



HAL
open science

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

Frédéric Grelot, Jean-Stéphane Bailly, Céline Blanc, Katrin Erdlenbruch, Patrick Mériaux, Nathalie Saint-Geours, Remy Tourment

► To cite this version:

Frédéric Grelot, Jean-Stéphane Bailly, Céline Blanc, Katrin Erdlenbruch, Patrick Mériaux, et al.. Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice - Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2009, spécial La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues, pp.95-108. hal-00570346

HAL Id: hal-00570346

<https://hal.science/hal-00570346v1>

Submitted on 1 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sensibilité d'une analyse coût-bénéfice

Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations

Frdric Grelot*
Jean-Stphane Bailly†
Cline Blanc‡
Katrin Erdlenbruch‡
Patrice Mriaux§
Nathalie Saint-Geours¶
Rmy Tourment§

Version : December 16, 2008

Abstract

Cost-Benefit Analysis gives rise to a global indicator measuring the interest to conduct a flood prevention policy. The precision of the indicator, a combination of hydrological, hydraulic, geographic and economic knowledge, depends on the precision of the underlying information. As this combination is relatively complex, a systematic sensitivity analysis of the global indicator with respect to the precision of input variables is difficult. Monte-Carlo analysis allows a numerical analysis of the variability of the final indicator and gives important insights into its validity.

Résumé

L'analyse cot-bnfice permet d'obtenir un indicateur synthtique de l'intrt ou non de mener une politique de prvention des inondations. La prcision de l'indicateur, combinaison des connaissances hydrologiques, hydrauliques, gographiques et conomiques d'un territoire, est tributaire de la prcision de ces connaissances. Comme cette combinaison est relativement complexe, une analyse systmatique de la sensibilit de cet indicateur la prcision des paramtres d'entre est difficile. La technique de Monte-Carlo permet tout de mme une analyse numrique de la variabilit de l'indicateur final et donne des indications importantes sur la validit de l'indicateur.

*frederic.grelot@cemagref.fr, UMR G-EAU, Cemagref Montpellier, Corresponding author

†UMR TETIS, Cemagref

‡UMR G-EAU, Cemagref

§UR OHAX, Cemagref

¶AgroParisTech, ENGREF

1 Introduction

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 20 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 auquel. Par ailleurs, le Grenelle de l'Environnement souhaite que l'ensemble des parties prenantes soit associé. Ceci traduit bien une prise de conscience au plus haut niveau de l'échelle de la prise de décision.

La présentation d'une méthode d'analyse coût-bénéfice (ACB) pour l'évaluation économique d'un projet de protection contre les inondations a été réalisée dans l'article de Erdlenbruch et al. (2008) [EGGL08]. Au travers d'une étude de cas, sur le bassin versant de l'Orb, il a été montré que l'avantage majeur d'une analyse coût-bénéfice est de comparer au travers d'un indicateur synthétique les bénéfices et les coûts des projets évalués. Pourtant, cet avantage ne doit pas masquer 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.

C'est pourquoi nous proposons dans cet article, en complément du celui de Erdlenbruch et al. (2008) [EGGL08], une analyse de la précision de l'indicateur final 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 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 tapes, 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 [SRA⁺07]. Dans cet article, nous proposons une application de ces deux démarches. Pour ce faire, nous rappelons dans un premier temps les principes 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.

2 Précisions sur les méthodes

2.1 Quelques rappels sur le critère de décision d'une analyse cot-bénéfice

L'analyse cot-bénéfice est une méthode générale 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 tablit 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 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 généraux. En effet, les bénéfices sont estimés par les dommages vits 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.

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

Cette façon de mesurer les bénéfices, appelée aussi méthode des dommages vits, est décrite en détail dans l'article précédemment cité [EGGL08]. Rappelons juste que les DMA intègrent des informations sur l'ensemble de crues possibles d'un bassin versant, en pondrant les dommages potentiels qu'elles engendrent par leur probabilité d'occurrence, selon la formule 4.

