



**Soutenir la recherche
pour prévenir les risques**



Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations

Impact des stratégies utilisées pour modéliser l'aléa inondation et caractériser la vulnérabilité des enjeux sur les résultats des évaluations de dommages potentiels liés aux inondations.

RAPPORT FINAL

Septembre 2012

Julian ELEUTÉRIO^{1,2}, Robert MOSÉ², Anne ROZAN¹

¹ UMR GESTE – Gestion Territoriale de l'Eau et de l'Environnement

² UMR IMFS – Institut de Mécanique des Fluides et Solides de Strasbourg

CONTEXTE DE L'ETUDE

Ce rapport présente le travail réalisé dans le cadre du projet de recherche cofinancé par l'ENGEES et la Fondation MAIF. Le projet en question s'est consacré à l'analyse des incertitudes existantes dans les processus d'évaluation de dommages liés aux inondations. Il s'est focalisé aux dommages directs potentiels aux bâtiments et a amené au développement d'une méthode d'évaluation de dommages et dysfonctionnements des infrastructures des réseaux. Ce rapport synthétise la thèse intitulée «Flood risk analysis: impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerability assessments on damage estimations » préparée par Julian ELEUTÉRIO, sous la codirection de Anne ROZAN et Robert MOSE. Il reprend sa structure afin de résumer ces résultats principaux.

RESUME

L'inondation constitue le risque naturel le plus dommageable en France et dans le monde. Une meilleure compréhension sur les inondations et les conséquences diverses qu'elles peuvent causer à notre société est un élément fondamental pour guider le développement de politiques de gestion et réduction du risque inondation. Les connaissances de base pour appréhender le risque inondation concernent la fréquence et l'intensité des inondations, l'exposition des enjeux aux inondations, leur vulnérabilité et susceptibilité à subir des dommages. L'analyse du risque inondation comprend différents états de connaissance comme les sciences de l'ingénieur, de l'eau, de la terre, sociales et économiques. L'aspect multidisciplinaire du risque inondation ainsi que les divers modèles nécessaires à l'évaluation du risque sont à l'origine d'une complexité organisationnelle contenant plusieurs sources d'incertitude. La précision des évaluations de dommages liés aux inondations dépend à la fois des modèles d'inondation et des modèles de vulnérabilité des enjeux. La compréhension des incertitudes épistémiques derrière les différents modules d'évaluation du risque est essentielle à l'optimisation des efforts de réduction d'incertitudes de l'évaluation, afin d'améliorer la prise de décision en matière de gestion du risque.

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à l'amélioration des connaissances concernant les différentes sources d'incertitude présentes dans l'évaluation économique du risque inondation. Il se concentre sur l'impact des différentes stratégies utilisées pour modéliser l'aléa inondation et la vulnérabilité d'un territoire sur les résultats de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations. A cette fin, nous analysons dans un premier temps la sensibilité des estimations de dommages aux différents modules de l'évaluation. Plusieurs tests ont été mis en œuvre sur deux études de cas en France. On a mesuré la variabilité des estimations en fonction des différentes bases de données, modèles et méthodes considérées pour : analyser la probabilité des inondations ; modéliser et cartographier l'aléa inondation ; et caractériser la vulnérabilité des bâtiments et leurs susceptibilité à subir des dommages. Les résultats de ces tests révèlent l'importance des incertitudes épistémiques dans ce type d'évaluation. Le choix des modèles et méthodes à utiliser ainsi que les échelles d'analyse à considérer pendant l'évaluation doivent faire l'objet de pré-études consistantes. Ensuite, nous avons procédé à des « modélisation parallèles » pour quantifier l'impact relatif de différentes sources d'incertitude sur les estimations de dommages. Les résultats démontrent que la contribution relative des différents modules à l'incertitude globale dépend de plusieurs aspects de l'évaluation comme les particularités du site analysé et la distribution des probabilités d'inondation. Même si l'utilisation courante de méthodologies complexes pour quantifier les incertitudes globales dans ces évaluations demeure aujourd'hui irréaliste ; la méthodologie développée dans cette étude et ses résultats peuvent supporter le praticien dans l'analyse d'incertitudes, la détermination de priorités et l'optimisation de la distribution des ressources entre les différents modules de l'évaluation. Enfin, la dernière partie de ce travail explore un degré de complexité supplémentaire des évaluations du risque inondation. Nous développons une méthode d'analyse systémique du dysfonctionnement et endommagement potentiels des réseaux d'infrastructure en lien avec la résilience du territoire face aux inondations. Cet aspect n'est que rarement approfondi dans les évaluations de dommages potentiels, représentant une importante source d'incertitudes. La méthodologie développée devra permettre une analyse plus détaillée de cet aspect dans les évaluations, rendant possible l'amélioration des estimations de dommages indirects.

SOMMAIRE

CONTEXTE DE L'ETUDE.....	i
RESUME	iii
SOMMAIRE.....	v
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I. Contexte, concepts, état de l'art et question de recherche	3
Chapitre 1. Principaux concepts liés à la gestion et évaluation du risque inondation	3
Chapitre 2. Incertitudes liées aux estimations des dommages potentiels des inondations.....	3
Chapitre 3. Développement d'un outil SIG pour l'évaluation des dommages	4
PARTIE II. L'impact des choix méthodologiques sur les évaluations	7
Chapitre 4. Présentation des études de cas	7
Chapitre 5. Analyses hydrologiques	8
Chapitre 6. Modélisation hydrodynamique et cartographie des inondations	10
Chapitre 7. Méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des enjeux	10
Chapitre 8. Fonctions de dommages et estimation de la valeur des enjeux	11
Chapitre 9. Cascade d'incertitudes dans les évaluations des dommages potentiels	13
PARTIE III. Complexité des dommages aux infrastructures de réseau	31
Chapitre 10. Endommagement et dysfonctionnement des infrastructures de réseau.....	31
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	33
DIFFUSION DE L'ETUDE.....	35
REMERCIEMENTS	37

INTRODUCTION

Si l'inondation est un phénomène naturel, que les zones inondables existent naturellement, l'homme peut aggraver ou atténuer de tels événements par l'imperméabilisation des sols, par des modifications du régime climatique ou par la construction d'ouvrages hydrauliques. L'inondation seule n'est pas un risque, de même que les enjeux ne le sont pas. Ainsi, c'est la présence du phénomène d'inondation (aléa) et la présence d'enjeux (vulnérabilité) dans le même espace physique et temporel qui génère le risque. Les villes demeurent en grande majorité à proximité des cours d'eau, constituant ainsi des enjeux sensibles à l'eau.

La gestion de ce phénomène complexe, à la fois d'origine naturelle et humaine, constitue un des grands défis de la société moderne. Son but est d'atténuer les dommages, de quelques natures qu'ils soient (sociaux, environnementaux, économiques). Le choix des mesures de mitigation des impacts des inondations dépend de divers facteurs : politiques, socio-économiques, ethniques, culturels... Cependant, la connaissance approfondie du risque est, dans tous les cas, un élément clef pour sa gestion. Les outils de modélisation occupent aujourd'hui une place primordiale dans la formation de la connaissance du risque et dans sa gestion. Toute forme de gestion est associée à un coût économique. Du côté des décideurs, la logique d'analyse coût-bénéfices s'impose petit à petit comme outil d'aide à la décision. Dans cette logique, les coûts d'investissement sont comparés aux coûts des dommages évités par de telle mesure de gestion. L'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations devient donc un indicateur de vulnérabilité puissant, qui permet aux décideurs de juger de la pertinence des projets de gestion d'inondations.

Le processus d'évaluation des dommages potentiels comprend différentes modélisations. Les bases de données, ainsi que les méthodes et hypothèses faites pendant les différentes modélisations sont à l'origine d'incertitudes diverses. La base des évaluations est constituée de trois piliers : modèle hydrodynamique, modèle d'occupation du sol et modèle économique de désordres et dommages. Les paramètres pris en compte dans chaque modèle ont leur importance sur les résultats globaux des évaluations. Jusqu'à quel point le choix des paramètres peut-il influencer les résultats des évaluations socio-économiques ? Ainsi, les évaluations de dommages accompagnées d'analyses d'incertitudes apportent aux gestionnaires une compréhension plus riche de la nature incertaine et variable du risque. Cependant, très souvent, ces évaluations sont présentées seules aux décideurs, et les études ne prennent pas en compte les incertitudes dans les analyses. Ceci entraîne une mauvaise utilisation des résultats de l'évaluation qui sont tenus pour certains.

De nos jours, on observe une forte tendance des recherches à se consacrer sur un aspect de l'évaluation afin de le raffiner. Les modèles d'hydraulique à surface libre sont des exemples de telles recherches. On possède actuellement des modèles très performants. Quelle est la sensibilité du choix de l'un ou de l'autre modèle hydraulique dans les évaluations des dommages engendrés par les inondations ? Quelle est la sensibilité des analyses aux choix des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des enjeux aux inondations ? Si on ne se pose pas ces questions, on risque de trop charger les modèles de paramètres et en conséquence d'incertitudes et de difficultés d'analyses. Les évaluations peuvent devenir très longues et onéreuses quand on envisage des résultats précis de chaque modèle individuellement. La précision de l'une ou l'autre étape individuellement peuvent ne pas jouer un rôle majeur dans les résultats de l'analyse globale. Cependant, ces modèles peuvent

jouer un rôle important dans la complexité de la mise en œuvre de telles analyses. L'effet de compensation ou cumulation d'incertitudes doit encore faire l'objet de recherches.

Le caractère pluridisciplinaire de ce projet de recherche permettra une vue d'ensemble de ces questions. Le choix des précisions d'une ou de l'autre étape d'une évaluation des dommages doit être fait en considérant les paramètres comme partie d'une chaîne des modèles. Chaque paramètre doit être considéré à la fois comme générateur de gains en précision et d'incertitudes dans un modèle. On propose donc de comparer les gains avec les incertitudes et la complexité des analyses. Ceci, afin de mesurer l'importance de chaque paramètre dans les résultats globaux des évaluations, et d'analyser la faisabilité (caractère opérationnel) de l'évaluation en lien avec sa fiabilité.

Le présent document est composé de trois parties. Dans la première partie (PARTIE I), nous présentons un état de l'art puis la méthodologie qui sera mise en œuvre dans ce travail de recherche. Dans la deuxième partie (PARTIE II), nous présentons les sites d'études, les moyens mis en œuvre pour appliquer la méthodologie de recherche ainsi que les principaux résultats obtenus. Enfin, dans la troisième partie (PARTIE III), nous abordons un pan des dommages indirects, à travers le développement d'une méthode d'évaluation des dommages aux infrastructures de réseaux.

La plupart des chapitres ont donné lieu à des articles soumis ou publiés. La liste de ces communications est présentée en annexe de ce document.

PARTIE I. Contexte, concepts, état de l'art et question de recherche

La gestion du risque inondation reste un vrai challenge en termes de compréhension et connaissances scientifiques au sens large, tant hydraulique, qu'hydrologique, que socio-économique. Ce, d'autant plus, que l'analyse du risque inondation est un outil essentiel à la gestion territoriale, aux politiques publiques locales, aux projets de gestion des rivières mais également la gestion du risque à travers, par exemple, la détermination des taux des primes d'assurance. Différents types d'analyses peuvent être mobilisées en fonction de l'objectif suivi. L'évaluation des dommages potentiels d'une inondation constitue l'une de ces analyses qui est de plus en plus utilisée. Ce type d'analyse nous permet de quantifier le risque en prenant en compte différents critères. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'évaluation des dommages potentiels et aux incertitudes liées aux données et aux méthodes utilisées pour cartographier l'aléa et celles utilisées pour évaluer la vulnérabilité des biens. Cette première partie est composée de trois chapitres. Les principaux concepts nécessaires à la bonne compréhension de notre problématique sont exposés dans le premier chapitre (Chapitre 1). Le Chapitre 2 développe la problématique et présente les incertitudes retenues dans le cadre de ce travail. Enfin, le Chapitre 3 présente l'outil SIG développé afin de réaliser les différents tests menés dans le cadre de ce travail.

Chapitre 1. Principaux concepts liés à la gestion et évaluation du risque inondation

Ce chapitre introduit les principaux concepts liés au risque inondation et au processus d'évaluation des dommages. Le risque inondation est une combinaison d'un aléa et d'une vulnérabilité (conséquence et probabilité). Il s'agit d'un phénomène complexe impliquant des aspects naturels et humains, et des intérêts tant privés que publics. Les conséquences d'une inondation peuvent être de différents types. Il convient de distinguer les conséquences positives, i.e. les gains et les bénéfiques, des conséquences négatives, i.e. les coûts et les pertes. Les pertes dues aux inondations sont elles-mêmes de différentes natures : environnementales, sociales, économiques, humaines etc. Le risque d'inondation est le principal risque naturel en France et dans le monde, en termes de vies humaines et dommages monétaires. Le risque d'inondation constitue de ce fait un réel challenge pour nos sociétés. Différentes mesures peuvent être utilisées dans le cadre de cette gestion du risque. Ainsi, les plans de gestion des inondations permettent de réduire la vulnérabilité des territoires, de veiller à ne pas accroître cette vulnérabilité au cours du temps, de tenter de se préparer aux événements, de tenter de les contrôler, d'améliorer la gestion post-crise, etc. Le but de toutes ces mesures est de réduire les dommages potentiels des inondations. Elles impliquent des coûts monétaires tels que les coûts de construction d'une digue ou d'un barrage, les coûts liés à l'amélioration des bâtiments afin de mieux résister aux inondations, etc. Cette évaluation des dommages potentiels constitue de ce fait un enjeu fort en tant qu'outil d'aide à la décision (tant dans les analyses coûts-bénéfiques, que les analyses multicritères). Différentes méthodes peuvent être utilisées afin d'évaluer ces dommages potentiels. Parmi elles, les méthodes déterministes sont actuellement les plus utilisées. Elles reposent sur une description de la vulnérabilité des biens aux inondations et sur l'aléa lui-même.

Chapitre 2. Incertitudes liées aux estimations des dommages potentiels des inondations

L'évaluation déterministe du dommage potentiel d'une inondation comprend la description de l'aléa, la vulnérabilité des biens ainsi que leurs susceptibilités à subir le dommage. Différents modèles

peuvent être utilisés pour obtenir les données nécessaires à l'évaluation. L'incertitude est présente dans ce processus d'évaluation, dans chacune des modélisations qui constitue une des étapes de ce processus d'évaluation (Figure 1). La manière dont cette incertitude se propage sur les résultats de l'estimation est encore mal connue. Le choix de telle ou telle stratégie retenue pour l'évaluation des dommages est de ce fait un point crucial à déterminer en amont du processus. Le but de ce chapitre est de proposer un cadre permettant d'analyser l'impact des différentes stratégies d'évaluation utilisées pour évaluer le dommage potentiel par rapport à leur faisabilité d'une part et à la précision des résultats d'autre part. Les éléments fondamentaux du processus d'évaluation sont ainsi analysés: (1) analyses hydrologiques et simulations hydrodynamiques des événements, (2) évaluation de la vulnérabilité des biens et (3) les fonctions de dommages et la détermination de la valeur des biens. Notre cadre d'analyse compare deux critères: l'incertitude (i.e. la variabilité des résultats d'évaluation en fonction des choix des modèles et des méthodes) et la faisabilité (i.e. le niveau de complexité lié aux méthodes et modèles utilisés). Ce cadre méthodologique permet de mieux comprendre l'ensemble du processus d'évaluation des dommages liés aux inondations et d'identifier la pertinence des étapes de ce processus. Le but de ce cadre est d'aider les décideurs dans leurs choix de stratégies d'évaluation en fonction de leurs besoins (niveaux de précisions) et des données, du temps et du budget dont ils disposent.

