

# Proposition d'une méthodologie pour l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle en contexte incertain. Application aux inondations

Abla-Mimi Edjossan-Sossou, Olivier Deck, Thierry Verdel, Marwan Al Heib

## ► To cite this version:

Abla-Mimi Edjossan-Sossou, Olivier Deck, Thierry Verdel, Marwan Al Heib. Proposition d'une méthodologie pour l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle en contexte incertain. Application aux inondations. 9. Journées nationales fiabilité des matériaux et des structures (JFMS 2016), Mar 2016, Nancy, France. ineris-01862945

**HAL Id: ineris-01862945**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01862945>**

Submitted on 28 Aug 2018

**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.

---

# Proposition d'une méthodologie pour l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle en contexte incertain - Application aux inondations

## Towards a methodology for assessing sustainability of natural hazards management strategies under uncertainty - An application to flood management

Abla Mimi EDJOSSAN-SOSSOU<sup>\*,\*\*</sup> — Olivier DECK<sup>\*</sup> — Thierry VERDEL<sup>\*</sup> —  
Marwan AL HEIB<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> GeoRessources, UMR 7359, Ecole des Mines de Nancy (Université de Lorraine), Campus ARTEM, CS 14234, Nancy Cedex, F-54042, France

{[abla-mimi.edjossan-sossou](mailto:abla-mimi.edjossan-sossou), [olivier.deck](mailto:olivier.deck), [thierry.verdel](mailto:thierry.verdel)}@univ-lorraine.fr

<sup>\*\*</sup> INERIS, c/o GeoRessources, Campus ARTEM, CS 14234, Nancy Cedex, F-54042, France

[marwan.alheib@ineris.fr](mailto:marwan.alheib@ineris.fr)

---

**RÉSUMÉ.** L'objectif de cette communication est de présenter une méthodologie exploratoire d'aide à la décision en présence d'incertitudes lors de l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle. La méthodologie est orientée sur l'intégration des incertitudes relatives aux données d'entrée de l'évaluation qui peuvent résulter soit de mesures imprécises ou de la variabilité des sorties de modèles, soit d'estimations par avis d'experts. Elle consiste à quantifier ces incertitudes et à les propager dans le processus d'évaluation afin d'estimer l'incertitude sur les résultats. Le décideur pourra alors, en toute connaissance de la variabilité des résultats, établir une hiérarchisation sur laquelle pourra se fonder la prise de décision. L'applicabilité de la méthodologie est illustrée par une étude de cas portant sur la gestion des risques liés aux inondations sur la commune de Dieulouard. Les résultats de cette application n'ont pas vocation à proposer la stratégie la plus durable à la commune ni à être généralisés (leur validité étant restreinte à la validation des hypothèses de travail formulées) mais sont simplement illustratifs pour montrer comment la prise en compte des incertitudes dans l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion peut induire une variabilité des résultats et donc influencer la prise de décision.

**ABSTRACT.** This paper aims to present an exploratory methodology suggested to support decision-making under uncertainty when assessing the sustainability of natural risks management strategies. The methodology focuses mainly on coping with input data-induced uncertainty that could result either from non-precise measurements, variability of models outputs or subjective estimations. It consists of estimating input data uncertainties and propagating them through the assessment process in order to quantify the uncertainty related to the results. Decision-maker can then, with full knowledge of the variability of results, establish a final ranking on which the decision-making could rely on. The applicability of the methodology is illustrated through a case study on flood risk management in Dieulouard. The results of this study are not intended to provide the most sustainable strategy to the municipality or to be generalized, their validity being restricted to the validation of the formulated assumptions. They are merely illustrative to show how taking account of uncertainty in the sustainability assessment process can induce variability in results and thus influence decision-making.

