

SENSIBILITE DE L'ÉVALUATION DES DOMMAGES POTENTIELS LIÉS AUX INONDATIONS

Julian ELEUTERIO^{1,2}, Anne ROZAN¹ et Sylvain PAYRAUDEAU³, *Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES), 1 quai Koch, 67070 Strasbourg. Tél : 03 88 24 82 93.*

1. *Gestion des Services Publics, UMR ENGEES-Cemagref.*
2. *Systèmes Hydrauliques Urbains, UPR ENGEES.*
3. *Centre d'Écologie Végétale et Hydrologie, UMR ENGEES-ULP.*

Courriel : julian.eleuterio@engees.u-strasbg.fr

Résumé

La réflexion générale de cet article a pour objet les incertitudes de l'évaluation de dommages potentiels liés aux inondations. Cette évaluation quantifie, en termes monétaires, les impacts générés quant à l'occurrence d'inondations dans des zones d'activités humaines. Elle est un instrument indispensable aux analyses coût-bénéfice, de plus en plus utilisées comme outil d'aide à la décision de projets de gestion d'inondations. En outre, elle aide à la compréhension du risque. La mise en œuvre d'une évaluation consiste à croiser les informations de l'aléa avec les données sur la vulnérabilité des enjeux, et ensuite à appliquer des modèles économiques pour monétiser les dommages. Les incertitudes sur les données issues de chaque étape de l'évaluation, ainsi que les approches utilisées pour croiser ces différentes données se répercutent dans les résultats de l'évaluation. L'analyse de propagation d'incertitudes liées aux différentes modélisations permet : de mieux connaître l'importance de chaque étape et les limites de l'évaluation ; de privilégier un modèle selon la précision requise ; et de prendre en compte le facteur « incertitude » dans la formalisation de la connaissance du risque et dans la prise de décision. Cet article se donne donc un triple objectif : (1) présenter les concepts de base des évaluations de dommages liés aux inondations; (2) révéler les incertitudes associées aux différentes étapes de l'évaluation et présenter les principes des analyses de propagation des incertitudes; et (3) appliquer l'analyse de propagation de l'incertitude sur les inondations de la rivière Bruche, (Communauté Urbaine de Strasbourg, Bas-Rhin, Alsace, France).

Mots-Clés : *Risque Naturel, Crue, Impact, Analyse Coût-Avantage, Coût Moyen Annuel.*

1. Introduction

L'inondation est un phénomène naturel, donc, les zones inondables sont naturellement existantes. 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'histoire de l'humanité est marquée par les relations entre l'homme et les cours d'eau. La sédentarisation de l'homme s'est faite par la construction des civilisations, ou des villes, toujours à proximité des cours d'eau. Comme autrefois, les villes demeurent en

grande majorité à proximité des cours d'eau. Cela pose le problème des inondations, problème qui apparaît uniquement lorsqu'il existe des enjeux sensibles à l'eau et à ses propriétés dynamiques en zones inondables. L'inondation seule n'est pas un risque, de même que les enjeux ne le sont pas. C'est l'existence des deux dans le même espace physique et temporel qui génère le risque.

Les inondations en milieux urbains engendrent de plus en plus de dommages pour la société. Les événements les plus récents dans le monde confirment ces problèmes, e.g. inondations dans l'Europe de l'Est en août 2002, en France en mai 2008, au Maroc en octobre 2008 et au Brésil en novembre et décembre 2008. Les dommages engendrés par les inondations en zones urbaines sont de nature sociale, environnementale, humaine et économique (Hubert et Ledoux, 1999). 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 de mitiger toute sorte de dommages. Depuis des siècles, l'homme a généralement choisi de lutter contre les inondations en considérant la modification du phénomène comme solution. Des barrages, digues, canaux, bassins de rétention, entre autres, ont toujours été construits à cet effet (Viollet, 2004).