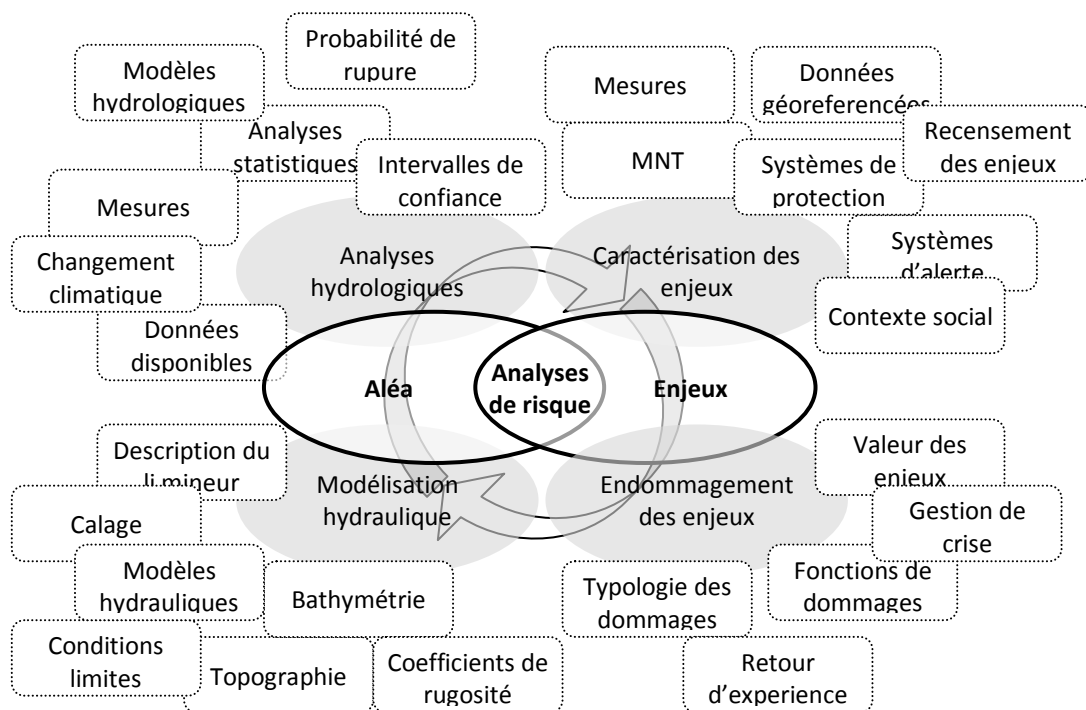


Figure 1. Sources d'incertitude dans l'évaluation du risque inondation.

Chapitre 3. Développement d'un outil SIG pour l'évaluation des dommages

Un outil SIG a été mis au point pour faciliter les tests réalisés dans la PARTIE II. Pour ce faire et en ce qui concerne le traitement des données, le logiciel ArcGIS 9.2 a été choisi. Le choix du logiciel en question a été orienté la compatibilité avec les logiciels hydrodynamiques comparés dans cette étude, notamment Hec RAS, Mike Flood et Mike21. Le développement d'un outil pour réduire le temps d'analyse de données facilite la comparaison des résultats des simulations. Nous avons

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

développé l'outil sous le langage computationnel Visual Basic for Applications (VBA) sous l'environnement du SIG ArcGIS 9.2. L'outil développé compte une interface simple et un algorithme relativement souple, et facilement modifiable. Il a été développé pour permettre le traitement conjoint des données issues des modélisations hydrauliques et des données issues des analyses de vulnérabilité. Le schéma suivant (Figure 2) synthétise l'algorithme de l'outil.

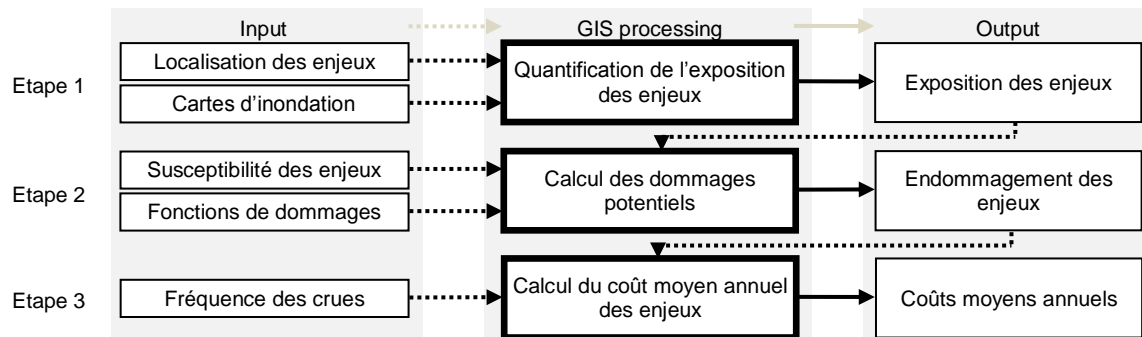


Figure 2. Les trios étapes de la méthode développée pour calculer les dommages des inondations.

La première étape consiste à combiner les paramètres de l'aléa avec les caractéristiques de vulnérabilité afin de déterminer les enjeux susceptibles d'être inondés et de préciser les paramètres hydrauliques potentiels auxquels ces enjeux seront exposés en cas de crue. L'étape numéro deux sert à calculer les dommages potentiels pour les enjeux susceptibles d'être endommagés grâce à des fonctions de dommages. Pendant la troisième étape, l'outil calcule le coût moyen annuel (moyenne probabiliste de dommages sur l'année) sur la base de dommages calculés pour un minimum de 3 crues de périodes de retour différentes. A l'aide de cet outil, nous sommes en mesure de réaliser différents tests sur les jeux de données en entrée du modèle (notamment : couches contenant la distribution spatiale des paramètres hydrauliques, couches avec la description de la vulnérabilité des enjeux et tableaux avec des fonctions de dommages) en mesurant la variabilité des résultats en sortie.

PARTIE II. L'impact des choix méthodologiques sur les évaluations

Différents types de données doivent être assemblés afin d'obtenir l'estimation des dommages. D'une part, il est nécessaire de recueillir des données sur l'aléa qui peut être modélisé de différentes manières. D'autre part, il est également nécessaire de recueillir des données sur la vulnérabilité qui sont plus ou moins abondantes selon le contexte, l'échelle retenue et le type de biens exposés à l'inondation. Les incertitudes vont être générées et se propager tout au long du processus d'évaluation. Comprendre et mesurer ces incertitudes va permettre d'orienter les choix méthodologiques. Pour ce faire, nous procédons par étapes, ainsi après avoir présenté les études de cas sur lesquels nous réalisons les tests (Chapitre 4), nous nous concentrons tout d'abord sur l'aléa (Chapitre 5 et Chapitre 6) puis dans un deuxième temps sur la vulnérabilité (Chapitre 7 et Chapitre 8). Enfin, le chapitre 9 synthétise le tout puisqu'on se concentre sur le processus d'évaluation dans son ensemble.

Chapitre 4. Présentation des études de cas

Deux études de cas ont été choisies pour l'application de la méthodologie de recherche pendant le développement de la thèse : (1) une zone dans la basse vallée de la rivière Bruche et (2) une dans la haute vallée de la rivière Ill. Les deux zones sont localisées dans la partie française du bassin versant du fleuve Rhin (Figure 3).

La première zone étudiée comprend la commune de Holtzheim. La commune est directement touchée par les inondations de la Bruche. La zone compte 11,9 km pour la rivière Bruche (de la commune d'Entzheim jusqu'à la commune de Strasbourg) ; et 6,4 km pour le canal de la Bruche (de la commune de Oberschaefolsheim jusqu'à la commune de Strasbourg). Tant la rivière que le canal se jettent dans la rivière Ill, qui traverse la commune de Strasbourg. Le débit de la Bruche peut atteindre 196 m³/s à Holtzheim pour une période de retour trentennale et 260 m³/s pour une période de retour centennale. Le tronçon de la Bruche en étude est assez naturel comptant très peu d'ouvrages en lit mineur (4 en tout). Les enjeux sur la zone comptent en majorité des bâtiments résidentiels, mais aussi des bâtiments commerciaux/publics ainsi que des infrastructures diverses. Cette étude de cas représente des espaces périurbains dont l'occupation au sol est relativement hétérogène et les systèmes hydrauliques sont à la fois simples (rivière) et complexes (ouvrages hydrauliques).

Le deuxième site d'études comprend la commune de Fislis, dans le Haut Rhin. Cette commune est « victime » fréquente d'inondations peu dommageables. L'événement endommageant le plus récent a eu lieu en 2007. La zone d'étude compte 6,5 km pour la rivière Ill et 4,1 km pour son affluent Limendenbach. Le débit de l'Ill peut atteindre 23 m³/s à Oltingue (1,5 km à l'amont de Fislis) pour une période de retour décennale et 50 m³/s pour une période de retour centennale ; son affluent Limendenbach peut atteindre 14 m³/s et 36 m³/s respectivement pour les mêmes périodes de retour. Les tronçons des rivières étudiées comptent 27 ouvrages (23 pour l'Ill et 4 pour Limendenbach). Hormis la confluence, le système hydraulique en question demeure relativement simple à modéliser. Les enjeux sur la zone comptent essentiellement des bâtiments résidentiels/activités agricoles. Des dommages aux infrastructures ne sont pas importants. Cette étude de cas représente des communes « agricoles » ou « de campagne », qui sont généralement « victimes » d'inondations récurrentes et dommageables.

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

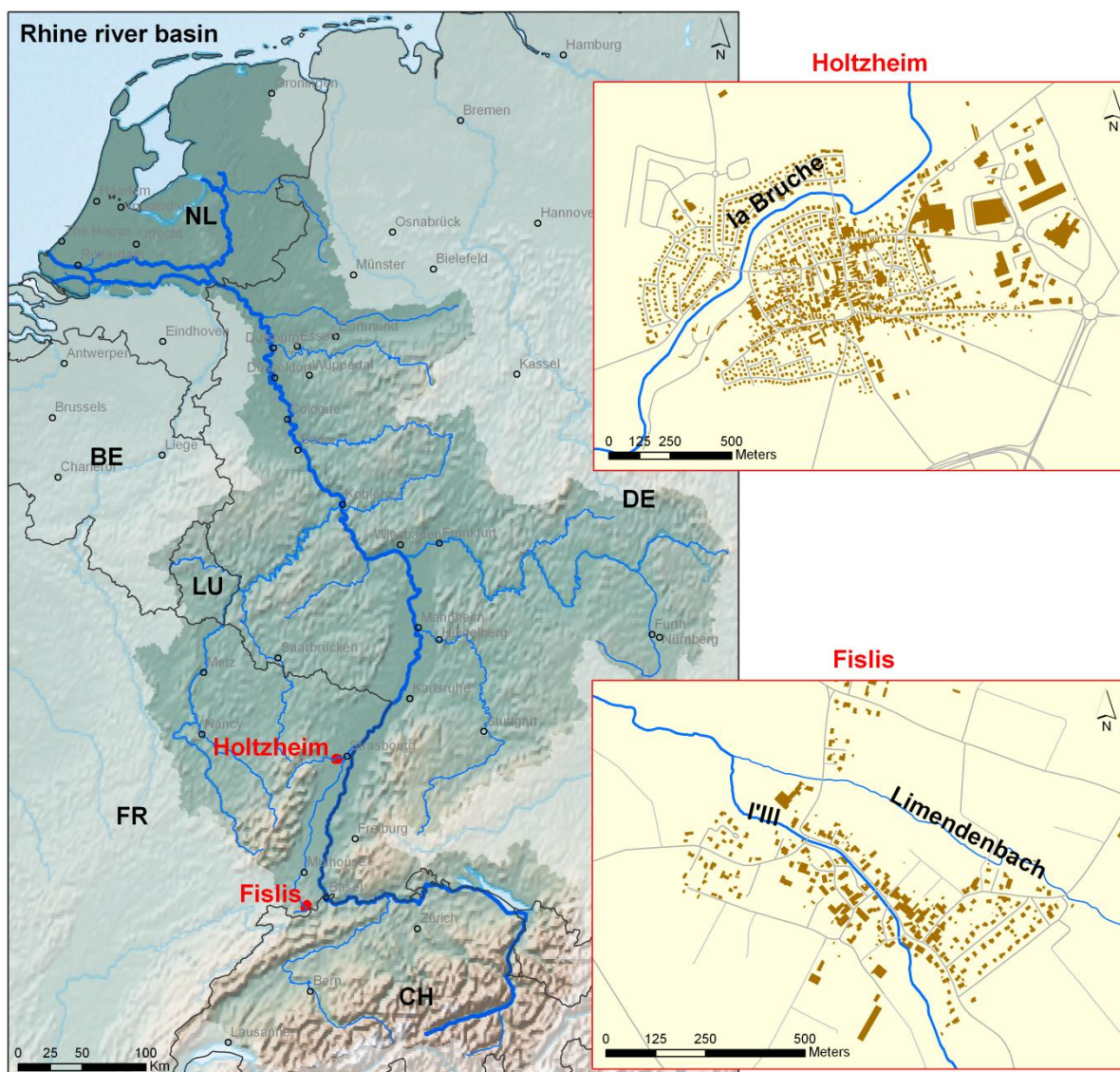


Figure 3. Localisation des études de cas : la commune d'Holtzheim dans la basse vallée de la Bruche et la commune de Fislis dans la haute vallée de l'III.

Chapitre 5. Analyses hydrologiques

La connaissance hydrologique est essentielle pour construire les cartes d'aléa, qui constituent le point de départ du processus d'évaluation du risque inondation. Les analyses hydrologiques nous permettent de connaître les variations du flux de la rivière au cours du temps et les probabilités d'occurrence des crues. Bien que les incertitudes hydrologiques soient considérées comme la source majeure d'incertitudes dans les évaluations des dommages, peu d'études ont porté sur la manière dont cette incertitude se propage dans le processus d'évaluation. De plus, il n'existe pas vraiment de standard en matière d'acceptabilité des niveaux d'incertitudes. En France, c'est en général un intervalle de confiance du débit de pointe à 70% pour les zones rurales et à 90% pour les zones urbaines. Alors que le choix de cet intervalle de confiance est déterminant pour les résultats de

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

l'analyse hydrologique, aucune étude n'a été développée afin de quantifier l'impact de ce choix sur les estimations des dommages. Dans ce chapitre, nous nous attelons ainsi à comparer le rôle du choix des différentes méthodes régulièrement utilisées ainsi que l'influence du choix de la borne de l'intervalle de confiance sur l'estimation. Pour ce faire, c'est le cas d'étude de la Bruche qui a été retenu. Afin de quantifier l'impact du choix de la distribution statistique retenue, nous en avons comparé quatre : GEV, Gumbel, Lognormal, and Pearson distribution. Deux intervalles de confiance ont été adoptés afin de déterminer les périodes de retour, 70% and 90%. Nous analysons la propagation de l'incertitude liée à la fois au choix de la distribution statistique et au choix de l'intervalle de confiance sur la production de carte d'aléa et sur l'évaluation des dommages liés à l'inondation.

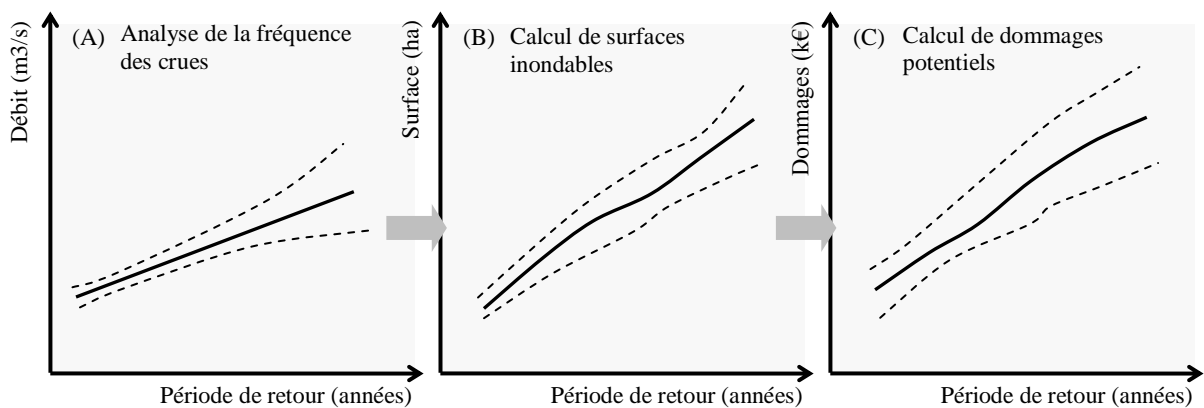


Figure 4. Schéma théorique de propagation d'incertitudes hydrologiques dans les cartes d'inondation et l'évaluation des dommages liés aux inondations.

Plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées pour analyser la série des mesures de débits. Ces méthodes ont servi à déterminer les périodes de retour associés aux débits divers de la rivière. Nous avons également utilisé des méthodes statistiques pour déterminer les intervalles de confiance pour ces estimations. L'influence des méthodes statistiques (GEV, Gumbel, Log, Pearson) et de l'intervalle de confiance (résultat central, borne supérieur de l'intervalle de confiance de 70% et borne supérieur de l'intervalle de confiance de 90%) sur l'évaluation des dommages a été analysée en propageant ces incertitudes dans des modèles hydrauliques. Ainsi, les débits déterminés à l'aide de ces différentes méthodes ont été utilisés pour produire des cartes d'inondation. 108 cartes d'inondation ont été développées et utilisées pour évaluer les dommages des inondations aux bâtiments pour différentes périodes de retour à l'aide de fonctions de dommages existantes dans la bibliographie. Les incertitudes liées aux choix des méthodes statistiques et intervalles de confiance ont été quantifiés grâce au calcul des coûts moyens annuels sur la zone d'études.

Le choix des distributions statistiques influence peu les résultats de l'évaluation des dommages. Une variation maximale de 29% est observée entre l'estimation minimal et maximal considérant les différentes distributions. La variabilité des résultats induite par le choix de l'intervalle de confiance est bien plus importante puisque les estimations de coût moyen annuel peuvent varier du simple au triple en fonction du choix opéré. De ce fait, il est vraiment nécessaire d'apporter une attention toute particulière aux choix des méthodes hydrologiques qui servent à construire les cartes d'aléa, en particulier lorsque ces cartes servent ensuite à l'évaluation des dommages monétaires.

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

Chapitre 6. Modélisation hydrodynamique et cartographie des inondations

Les cartes de risque d'inondation constituent un élément de base des politiques de contrôle et de gestion des inondations. Afin d'améliorer le processus de décision, il est nécessaire de mieux comprendre le phénomène lié à l'inondation et la précision des cartes. Ainsi, différentes institutions cherchent à améliorer la qualité des cartes : le programme de modernisation des cartes de la Federal Emergency Management aux Etats-Unis et la Directive Inondation Européenne 2007/60/EC sont autant d'exemples qui montrent l'importance de cet élément. En pratique, différents critères influencent les choix pour modéliser l'aléa et produire les cartes : l'échelle de l'analyse, la disponibilité des données et des ressources financières. La topographie et les erreurs hydrologiques sont considérées comme les sources majeures d'incertitudes des cartes d'aléa. Le type de modèle hydraulique représente une autre source d'incertitude. L'objectif principal de ce chapitre est donc d'identifier comment les cartes d'aléa et les évaluations de dommages peuvent être affectées par les choix stratégiques en matière de modélisation hydrodynamique. En effet, nous nous focalisons sur les différentes stratégies utilisables pour cartographier la rivière, en considérant différents niveaux d'analyses. Les différences dans les stratégies portent, d'une part, sur le type de modèle hydrodynamique utilisé pour simuler l'inondation (modèles 1D, 1D/2D ou 2D) et, d'autre part, les choix du modélisateur lors de l'intégration de la géométrie, de la bathymétrie et de la topologie des lieux étudiés (sections en travers et résolution du modèle numérique de terrain). Ainsi, différentes stratégies de modélisation hydraulique ont été utilisées pour générer les cartes d'inondation. Ces stratégies se différencient donc principalement par le type de modèle utilisé (1D, 1D/2D et 2D) et par l'échelle de l'analyse (la quantité de données utilisées, la finesse du modèle).

Des cartes de période de retour de 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 et 500 ans ont été construites pour les différents scénarios de modélisation. La méthode de calcul de l'endommagement potentiel aux bâtiments en utilisant des fonctions de dommages a été entreprise pour les différentes cartes d'inondation produites. Ceci dans le but de propager les incertitudes hydrauliques dans les résultats des évaluations de dommages. Le coût moyen annuel a été calculé pour quantifier et comparer ces incertitudes. On constate que pour le modèle 1D, le coût des dommages évalué est inversement proportionnel à l'échelle d'analyse. Pour les modèles 2D, l'effet est contraire, le coût des dommages évalué est proportionnel à l'échelle d'analyse. Pour les modèles couplés, les deux effets sont observés. La comparaison de 32 stratégies de modélisation et la production de pas moins de 96 cartes d'inondations montre bien que le choix du type de modèle est le facteur le plus important lorsqu'on considère la variabilité des paramètres constituant la cartographie de l'aléa. Les tests portant sur l'échelle devront faire l'objet de recherches plus approfondies. Le choix de la résolution du modèle numérique de terrain (MNT) influence également fortement les résultats du processus de modélisation. Ainsi, différents critères doivent être étudiés avant de faire ces choix surtout si c'est une méthode simplifiée qui est utilisée pour cartographier l'aléa. En fait, c'est le but pour lequel on réalise cette cartographie qui doit influencer les critères de celle-ci, notamment le choix du niveau de l'échelle. Cependant, les ressources financières et la qualité des données dont on dispose sont également des facteurs déterminants pour le choix du modèle. Pour ces raisons, nous suggérons de réaliser, à la suite des évaluations des dommages, des analyses de sensibilité.

Chapitre 7. Méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des enjeux

Les principaux dommages causés par les inondations sont les dommages aux bâtis. Les dommages occasionnés aux bâtiments dépendent à la fois, (a) du phénomène physique, par exemple la hauteur

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

d'eau, la vitesse, la durée de submersion; et (b) de la vulnérabilité du bâtiment lui-même qui dépend, par exemple du type de construction, du type d'occupation, du niveau d'auto-protection etc. Si beaucoup d'efforts se sont concentrés sur l'aléa (élaboration de cartes, estimation des paramètres hydrauliques, etc.), la connaissance de la vulnérabilité du territoire est également cruciale pour obtenir de bonnes estimations des dommages potentiels d'une inondation. La vulnérabilité comporte à la fois des paramètres physiques, économiques et sociaux des bâtiments et de ses occupants ainsi que des éléments externes, comme la possibilité de réduire les dommages grâce, par exemple, à des systèmes d'alertes. L'échelle de l'analyse est alors un élément déterminant pour collecter et produire les données. Pourtant, l'évaluation de la vulnérabilité est une tâche qui est souvent simplifiée par l'agrégation de données existantes. En effet, la récolte de données de terrain peut vite devenir très lourde à mener. De ce fait, en pratique, la mise en œuvre d'une telle évaluation dépend aussi de sa facilité de mise en œuvre, i.e. des du type de données disponibles, du temps, des ressources financières etc. Trouver le bon arbitrage entre la précision et la faisabilité de la méthode est donc un vrai challenge. Ce chapitre se concentre sur l'évaluation des dommages aux bâtis en confrontant différentes méthodes pour y parvenir. Ces approches diffèrent par les types de données utilisés pour déterminer l'exposition au risque des bâtiments. Par contre, ce sont les mêmes cartes d'aléa et les mêmes fonctions de dommages qui sont évalués pour estimer les dommages afin de pouvoir isoler et quantifier l'impact du choix de la méthode d'estimation de la vulnérabilité.

Six méthodes de caractérisation de la vulnérabilité matérielle des bâtiments aux inondations ont été utilisées pour estimer leur susceptibilité à subir des dommages. Ces méthodes sont différentes en ce qui concerne les données existantes et l'approche utilisée pour recenser les données manquantes concernant la typologie et les caractéristiques diverses des bâtiments. Six bases de données concernant l'occupation du sol et la vulnérabilité des bâtiments ont été ainsi produites. Ces données ont été utilisées pour calculer les dommages pour des événements de période de retour décennale, trentennale et centennale, ainsi que le coût moyen annuel. On a constaté que les évaluations à plus grande échelle ont tendance à surestimer les dommages par rapport à l'évaluation la plus fine. Même si les valeurs centrales sont très proches, nous constatons que le niveau d'incertitude peut être très important lorsque les échelles sont grandes. Lorsqu'on travaille sur des petites zones qui sont fréquemment inondées (période de retour inférieure à 30 ans), une enquête de terrain exhaustive semble adaptée afin d'évaluer au mieux la vulnérabilité des bâtiments et permettre ainsi de réduire considérablement les incertitudes majeures comme la présence ou l'absence de caves. Si de telles enquêtes ne sont pas réalisables, il faut impérativement réaliser alors des études de sensibilité afin de déterminer les limites de l'exercice.

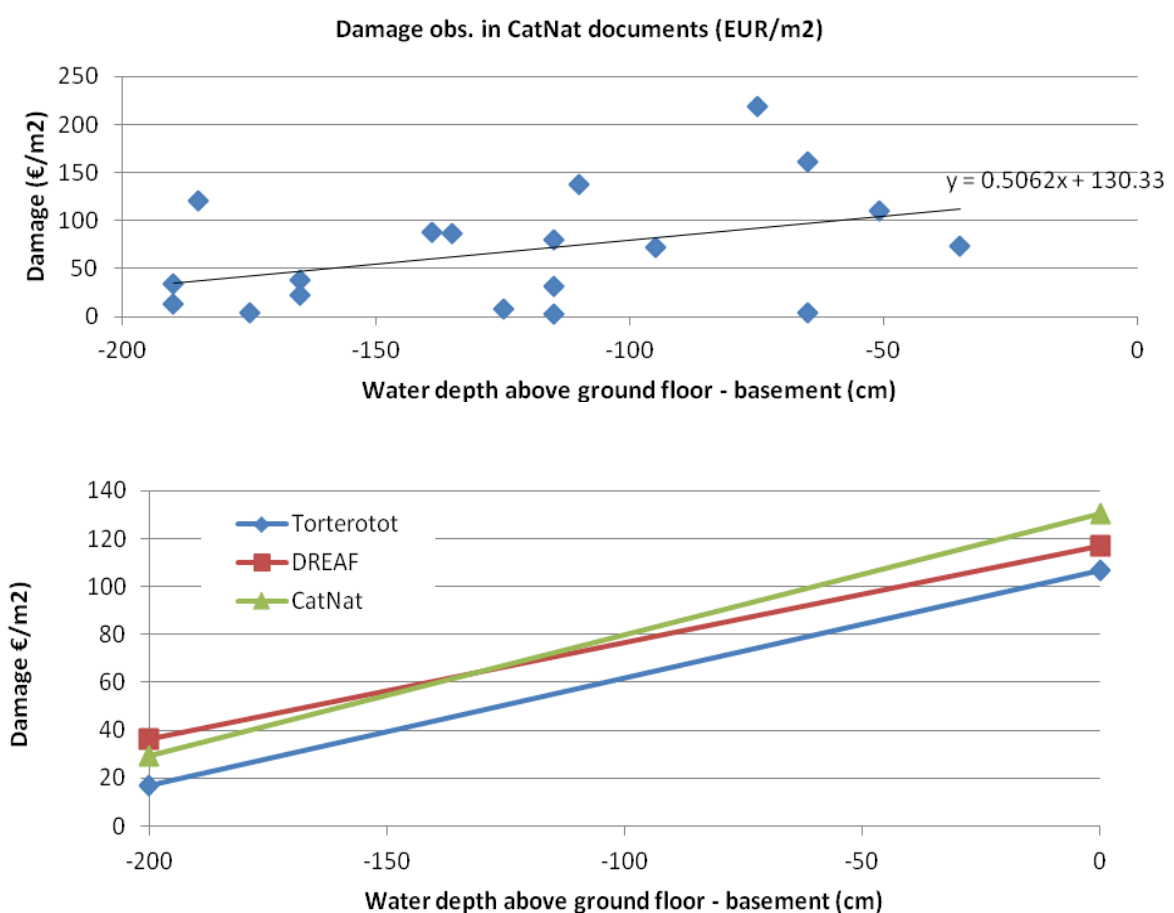
Chapitre 8. Fonctions de dommages et estimation de la valeur des enjeux

Les dommages potentiels dus à une inondation sont généralement traduits à travers des fonctions de dommages. Même s'il est recommandé de construire des fonctions de dommages spécifiques du terrain étudié, il est rare que des études puissent se permettre de construire leurs propres fonctions. En général, les études se réfèrent à des fonctions de dommages construites dans le cadre d'études spécifiques. Deux types de fonctions de dommages peuvent être utilisées afin d'évaluer les dommages potentiels: (1) les fonctions de dommages absolues où le dommage est calculé pour les biens affectés sans prendre en compte la valeur du bien elle-même, et (2) les fonctions de dommages relatives qui sont exprimées en proportion de la valeur du bien. Ces fonctions de dommages relatives sont plus facilement transposables à d'autres contextes dans la mesure où elles

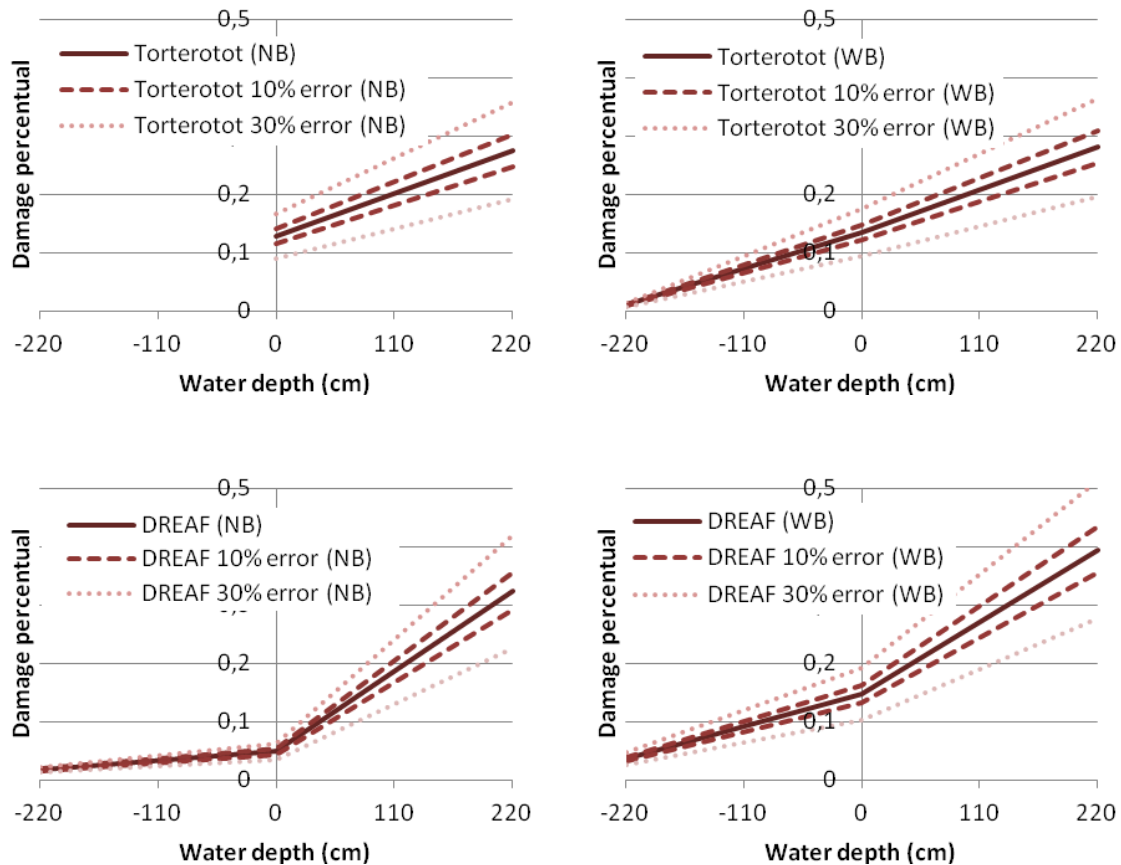
J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

sont exprimées en pourcentage de la valeur du bien, mais il faut ensuite connaître la valeur des biens. A la fois, le choix de la fonction de dommage et la méthode pour déterminer la valeur des biens influencent directement les résultats des évaluations. Le but de ce chapitre est de chercher à comprendre comment ces choix font varier les évaluations des dommages potentiels.

Deux fonctions de dommages nationales ont été utilisées pour tester les évaluations des dommages aux inondations. Le dossier de catastrophes naturelles (CatNat) déposé pour le site d'étude après un événement de période de retour trentennale a été analysé afin de valider les fonctions de dommages utilisées. Les dommages déclarés ont été ramenés à la valeur actuelle exprimée en €/m². Nous avons corrélé ces valeurs à la hauteur de l'eau dans le sous-sol des bâtiments car le nombre de rez-de-chaussée de bâtiments atteints par l'eau n'était pas suffisant pour réaliser des analyses statistiques.