**MOTS-CLÉS:** Evaluation de la durabilité, Prise de décision, Incertitude, Simulations Monte Carlo, Théorie des possibilités, Arithmétique des intervalles, Risques d'origine naturelle, Inondation

**KEYWORDS:** Sustainability assessment, Decision-making, Uncertainty, Monte Carlo simulations, Possibility theory, Intervals arithmetic, Natural hazards, Flood

---

## 1. Introduction et contexte

La gestion durable des risques d'origine naturelle est un concept émergent dicté par les principes du développement durable. Elle peut être définie comme une approche de gestion visant à garantir sur le long terme une sécurité suffisante pour les populations, leurs biens et le milieu naturel tout en recherchant un compromis acceptable entre les conséquences des stratégies de gestion et les conditions nécessaires au développement territorial durable. Du point de vue opérationnel, sa mise en œuvre peut s'appuyer sur divers outils parmi lesquels l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion. Toutefois, l'évaluation de la durabilité est une activité sujette à des incertitudes pouvant provenir de la qualité des données d'entrée de l'évaluation, des choix méthodologiques opérés lors de l'évaluation, des fluctuations temporelles de la dynamique territoriale, etc. Ces diverses incertitudes font qu'une stratégie de gestion jugée la plus durable lors d'une évaluation réalisée dans un contexte supposé certain peut ne plus être la meilleure lorsque les conditions de l'évaluation changent. L'analyse de l'influence des incertitudes s'avère alors nécessaire pour déterminer dans quelle mesure celles-ci peuvent influencer sur l'ordre de classement des stratégies et donc sur la prise de décision (Hall et Solomatine, 2008). C'est dans ce contexte que se situe cette communication qui vise à présenter une méthodologie développée dans le cadre du projet « *Prise en compte des INCERTitudes pour des Décisions Durable* » (INCERDD) pour la prise en compte des incertitudes relatives aux données d'entrée dans l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques.

## 2. Généralités sur la formalisation des incertitudes sur les données d'entrée

La notion d'incertitude a des définitions variables selon le contexte et le domaine dans lesquels elle est utilisée. Dans la présente communication, elle est considérée comme l'incapacité d'une variable (donnée d'entrée ou résultat de modèle) à être connue avec exactitude (Duchêne, 1999). Elle se formalise sous la forme d'un ensemble ( $\{x_1; x_2; \dots; x_n\}$ , cas des données discrètes) ou d'un intervalle ( $[x_{inf}; x_{sup}]$ , cas des données continues) des valeurs possibles incluant la valeur la plus réaliste ou vraisemblable pour un degré de confiance donné. L'analyse des incertitudes vise à déterminer les incertitudes associées à un résultat prédictif à partir de celles relatives aux données d'entrée (Pagnon, 2012). Elle comprend les deux phases suivantes : la quantification des incertitudes sur les données d'entrée qui consiste à déterminer l'ensemble ou l'intervalle auquel les valeurs possibles de chacune des variables d'entrée de l'évaluation peuvent appartenir et la propagation qui consiste à faire transiter les incertitudes sur les données d'entrée au travers du modèle ou de l'équation pour établir la dispersion qui en résulte sur les résultats. Il existe une multitude de méthodes de formalisation des incertitudes (Bloch, 1996). Elles peuvent être regroupées en deux grandes familles selon que l'approche adoptée est probabiliste ou non. L'approche probabiliste est la plus courante avec des méthodes comme les estimations statistiques directes, les simulations Monte Carlo (SMC), etc. Les méthodes non probabilistes sont basées sur diverses théories comme la théorie des possibilités, la théorie des intervalles, etc.

## 3. Présentation de l'étude de cas

Dieulouard (Meurthe-et-Moselle) a été retenue comme site d'application de la méthodologie à la gestion des risques liés aux inondations. Ce choix est justifié par l'existence de projets de développement communal prévus dans des zones à risques notamment la construction de logements et de commerces dans une zone d'aléa en suivant, bien entendu, les prescriptions du Plan de Prévention des Risques Inondations (PPRI) pour le bâti neuf. L'étude de cas a consisté à évaluer, par rapport au statu quo (situation de référence, S0), les deux stratégies alternatives suivantes :