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. Cette connaissance peut être acquise à travers le vécu d'une société ou à travers les outils de modélisation modernes. Le dynamisme des sociétés actuelles, parmi d'autres facteurs, ne permet pas une conservation individuelle de la mémoire de tels événements. Donc, la gestion individuelle ne peut pas exister dans des agglomérations de taille importante. Une gestion de la part de l'Etat devient donc nécessaire. Les outils de modélisation occupent aujourd'hui une place primordiale dans la formation de la connaissance du risque et dans sa gestion (LCL et al., 2007).

Toute forme de gestion est associée à un coût économique. Du côté des investisseurs, une logique d'analyse coût-bénéfices gagne de plus en plus d'ampleur dans le choix d'investissements. Dans cette logique, les coûts d'investissement sont comparés aux coûts de dommages évités par de telle mesure de gestion. Une modélisation économique est cruciale dans la décision de projets. L'évaluation de dommages potentiels liés aux inondations devient donc un indicateur de vulnérabilité puissant, qui permet aux investisseurs de juger de la pertinence des projets de gestion d'inondations. L'estimation du coût des dommages liés aux inondations facilite aussi la prévention du budget pour la gestion de crise (Kreibich and Thielen, 2008). En outre, de telles analyses spatialisées peuvent permettre une connaissance plus approfondie du risque, de telle sorte que des plans d'urbanisme et de contingence peuvent s'y référer.

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 (Appel et al., 2008). Le résultat de telles évaluations est sensible et doit faire l'objet de nombreuses réflexions avant d'être adopté comme facteur déterminant à la décision de gestion du risque. 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.

Afin de discuter sur cette problématique, cet article présente : dans la section 2 - les concepts de base des évaluations de dommages liés aux inondations, les principes des analyses de propagation des incertitudes et des tests de sensibilité ; dans la section 3 - l'analyse de sensibilité et de propagation de l'incertitude dans l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations réalisées sur la rivière Bruche, (Communauté Urbaine de Strasbourg, Bas-Rhin, Alsace, France).

2. Évaluation des dommages liés aux inondations

L'évaluation des dommages liés aux inondations peut avoir lieu à deux moments distincts par rapport à l'événement endommageant : (a) après l'événement, analyse *a posteriori* - ce type d'évaluation a pour objectif le recensement des dommages subis par une population dans le passé ; (b) avant l'événement, analyse *a priori* - ce type d'évaluation a pour objectif l'estimation de dommages potentiels liés à un ou plusieurs aléas hypothétiques (Hubert et Ledoux, 1999). Dans ce travail, on aborde uniquement les évaluations *a priori*.

2.1 Principes, objectifs et méthodes des évaluations des dommages

L'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations repose sur trois piliers : les modélisations hydrologiques et hydrauliques qui déterminent l'aléa ; la caractérisation de la vulnérabilité des enjeux aux inondations ; et la monétisation des impacts. L'objectif de l'évaluation est de déterminer quels sont les dommages potentiels liés à un ou plusieurs aléas. Ces aléas peuvent représenter des inondations de périodes de retour spécifiques dans la situation actuelle du site d'étude ou dans des scénarios d'aménagement hypothétiques. Ainsi, il est possible de comparer différents scénarios d'aménagement en matière de coût des dommages évités par rapport à l'état actuel. Une évaluation classique des dommages d'inondations comprend trois étapes : (1) l'acquisition des données sur l'aléa et la vulnérabilité, (2) le croisement des données, et (3) la monétisation des dommages (LCL et al., 2007). Ces trois étapes sont décrites par la suite.

2.2 Obtention des données de base

Après avoir défini les objectifs de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations, la première étape de l'évaluation consiste à recenser les données nécessaires à l'étude (Messner et al., 2007). Les données nécessaires à cette analyse concernent l'aléa, les enjeux et les retours d'expérience concernant des dommages subis antérieurement. Ces données peuvent être obtenues à travers différentes méthodes, expliquées par la suite.