Rares sont les fonctions de dommages qui sont accompagnées de marges d'erreur et explications concernant le niveau d'incertitudes existant. Une analyse théorique a été réalisée, en agrégeant 10 et 30% d'erreurs potentielles aux fonctions de dommages utilisées. Dans ce cas, les évaluations de dommages sont directement impactées par cette erreur (10% d'erreur sur une fonction de dommages équivaut à 10% d'erreur sur le résultat final de l'évaluation des dommages).



L'estimation de la valeur des enjeux affecte de la même manière les résultats des évaluations de dommages. Une sous-estimation de 10% de la valeur d'un bien implique une sous-estimation de 10% des dommages potentiels à ce bien. Différentes méthodes d'estimation de la valeur des enjeux nous ont amené à une variation de 51% de la valeur des dommages évalués. Ces incertitudes se sont montrées bien plus fortes que les incertitudes générées par le choix des fonctions de dommages.

Chapitre 9. Cascade d'incertitudes dans les évaluations des dommages potentiels

Ce chapitre reprend tous les aspects présentés dans les chapitres précédents de la thèse et propose une analyse de l'ensemble des incertitudes liées à l'évaluation des dommages liés aux inondations. D'une part, nous comparons les impacts des incertitudes des quatre modules de l'évaluation de dommages : (1) les analyses hydrologiques et les considérations faites pour déterminer les débits pour différentes probabilités d'occurrence; (2) les types de modèle hydraulique et les considérations faites lors de l'intégration des données topographiques et bathymétriques; (3) les données et méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments aux crues ; et (4) les fonctions de dommages utilisées et les erreurs relatives à la caractérisation de la valeur des enjeux. D'autre part, nous quantifions l'impact des échelles d'analyse de l'aléa hydraulique et de la vulnérabilité des enjeux sur les estimations de dommages potentiels.

1. Introduction

Plusieurs études récentes se sont focalisées sur l'analyse d'incertitudes liées au processus d'évaluation des dommages liés aux inondations. Peu d'études, en revanche, ont abordé de manière comparative l'impact de l'ensemble des stratégies d'évaluation dans le résultat global de ces évaluations (Merz et al., 2010). Apel et al. (2008) a comparé l'impact du choix des modèles hydrauliques et modèles d'endommagement (fonctions de dommages) utilisés pendant l'évaluation du risque. Les auteurs insistent sur l'importance de quantifier les incertitudes des différents modèles utilisés pour l'évaluation afin de mieux comprendre le phénomène de compensation d'incertitudes. Ils constatent l'importance majeure du modèle d'endommagement dans l'incertitude finale de l'évaluation. A l'inverse de Apel et al. (2008), Merz and Thieken (2009) arrivent à la conclusion suivante : la contribution du modèle d'endommagement à l'incertitude globale de l'évaluation est faible en comparaison avec les incertitudes liées aux modèles hydrologiques et hydrauliques. D'autres études ont conclu que les incertitudes hydrologiques et l'estimation des dommages sont des sources majeures d'incertitudes dans ce type d'évaluation (de Blois and Wind, 1995).

Une meilleure compréhension et la réduction des incertitudes liées aux évaluations de dommages demeurent un grand défi en matière de recherche (MEDDE, 2012). Les ressources disponibles ainsi que les dimensions de la zone d'études sont autant de facteurs déterminants pour le type d'outils à mettre en œuvre, et donc un élément crucial de la précision des résultats de l'analyse (Messner et al., 2007). Pour réduire les incertitudes de ces évaluations de manière efficace, il est vital d'identifier l'importance des différentes sources d'incertitudes du processus (de Blois and Wind, 1995). Comme évoqué par Green et al. (2011), l'appréciation des gains en matière de précision des résultats est essentielle à la gestion du risque.

L'objectif de ce chapitre est de comparer l'impact des différentes sources d'incertitudes épistémiques du processus d'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations. Dans la première partie (section 2), nous présentons la méthodologie de propagation d'incertitudes utilisée pour mesurer la part d'incertitudes liée aux différents modules de l'évaluation. En deuxième partie de ce chapitre (section 3), nous analysons l'impact des différents modules de l'évaluation sur les résultats de l'évaluation des dommages directs aux bâtiments dans deux études de cas en Alsace. Une analyse sur les échelles d'évaluation est menée dans le but de quantifier les incertitudes liées à cet aspect de l'évaluation.

2. Méthode

Cette étude se focalise sur les incertitudes épistémiques existantes dans les différentes modélisations nécessaires à l'évaluation des dommages liés aux inondations. Merz and Thieken (2009) suggèrent que l'utilisation de plusieurs méthodes pour analyser un même phénomène introduit la notion d'incertitude épistémique. Nous adoptons cette notion, en distinguant les incertitudes liées aux modèles, méthodes et données, i.e. incertitudes des modèles, des incertitudes corrélées aux hypothèses et choix des paramètres à introduire dans les modèles, i.e. incertitudes paramétriques (NRC, 2000). La méthode d'analyse d'incertitudes proposée ici considère l'évaluation des dommages comme un processus déterministe classique qui comprend deux grands groupes de variables à combiner pour aboutir aux résultats (pour plus de détails, cf. Chapitre 2). Nous appelons ces groupes « volets » de l'évaluation de dommages. Le volet « aléa » de l'évaluation comprend les analyses hydrologiques et modélisations hydrauliques nécessaires à la compréhension de l'aléa inondation. Le volet « enjeux » comprends la modélisation de la vulnérabilité et de

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

l'endommagement des enjeux. Afin de mesurer l'incertitude globale de l'évaluation, différentes stratégies d'acquisition de données et de modélisation sont proposées aux 4 modules fondamentaux de l'évaluation (Figure 5).

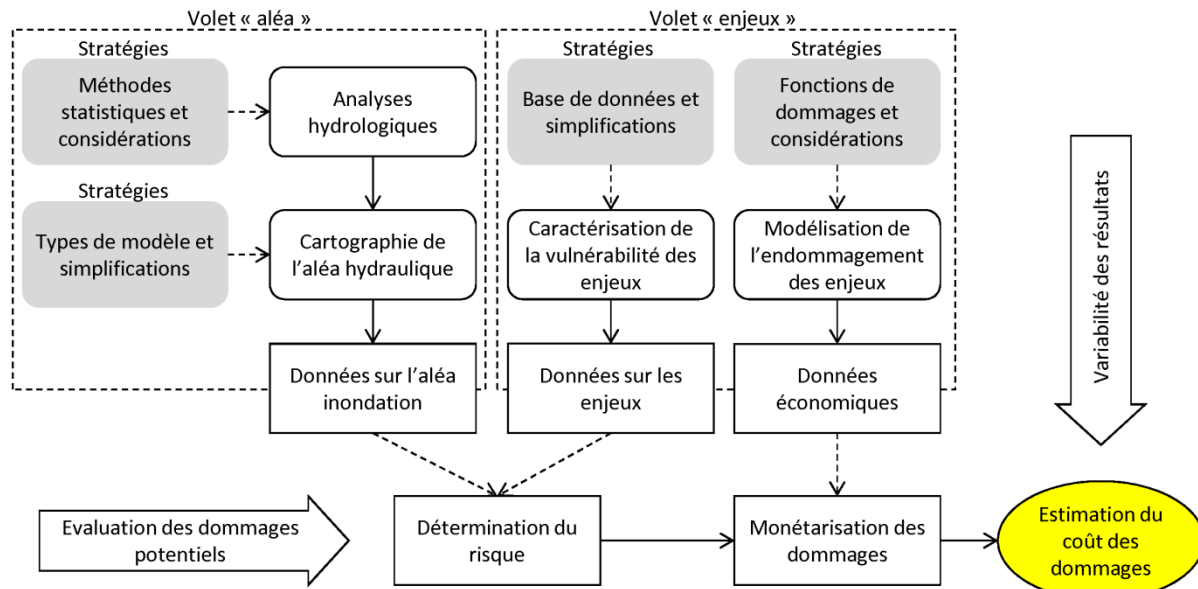


Figure 5. Schéma de propagation d'incertitudes épistémiques des différents modules de l'évaluation de dommages.

La méthode d'analyse d'incertitudes proposée ci-dessus (Figure 5) consiste en trois étapes d'analyse : (1) définition et mise en œuvre de plusieurs « stratégies » pour produire les données nécessaires à l'évaluation des dommages potentiels (données relatives à l'aléa inondation, la vulnérabilité des enjeux et leur susceptibilité à subir des dommages) ; (2) propagation des incertitudes liées aux différentes stratégies sur les résultats de l'évaluation (tests de sensibilité relatifs à chaque module de l'évaluation) ; et (3) quantification de la variabilité des résultats générée par les différents scénarios et stratégies d'évaluation. La méthode en question a été appliquée sur deux études de cas afin de mieux comprendre l'influence des caractéristiques locales sur le phénomène de propagation d'incertitudes liées aux différents modules d'évaluation des dommages. La commune de Holtzheim dans la basse vallée de la Bruche et la commune de Fislis dans la haute vallée de l'Ill ont fait l'objet de cette étude. Les deux zones sont localisées dans la partie française du bassin versant Rhin (pour plus de détails, cf. Chapitre 4).

2.1. Définition des stratégies d'évaluation

Les tests réalisés dans ce travail se fondent sur deux critères de différenciation stratégique concernant l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations : (1) le choix des modèles, méthodes, données et les incertitudes corrélées ; et (2) le choix des échelles d'évaluation de l'aléa inondation et de la vulnérabilité des enjeux.

2.1.1. Modèles, méthodes et données

Dans la méthodologie décrite par la Figure 5, nous déterminons une configuration globale en matière de choix des modèles et hypothèses, prise comme « référence ». L'évaluation « référence » est J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

constituée d'un seul modèle et jeu d'hypothèses pour chaque module de l'évaluation, i.e. un modèle hydrologique, un modèle hydraulique, un modèle de vulnérabilité, et un modèle d'endommagement. Cette évaluation comporte la description la plus détaillée des modules « hydraulique » et « vulnérabilité ». Les autres scénarios proposés gardent à chaque fois la structure de référence pour trois des modules de l'évaluation tandis que le quatrième module fait l'objet de différents choix en matière : d'une part de modèles, méthodes et données (révélateurs d'incertitudes des modèles) ; et d'autre part de considérations et simplifications dans le paramétrage des modèles (révélateurs d'incertitudes paramétriques).

2.1.2. Echelles d'évaluation

Différentes approches globales sont entreprises vis-à-vis des échelles d'analyse des deux « volets » de l'évaluation, i.e. vulnérabilité des enjeux et aléa inondation. Trois niveaux d'échelles sont considérés dans la définition des scénarios d'évaluation : échelles « micro », « meso » et « macro » (Figure 1.1. Tableau 1).

Tableau 1. Echelles d'évaluation de la vulnérabilité des enjeux et de l'aléa inondation.

Echelle	Vulnérabilité des enjeux	Aléa inondation
MICRO	La caractérisation des enjeux est réalisée à l'échelle élémentaire (chaque bâtiment, infrastructure, objet, etc.). on s'intéresse aux détails de construction et d'occupation de chaque enjeu, déterminant leur vulnérabilité matérielle.	Des modèles hydrodynamiques performants sont utilisés avec une description fine des écoulements en lit mineur et lit majeur des cours d'eau, en tenant compte des particularités des ouvrages hydrauliques existants. On s'intéresse à l'emprise et aux caractéristiques hydrauliques d'événements fréquents et extrêmes.
MESO	La caractérisation des enjeux est réalisée à l'échelle de blocs d'occupation du sol homogènes (zones résidentielles, industriels, commerciales, etc.). On s'intéresse aux caractéristiques de construction des enjeux qui présentent une occupation similaire. Des agrégations des valeurs sont nécessaires.	Les modélisations hydrodynamiques tiennent compte d'une description relativement fine des écoulements en lit mineur avec une description plus grossière du lit majeur, sans s'intéresser au détail de l'analyse. On s'intéresse à des événements de toute fréquence, avec un accent sur l'emprise d'événements exceptionnels.
MACRO	La caractérisation des enjeux est réalisée à l'échelle des unités administratives (municipalités, départements, régions, nations, etc.). On s'intéresse majoritairement aux caractéristiques d'occupation du sol, négligeant les caractéristiques des constructions.	La modélisation hydrodynamique décrit approximativement ce qui se passe dans le lit mineur du cours d'eau, s'intéressant majoritairement à la définition de l'emprise d'événements exceptionnels.

Il est démontré que différentes échelles d'évaluation peuvent être considérées pour les différents modules de l'évaluation (Messner et al., 2007). La méthodologie employée ici prend en compte cet aspect en considérant toutes les combinaisons d'échelle possibles pour l'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux décrites dans la (Tableau 1). Deux modules de l'évaluation sont particulièrement dépendants de la taille de la zone d'étude. Ce sont les modules « hydraulique » et « vulnérabilité », dont le caractère spatial rend l'acquisition et le traitement des données plus complexe pour une échelle plus fine d'analyse. Dans cette étude, seules les stratégies corrélées aux simplifications réalisées sur ces deux modules sont concernées par les changements d'échelles. Pour

chacun, une stratégie « micro », une « meso » et une « macro » ont été définies parmi les stratégies décrites par la suite. Les modules « hydrologie » et « endommagement » de référence ont été inchangés pour la construction des différents scénarios d'évaluation.

2.2. Mise en œuvre des différentes stratégies d'évaluation

2.2.1. Module « hydrologique » : détermination des fréquences des événements

Pour l'étude de cas de la commune de Holtzheim, une série de mesures de 39 années sur la rivière Bruche a été utilisée. Pour la commune de Fislis, nous utilisons une série de mesures de 30 années sur la rivière Ill. Ces données hydrologiques sont disponibles sur la base de données nationale de mesures hydrologiques « Banque Hydro »¹. Les analyses hydrologiques ont été réalisées sur les séries de données maximales des débits journaliers avec le logiciel « Hydrological Frequency Analysis » (HYFRAN®)². Six fonctions couramment utilisées pour analyser la fréquence de crues ont été utilisées (Haktanir, 1992; Merz and Thielen, 2005; Xu and Boij, 2007): GEV (Generalised extreme value), GP (Generalised Pareto), GUM (Gumbel), PE3 (Pearson type 3), LN3 (Lognormal 3-parameter-type) et EXP (Exponential). Le calcul des intervalles de confiance a été réalisé avec le logiciel HYFRAN® utilisant la méthode « parametric bootstrap » (Fortin et al., 1997). Les 4 méthodes de distribution statistique jugées représentatives d'une réalité probable (GEV, GUM, PE3 et LN3) ont été testées dans les deux études de cas, afin de révéler les incertitudes des modèles. L'intervalle de confiance de 90% a été utilisé afin de prendre en compte les incertitudes paramétriques des modèles (pour plus de détails, cf. Chapitre 4). Les résultats de l'analyse hydrologique des débits en fonction des différentes probabilités d'occurrence (périodes de retour) sont représentés dans les graphes suivants (Figure 6).

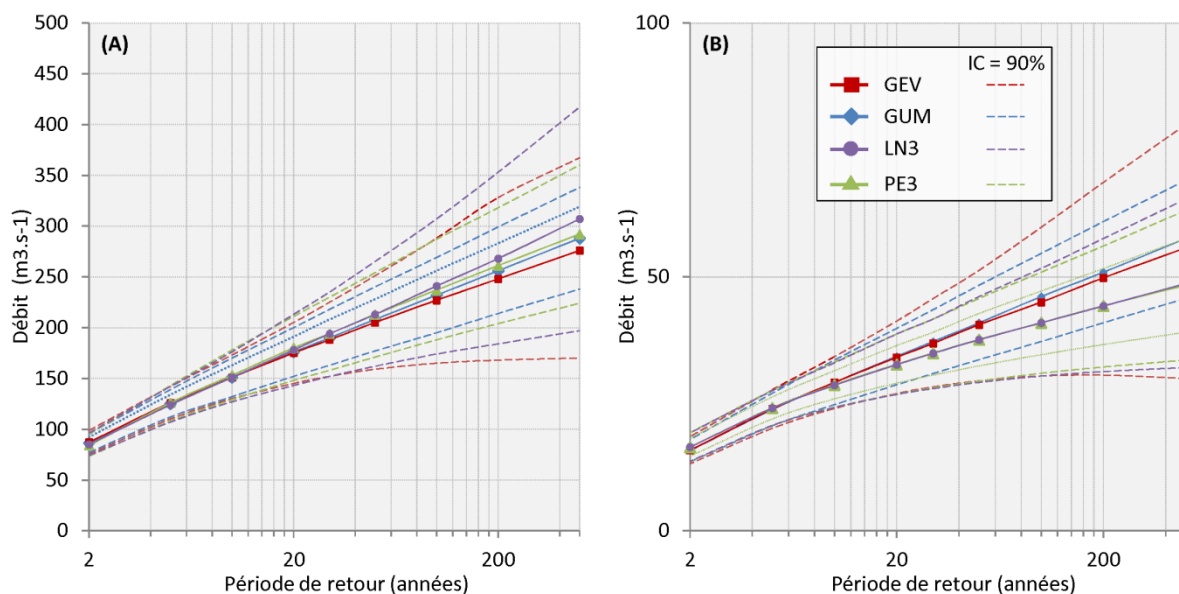


Figure 6. Résultats des analyses hydrologiques. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

¹ Site WEB «Banque hydro» <http://www.hydro.eaufrance.fr/> (Juin 2012).