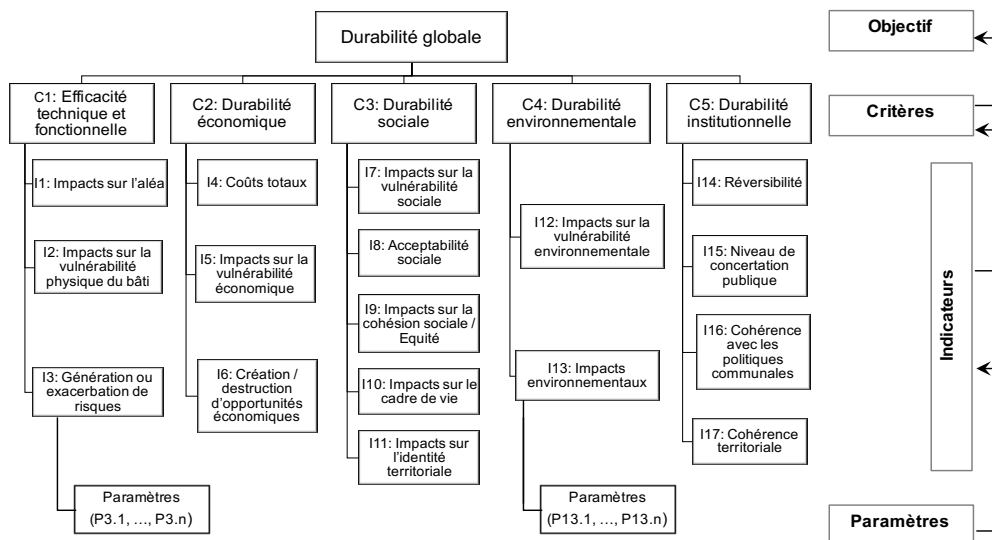
- S1 : aucune action sur le niveau d'aléa ou la vulnérabilité du bâti et
- S2 : installation de dispositifs individuels destinés à limiter ou à retarder la pénétration de l'eau dans le bâti.

Ces deux stratégies intègrent chacune la construction effective des logements et commerces en zone d'aléa contrairement au statu quo. Les données d'entrée utilisées sont des projections en fonction du pire et du meilleur cas. Les données quantitatives ont été projetées sur la base d'hypothèses de travail au regard des valeurs actuelles des paramètres tandis que les données qualitatives résultent d'avis d'experts sur l'évolution potentielle des indicateurs quantitatifs dans le temps. Il convient de rappeler que cette étude n'a pas prétention à proposer à la commune la stratégie la plus durable mais plutôt à illustrer la méthodologie et à justifier la nécessaire prise en compte des incertitudes dans l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle.

## 4. Méthodologie d'évaluation de la durabilité des stratégies en présence d'incertitudes sur les données d'entrée

La méthodologie s'inspire de l'approche proposée par Edjossan-Sossou *et al.* (2014) pour évaluer la durabilité des stratégies de gestion en contexte déterministe. Elle est axée sur une analyse multicritère et s'appuie sur une série de 5 critères subdivisés en 17 indicateurs (voir figure 1) ; chaque indicateur pouvant être à son tour subdivisés en paramètres.

Les indicateurs peuvent être soit quantitatifs lorsqu'ils sont mesurés ou calculés, soit qualitatifs<sup>1</sup> lorsqu'ils sont estimés à partir d'opinions d'experts. Cette approche adopte un mode d'évaluation relatif qui consiste à juger la contribution de la stratégie évaluée à l'atteinte du développement territorial durable par rapport à celle d'une situation de référence donnée.



**Figure 1.** Critères et indicateurs d'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques

L'originalité de la méthodologie proposée réside dans l'adoption d'un formalisme hybride combinant des intervalles de valeurs issus de SMC et des intervalles flous issus de la théorie des possibilités. En effet, bien souvent la propagation des incertitudes suit un formalisme purement probabiliste ou possibiliste. L'intérêt d'un tel formalisme mixte réside dans sa capacité à caractériser les incertitudes de façon pragmatique afin de ne pas négliger certains aspects de la problématique de l'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion faute de pouvoir les traiter dans un cadre purement probabiliste ou possibiliste. Les quatre modules de la méthodologie sont présentés ci-après.

### 3.1. Module 1 : Détermination de la distribution des performances incertaines des indicateurs quantitatifs

La première étape de ce module consiste à collecter les données d'entrée incertaines et à caractériser les incertitudes associées. Il s'agit de déterminer les domaines de variabilité possibles des différents paramètres associés à chaque indicateur ; chaque paramètre devant être identifié par une loi statistique décrivant sa dispersion. Cela peut se faire selon différentes modalités. Les incertitudes peuvent soit être fournies par la bibliographie ou provenir des incertitudes sur des données similaires, soit résulter de calculs analytiques conduits selon le guide sur l'expression des incertitudes de mesure ou encore être estimées par SMC. Aucune approche de caractérisation des données quantitatives n'est imposée. Le choix d'une modalité ou d'une autre dépendra de la démarche de collecte des données lors de l'évaluation.