En ce qui concerne l'aléa, on s'intéresse à deux groupes d'informations. Le premier groupe comprend les caractéristiques hydrologiques concernant les différentes périodes de retour des événements en étude. Le deuxième groupe comprend la propagation des débits résultants des différentes périodes de retour sur la topographie du site en étude. Pour obtenir les données sur l'aléa on peut recourir à deux approches différentes :

- déterminer l'extension d'un ou plusieurs événements, de périodes de retour connues, à travers des expertises sur le terrain et des retours d'expériences des riverains ;
- utiliser les outils de modélisation hydraulique pour raffiner ces résultats et nous permettre de créer des scénarios hypothétiques.

La première option n'est utilisée que dans des cas où il s'avère difficile d'obtenir des ressources pour réaliser de telles analyses. La deuxième option est largement utilisée dans le contexte actuel. L'utilisation des outils de modélisation devient indispensable à ce type d'analyse. Les résultats de ces analyses sont présentés sous la forme de cartes, e.g. l'enveloppe de crue de période de retour égal à 100 ans (Q100), par classes d'hauteur d'eau, qui est utilisée dans l'étude de cas de la Bruche (figure 1).



Figure 1 : Enveloppe de crue de période de retour égal à 100 ans, utilisée dans l'évaluation des dommages dans la basse Bruche, Bas-Rhin, France.

Le type de données à recenser sur la vulnérabilité des enjeux varie selon les objectifs, l'échelle et la précision espérée de l'évaluation. En général, on peut utiliser quatre approches différentes pour obtenir ces données :

- utiliser des bases de données spatiales géo-référencées déjà existantes sur l'occupation du sol. Ces bases de données représentent l'occupation du sol par zones homogènes sous forme de couches sur un Système d'Informations Géographiques (SIG), e.g. CORINE Land Cover ;
- utiliser des bases de données spatiales géo-référencées déjà existantes sur l'occupation d'entités existantes sur une zone. Ces bases de données représentent les entités dans la zone d'étude par leurs formes géométriques projetées sous forme de couches sur un SIG, e.g. la BD Topo de l'Institut Géographique National (IGN) ;
- réaliser des enquêtes de terrain. Ces enquêtes sont faites sous forme de visites au site d'étude pour collecter les données sur les enjeux et leur vulnérabilité. L'organisation de l'enquête de terrain peut aboutir à une classification de chaque entité ou de zones homogènes ;
- réaliser des enquêtes individuelles ou téléphoniques. Cette méthode permet une grande variabilité de données sur la vulnérabilité des enjeux. En outre, des données concernant des dommages subis antérieurement peuvent être intégrées à l'enquête. La méthode d'échantillonnage et les analyses statistiques des données recensées jouent un rôle très important sur l'exploitation des données.

La combinaison des différentes méthodes est une alternative qui permet de compléter et vérifier l'analyse. En outre, l'utilisation des différentes méthodes nous permet d'avoir des informations sur les incertitudes de l'analyse et de tester la sensibilité de l'évaluation des dommages. Les données concernant la vulnérabilité sont aussi présentées sous forme de cartes, e.g. la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments dans l'étude de cas de la Bruche, en utilisant les deux premières méthodes confondues (figure 2).

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations



Figure 2 : Caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments selon deux méthodes confondues, dans l'étude des inondations de la Bruche, Bas-Rhin, France.

Les données économiques concernent principalement les fonctions de dommages. Ces fonctions expriment les dommages directs en rapport à des paramètres de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux, e.g. courbes de dommage en fonction des caractéristiques de construction du bâtiment résidentiel et de la hauteur de l'eau atteinte, utilisées dans l'étude de cas de la Bruche (figure 3).