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

O :

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

- T_d : priode de retour de la plus faible crue qui cre des dommages (dsigne par premiere crue dommageable dans la suite) ;
- $p(T)$: densit de probabilit de l'vnement de priode de retour T .

Dans la pratique, leur calcul est ralis en ne considrant qu'un nombre limit de crues bien choisies.

Les cots considrs consistent en les cots initiaux CI ncessaires la ralisation des amnagements, mais galement les cots venir d'entretien CE . Ceux-ci sont souvent considrs comme constants sur la dure, mme si leur volution possible ne pose aucun problme mthodologique particulier.

Au final, avec les hypothses de constance des bnfcies mesurs par les $DEMA$ et des cots d'entretien CE , les quations 1 et 2 deviennent respectivement les quations 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, mme si nous nous plaons clairement dans le cadre d'une valuation d'un aménagement visant modifier les inondations, l'ACB ne se rsume pas la seule balance des cots et bnfcies en lien direct avec les inondations. Mme si cela n'est pas l'objet de cet article, il s'agit galement de considrer tous les impacts positifs ou ngatifs induits par les amnagements, ds lors qu'ils sont montarisables, comme par exemple ceux sur l'environnement, sur le tourisme, etc.

2.2 Analyses d'incertitude et de sensibilit dans la littrature

La prise en compte de l'incertitude dans la gestion du risque d'inondation est une proccupation croissante l'chelon europen [FLO07]. Qualifier les sources d'incertitude d'un modle, quantifier la precision des rsultats 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 rduction du risque d'inondation, les sources d'incertitude entachant le rsultat final (la VAN du projet) sont nombreuses. tablir une typologie de ces sources d'incertitude est dj une tape importante : outre la distinction entre *variabilit naturelle* des phnomnes et *incertitude lie au manque de connaissance*, on doit aussi tablir l'origine de l'incertitude : rsolution et exactitude des paramtres d'entre du modle, voire la structure mme du modle [RvdSHV07]. L'volution des paramtres d'entre au cours du temps (changement d'occupation du sol par exemple) constitue aussi un facteur majeur d'incertitude [WPS07].

Pour analyser ces incertitudes, de nombreux travaux s'appuient sur une approche de Monte-Carlo [Moo97], qui consiste en plusieurs ralisations d'un mme modle suivant des jeux de paramtres d'entre tirs alatoirement, selon des lois de probabilit dfinies. Les corrélations existant entre les diffrents paramtres d'entre peuvent tre simules, l'aide de lois de

distribution conjointe. L'exploitation des résultats permet 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) [SCS00, HD06]. 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 existent¹, notamment celui de la logique floue [MP04, AS07].

Même si ces méthodes sont largement répandues dans le champ de la modélisation hydrologique et hydraulique [PBRM08, Che06, WPS07, Woo07], 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 [ATMB04] et aux Pays-Bas [KC97] : ces travaux aboutissent 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 vits, 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 [Bri01, Nat00]. Ces travaux prennent en compte l'incertitude liée aux courbes débit-fréquence, aux courbes débit-niveaux et l'évaluation des dommages [MKTS04]. D'autres études s'intéressent plus spécifiquement aux incertitudes caractéristiques spatiales [AHG03, WA03, Wer01, SCC08].

En France, malgré les travaux pionniers de Torterotot [Tor93], il est difficile de constater avec différents rapports commandités par le MEEDDAT [LGR03, Bou08] 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 ?

3 Le cas d'étude

3.1 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^2 soumis à un risque de crues rapides. Associée à une zone karstique, la rivière possède un comportement 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 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il s'élève à $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour

¹Le site 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.

une crue centennale (Q_{100}). En conséquence du comportement seuil, il n'existe qu'un faible cart entre les zones inondes 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 ce risque naturel, le gestionnaire du bassin versant met actuellement en place un Programme d'Actions de Prvention des Inondations (PAPI).