² Site WEB du logiciel d'analyses hydrologiques utilisé dans le cadre de cette étude : « Hydrological Frequency Analysis » HYFRAN http://www1.ete.inrs.ca/activites/groupe/chaire_hydrol/chaire9.html (Juin 2012).

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

Les valeurs de débits centrales, minimales et maximales (IC = 90%) relatives à 8 périodes de retour différentes ont été utilisées dans la réalisation des tests (5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 et 500 ans).

2.2.2. Module « hydraulique » : simulation et cartographie des crues

Plusieurs modèles hydrauliques ont été développés dans le cadre de cette étude. Pour la commune de Holtzheim, nous nous sommes basés sur un modèle hydraulique conçu par le bureau d'études DHI entre 2005 et 2008 à la demande de la Communauté Urbaine de Strasbourg, avec le logiciel couplé uni-bidimensionnel (1D-2D) MIKE Flood[®] et des données topographiques obtenues par technique LIDAR³ avec 1 point par m² avec une précision altimétrique de 10 cm. Pour la seconde étude de cas, un modèle existant conçu par le Conseil Général du Haut Rhin avec le logiciel unidimensionnel (1D) HEC-RAS[®] et un modèle numérique de résolution similaire à celui de Holtzheim ont été utilisés. Ces outils ont constitué les briques de base des modèles développés dans les deux études de cas. Les différentes stratégies de modélisation adoptées pour le module « hydraulique » se sont fondées sur le type de logiciel de modélisation hydraulique utilisé (révélateur des incertitudes relatives aux modèles) et les simplifications/considérations méthodologiques adoptées pendant la construction de la topologie des modèles (révélateur des incertitudes paramétriques). D'autres auteurs ont également considéré l'un ou l'autre de ces aspects (Apel et al., 2008; Cook and Merwade, 2009; Merz and Thieken, 2009). Dans cette étude, nous avons utilisé trois logiciels hydrauliques et trois niveaux de détail différents ont été considérés pendant la construction de chaque modèle, faisant référence aux trois échelles d'analyse (micro, meso et macro) (Tableau 1). Le tableau suivant synthétise l'ensemble des différentes stratégies développées (Tableau 2).

Tableau 2. Différences entre les stratégies du module « hydraulique » de l'évaluation vis-à-vis des différents types de logiciel de modélisation hydraulique et simplifications entreprises.

Type de logiciel de modélisation hydraulique	Simplification/considérations méthodologiques
Logiciel unidimensionnel (1D). HEC-RAS 4.1 ^a . Représentation des lit-mineur et -majeur par branches filaires et casiers.	Nombre et position des sections en travers; nombre de singularités hydrauliques modélisées.
Logiciel bidimensionnel (2D). MIKE21 ^b . Représentation des lit-mineur et -majeur par un modèle numérique de terrain.	Taille des cellules de la maille bidimensionnel; nombre de singularités hydrauliques représentées.
Logiciel couplé uni-bidimensionnel (1D-2D). MIKE Flood ^b . Représentation du lit-mineur par branches filaires et du lit-majeur par un modèle numérique de terrain.	Nombre de sections en travers et singularités concernant la partie unidimensionnelle du modèle. Taille des cellules concernant la partie bidimensionnelle du modèle.

(a) Logiciel développé par l'USACE (United States Army Corps of Engineers). Site WEB: www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/ (consulté en juin 2012)

(b) Logiciel développé par le bureau d'études DHI Group. Site WEB: www.mikebydhi.com/Products/WaterResources/ (consulté en juin 2012)

Les parties bidimensionnelles des modèles 2D et 1D-2D ont été construites avec une maille rectangulaire de taille homogène. La méthode d'interpolation bathymétrique développée par Merwade et al. (2006, 2008) a été utilisée pour compléter les informations bathymétriques des

³ LIDAR est l'acronyme de l'expression anglo-saxonne « Light Detection and Ranging » qui désigne une technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur.

modèles 1D et alimenter le modèle 2D. Tous les scénarios ont considéré les principales obstructions hydrauliques, en fonction des échelles d'analyse adoptées (pour plus de détails, cf. Chapitre 5). Au total, 18 modèles ont été construits et analysés dans cette étude. Nous avons simulé et cartographié des crues de périodes de retour de 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 et 500 ans.

2.2.3. Module « vulnérabilité » : classification et caractérisation des enjeux

Deux groupes de caractéristiques des bâtiments ont été nécessaires à la caractérisation de leur vulnérabilité : (1) caractéristiques de construction, i.e. hauteur du premier plancher, présence de sous-sol ; et (2) caractéristiques d'occupation, i.e. type d'occupation, type d'activité, localisation de l'activité dans le bâti et taux d'occupation réel. Plusieurs bases de données avec différents niveaux de précision peuvent être utilisées pour identifier ces différents aspects de la vulnérabilité d'un territoire. Trois bases de données (BD) existantes ont été utilisées afin d'extraire les caractéristiques d'occupation des bâtiments des sites d'études :

- la BD TOPO^{®4}, conçue par l'Institut Géographique National (IGN), représente sous forme numérique (données géoréférencées) l'occupation du sol et la morphologie à l'échelle du 1 :25 000. Parmi les données disponibles dans cette base de données, la couche SIG « bâti » contient la représentation spatiale des contours des bâtiments et la description des types d'occupation.
- la BD OCS décrit l'occupation du sol en zones homogènes selon 94 classes à l'échelle du 1 :25 000. Cette base de données a été constituée à la demande de la région Alsace (GÉOMÉDITERRANÉE, 2003) ;
- des bases de données locales (BD Locales). Ces couches SIG constituées des points géoréférencés indiquant les adresses des bâtiments ont été enrichies avec des informations tirées de bases de données locales (Chambre de Commerces et de l'Industrie et collectivités locales) faisant référence aux types d'activités des bâtiments. Ces bases de données étaient beaucoup plus complètes pour le cas de Holtzheim que pour le cas de Fislis.

Des méthodes complémentaires ont été mises en place pour pallier les limites de ces bases de données. D'une part des entretiens ont été réalisés auprès d'experts locaux de l'immobilier pour déterminer les caractéristiques de construction, e.g. présence de sous-sols, hauteur du premier plancher. D'autre part, trois types d'enquête de terrain ont été réalisés sur les deux études de cas : (1) une enquête de terrain superficielle, dénommée « Enquête S », afin d'identifier les caractéristiques moyennes à l'ensemble des bâtiments des communes ; (2) une enquête de terrain semi-approfondie « Enquête SA » afin d'estimer les caractéristiques moyennes des bâtiments par zone d'occupation du sol homogène, pré-identifiés sur la base d'analyses cartographiques ; et (3) une enquête approfondie « Enquête A », afin de recenser et mesurer les caractéristiques, bâtiment-par-bâtiment. Six stratégies concernant le module « vulnérabilité », basées sur ces différentes bases de données, ont été utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments sur les deux études de cas (Tableau 3). Ces stratégies ont également été fondées sur différentes échelles d'analyse : les stratégies développées ont un niveau de précision croissant de la Méthode A (échelle « macro ») à la Méthode F (échelle « micro »).

⁴ Site WEB : www.ign.fr

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

Tableau 3. Les données et considérations prises en compte dans les différentes stratégies concernant le module « vulnérabilité », utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments

	Méthode A	Méthode B	Méthode C	Méthode D	Méthode E	Méthode F
Origine des données	BD Topo	BD Topo / OCS	BD Topo / OCS BD locale	BD Topo / OCS BD locale Enquête S	BD Topo / OCS / BD locale Enquête SA	BD Topo / OCS BD locale Enquête A
Présence de cave	Dire d'expert	Dire d'expert	Dire d'expert	Valeurs moyennes	Valeurs moyennes	Identifié individuellement
Élévation du premier plancher	Dire d'expert	Dire d'expert	Dire d'expert	Valeurs moyennes	Valeurs moyennes	Mesuré individuellement
Taux d'occupation des rez-de-chaussée	Dire d'expert	Dire d'expert	Estimé	Estimé	Valeurs moyennes	Estimé individuellement

La variabilité des résultats de ces méthodes révèle les incertitudes liées aux choix des modèles. Afin de prendre en compte les incertitudes liées aux considérations faites pour les données mesurées, estimées et déterminées par dire d'experts, i.e. incertitudes paramétriques, nous avons déterminé les bornes d'incertitudes MIN-MAX en suivant l'étude de Paté-Cornell (1996). Deux scénarios ont été considérés pour chaque méthode ; scénario MIN et MAX, correspondant respectivement à la combinaison des incertitudes des données aboutissant à une vulnérabilité minimale et maximale des bâtiments (pour plus de détails, cf. Chapitre 6). Ainsi, 18 estimations de la vulnérabilité des enjeux ont été réalisées pour chaque étude de cas.

2.2.4. Module « endommagement » : fonctions de dommages et valeur des enjeux

Deux ensembles de fonctions de dommages fréquemment utilisés dans le contexte national pour évaluer l'endommagement potentiel des bâtiments résidentiels ont été utilisés dans cette étude (CEPRI, 2008; D4E, 2007). Le premier jeu de fonctions de dommages utilisé « modèle 1 » a été développé par Torterotot (1993) tandis que le deuxième set « modèle 2 » a été mis au point sur quelques communes de la région Ile-de-France (à la fin des années 80) (D4E, 2007), et repris dans le cadre de l'outil standard d'analyse coût-bénéfices des inondations du Plan Rhône en 2010 (Ledoux_Consultants, 2010). Les deux jeux de fonctions de dommages en question distinguent les bâtiments avec et sans cave. Ils représentent le coefficient d'endommagement potentiel des bâtiments résidentiels en fonction de la hauteur de submersion par rapport au premier plancher des bâtiments (Figure 7).

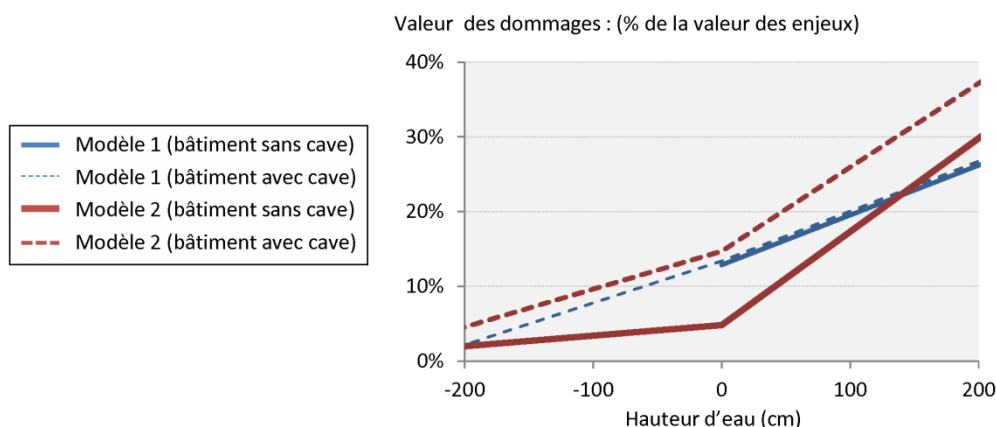


Figure 7. Différentes fonctions de dommages utilisées dans les tests relatifs au module « endommagement ».

Afin de calibrer ces fonctions de dommages, il est nécessaire de déterminer le prix moyen de l'habitat au m² et la surface des bâtiments exposés aux crues. La surface totale projetée des bâtiments et leur localisation spatiale ont été recensées de la même manière pour les différents scénarios d'analyse dans la BD TOPO de l'IGN. Cette méthode est aussi à l'origine d'incertitudes diverses. Une comparaison des surfaces de 155 bâtiments sur la zone d'Holtzheim issues de la BD TOPO avec des surfaces extraites à partir d'orthophotos a démontré une surestimation moyenne de 5% des surfaces des bâtiments par la BD TOPO (Eleutério, 2008). L'estimation de la valeur de construction des enjeux a été réalisée sur la base de dire d'experts immobiliers. Un écart type de 25% de la valeur estimée par rapport à la moyenne a été avéré entre les valeurs minimale et maximale estimées par dire d'expert. En addition à ces incertitudes, les coefficients d'endommagement proposés ci-dessus (Figure 7) sont eux-mêmes chargés d'incertitudes (D4E, 2007). Rares sont les fonctions de dommages qui sont accompagnées de marges d'erreur et explications concernant le niveau d'incertitudes existant, laissant cette appréciation difficile. Toutes ces incertitudes cumulées ont été considérées dans cette étude comme sources d'incertitudes paramétriques, et ont été évaluées de manière théorique. Nous avons considéré que les coefficients des fonctions de dommages utilisées dans nos tests peuvent avoir une incertitude de $\pm 30\%$ du coefficient proposé (pour plus de détails, cf. Chapitre 7).

La monétarisation des dommages directs aux activités économiques a été réalisée avec des fonctions de dommages existantes (DNRM, 2002) pour les différents scénarios d'évaluation. Sachant que cette typologie de bâtiments est minoritaire dans les études de cas considérées, ces fonctions n'ont pas fait l'objet des tests d'incertitudes réalisées dans notre travail.

2.3. Propagation d'incertitudes

La combinaison des différentes données, ainsi que le calcul des dommages et du coût moyen annuel des dommages ont été réalisés grâce à un outil SIG développé dans ce but (pour plus de détails, cf. Chapitre 3). Chaque stratégie d'analyse des différents modules est à l'origine d'une estimation de dommages potentiels. Le nombre de scénarios mis en œuvre pour analyser l'impact de chaque module d'évaluation dans les résultats est présenté dans la table suivante (Tableau 4).

Tableau 4. Nombre de scénarios d'évaluation de dommages mis en œuvre pour chaque étude de cas afin d'analyser l'impact des incertitudes épistémiques de chaque module dans les résultats de l'évaluation.

Modules de l'évaluation	Holtzheim	Fislis
Hydrologie	12 scénarios	12 scénarios
Hydraulique	18 scénarios	18 scénarios
Vulnérabilité	18 scénarios	18 scénarios
Endommagement	8 scénarios	8 scénarios

En plus de ces scénarios d'évaluation, nous avons considéré 9 scénarios supplémentaires pour chaque étude de cas, ceci afin de prendre en compte l'impact des échelles dans les résultats de l'évaluation. Le nombre total de 65 scénarios d'évaluation de dommages a été mis en œuvre pour chaque étude de cas. Chaque scénario a comporté l'évaluation de dommages pour 8 crues, avec des périodes de retour égales à 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 et 500 ans, et le calcul du coût moyen annuel.

La quantification de la variabilité des résultats de ces évaluations est présentée dans la section suivante.

3. Résultats

3.1. Incertitude globale des évaluations

Des courbes de risque (dommages/fréquence) ont été obtenues en fonction des choix stratégiques portés sur les différents modules de l'évaluation, suivant la méthode combinatoire proposée (Figure 5). Les bornes minimales et maximales de ces courbes sont présentées dans les graphes suivants (Figure 8).