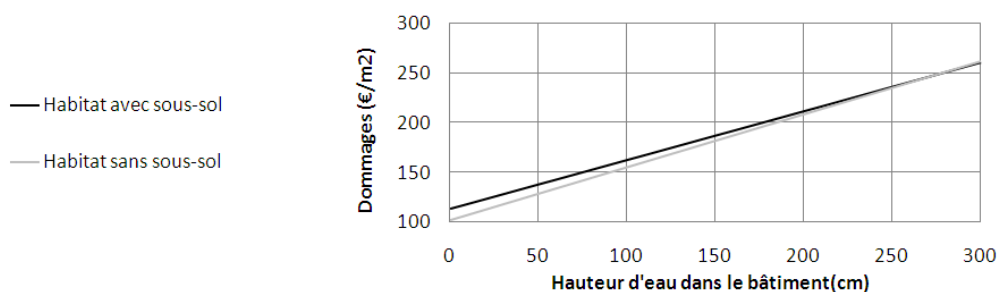


Figure 3 : Courbes de dommage en fonction de la hauteur d'eau et des caractéristiques des bâtiments résidentiels – basées sur Torterotot (1993).

Deux approches peuvent être utilisées pour obtenir ces données :

- créer des fonctions de dommages en se basant sur des retours d'expérience des dommages subis dans le passé ;
- utiliser des fonctions de dommages créées sur d'autres sites.

L'idéal est de pouvoir construire les fonctions de dommages directement sur le site d'étude en valorisant les retours d'expériences (Hubert et Ledoux, 1999). Pour cela, un travail d'évaluation des dommages *a posteriori* doit avoir lieu, de même qu'un grand effort de recueil et traitement de données. Cela n'est pas toujours possible. Pour utiliser les fonctions de dommages d'autres sites d'études, il faut prendre en compte les différences de contexte socio-économique entre les deux sites. Les méthodes de construction de ces fonctions sont diverses (White, 1964 ; Penning-Rowsell et Chatterton, 1977 ; Torterotot, 1993 ; Nascimento et al., 2006). Ces fonctions de dommages doivent être actualisées et transposées au site d'étude avant évaluation.

2.3 Analyse des données

La deuxième étape de l'évaluation comprend le croisement des données sur l'aléa avec des données sur la vulnérabilité des enjeux. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont des outils incontournables à cette étape. Cette analyse permet l'association des paramètres de l'aléa aux enjeux, e.g. la carte de risque (figure 4) qui associe des hauteurs d'eau simulées pour la crue centennale (figure 1) aux enjeux identifiés dans la zone de risque de l'étude menée sur la rivière Bruche (figure 2).



Figure 4 : Croisement des données sur l'aléa avec des données sur la vulnérabilité des enjeux. Etude de cas de la Bruche, Bas-Rhin, France.

Cette étape permet la compréhension des relations physiques entre l'aléa et les enjeux. Différentes analyses peuvent être faites à ce stade. Quelques méthodes d'analyse du risque « inondation » reposent sur cette étape de l'évaluation des dommages liés aux inondations, e.g. la méthode « Inondabilité » développée par le Cemagref (Gilard, 1998).

2.4 Calcul des dommages économiques

La troisième et dernière étape de l'évaluation de dommages potentiels comprend la monétisation des impacts. Pour exprimer les impacts en termes économiques, les dommages sont divisés classiquement en quatre types : dommages directs, indirects, dommages tangibles, intangibles (Messner et al., 2007). Les dommages directs résultent du contact direct des eaux avec l'homme, les biens et l'environnement. Les dommages indirects sont dus soit (1) au dysfonctionnement des chaînes économiques, e.g. coupures de voies de communication ou perturbations de réseaux, pertes d'exploitation des activités, chômage partiel, coût de nettoyage, coût de relogement, impacts sur la santé, (2) soit aux coûts liés aux actions mises en œuvre pour éviter ou réduire d'autres dommages, e.g. coûts des secours. Les dommages tangibles correspondent aux dommages pour lesquels on peut associer une valeur monétaire, tandis que les dommages intangibles peuvent difficilement être associés à un coût, e.g. impact psychologique d'une crue, perte de patrimoine historique ou décès.

