Cost-Benefit Analysis based on the damage avoided approach gives rise to several synthetic indicators measuring either the flood exposure of an area (mean annual damage), or the interest to conduct a flood prevention policy (mean annual damage avoided, net present value). Those indicators are the outcome of a combination of hydrological, hydraulic, geographic and economic models. Although it is recommended to study the precision of these indicators, this is rarely done in practice, as the combined models which are needed are relatively complex. In this article, we present an approach which is based on Monte-Carlo analysis, and discuss the insights which can be drawn from it on the validity of the indicators.

### Bibliographie

- AERTS, J.-C.-J.-H., HEUVELINK, G.-B.-M., GOODCHILD, M.-F., 2003, Accounting for spatial uncertainty in optimization with spatial decision support systems, *Transactions in GIS*, 7(2), p. 211-230.
- AHMAD, S.-S., SIMONOVIC, S.-P., 2007, A methodology for spatial fuzzy reliability analysis, *Applied GIS Journal*, 3(1), p. 1-42.
- APEL, H. et al., 2004, Flood risk assessment and associated uncertainty, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2), p. 295-308.
- BOURNOT, A., 2008, *Évaluation de la pertinence des mesures de gestion du risque d'inondation. Manuel des pratiques existantes*, rapport technique, CEPRI.
- BRIANT, M.-J., 2001, *Hec-fda sensitivity and uncertainty analysis*, Research Document 46, USACE Hydrologic Engineering Center (HEC).
- BROWN, J.-D., HEUVELINK, G.-B.-M., 2007, On the identification of uncertainties in spatial data and their quantification with probability distribution functions, in : WILSON, J.-P., FOTHERIGHAM, A.-S., eds, *The Handbook of Geographic Information Science*, p. 94-107, Blackwell.
- BROWN, J.-D., HEUVELINK, G.-B.-M., 2007, The Data Uncertainty Engine (DUE) : A software tool for assessing and simulating uncertain environmental variables, *Computers and Geosciences*, 33(2), p. 172-190.
- CHEN, C., 2006, Comparison of methods for uncertainty analysis of hydrologic models, in : *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics*, HIC 2006, Nice.
- CHILÈS, J.-P., DELFINER, P.-P., 1999, *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*, New York, John Wiley and Sons.
- ERDLENBRUCH, K. et al., 2008, Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre des inondations. Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb, *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires*, n° 53, p. 3-20.

FLOODsite, 2007, *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*, Report T09-06-01.

HELTON, J.-C., DAVIS, F.-J., 2006, Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis, *Multimedia Environmental Models*, 32(2), p. 135-154.

KOK, M., COOKE, R.-M., 1997, Optimal decisions that reduce flood damage along the Meuse: an uncertainty analysis, *In The Practice of Bayesian Analysis*, p. 151-172.

LEBÈGUE, D., BAUMSTARK, L., HIRTZMAN, P., 2005, *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, rapport technique, Commissariat général du plan.

LEDoux, B., GRELOT, F., RELIANT, C., 2003, *Synthèse des évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations*, rapport technique, ministère de l'Écologie et du Développement durable – direction des Études économiques et de l'Évaluation environnementale, Paris, France.

MASKEY, S., PRICE, R.-K., 2004, Assessment of uncertainty in flood forecasting using probabilistic and fuzzy approaches, *in : International Conference on Hydroinformatics 2004*, 21-24 June, Singapore.

MERZ, B. *et al.*, 2004, Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), p. 153-163.

MOONEY, C.-Z., 1997, Monte Carlo Simulation, *Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences 07-116*, Sage, Thousands Oaks, Ca.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (éd.), 2000, *Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies*, Washington DC, National Academy Press.

PAPPENBERGER, F. *et al.*, 2008, Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models, *Advances in Water Resources*, n° 31, p. 1-14.

REFSGAARD, J.-C. *et al.*, 2007, Uncertainty in the environmental modelling process: A framework and guidance, *Environmental Modelling and Software*, n° 22, p. 1543-1556.

SALTELLI, A., CHAN, K., SCOTT, E.-M. (éds), 2000, *Sensitivity analysis*, Wiley Series in Probability and Statistics, Chichester, England : Wiley, 2000.

SALTELLI, A. *et al.*, 2007, *Global Sensitivity Analysis*, The primer, Wiley.

SARMENTO, P., CARRÃO, H., CAETANO, M., 2008, A fuzzy synthetic evaluation approach for land cover cartography accuracy assessment, *in : Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Shanghai, P. R. China, June 25-27, p. 348-355.

TORTEROTOT, J.-P., 1993, *Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes*, thèse de doctorat, spécialité Sciences et techniques de l'environnement, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2 volumes.

WEICHEL, T., PAPPENBERGER, F., SCHULZ, K., 2007, Sensitivity and uncertainty in flood inundation modelling-concept of an analysis framework, *Advances in Geosciences*, n° 11, p. 31-36.

WERNER, M.-G.-F., 2001, Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 26(7-8), p. 517-522.

WILSON, M.-D., ATKINSON, P.-M., 2003, Prediction Uncertainty in Elevation and its Effect on Flood Inundation Modeling, *in : Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on GeoComputation*, University of Southampton, United Kingdom, p. 8-10.

WOODHEAD, S., 2007, *Evaluation of Inundation Models - Limits and Capabilities of models*, FLOODsite, April 2007, Report T08-07-01, p. 18-19.