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

Phase 1 Aménagement morphologique de la rivière. Cette première phase vise supprimer les débordements les plus fréquents, liés des crues décennales. Les coûts d'investissement de cette phase s'évaluent environ 5 millions d'euros HT (comprenant l'aménagement et les acquisitions foncières). Les coûts d'entretien sont estimés 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 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 coulements pour des crues de type Q_{20} . Les coûts d'investissement de cette phase sont estimés environ 9 millions d'euros H.T, 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) 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 cartographique 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 celles de Erdlenbruch et al. [EGGL08]. Nous avons décrit le pouvoir endommageant d'une très grande crue (Q_{∞}) en appliquant un coefficient correcteur la crue centennale de l'état 0. Ce coefficient est appelé le coefficient 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.

Projet	C_I	C_E	$DEMA$	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

TAB. 1 – Valeurs clés de l’ACB de chacun des scénarios, en millions d’euros

Paramètres hydrologiques					
Nom	Valeur	Min	Max	Unité	Intitulé
T_{deb_1}	8	6	10	année	Première crue dommageable (état 0 et 1)
T_{deb_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	Min	Max	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)
T_E	0,05	0,03	0,07	%	Taux d’entretien
Autre paramètre					
Nom	Valeur	Min	Max	Unité	Intitulé
N	60	30	90	année	Durée de vie du projet

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

3.2 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
- paramètres liés aux coûts des scénarios
- paramètres liés à l’évaluation des dommages
- paramètres liés à l’actualisation

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_{012} , T_{050} , 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, remplace par la crue débordante. Comme la phase 2 vise à empêcher tout débordement avant la crue de période de retour 20, nous avons deux valeurs pour la crue débordante : T_{deb_1} pour les tats

0 et 1, $Tdeb_2$ pour l'état 2.

Nous disposions 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 différents paramètres : pour des questions de cohérence, il faut que $Tdeb_1 < T_10 < T_12$). Ces paramètres devenaient pour le coup corrigés. Cette corrélation n'est pas compatible avec les méthodes de traitement que nous avons mobilisées pour l'analyse de sensibilité. Une possible façon de remédier ce problème est discuté 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 T_E des seuls coûts des aménagements. Nous avons considéré que ce taux T_E était le paramètre imprécis.

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 les coûts totaux d'investissement est un paramètre fixe.

Paramètres liés à l'évaluation des dommages Le calcul des dommages comprend de nombreuses tapes où interviennent de multiples facteurs d'incertitude. Chaque enjeu est appliqué un modèle particulier, qui explique les dommages potentiels des crues en fonction des caractéristiques de submersion. Ainsi, pour les dommages aux bâtiments, 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 valuer les dommages vifs, 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 bâtiments. 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 a préconisé un taux d'actualisation uniforme pour des projets publics, que nous adoptons par la suite comme paramètre fixe. 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 paramtres En plus des valeurs considres dans le calcul initial de la *VAN*, les tableaux 2 et 3 donnent galement les plages de variation des paramtres pour les analyses d’incertitude et de sensibilit.

En l’absence d’une spcification prcise des marges d’imprcision dans l’estimation des valeurs des diffrents paramtres, l’ide gnrale retenue a t d’affecter une variation de plus ou moins 20% aux valeurs de base. Certains paramtres ont des variations plus importantes, comme C_∞ qui varie de 1 3, le taux d’entretien de 3% 7% ou l’horizon temporel de 30 90 ans. Ces variations sont indpendantes les unes des autres.

Le choix de ces taux de variations ne s’appuie pas sur une estimation prcise des plages de variation des diffrents paramtres. Nous avons choisi des paramtres d’imprcision comparables pour les diffrents paramtres pour mesurer, imprcision gale l’importance de chacun des paramtres dans le calcul final.