Le risque inondation s'avère être bien différent dans les deux communes analysées. En analysant les résultats du scénario « référence », nous constatons que les premiers événements débordants sont susceptibles de générer des dommages de même ordre de grandeur pour les deux sites d'études. Peu d'enjeux sont exposés aux crues de petite période de retour. Cependant, pour la commune d'Holtzheim, la progression des dommages est relativement lente pour des événements de fréquence importante car une digue protège le centre ville contre ces crues (de périodes de retour inférieures à 30 ans environ, dans le graphe A de la Figure 8) tandis que pour la commune de Fislis les dommages grimpent significativement pour ces événements de fréquence moins importante (graphe B de la Figure 8).

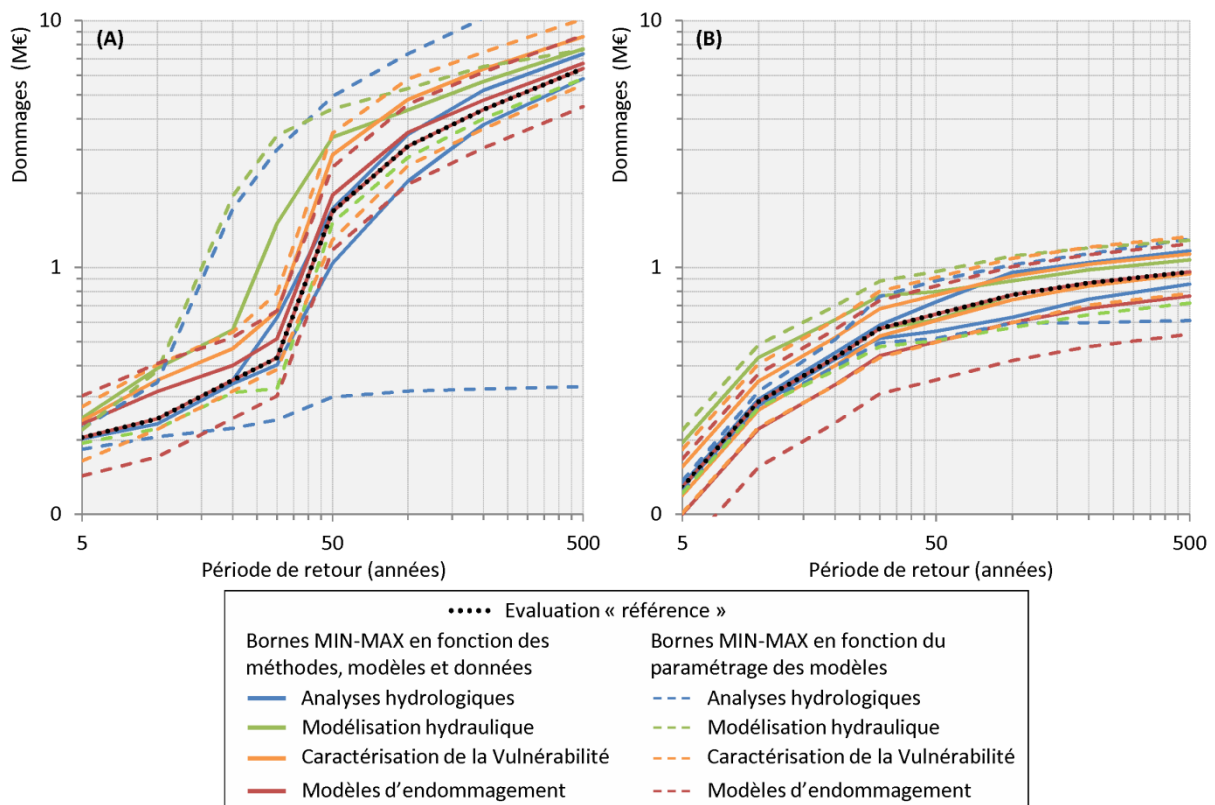


Figure 8. Dommages potentiels pour différentes périodes de retour, en fonction des méthodes, modèles, données (incertitudes liés aux modèles) et du paramétrage des modèles (incertitudes paramétriques). Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

Nous constatons également que la variabilité des résultats due aux choix des modèles, méthodes et données est bien plus importante quand on rajoute les incertitudes liés à leur paramétrage (incertitudes paramétriques). Les graphes suivants permettent de mieux appréhender ces résultats en mettant en évidence le rôle de chaque module de l'évaluation dans la variation des estimations. Ces graphes représentent les bornes minimales et maximales par rapport aux valeurs obtenues avec l'évaluation « référence », en fonction des méthodes, modèles et données (Figure 9), et en fonction du paramétrage des modèles (Figure 10).

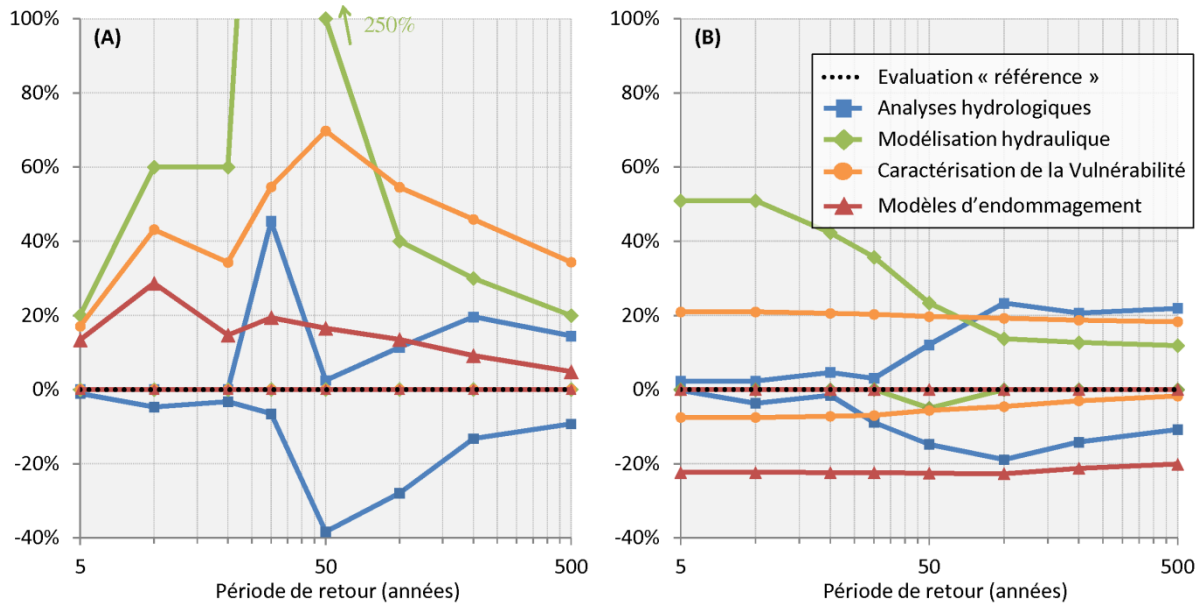


Figure 9. Variation des résultats de l'évaluation des dommages par rapport aux résultats de l'évaluation « référence » - en fonction des méthodes, modèles et données. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

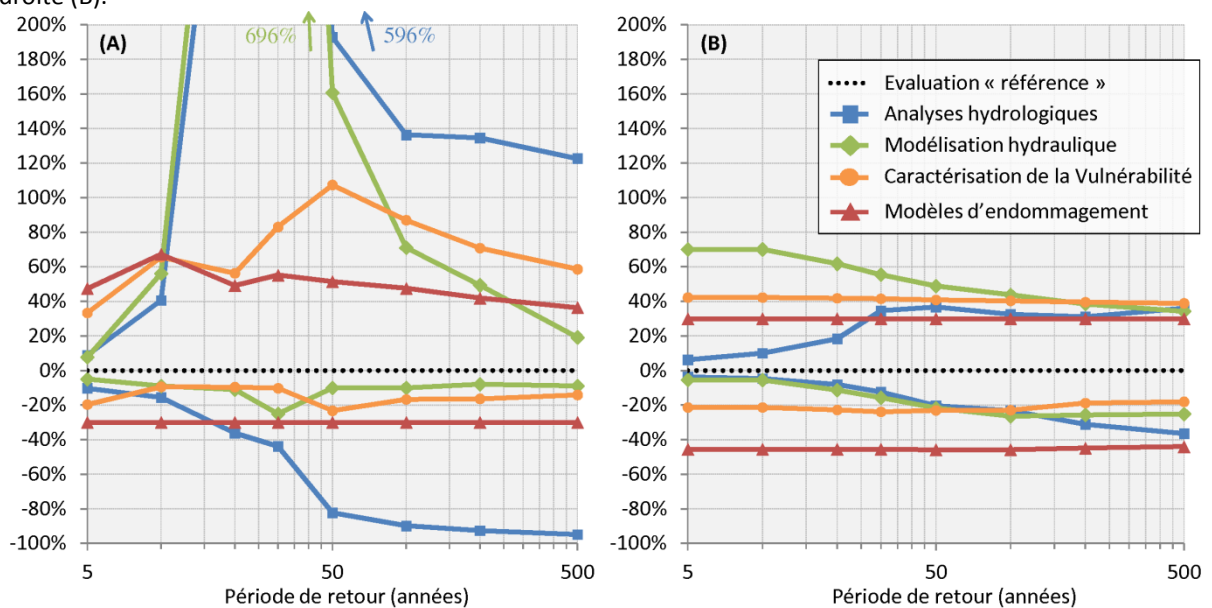


Figure 10. Variation des résultats de l'évaluation des dommages par rapport aux résultats de l'évaluation « référence » - en fonction du paramétrage des modèles. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

Les pics observés dans le cas de la commune de Holtzheim (graphe A dans la Figure 9) démontrent une particularité de ce site. L'existence d'une digue de protection des inondations est à l'origine de cette singularité. La difficulté de certains scénarios de modélisation à bien représenter cet ouvrage a entraîné une forte variabilité concernant la détermination de la période de retour de défaillance de l'ouvrage. Dans le cas de Fislis (graphe B dans la Figure 9), l'incertitude hydraulique a été constatée principalement pour des crues fréquentes, pour lesquelles des petites surestimations de hauteur d'eau et d'emprise de l'aléa jouent un rôle très important dans la quantification des dommages potentiels.

Bien que l'ordre de grandeur des incertitudes soit beaucoup plus important pour les incertitudes paramétriques (Figure 10), la similitude entre ces deux figures (Figure 9 et Figure 10) révèle que les incertitudes paramétriques se propagent de manière très similaire à celle des incertitudes liées aux modèles, méthodes et données. Cependant, nous constatons une énorme différence concernant le module hydrologique (graphe A dans la Figure 10). L'impact de la prise en compte des intervalles de confiance de 0.9 a été très significatif pour le cas de Holtzheim. Ceci est également dû à l'ouvrage hydraulique présent sur ce site d'études.

Les graphes suivants (Figure 11) représentent les variations induites par ces différents tests de sensibilité réalisés en termes de coûts moyens annuels (CMA).

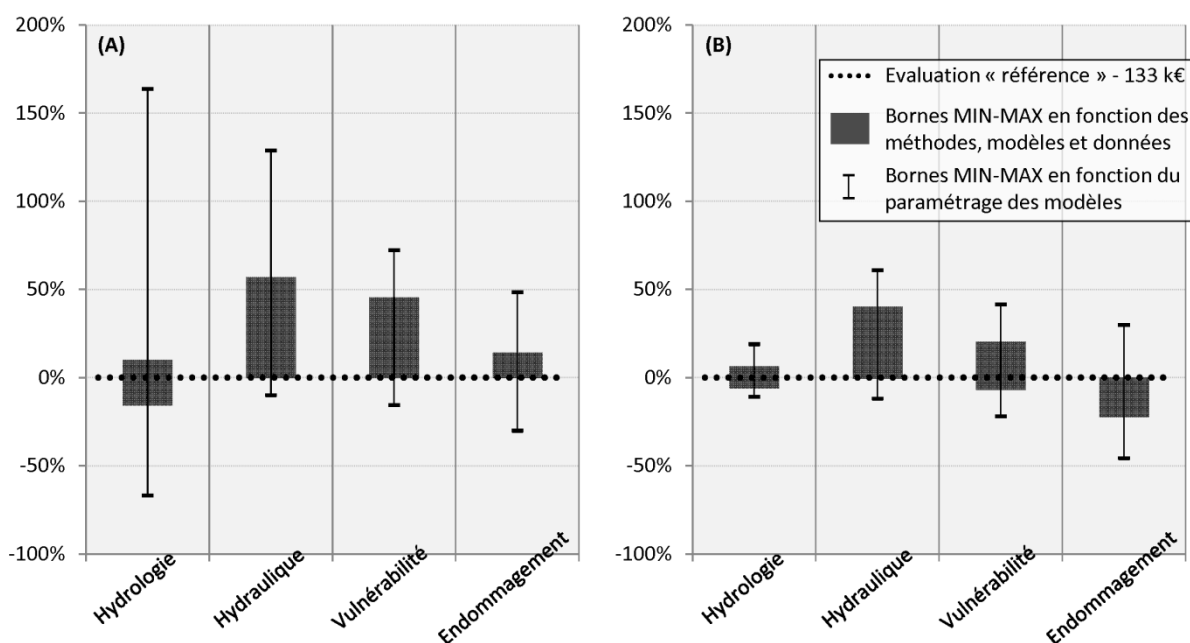


Figure 11. Coût moyen annuel des dommages en fonction des méthodes, modèles, données et paramétrage des modèles. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

Nous constatons que la variabilité des CMA due aux choix des méthodes, modèles et données (incertitudes des modèles) sont très similaires pour les deux études de cas. La modélisation hydraulique a été le facteur le plus important dans la variabilité des résultats, suivi par la

caractérisation des enjeux. Les amplitudes (MAX-MIN) des bornes d'incertitudes relatives au module « hydraulique » sont 25% (Holtzheim) et 43% (Fislis) plus importantes que les celles liées au module « vulnérabilité ». Une différence est observée quant aux rôles de l'hydrologie et des fonctions de dommages. Dans le cas de Holtzheim (graphe A dans la Figure 11) les fonctions hydrologiques ont joué un rôle plus important que la quantification des dommages. Les amplitudes relatives aux modules « hydrologie » et « endommagement » correspondent à respectivement 56% et 31% de la valeur d'amplitude relative au module « vulnérabilité ». Dans le cas de la commune de Fislis (graphe B dans la Figure 11), on constate que ces amplitudes correspondent respectivement à 54% et 83%. Ceci s'explique par le fait que dans la deuxième étude de cas il y a une prédominance de bâtiments sans sous-sol, et les hauteurs d'eau inondant le site pour les événements de fréquence plus importante sont relativement basses. Dans ce cas, la différence entre les deux modèles économiques utilisés (fonctions de dommages) est la plus importante.

La différence majeure entre les deux études de cas concerne la variabilité des CMA due aux considérations entreprises pendant les analyses (incertitudes paramétriques). Dans le cas de Holtzheim (graphe A dans la Figure 11), nous constatons la forte influence des considérations hydrologiques (intervalles de confiance de 0.9) et de paramétrage des modèles hydrauliques. Notons que les tests de sensibilité concernant les incertitudes paramétriques réalisés sur le module « hydrologie » ont révélé un fort potentiel, à la fois de sur- et sous estimation du CMA. Les bornes MIN-MAX de ces tests (graphe A de la Figure 8) démontrent comment l'ouvrage de protection de Holtzheim a influencé ce module, e.g. le scénario minimal d'évaluation est induit par la non défaillance de l'ouvrage de protection due à une sous-estimation des lignes d'eau générée par des considérations hydrologiques. A Fislis (graphe B dans la Figure 11) nous observons une très faible influence des considérations hydrologiques sur le CMA. L'incertitude liée au paramétrage des modèles hydrauliques reste forte, cependant moins importante que celle de l'autre étude de cas. Il ressort que les incertitudes sont majoritairement génératrices de surestimations des dommages directs potentiels.

3.2. Le rôle de l'échelle d'analyse

Les courbes de risque (dommages/fréquence) calculées en fonction des échelles de modélisation de l'aléa et analyse de la vulnérabilité des bâtiments sont représentées dans les graphes suivants (Figure 12).

Nous constatons que pour les deux études de cas, les incertitudes sont beaucoup plus importantes pour des événements les plus fréquents (périodes de retour inférieures à 50 ans) que pour les événements plus rares. Les estimations maximales des dommages à Fislis sont supérieures de 91% en moyenne aux estimations minimales (pour les périodes de retour inférieures à 50 ans), et de 34% en moyenne pour les périodes de retour supérieures à 50 ans. Cette incertitude est beaucoup plus importante dans le cas de la commune de Holtzheim : les estimations maximales sont supérieures de 446% et 82% en moyenne aux estimations minimales, respectivement, pour les périodes de retour inférieures et supérieures à 50 ans.