Les dommages directs tangibles sont classiquement calculés à l'aide de fonctions de dommages. La hauteur d'eau est le paramètre descriptif de l'aléa le plus important en ce qui concerne les dommages liés aux inondations en milieu urbain (Messner et Meyer, 2006 ; Kreibich et Thielen, 2008). Les dommages indirects sont généralement estimés proportionnellement aux dommages directs, car les analyses nécessaires pour les calculer précisément sont extrêmement complexes. Les dommages intangibles ne sont que rarement inclus dans des évaluations (Lekuthai et Vongvisessomjai, 2001).

2.5 Propagation d'incertitudes

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations

On peut distinguer deux types d'incertitudes : celles qui sont intrinsèques au phénomène étudié et celles associées aux manques de connaissances et aux méthodes utilisées pour recenser les informations disponibles sur le phénomène. Le premier type d'incertitude ne dépend pas de l'homme tandis que le second type dépend de l'état actuel d'avancement technologique et scientifique associé au phénomène étudié et de l'attention accordée à l'évaluation. C'est uniquement le deuxième type d'incertitude qui peut être réduit. Dans le cas des évaluations des dommages potentiels liés aux inondations, les données et méthodes utilisées sont à l'origine des incertitudes propagées dans les résultats.

L'analyse de propagation d'incertitudes dans les résultats de l'évaluation des dommages permet de quantifier l'impact des données et méthodes utilisées, aux résultats de l'évaluation. Une méthode classique d'analyse d'incertitudes comprend 5 étapes : (1) mise en œuvre d'une méthode d'évaluation des dommages, (2) détermination des sources d'incertitudes de l'analyse, (3) quantification des différentes sources d'incertitudes, (4) combinaison des incertitudes de façon à créer un scénario qui sous-estime et un autre qui surestime les dommages, et (5) calcul des résultats de l'évaluation des dommages selon les différents scénarios. L'application de cette méthode permet l'agrégation des incertitudes minimales et maximales aux résultats de l'évaluation des dommages. De ce fait, les incertitudes liées à l'évaluation sont prises en compte dans les décisions de gestion.

2.6 Sensibilité de l'évaluation des dommages

Le résultat de l'évaluation des dommages réagit différemment suivant les données et méthodes utilisées. Chaque étape de l'évaluation a une influence directe sur l'incertitude entraînée au résultat de l'analyse. Les tests de sensibilité permettent de mesurer la sensibilité de l'évaluation aux différents paramètres de l'évaluation. Le principe général de ces analyses comprend trois parties : (1) on conserve tous les paramètres de l'évaluation sauf celui qui va faire l'objet de l'analyse ; (2) on applique différentes données, méthodes, approches et/ou hypothèses sur le paramètre en étude ; et (3) on étudie les impacts des variations du paramètre étudié sur le résultat de l'évaluation.

En réalisant ces tests sur différentes étapes ou variables de l'évaluation, on parvient à les hiérarchiser selon les incertitudes plus ou moins grandes qu'elles génèrent au résultat de l'évaluation. C'est ainsi que l'on parvient à l'identification des étapes clefs, ce qui permet d'améliorer la fiabilité de l'évaluation. Ainsi, le choix des méthodes et des bases de données utilisées dans l'évaluation peut être réévalué, en donnant la priorité aux étapes pour lesquelles l'évaluation est la plus sensible.

3. Etude de cas sur la propagation d'incertitudes

La commune d'Holtzheim, dans la basse vallée de la Bruche (figure 5), fait l'objet d'une évaluation classique des dommages potentiels liés aux inondations. Seuls les dommages tangibles directs aux bâtiments et aux biens dans l'intérieur des bâtiments sont évalués. Les dommages tangibles indirects aux activités économiques sont estimés à partir des dommages directs. En complément de l'évaluation économique, une analyse de propagation d'incertitudes dans les résultats de l'évaluation et un test de sensibilité de l'évaluation à l'étape de caractérisation de la vulnérabilité des enjeux sont réalisés.