4 Analyse d’incertitude

4.1 Principes

Le principe de l’analyse d’incertitude d’un output (par exemple la *VAN*) consiste considrer que les paramtres utilis pour son calcul sont en fait des valeurs particulires tires dans une loi de distribution propre chaque paramtre. Ces valeurs particulires 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 paramtres. Pour tenir compte du fait qu’il est fort peu probable que tous les paramtres soient leur valeur minimum (ou maximum) en mme temps, une faon rigoureuse de procder est de procder des tirages alatoires des valeurs de paramtres une fois leur loi de distribution donne.

Il a t choisi de considrer une distribution de type triangulaire (avec comme paramtres les valeurs minimales, maximales et centres du tableau 2), ce qui revient considrer que les valeurs minimales et maximales de chacun des paramtres d’entre sont des valeurs qui ne peuvent pas tre dpassees et qu’il est plus probable de rencontrer des valeurs proches de la valeur centre.

Nous avons procde un tirage de 100 000 jeux de paramtres, ce qui nous a sembl un bon compromis entre temps de calcul (de l’ordre de l’heure) et prcision (sur une moyenne, on s’attend une prcision suprieure 1%.) Pour chacun des paramtres, les tirages se font indpendamment des autres paramtres.

4.2 Rsultats

Le tableau 4 donne les principales statistiques des diffrents outputs que nous avons considrs. Une representation graphique sous forme d’histogramme est disponible en figure 1.

Dans le tableau 4, nous pouvons constater que ce sont les *VAN* qui ont les distributions les plus tales et les plus disperses. La *VAN* totale est d’ailleurs elle-mme plus tale que les *VAN* des tapes 1 et 2, alors que cette caractristique ne se retrouve pas pour les *DMA*, *DEMA* et *R*. Nous constatons galement que les valeurs calcules avec les paramtres initiaux ne sont pas sensiblement diffrentes des moyennes et mdianes des distributions correspondantes, sauf pour les *VAN*, o les valeurs moyennes et mdianes sont plus faibles.

Paramètres liés aux dommages sur le bâti					
Nom	Valeur	Min	Max	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	Sur-élévation centre-ville Commune 1
surelevation_Q2	0,3	0,24	0,36	m	Sur-élévation Vieux lotissement
surelevation_Q3	0,6	0,48	0,72	m	Sur-élévation Lotissement récent
surelevation_Q4	0,2	0,16	0,24	m	Sur-élévation Autres quartiers
surelevation_Q5	0,15	0,12	0,18	m	Sur-élévation Centre-ville Commune 2
surelevation_Q6	0,3	0,24	0,36	m	Sur-élévation 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	Min	Max	Unité	Intitulé
$DA0_{010}$	0,09	0,07	0,11	millions €	Domage état 0 pour T_{10}
$DA0_{012}$	0,13	0,1	0,16	millions €	Domage état 0 pour T_{12}
$DA0_{050}$	0,2	0,16	0,24	millions €	Domage état 0 pour T_{50}
$DA0_{100}$	0,31	0,25	0,37	millions €	Domage état 0 pour T_{100}
$DA1_{010}$	0,03	0,02	0,04	millions €	Domage état 1 pour T_{10}
$DA1_{012}$	0,05	0,04	0,06	millions €	Domage état 1 pour T_{12}
$DA1_{050}$	0,25	0,2	0,3	millions €	Domage état 1 pour T_{50}
$DA1_{100}$	0,36	0,29	0,43	millions €	Domage état 1 pour T_{100}
$DA2_{050}$	0,13	0,1	0,16	millions €	Domage état 2 pour T_{50}
$DA2_{100}$	0,2	0,16	0,24	millions €	Domage état 2 pour T_{100}

Autre paramètre					
Nom	Valeur	Min	Max	Unité	Intitulé
C_∞	2	1	3		Coefficient pour Q_∞