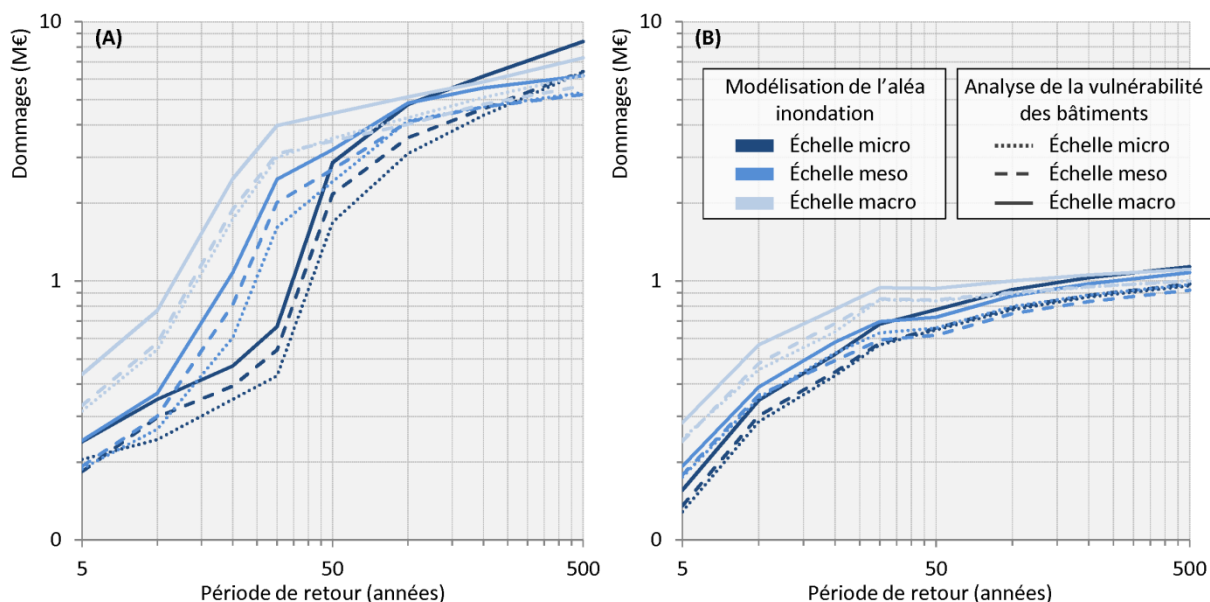


Figure 12. Dommages potentiels pour différentes périodes de retour, en fonction des échelles d'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

3.2.1. Le coût moyen annuel

Des coûts moyens annuels ont été calculés avec les couples de valeurs (dommages x probabilités d'occurrence) estimés par les différents scénarios d'évaluation étudiés (Figure 13).

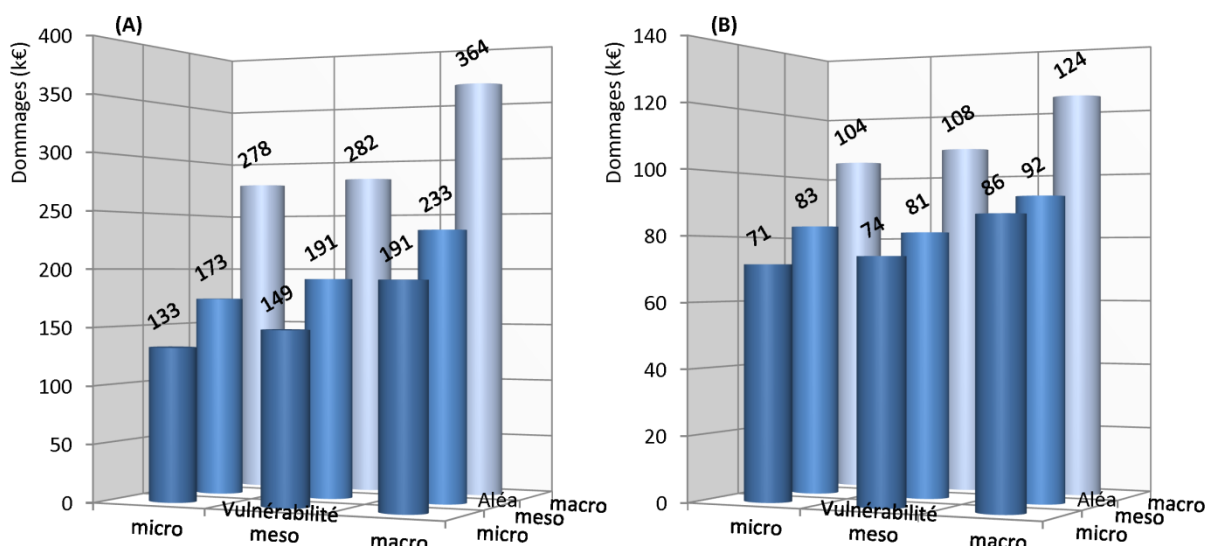


Figure 13. Coût moyen annuel des dommages en fonction des échelles d'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

Pour la commune de Holtzheim (graphe A dans la Figure 13), les estimations de CMA basées sur la modélisation de l'aléa à l'échelle « macro » sont en moyenne 96% plus importantes que celles estimées avec l'échelle « micro ». Les estimations basées sur l'aléa à l'échelle « meso » ne sont que

27% supérieures en moyenne à celles estimées avec l'échelle « micro ». Ceci met en évidence qu'une grosse incertitude dans l'évaluation est générée quand on passe de l'échelle « meso » à l'échelle « macro » vis-à-vis de l'aléa. En ce qui concerne les échelles d'analyse de la vulnérabilité des bâtiments, celles-ci ont moins d'impact sur les estimations de CMA. Les estimations basées sur l'échelle « macro » de vulnérabilité sont en moyenne 28% supérieures aux estimations basées sur l'échelle « meso » qui sont seulement 12% supérieures à celles basées sur l'échelle « micro ». Ces pourcentages sont moins importants pour le cas de Fislis (graphe B dans la Figure 13), mais il reste que l'influence de l'aléa est de même nettement plus importante. L'influence des modèles d'inondation à l'échelle « macro » sur les estimations de CMA sont aussi remarquables. Les estimations basées sur l'aléa à l'échelle « macro » sont en moyenne 31% supérieures aux estimations basées sur l'échelle « meso », qui sont seulement 11% supérieures aux estimations basées sur l'échelle « micro » de l'aléa.

Ces résultats montrent également que les deux modules de l'évaluation sont influencés de la même façon : plus l'échelle est grande, plus l'estimation tend à la surévaluation des dommages moyens annuels. L'estimation de CMA basée sur l'échelle « macro » de l'aléa et de la vulnérabilité est supérieur de 175% (Holtzheim) et 73% (Fislis) à l'estimation basée sur l'échelle « micro ». Nous observons aussi que l'estimation à l'échelle « meso » de l'aléa et la vulnérabilité est autant ou plus proche de l'estimation à l'échelle « micro » que l'estimation basée sur l'échelle « micro » de l'aléa et « meso » de la vulnérabilité, et ceci pour les deux études de cas.

3.2.2 La part de « l'aléa » et de « la vulnérabilité »

Nous avons pu observer que de manière générale la modélisation de l'aléa inondation joue un rôle plus important sur la variabilité des estimations que la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments (voir les variations des estimations pour les périodes de retour inférieures à 50 ans sur le graphe A dans la Figure 12). Cette observation est aussi apparente sur les estimations du coût moyen annuel (Figure 13) discutées ci-dessus. Afin d'explorer comment les incertitudes issues des choix des échelles d'évaluation affectent l'un ou l'autre module de l'évaluation, nous avons quantifié la contribution de ces modules sur l'incertitude globale des estimations. La méthode des « modèles parallèles » proposée par Visser et al. (2000), qui a été reprise par Merz and Thielen (2009) dans le contexte d'analyse du risque inondation a été adaptée avec cette finalité. La démarche suivante a été suivie :

1. pour chaque période de retour (T), nous avons calculé l'écart maximal des estimations provoqué lors de l'utilisation des 9 combinaisons d'échelles d'analyse, i.e. la différence entre les bornes maximales et minimales d'incertitudes ($EM_{total,T}$) ;
2. pour chaque échelle d'analyse du module « aléa » (micro, meso et macro), nous avons déterminé l'écart maximal des estimations généré par les différentes échelles d'analyse entreprises dans le module « vulnérabilité ». Ceci a conduit à trois estimations d'écart maximal pour chaque période de retour : $EM_{aléa(micro),T}$, $EM_{aléa(meso),T}$ et $EM_{aléa(macro),T}$. Ces écarts sont causés par la variabilité des méthodes utilisées dans le module « vulnérabilité » ;
3. ainsi, on détermine l'écart maximal moyen généré par le module « vulnérabilité » pour chaque période de retour ($EMM_{vul,T}$) en calculant la moyenne des écarts maximaux calculés précédemment ;

4. l'influence du module « vulnérabilité » sur l'incertitude globale de l'évaluation pour chaque période de retour a été définie comme : $I_{vul} = EMM_{vul, T} / EM_{total, T} \cdot 100\%$;
5. nous déterminons l'influence du module « aléa » en répétant les étapes 2, 3 et 4 en déterminant les écarts causés par la variabilité des méthodes utilisées dans le module « aléa ».

Les graphes suivants (Figure 14) montrent les résultats de cette analyse :

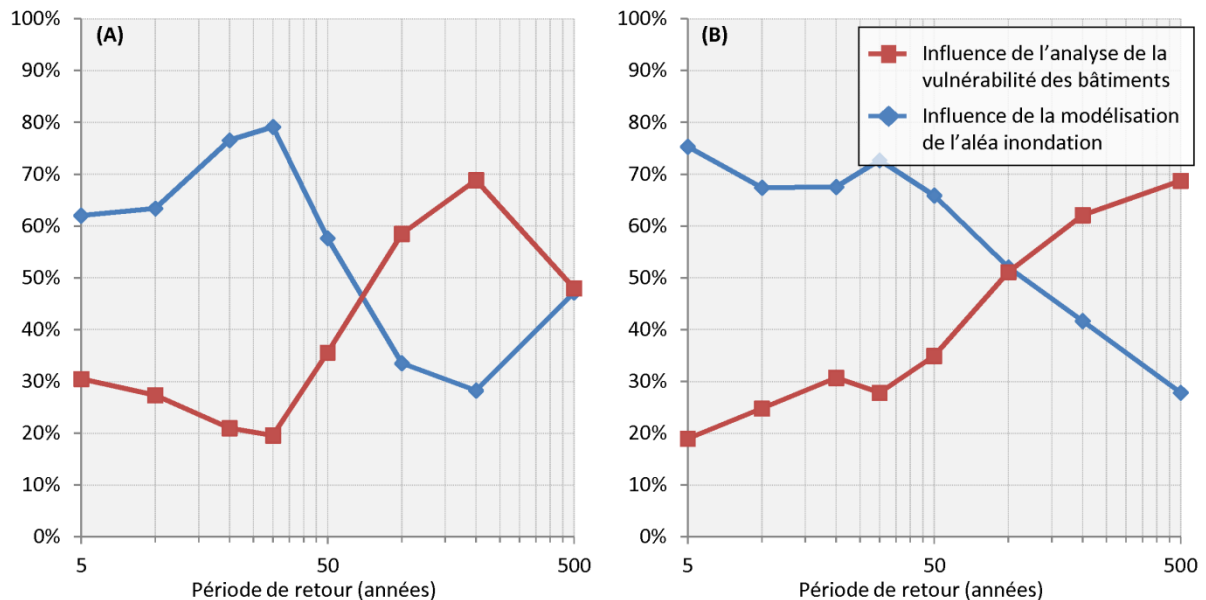


Figure 14. Contribution des deux modules « aléa » et « vulnérabilité » à l'incertitude globale de l'évaluation des dommages toutes échelles confondues. Le cas de Holtzheim à gauche (A) et de Fislis à droite (B).

Nous observons que l'influence des différents modules sur la variabilité des résultats de l'estimation est très similaire pour les deux études de cas. Tant pour le cas de Holtzheim (graphe A dans la Figure 14) que pour celui de la commune de Fislis (graphe B dans la Figure 14), le module « aléa » contribue majoritairement à l'incertitude globale de l'évaluation pour des inondations de période de retour inférieure à 100 ans ; et le module « vulnérabilité » est plus influant pour les événements de période de retour supérieure. La remontée de l'influence du module « aléa » pour les événements extrêmes dans le cas de Holtzheim (graphe A dans la Figure 14) s'explique par le fait qu'un certain nombre de bâtiments peut-être identifié comme dans ou hors l'enveloppe des inondations due à la variabilité des modèles hydrauliques.

En analysant les estimations de coût moyen annuel (CMA) de la même manière (étapes 1 à 5 de la méthode des modèles parallèles), nous avons déterminé l'influence globale des différents modules sur l'estimation du CMA des inondations. La variabilité des résultats induite par les variations d'échelle dans la modélisation de l'aléa inondation a influencée de 65% la valeur du CMA calculée sur Holtzheim tandis que l'influence de l'analyse de la vulnérabilité des bâtiments a été de 30%. Pour le deuxième site, l'influence de l'aléa a été de 67%, et l'influence de la vulnérabilité de 28%. Ceci est dû

au fait que l'indicateur de CMA est plus fortement influencé par les valeurs de dommages plus fréquentes (de périodes de retour moins importantes).

4. Discussion des résultats

L'ensemble des tests réalisés démontre une tendance générale à la surestimation des dommages directs potentiels aux bâtiments. Les tests d'échelle d'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité ont révélé la forte influence de ces considérations sur les résultats de l'évaluation en précisant le rôle précis de l'un ou l'autre module en tant que sources d'incertitudes. Dans les deux études de cas, plus l'échelle d'évaluation est grande, plus importantes sont les valeurs des dommages estimées, tant pour l'aléa que pour la vulnérabilité des enjeux. Les phénomènes de compensation d'incertitudes se sont révélés très complexes à analyser. La variabilité des résultats due aux choix des méthodes, modèles et données sont très similaires entre les deux études de cas. Pour les deux études de cas, la modélisation hydraulique a été le facteur le plus important à la variabilité des résultats, suivi de la caractérisation des enjeux. Les incertitudes liées aux modèles d'inondation ont tendance à sur- ou sous-estimer le risque par augmentation ou réduction généralisée des hauteurs d'eau et surfaces inondables ; tandis que les incertitudes liés à la caractérisation des enjeux ont une variabilité spatiale, pouvant être à l'origine d'un effet compensatoire lors de la somme des dommages potentiels, e.g. la sous-estimation de la hauteur du plancher d'un bâtiment peut être compensée par la surestimation de cette caractéristique sur d'autres bâtiments. Les différences principales entre les résultats des deux études de cas sont constatées lors de la réalisation des tests relatifs aux incertitudes paramétriques i.e. incertitudes liées aux différentes considérations et données introduites dans les modèles. La détermination des intervalles de confiance hydrologiques ainsi que les incertitudes relatives aux traitements des données topographiques et bathymétriques dans les modèles hydrauliques ont été d'importance fondamentale pour la première étude de cas (Holtzheim). L'ouvrage de protection contre les crues dans le site en question est à l'origine de ces différences. D'une part, la variation de la période de retour pour laquelle l'ouvrage est défaillant a été un paramètre très sensible pour l'évaluation. D'autre part, certaines simplifications hydrauliques ont anéanti la prise en compte fine de cet ouvrage, ce qui a amené à une surestimation des dommages causés par les crues de fréquence plus importante. Ces particularités liées aux sites d'études démontrent la complexité des études d'incertitudes.