La démarche de propagation des incertitudes relatives aux paramètres dans le calcul des Indices de Performances des Indicateurs (IPI) incertains consiste d'abord à calculer le Taux d'Impact (TI) correspondant aux différentes valeurs de ces paramètres suivant l'équation [1] (où  $V_{\text{strat}}$  et  $V_{\text{ref}}$  correspondent à la valeur du paramètre respectivement pour la stratégie évaluée et la situation de référence). En présence d'intervalles plutôt que d'ensembles, les TI sont calculés pour les valeurs inférieure et supérieure de ces intervalles. Les TI obtenus sont normalisés en Notes d'Impact (NI) pour faciliter les calculs suivants par l'attribution d'une note à l'aide d'échelles de percentiles bidirectionnelles : la note est positive ou négative selon que la variation induite par la stratégie (exprimée par le TI) est un avantage ou non. On en déduit ainsi l'intervalle de confiance des NI de chaque paramètre (soit  $[NI_{\text{inf}} ; NI_{\text{sup}}]$ ). Ensuite la détermination de la forme de la distribution des IPI incertains, et donc des intervalles de confiance, se fait en réalisant par SMC des agrégations par moyenne arithmétique pondérée à partir des intervalles de valeurs des NI (avec une hypothèse de distribution uniforme de ces valeurs). A ce niveau, l'application des SMC présente l'avantage de ne nécessiter aucune hypothèse sur la forme de la distribution des valeurs des NI. L'histogramme des résultats des SMC permet alors de déterminer la loi statistique à laquelle peut s'ajuster la distribution des IPI incertains. Les SMC ne permettant pas d'obtenir des bornes extrêmes identiques d'une simulation à l'autre, l'équation [2], basée sur l'arithmétique des intervalles, permet de déterminer les bornes de l'intervalle de confiance maximal des IPI incertains (où  $x_i$  est le coefficient de pondération du paramètre  $i$ ).

<sup>1</sup> La méthodologie a été développée en considérant que les indicateurs qualitatifs ne sont pas subdivisés en paramètres.

$$TI = \frac{V_{strat} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad [1]$$

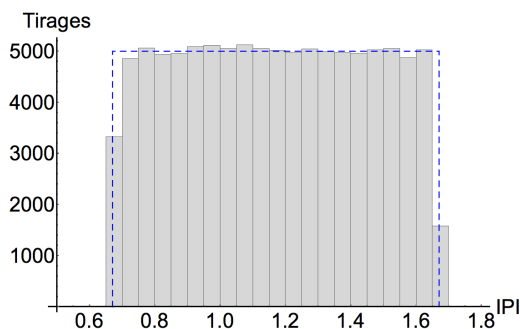
$$IPI \in \left[ \frac{\sum x_i * NI_{inf_i}}{\sum x_i}, \frac{\sum x_i * NI_{sup_i}}{\sum x_i} \right] \quad [2]$$

A titre illustratif, l'évaluation de l'indicateur « *Impacts sur la vulnérabilité physique* » de S1 à partir des données<sup>2</sup> du tableau 1 (S0 est la stratégie de référence) donne des intervalles qui traduisent la dispersion des résultats à chaque étape du module. La figure 2 représente l'histogramme résultant des SMC à partir des intervalles de valeurs des NI (pour une équipondération<sup>3</sup> des NI). On y observe que la distribution de l'IPI peut être ajustée à une loi uniforme. Les valeurs possibles de l'IPI peuvent donc appartenir à un intervalle qui ne varie pas en fonction du degré de confiance.

**Tableau 1.** Indice de performance de l'indicateur « *Impacts sur la vulnérabilité physique* » de S1 pour une échelle de normalisation à pas identiques de 10 % (Notes d'impact allant de - 10 à + 10)

Paramètres	V <sub>S0</sub>	V <sub>S1</sub>	TI	NI	IPI
Nombre de logements dans l'enveloppe de la zone inondable (#) ↓	[110 ; 200] <b>165</b>	[194 ; 284] <b>249</b>	[+ 42 % ; + 76 %] <b>+ 51 %</b>	[- 8 ; - 5] <b>- 6</b>	[0,67 ; 1,67] <b>+ 1,33</b>
Taux d'endommagement moyen de la commune (%) ↓	[2 ; 30,8] <b>15</b>	[2 ; 30,8] <b>15</b>	{0 %} <b>0 %</b>	{0} <b>0</b>	
Proportion de logements en zone inondable ayant des mesures protectives (%) ↑	{10} <b>10</b>	[30 ; 43] <b>34</b>	{+ 100 %} <b>+ 100 %</b>	{+ 10} <b>+ 10</b>	

Les flèches indiquent le sens de la variation souhaitable. Les valeurs en gras sont supposées déterministes.