TAB. 3 – Paramètres intervenant dans l'estimation des dommages

Principales statistiques des DMA pour les différentes étapes							
	Valeur initiale	Moyenne	Écart-Type	Médiane	Min	Max	
<i>DMA</i> état 0	2,10	2,10	0,22	2,09	1,33	3,16	
<i>DMA</i> état 1	1,63	1,62	0,18	1,61	1,02	2,57	
<i>DMA</i> 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	Min	Max	
<i>DEMA</i> étape 1	0,47	0,47	0,08	0,47	0,26	0,82	
<i>DEMA</i> étape 2	0,80	0,80	0,12	0,79	0,44	1,37	
<i>DEMA</i> 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	Min	Max	% Négatif
<i>VAN</i> étape 1	1,86	1,81	2,24	1,67	-5,68	13,38	21 %
<i>VAN</i> étape 2	4,62	4,44	3,42	4,26	-7,19	20,43	9 %
<i>VAN</i> 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	Min	Max	% < 1
<i>R</i> étape 1	1,19	1,20	0,25	1,18	0,53	2,85	21 %
<i>R</i> étape 2	1,31	1,32	0,25	1,29	0,60	2,81	9 %
<i>R</i> totale	1,27	1,27	0,21	1,25	0,64	2,42	9 %

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

Concernant plus particulièrement les *VAN* (respectivement les rapports *R*), nous pouvons nous apercevoir qu'une certaine proportion de leur distribution est dans le négatif (respectivement inférieure 1), ce qui est représenté en rouge 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 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.

5 Analyse de sensibilité

5.1 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, 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 [SRA⁺07] 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 l'avons fait dans une étape préliminaire) regarder des indicateurs valables pour un paramètre lorsque les valeurs des autres paramètres sont fixes, 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.

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

O :

- $Y = f(x_1, \dots, x_n) = f(X)$ est l'output dépendant des paramètres (x_1, \dots, x_n) ;
- $\text{Var}(E(Y|x_i)) = \text{Var}_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y|x_i))$;
- S_i est l'indice de sensibilité du paramètre i .