5. Références

- Apel, H., Aronica, G., Kreibich, H. and Thielen, A., 2008. Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1): 79-98.
- CEPRI, 2008. Evaluation de la pertinence des mesures de gestion du risque d'inondation : Manuel des pratiques existantes.
- Cook, A. and Merwade, V., 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 131-142.
- D4E, 2007. Évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations, Paris.
- de Blois, C.J. and Wind, H.G., 1995. Assessment of flood damages and benefits of remedial actions: "What are the weak links?"; with application to the Loire. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20(5-6): 491-495.
- DNRM (Department of Natural Resources and Mines, Queensland Government), 2002. Guidance on the assessment of tangible flood damages, Brisbane, Australia.
- J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

- Eleutério, J., 2008. Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels à la caractérisation des enjeux - Application aux inondations dans la basse vallée de la Bruche. Msc. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs sur Marne, 61 pp.
- Fortin, V., Bernier, J. and Bobée, B., 1997. Simulation, Bayes, and bootstrap in statistical hydrology. *Water Resour. Res.*, 33(3): 439-448.
- GÉOMÉDITERRANÉE, 2003. Constitution d'une base de données « occupation du sol » à partir d'images satellitaires - BD OCS. Région Alsace, Strasbourg.
- Green, C., Viavattene, C. and Thompson, P., 2011. Guidance for assessing flood losses: CONHAZ Report. 204344.
- Haktanir, T., 1992. Comparison of various flood frequency distributions using annual flood peaks data of rivers in Anatolia. *Journal of Hydrology*, 136: 1-31.
- Ledoux_Consultants, 2010. Guide d'accompagnement pour une méthode standard pour l'analyse coût / bénéfice des projets de prévention des inondations, Mission Rhône (DREAL Rhône-Alpes / Service Prévention des Risques).
- MEDDE, 2012. Risque Inondation : quels défis pour la recherche en appui à l'action publique ? ISSN : 2102-474X.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thielen, A., 2010. Review article "Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8): 1697-1724.
- Merz, B. and Thielen, A., 2009. Flood risk curves and uncertainty bounds. *Natural Hazards*, 51(3): 437-458.
- Merz, B. and Thielen, A.H., 2005. Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4): 114-132.
- Messner, F. et al., 2007. Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods, FLOODsite Consortium, Wallingford.
- NRC (National Research Council), 2000. Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies. The National Academies Press, Washington, D.C., 216 pp.
- Paté-Cornell, M.E., 1996. Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2-3): 95-111.
- Torterotot, J.P., 1993. Le coût des dommages dûs aux inondations: estimation et analyse des incertitudes. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 634 pp.
- Visser, H., Folkert, R.J.M., Hoekstra, J. and de Wolff, J.J., 2000. Identifying Key Sources of Uncertainty in Climate Change Projections. *Climatic Change*, 45(3): 421-457.
- Xu, Y. and Booij, M.J., 2007. Propagation of Discharge Uncertainty in A Flood Damage Model for the Meuse River. In: S. Begum, M.J.F. Stive and J.W. Hall (Editors), *Flood risk management in Europe : innovation in policy and practice*. Springer, Dordrecht, pp. 293-310.

PARTIE III. Complexité des dommages aux infrastructures de réseau

La compréhension des dommages potentiels est essentielle pour appréhender le risque et savoir le gérer. La grande majorité des études se concentre sur les dommages directs aux bâtis qui représentent en effet la plus grande part des dommages lors d'une inondation en contexte urbain. Cependant, le système urbain est également très dépendant des infrastructures de réseaux. Or, le dommage potentiel direct de ces réseaux est en général le point de départ à toute une série de dysfonctionnements, nombre de services étant en effet très dépendants de ces infrastructures, et conditionnent la capacité de résilience du territoire. Nous présentons dans cette partie, une première étape dans la recherche d'une évaluation des dommages aux infrastructures de réseaux.

Chapitre 10. Endommagement et dysfonctionnement des infrastructures de réseau

Les réseaux représentent des éléments structurants dans le contexte urbain permettant le transport des personnes, leurs communications et les échanges des différents services. Le bon fonctionnement du réseau dans une période de crise et sa capacité à recouvrer un fonctionnement normal est fondamental pour la société. Les inondations constituent un des risques naturels majeurs dans le monde et les dommages causés ne cessent d'augmenter. En ce qui concerne les réseaux, les inondations peuvent porter atteinte à leur infrastructure, causant ainsi des dommages monétaires directs mais les inondations causent également des dysfonctionnements qui de ce fait interrompent les services pour lesquelles ces infrastructures sont supports.

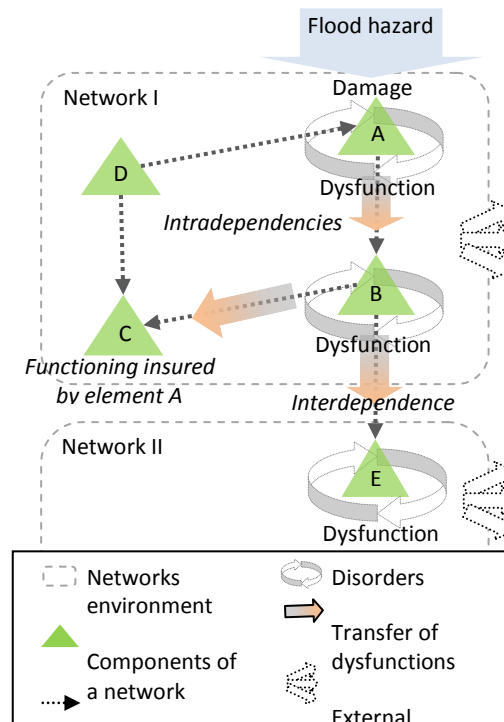


Figure 15. Relation entre infrastructures de réseau.

De ce fait, la résilience aux inondations des systèmes socio-économiques est intrinsèquement liée à la capacité des gestionnaires de réseaux à faire face aux dommages et aux dysfonctionnements pendant et après une inondation. La connaissance des infrastructures des réseaux et leur vulnérabilité sont des étapes importantes dans un objectif de gestion du risque et d'amélioration de la résilience d'un territoire. Jusqu'à présent, peu de méthodes ont été développées dans le but de lier les dysfonctionnements potentiels des réseaux au risque d'inondation. La vulnérabilité d'un réseau au risque d'inondation est en effet une affaire complexe, nécessitant de connaître les équipements, les différents liens et les dépendances entre les différents éléments. Le besoin de méthodes pour évaluer les dommages et les dysfonctionnements potentiels d'un réseau a été mis en évidence par de nombreuses études. Lorsqu'elle est mise en œuvre, il s'agit souvent de démarches à des échelles très macro.

Ce travail propose une méthode permettant d'évaluer à la fois, les dommages et les dysfonctionnements potentiels d'un réseau en cas de crues. La méthode mise en œuvre intègre la structure du réseau, le matériel, la vulnérabilité fonctionnelle et l'intra et l'interdépendance. La méthode est construite selon deux principes : (1) l'analyse est faite à l'échelle élémentaire, considérant qu'un réseau est constitué d'un ensemble d'éléments avec leur propres vulnérabilités ; (2) l'analyse doit être menée en étroite relation avec les gestionnaires et propriétaires de réseaux, sur la base d'avis d'experts. La méthode développée est organisée autour de trois étapes, qui conduisent à la construction de matrices d'endommagement et dysfonctionnement :

Les matrices sont développées dans le but de déterminer les causes directes et indirectes pouvant générer des conséquences (dommages et dysfonctions) sur les différents éléments du réseau. Les matrices construites ont la structure suivante :

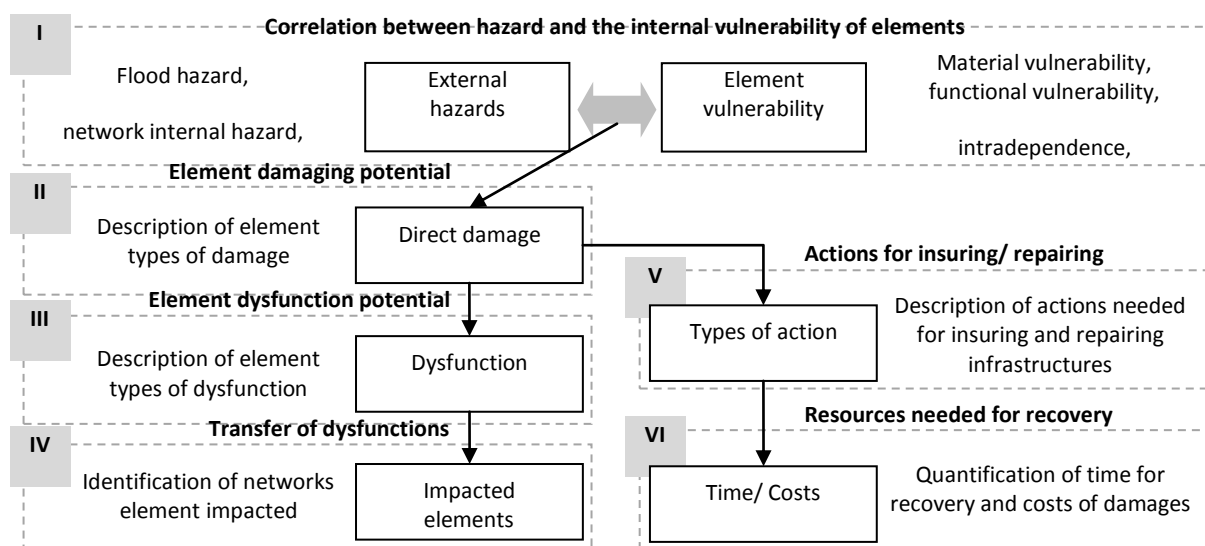


Figure 16. Structure of damage-dysfunction matrices.

25 matrices ont été construites sur la base d'enquêtes avec « les experts du réseau » en Alsace. Les principaux éléments des réseaux suivants ont été analysés: distribution d'eau potable, assainissement, éclairage public, distribution de gaz et électricité. Nous avons utilisé ces matrices pour concevoir des cartes d'endommagement :

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La quantification du risque inondation ainsi que sa cartographie impliquent plusieurs étapes de modélisation, chacune porteuse d'incertitudes. L'étude en question révèle d'une part que l'incertitude de chaque module de l'évaluation (hydrologie, hydraulique, vulnérabilité et endommagement) dépend de plusieurs facteurs, qui sont très dépendants des caractéristiques des sites étudiés. La modélisation hydraulique de l'aléa inondation joue un rôle prépondérant dans l'évaluation du risque aux bâtiments, surtout pour les crues les plus fréquentes. Ceci montre que lors de l'évaluation des coûts des dommages, une attention plus particulière doit être faite à la modélisation des crues de fréquences importantes. Les résultats de cette étude révèlent que l'existence d'ouvrages de protection (digues et barrages) sur un site s'avère un élément important à prendre en compte lors des décisions en matière de précision de l'analyse de l'aléa. Cet aspect s'est révélé être une forte source d'incertitudes dans l'évaluation des dommages. Par ailleurs l'étude en question montre que l'échelle d'évaluation a un rôle non négligeable dans l'évaluation. Les échelles plus larges ont induit une forte surestimation des dommages vis-à-vis des échelles les plus fines. Ces résultats démontrent qu'une réflexion approfondie doit être faite lors de l'utilisation des cartes d'inondation et de bases de données relatives à la vulnérabilité des enjeux dans la perspective d'évaluer les dommages potentiels liés aux inondations.

Le niveau d'incertitudes subsistant à ces évaluations nous amène à réfléchir aux incertitudes existantes à un deuxième degré d'évaluation (les réseaux et ses effets). Des incertitudes liées à l'identification de l'aléa doivent encore intégrer les risques de défaillance d'ouvrages et le changement climatique (aléa hydrologique). La vulnérabilité d'un territoire est également dépendante des réseaux, infrastructures et systèmes de gestion de crise. La complexité de ces aspects du risque induit d'autres niveaux d'incertitudes, encore plus complexes lors de l'évaluation de dommages indirects et intangibles. L'importance des incertitudes existantes dans la quantification du risque met en cause l'utilisation de ce critère seul comme support à la prise de décision. Des méthodes standardisées qui tiennent compte des incertitudes seraient un moyen efficace de permettre l'utilisation de ces outils de manière comparative. Malgré l'existence d'incertitudes diverses, ces évaluations sont des outils extrêmement puissants pour la compréhension du risque. La consolidation de ces évaluations reste une perspective de recherche de même que la gestion du risque inondation en élargissant la sphère de l'analyse aux aspects sociaux et politiques du risque.

DIFFUSION DE L'ETUDE

Méthodologie générale

Eleutério J., Payraudeau S., Rozan A., Sensitivity of the appraisal of flood-alleviation benefits to: hydraulic modelling, vulnerability assessment and the coupling of hazard with vulnerability, pag. 149-158, International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid/Macedonia, 1-5 September 2009.

Eleutério J., Uncertainty on flood damage assessment: the challenges of assessing and combining hydraulic and vulnerability data. 8th World Wide Workshop for Young Environmental Scientists, Arcueil, France, 2-5 June 2009.

Eleutério J., Flood loss analysis uncertainties: how to assess, process and analyse different data. 17th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists, Amsterdam, Nederland, 24-27 June 2009.

Eleutério J., Rozan A. and Mosé R., Identifying how the strategies used to assess potential damage of future floods can affect the results of the evaluation, 10th World Wide Workshop for Young Environmental Scientists, Arcueil, France, 31 May – 4 June 2010.

Eleutério J., Rozan A., Mosé R., Identifying how the strategies used to evaluate flood damages can affect the results of the evaluation, European Geosciences Union, General Assembly 2010, Vienna, Austria, 2-7 May 2010.

Système d'Information géographique et analyse du risque inondation

Eleutério J., Martinez D., Rozan A., Developing a GIS tool to assess potential damage of future floods, Risk Analysis VII & Brownfields V, C.A. BREBBIA, Wessex Institute of Technology, UK and C.N. Brooks, Greenfield Environmental Trust Group, USA, pag. 381-392, 2010.

Eleutério J., Martinez D., Automating the evaluation of flood damages: methodology and potential gains, European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, 2-7 Mai 2010.

Eleutério J., Martinez D., Rozan A., GIS method for flood risk analysis: a tool to evaluate assets damage potential and expected annual damage, Natural Hazards, 2012, (révision en cours).

Analyses hydrologiques

Eleutério J., Mosé R., Rozan A., Payraudeau S., Impact on hydrological confidence intervals on floods damage potential estimations, European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, 22-27 April 2012.

Eleutério J., Rozan A., Mosé R. and Payraudeau S., Impact of discharge confidence intervals on flood hazard, damage potential and risk maps, 2012 (en cours).

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

Modélisation hydraulique

Eleutério J. and Mosé R., Comparison of strategies used to map riverine flooding: the town of Fislis, in France, as a case study, 5th International Conference on Flood Management (ICFM5), Tokyo-Japan, 27-29 September 2011.

Eleutério J. and Mosé R., Comparison of strategies used to map riverine flooding: the town of Fislis, in France, as a case study, 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.

Vulnérabilité des enjeux

Eleutério J., Payraudeau S., Rozan A., Sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractéristique de la vulnérabilité des bâtiments, Ingénieries EAT, n°55-56, pp.29-44, 2008.

Eleutério J., Rozan A., Payraudeau S., Sensitivity of Flood Damage Evaluation for Different Settings in Flood Vulnerability Assessment. Vol. 2, pag. 661-668, 2nd International Conference on Water & Flood Management (ICWFM), BUET, Dhaka, Bangladesh, 2009.

Eleutério J., Rozan A., Payraudeau S., Sensibilité de l'évaluation des dommages liés aux inondations. 20èmes Journées Scientifiques de l'Environnement, Environnement entre Passé et futur : les risques à l'épreuve des savoirs, Créteil, France, 10-12 February 2009.

Vulnérabilité des réseaux

Eleutério J., Hattemer C., Rozan A., A method to evaluate floods damage and consequences to network infrastructure and associated uncertainty, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 03 - 08 April 2011.

Hattemer C., Eleutério J., Rozan A., Evaluation de l'endommagement et des défaillances du réseau d'éclairage public en cas de crue - Le cas de la basse vallée de la Bruche, 2012 (en cours).

Eleutério J., Hattemer C., Rozan A., A systemic method to evaluate potential impacts of floods on network infrastructures, Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012 (révision en cours).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Fondation Maif pour le cofinancement de ce travail.

Julian ELEUTÉRIO, Robert MOSÉ, Anne ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations - Impact des stratégies utilisées pour modéliser l'aléa inondation et caractériser la vulnérabilité des enjeux sur les résultats des évaluations de dommages potentiels liés aux inondations, Rapport final d'étude pour la Fondation Maif. Septembre 2012.

J. ELEUTÉRIO, R. MOSÉ et A. ROZAN, Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.