**Figure 2.** Distribution de probabilité de l'indicateur « *Impacts sur la vulnérabilité physique* » de S1

### 3.2. Module 2 : Détermination de la distribution des performances incertaines des indicateurs qualitatifs

Tout comme pour le module 1, la première étape consiste à collecter les données incertaines (directement à l'échelle des indicateurs cette fois-ci) et à caractériser les incertitudes associées. Une approche non probabiliste a été adoptée pour la formalisation de ces incertitudes. Le choix a porté sur la théorie des possibilités, qui permet de raisonner sur des ensembles emboîtés en leur attribuant des degrés de confiance en fonction de la crédibilité accordée à l'expertise (Fallet-Fidry, 2012). Ce choix est justifié par le fait que le cadre possibiliste est un outil simple pour manipuler des informations de différentes sources en vue d'en extraire une information unique et quantifier l'incertitude associée à cette information unique. La démarche proposée consiste à éliciter les avis des experts sur l'indicateur, à les fuzzifier sous forme de distribution de possibilités triangulaire et à les combiner par une fusion conjonctive pour établir la distribution de possibilités la plus vraisemblable (en prenant comme son « support » la zone correspondant à l'union des intervalles « support » de toutes les distributions fusionnées et leur zone de consensus comme son « noyau »). Cette distribution de possibilités est ensuite normalisée dans un souci d'uniformité et pour faciliter les calculs suivants. On pourra alors réaliser des  $\alpha$ -coupes (avec  $\alpha$  = degré de possibilité) dans les distributions normalisées pour obtenir les plages de valeurs associées à chaque degré de certitude (1 -  $\alpha$ ). La figure 3 représente l'exemple de la fusion des avis de six experts sur l'indicateur « *Impacts sur le cadre de vie* » de S0 avec un consensus de cinq experts sur l'intervalle [4 ; 5].

Les incertitudes sont ensuite propagées par l'arithmétique des intervalles pour déterminer les intervalles de confiance des IPI incertains en faisant la différence entre les bornes des valeurs de l'indicateur qualitatif pour la stratégie évaluée

<sup>2</sup> Ces données résultent du simulateur développé par Edjossan-Sossou *et al.* (2015) pour la crue de référence.

<sup>3</sup> Nous avons choisi d'appliquer une équipondération pour les différentes agrégations de cette application.

$[V'_{stratInf} ; V'_{stratSup}]$  et la situation de référence  $[V'_{refInf} ; V'_{refSup}]$  (comme le montre l'équation [3]). Ce calcul se fait pour le noyau, le support et les intervalles obtenus pour les  $\alpha$ -coupes choisies.

$$IPI \in [V'_{strat Inf} - V'_{ref Sup} ; V'_{strat Sup} - V'_{ref Inf}] \quad [3]$$

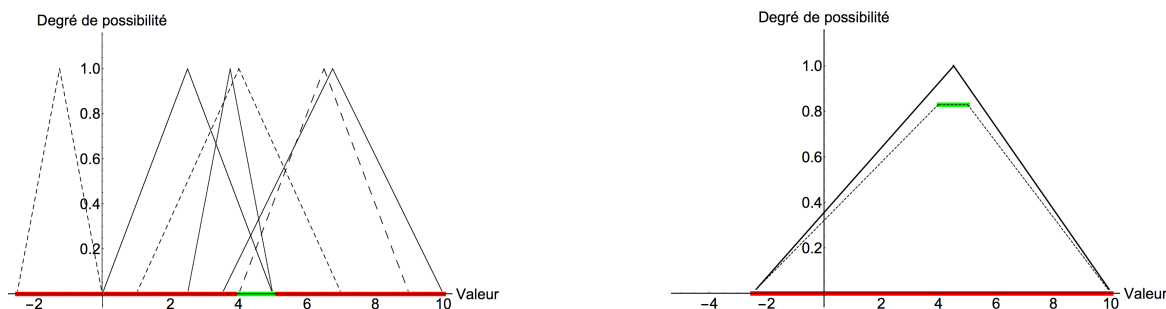


Figure 3. Fusion des avis d'experts sur l'indicateur « Impacts sur le cadre de vie » de S0