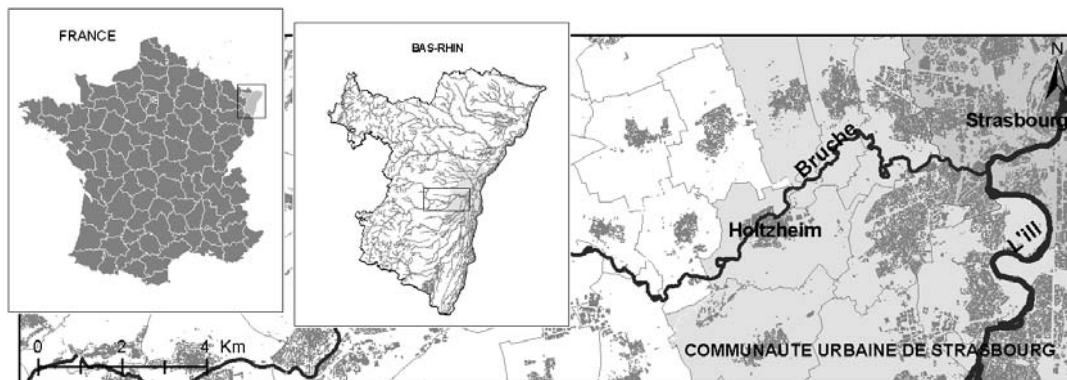


Figure 5 : La commune d'Holtzheim, dans la Communauté Urbaine de Strasbourg, Bas-Rhin, France.

3.1 Méthode d'évaluation de dommages potentiels

La méthode d'évaluation des dommages potentiels à trois étapes, expliquée auparavant, a été mise en œuvre. Cependant, les informations concernant les enjeux, utilisés dans l'étude, sont obtenues de différentes façons, afin d'analyser la sensibilité de l'évaluation à cette étape. Cette étape de l'évaluation est, depuis longtemps, omise dans les analyses de risque (Barroca et al., 2007).

Quatre méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments ont été utilisées. On s'interroge sur deux groupes de caractéristiques des bâtiments : (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. La surface totale projetée des bâtiments et leur localisation spatiale ont été recensées de la même manière pour les 4 méthodes. La BD TOPO a été utilisée pour ce propos. Cette base de données représente les bâtiments par des formes géométriques géo-référencées, e.g. les bâtiments identifiés dans la zone d'étude (figure 2). Les 4 méthodes sont basées sur des bases de données et hypothèses différentes :

- la METHODE A repose sur les données de la BD OCS et le dire d'expert. La BD OCS représente sous forme d'une couche numérique, l'occupation du sol par 93 classes différentes, e.g. zone industrielle, commerciale, résidentielle. Seul le type d'occupation des bâtiments est identifié par la BD OCS. Toutes informations concernant les caractéristiques de construction des bâtiments, et le type d'activité, la localisation de l'activité dans le bâti et le taux d'occupation réel, ont été obtenues à travers de l'avis d'un agent immobilier local ;
- la METHODE B est basée sur trois bases de données et complété aussi par le dire d'experts. La BD ADRESSES est constituée d'une couche numérique qui contient des points géo-référencés indiquant toutes les adresses de la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Cette base a été enrichie avec les informations de la base de données de la Chambre de Commerces et de l'Industrie et la base de données des activités et bâtiments publics de la CUS. Ces dernières nous apportent les adresses des activités économiques, e.g. commerces et industries, et des bâtiments publics. Ceci nous permet de localiser les activités sur le site d'étude, à l'aide de la BD ADRESSES. Seul le type d'occupation des bâtiments et celui des activités sont identifiés par les bases de données utilisées. Les autres informations sont identifiées par dire d'expert ;