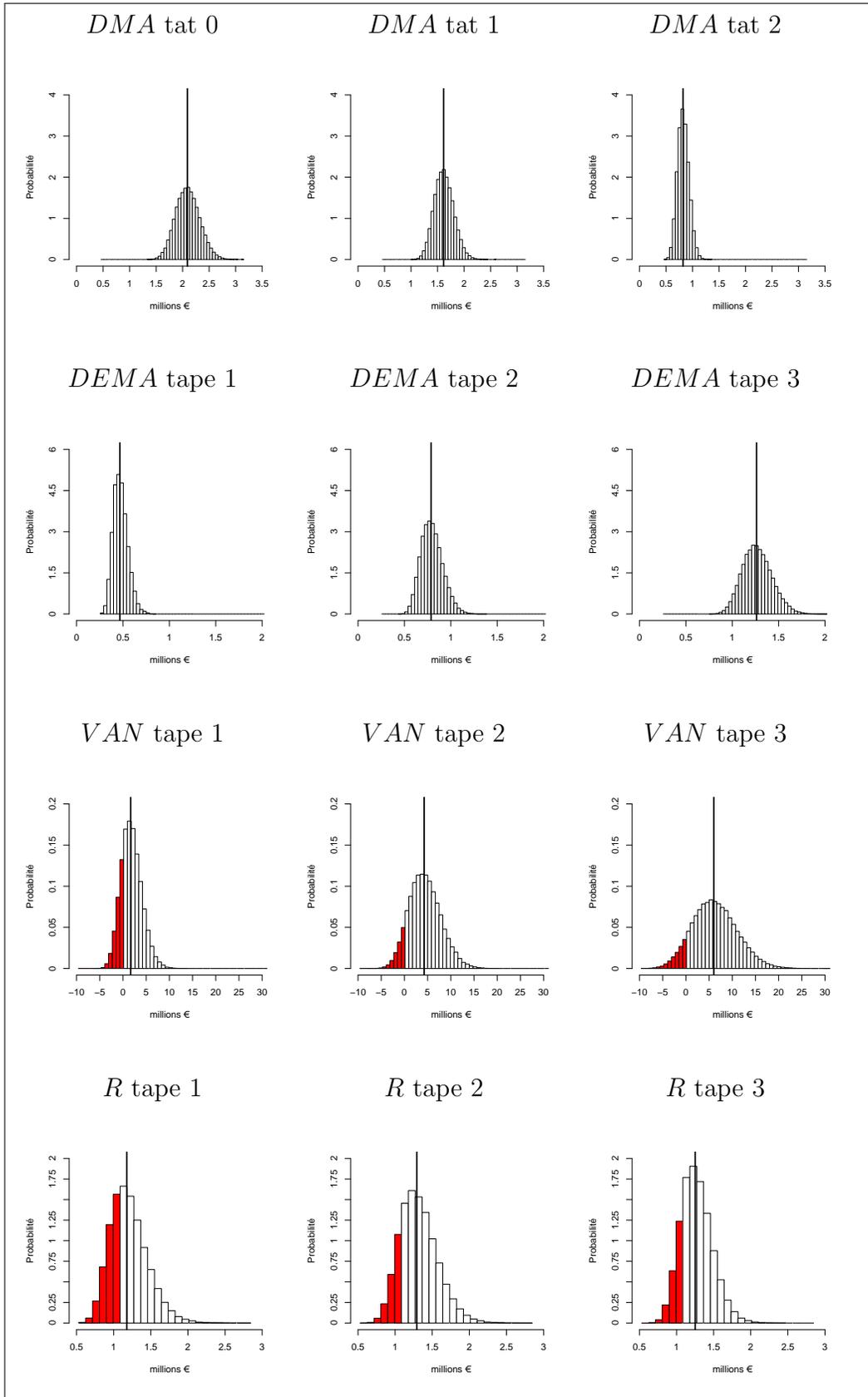


FIG. 1 – Histogrammes des différents outputs

	<i>DMA</i> ₀	<i>DMA</i> ₁	<i>DMA</i> ₂	<i>DEMA</i> ₁	<i>DEMA</i> ₂	<i>DEMA</i> ₃	<i>VAN</i> ₁	<i>VAN</i> ₂	<i>VAN</i> ₃
<i>Tdeb</i> ₁	0,08	-	-	0,66	-	0,16	0,45	-	0,10
<i>Tdeb</i> ₂	-	-	0,05	-	0,04	0,02	-	0,03	0,01
<i>T</i> ₀₁₂	0,17	0,27	-	-	0,64	0,34	-	0,42	0,21
<i>T</i> ₀₅₀	0,01	0,02	0,04	0,01	-	-	0,01	-	-
<i>T</i> ₁₀₀	-	0,01	0,04	-	-	-	-	-	-
<i>CI</i> ₁	-	-	-	-	-	-	0,12	-	0,03
<i>CI</i> ₂	-	-	-	-	-	-	-	0,12	0,06
<i>T_E</i>	-	-	-	-	-	-	0,10	0,09	0,13
<i>N</i>	-	-	-	-	-	-	0,08	0,12	0,15
<i>C</i> _∞	0,09	0,14	0,40	-	-	-	-	-	-
<i>bati</i> ₀	0,38	0,33	0,26	0,20	0,18	0,28	0,14	0,12	0,19
<i>bati</i> _p	0,02	0,02	0,01	-	0,01	0,01	-	0,01	0,01
<i>rdc-Q4</i>	0,21	0,17	0,14	0,12	0,09	0,15	0,08	0,06	0,10
<i>rdc-Q6</i>	0,01	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-
<i>h-Q6</i>	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

TAB. 5 – Sensibilité des DMA, DEMA, VAN aux paramètres (Seuls les paramètres influents sont présentés)

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 [SRA⁺07, pp.164-167] basée sur des échantillonnages des paramètres suivant des tirages de Monte-Carlo.

5.2 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 retenus².