### 3.3. Module 3 : Détermination de la distribution des performances incertaines des critères

Pour le calcul des Indices de Performance des Critères (IPC) incertains, la propagation des incertitudes obtenues sur les IPI incertains se fait par l'arithmétique des intervalles pour les différents degrés de confiance (approche probabiliste) ou de certitude (approche possibiliste) définis. Le choix de cette méthode se justifie par sa capacité à permettre une combinaison des données probabilistes et possibilistes. Les intervalles de valeurs des IPC sont déterminés en faisant la moyenne arithmétique pondérée des bornes des IPI pour les différents degrés de confiance/certitude.

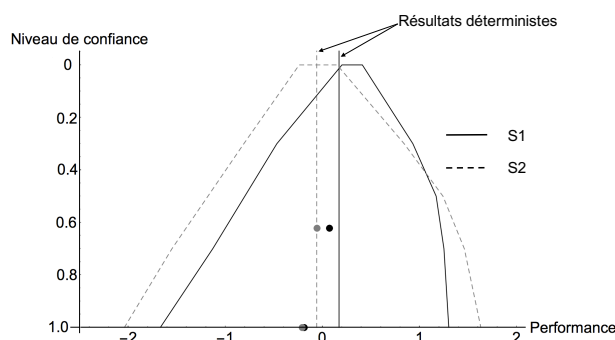
### 3.4. Module 4 : Détermination de la distribution de la durabilité globale incertaine

Les IPC incertains générés par le module 3 peuvent alors servir à conduire une démarche d'analyse multicritère selon une logique d'agrégation totale ou partielle des IPC incertains en utilisant les techniques classiques d'analyse multicritère. Ce module s'inscrit dans une logique d'agrégation totale et consiste à synthétiser les performances obtenues pour chacun des cinq critères de durabilité en une note finale sur laquelle se basera la prise de décision. Les incertitudes sur les IPC incertains sont propagées dans le calcul de l'Indice de Durabilité Globale (IDG) par une moyenne arithmétique pondérée. L'équation [4] (où  $w_i$  est le poids du critère  $i$ ) permet alors d'établir les intervalles de confiance pour les différents degrés de confiance. La moyenne arithmétique pondérée, méthode d'agrégation totale la plus utilisée, a été retenue en raison de sa facilité de compréhension et d'utilisation pour une meilleure appropriation de la méthodologie par les utilisateurs.

$$IDG \in \left[ \frac{\sum w_i * IPC_{inf_i}}{\sum w_i} ; \frac{\sum w_i * IPC_{sup_i}}{\sum w_i} \right] \quad [4]$$

Tout comme pour les IPC, on obtient une distribution de possibilités pour l'IDG. Il est alors pertinent de mettre en œuvre un processus de défuzzification pour transformer la distribution de possibilités en une valeur unique car la décision se prendra plus aisément à partir d'une seule valeur plutôt que d'un intervalle de valeurs. La défuzzification peut se faire par le centre de gravité, par la moyenne des maxima, par les bornes de l'intervalle associé à une  $\alpha$ -coupe donnée en gardant à l'esprit que dans le cadre du calcul de l'IDG en contexte incertain le décideur a une attitude optimiste lorsqu'il considère la valeur maximale ou inversement, etc (Talon *et al.*, 2010). Le choix de la méthode est une opération délicate car le classement et la prise de décision s'appuient sur la valeur résultante.

Les distributions de l'IDG de S1 et S2 ainsi que les résultats issus de données supposées déterministes sont représentés sur la figure 4. On y observe que l'IDG de S2 a la dispersion la plus forte ce qui signifie que quand on intègre les incertitudes sur les données d'entrée à l'évaluation de la durabilité des deux stratégies, c'est S2 qui présente la plus forte incertitude sur les projections de sa capacité à être durable. Une analyse comparative des intervalles de valeurs des IDG incertains pour une  $\alpha$ -coupe = 0 (soit un degré de certitude de 100 %) permet de conclure que S1 est meilleure que S2 lorsqu'on défuzzifie par la borne inférieure ; ce qui corrobore le classement de l'évaluation déterministe. Néanmoins, S2 devient meilleure que S1 dans le cas d'une défuzzification par la borne supérieure. Par ailleurs, on a quasiment une incomparabilité des deux stratégies en cas de défuzzification par le milieu des intervalles (voir les points centraux des intervalles correspondant à un niveau de confiance de 100 % sur la figure 4). Ceci correspond à une situation où le décideur adopte une attitude prudente à travers un raisonnement basé sur la moyenne des bornes de l'intervalle de confiance ce qui lui évite d'avoir une attitude pessimiste ou optimiste.



**Figure 4.** Distribution de possibilités de l'Indice de Durabilité Globale de S1 et S2

Cette variabilité du classement permet de démontrer que la prise en compte des incertitudes sur les données d'entrée peut avoir une influence sur la prise de décision selon que le décideur opte pour une attitude pessimiste, prudente ou optimiste. Le choix d'une attitude donnée dépend du contexte spécifique de l'application de la méthodologie et des aspirations du décideur et quelle que soit l'attitude adoptée, la décision doit être prise en sachant qu'elle pourrait ne plus être la même si on changeait d'attitude. La prise en compte des incertitudes a donc l'avantage de présenter au décideur le domaine de validité potentiel des projections relatives à la durabilité des stratégies et les divers classements qui en découlent. Dans son état actuel, le but ultime de la méthodologie est de fournir au décideur des informations sur la variabilité potentielle du classement des stratégies entre elles afin qu'il prenne sa décision en toute connaissance de cause.

## 5. Discussion et conclusion

La méthodologie développée se décline en 3 phases qui consistent : à quantifier et représenter les incertitudes sur les données d'entrée, à propager les incertitudes quantifier dans le processus d'évaluation de la durabilité globale et à établir une hiérarchisation finale en transformant la distribution de possibilités de la durabilité globale en une valeur précise par un procédé de défuzzification. Les résultats de l'application montrent, d'une part, que la méthodologie proposée permet effectivement d'intégrer les incertitudes sur les données d'entrée dans le processus d'évaluation de la durabilité des stratégies de gestion des risques d'origine naturelle et de l'autre, que ces incertitudes peuvent induire une variabilité du classement des stratégies entre elles. Cet exemple illustratif ne prétend pas que les classements obtenus sont pertinents d'un point de vue de l'expertise de la gestion des risques liés aux inondations. Il est davantage une étude de faisabilité de la méthodologie et illustre simplement comment le fait de prendre en compte les incertitudes sur les données d'entrée peut influencer le processus décisionnel. Il convient de multiplier les études de cas afin d'identifier les difficultés de l'application opérationnelle de la méthodologie ainsi que les pistes d'une amélioration potentielle.

## 6. Références bibliographiques

- Bloch I., « Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique », *Traitement du Signal*, vol. 13, n° 4, 1996, p 267-288.
- Duchêne J., « Le traitement de l'incertitude dans les perspectives démographiques », *Qüestió*, vol. 23, n° 1, 1999, p. 113-128.
- Edjossan-Sossou A. M., Deck O., Al Heib M. et Verdel T., « A decision-support methodology for assessing the sustainability of natural risk management strategies in urban area », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, 2014, p. 3207-3230.
- Edjossan-Sossou A. M., Deck O., Al Heib M. et Verdel T., « Evaluation micro-échelle des différents dommages liés aux inondations : développement d'un outil de calcul permettant l'intégration des incertitudes sur les données d'entrée », *11<sup>ème</sup> Colloque Georisque*, Montpellier, 27-28 janvier 2015.
- Fallet-Fidry G., Contribution à la modélisation et au traitement de l'incertain dans les analyses de risques multidisciplinaires de systèmes industriels - Application à la source froide d'une unité de production d'énergie, Thèse de doctorat, Univ. Lorraine, 2012.
- Hall J. et Solomatine D., « A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions », *International Journal of River Basin Management*, vol. 6, n° 2, 2008, p. 85-98.
- Pagnon S., Stratégies de modélisation des conséquences d'une dispersion atmosphérique de gaz toxique ou inflammable en situation d'urgence au regard de l'incertitude sur les données d'entrée, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2012.
- Talon A., Curt C., Boissier D. et Mauris G., « Aide à la décision pour l'expertise des barrages », *6<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Fiabilité des Matériaux et des Structures*, Toulouse, 24-26 mars 2010.