Les paramètres liés aux périodes de retour sont plus importants pour les faibles périodes de retour (*Tdeb*₁, *Tdeb*₂, *T*₀₁₂). Concernant l'importance relative de *T*₀₁₂ par rapport à celle de *T*₀₅₀ et *T*₁₀₀, l'interprétation doit être temporelle. 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*₀₁₂, *T*₀₅₀ et *T*₁₀₀ avaient la même précision, alors qu'il est fort probable que *T*₀₁₂ soit connu avec une meilleure précision. Par contre, comme les événements étant 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

²Le seuil choisi était que $S_i > 0,01$. Si toutes les paramètres avaient la même importance, on aurait $S_i = 0,03$ uniformément.

présents. 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 (T_E), très souvent négligés 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 $bati_0$, 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 globaux 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*.

6 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 différents types de projet est positive avec les valeurs de départ et chacune de ces valeurs est donc considérée comme économiquement efficace. En admettant que la marge de précision des différents paramètres est +/- 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 leur variations. Notre analyse a montré que la *VAN* est un indicateur relativement égal 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 priodes 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 bords 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 généralement 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 (priodes de retour, coûts et bénéfices) aient une part d'imprécision commune. Ceci nous semble particulièrement être le cas pour les priodes de retour qui sont calculées 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 [CPD99, BH07a, BH07b] ou d'effectuer une analyse de sensibilité en se basant sur un échantillonnage dans l'espace des paramètres [HD06, SCS00]. 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 coûts-bénéfices peuvent également être affines : par exemple, la connaissance de l'ala de rupture d'ouvrage est un élément-clé, tant au niveau hydraulique qu'au niveau des dommages économiques. Dans le modèle ici présent, 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, la crue de projet de protection et la crue de danger de rupture sont très proches en intensité. Pourtant, l'ala d'inondation résultant d'une rupture de l'ouvrage a des conséquences bien plus sévères pour les enjeux proches qu'une simple submersion.

La relative imprecision de la *VAN* ne doit surtout pas être considérée comme une condition rédhibitoire 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 serait, de prime abord, plus confortable de ne discuter que sur un chiffre précis, la représentation de l'imprecision combine de toutes les expertises nécessaires 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. L'heure actuelle, les commanditaires ont peu l'habitude de manier des intervalles de confiance, plutôt que des résultats uniques.

Remerciements

Les travaux présents 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.

Références

- [AHG03] Jeroen C. J. H. Aerts, Gerard B. M. Heuvelink, and Michael F. Goodchild. Accounting for spatial uncertainty in optimization with spatial decision support systems. *Transactions in GIS*, 7(2) :211–230, 2003.
- [AS07] Shohan S. Ahmad and Slobodan P. Simonovic. A methodology for spatial fuzzy reliability analysis. *Applied GIS Journal*, 3(1) :1–42, 2007.
- [ATMB04] Heiko Apel, Annegret H. Thielen, Bruno Merz, and Gnter Blschl. Flood risk assessment and associated uncertainty. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2) :295–308, 2004.
- [BH07a] James D. Brown and Gerald B. M. Heuvelink. On the identification of uncertainties in spatial data and their quantification with probability distribution functions. In John P. Wilson and A. Stewart Fotheringham, editors, *The Handbook of Geographic Information Science*, pages 94–107. Blackwell, 2007.
- [BH07b] James D. Brown and Gerald B. M. Heuvelink. The Data Uncertainty Engine (DUE) : A software tool for assessing and simulating uncertain environmental variables. *Computers and Geosciences*, 33(2) :172–190, 2007.
- [Bou08] Anne Bournot. Évaluation de la pertinence des mesures de gestion du risque d'inondation. Manuel des pratiques existantes. Technical report, CEPRI, 2008.
- [Bri01] Mary J. Briant. Hec-fda sensitivity and uncertainty analysis. Research Document 46, USACE Hydrologic Engineering Center (HEC), february 2001.

- [Che06] ChangJun Chen. Comparison of methods for uncertainty analysis of hydrologic models. In *Proceedings of the 7th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2006, Nice*, 2006.
- [CPD99] Jean-Paul Chilès and Pierre P. Delfiner. *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*. New York : John Wiley and Sons, 1999.
- [EGGL08] Katrin Erdlenbruch, Éric Gilbert, Frédéric Grelot, and Christophe Lescouliers. 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*, 53 :3–20, 2008.
- [FLO07] FLOODsite. *Evaluating flood damages : guidance and recommendations on principles and methods*, january 2007. Report T09-06-01.
- [HD06] Jon C. Helton and F. J. Davis. Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis. *Multimedia Environmental Models*, 32(2) :135–154, 2006.
- [KC97] Matthijs Kok and Roger M. Cooke. Optimal decisions that reduce flood damage along the meuse : an uncertainty analysis. In *The Practice of Bayesian Analysis*, pages 151–172, 1997.
- [LGR03] Bruno Ledoux, Frédéric Grelot, and Claire Reliant. Synthèse des évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations. Technical report, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable – Direction des Études Économiques et de l'Évaluation Environnementale, Paris, France, 2003.
- [MKTS04] Bruno Merz, Heidi Kreibich, Annegret H. Thielen, and Reinhard Schmidtke. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1) :153–163, 2004.
- [Moo97] Christopher Z. Mooney. Monte Carlo Simulation. Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences 07-116, Sage, Thousand Oaks, Ca, 1997.
- [MP04] Shreedhar Maskey and Roland K. Price. Assessment of uncertainty in flood forecasting using probabilistic and fuzzy approaches. In *International Conference on Hydroinformatics 2004, 21-24 June, Singapore*, 2004.
- [Nat00] National Research Council, editor. *Risk analysis and uncertainty in flood damage reduction studies*. Washington DC : National Academy Press, 2000.
- [PBRM08] Florian Pappenberger, Keith J. Beven, Marco Ratto, and Patrick Matgen. Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models. *Advances in Water Resources*, 31 :1–14, May 2008.
- [RvdSHV07] Jens Christian Refsgaard, Jeroen P. van der Sluijs, Anker Lajer Hjberg, and Peter A. Vanrolleghem. Uncertainty in the environmental modelling process : A framework and guidance. *Environmental Modelling and Software*, 22 :1543–1556, 2007.
- [SCC08] Pedro Sarmiento, Hugo Carro, and Mario Caetano. A fuzzy synthetic evaluation approach for land cover cartography accuracy assessment. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment*

in Natural Resources and Environmental Sciences, Shanghai, P. R. China, June 25-27, pages 348–355, 2008.

- [SCS00] Andrea Saltelli, Karen Chan, and Evelyn M. Scott, editors. *Sensitivity analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics. Chichester, England : Wiley, 2000.
- [SRA⁺07] Andrea Saltelli, Marco Ratto, Terry Andres, Francesca Campolongo, Jessica Cariboni, Debora Gatelli, Michaela Saisana, and Stefano Tarantola. *Global Sensitivity Analysis. The primer*. Wiley, 2007. Disponible chez Jean-Stphane Bailly.
- [Tor93] Jean-Philippe Torterotot. *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, 1993. 2 volumes.
- [WA03] Matthew D. Wilson and Peter M. Atkinson. Prediction Uncertainty in Elevation and its Effect on Flood Inundation Modeling. In *Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation, University of Southampton, United Kingdom*, pages 8–10, 2003.
- [Wer01] M. G. F. Werner. 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) :517–522, 2001.
- [Woo07] Simon Woodhead. *Evaluation of Inundation Models - Limits and Capabilities of models*. FLOODsite, April 2007. Report T08-07-01 - p.18-19.
- [WPS07] Thilo Weichel, Florian Pappenberger, and Karsten Schulz. Sensitivity and uncertainty in flood inundation modelling-concept of an analysis framework. *Advances in Geosciences*, 11 :31–36, 2007.