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations

- la METHODE C repose sur la BD ADRESSES et sur les données recensées sur le terrain au travers d'une enquête de terrain superficielle, nommé ENQUETE S. Cette enquête a permis de recenser par zone homogène toutes les caractéristiques nécessaires pour caractériser la vulnérabilité de chaque bâtiment. Cependant, l'approche par zone homogène ne permet pas d'identifier la variabilité des caractéristiques individuelles des bâtiments. La BD ADRESSES est utilisée pour simplifier l'organisation et le traitement des données de l'enquête ;
- la METHODE D utilise la BD ADRESSES et les données recensées au travers d'une enquête de terrain exhaustive, nommée l'ENQUETE E. A la différence de l'ENQUETE S, les caractéristiques sont évaluées bâtiment par bâtiment.

Les méthodes A et B sont dépendantes de bases de données existantes au préalable et de l'avis d'experts, tandis que les méthodes C et D sont dépendantes du type d'enquête de terrain et des matériaux utilisés pour réaliser les mesures sur le terrain. La fiabilité de l'analyse est liée à la qualité des données mobilisées ; la faisabilité des méthodes est décroissante de la METHODE A à la METHODE D (figure 6).

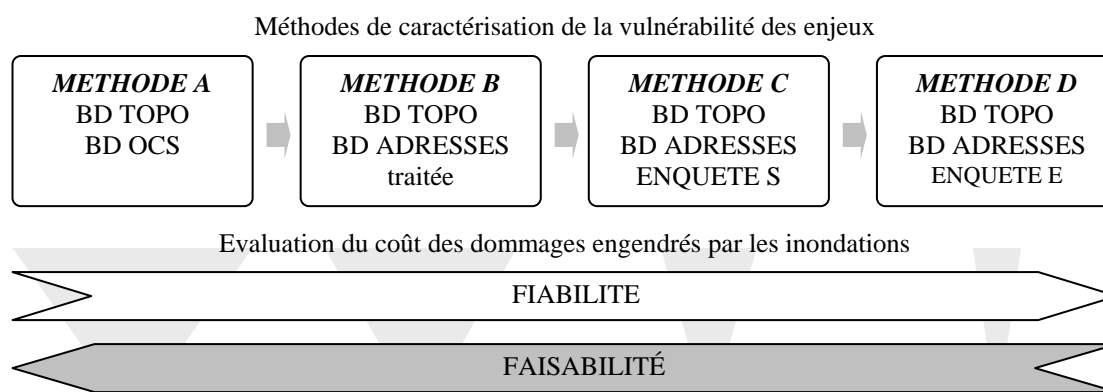


Figure 6 : Les 4 méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments, en fonction de leur fiabilité et faisabilité.

En ce qui concerne les données sur l'aléa, elles sont issues d'une modélisation réalisée par le bureau d'étude DHI à la demande de la CUS. Le modèle Mike Flood, qui couple les modèles 2D Mike 21 et 1D Mike 11, a été utilisé pour représenter les écoulements dans le lit majeur et le lit mineur (Mejdi, 2007). Les enveloppes des crues modélisées sur la zone d'étude correspondent à des épisodes de crues de période de retour de 10, 30 et 100 ans. Ces enveloppes ont une résolution de 20 m sur 20 m et représentent les niveaux d'eau en 6 classes : moins de 10 cm, entre 10 et 20 cm, entre 20 et 50 cm, entre 50 cm et 1 m, entre 1 et 2 m, plus de 2 m (figure 1). Les vitesses d'écoulement et les durées de submersion ont également été déterminées. La coopération avec la CUS nous a permis d'accéder aux résultats de la première phase de modélisation, disponibles au printemps 2008.

En utilisant les options d'analyse spatiale du logiciel SIG ARCGIS 9.2, le croisement des données de l'aléa et de la vulnérabilité a été effectué pour un aléa correspondant aux enveloppes de crues de période de retour de 10, 30 et 100 ans. Ce croisement est réalisé par superposition de la couche des hauteurs d'eau associée à une crue et de la couche vulnérabilité issue des méthodes A, B, C et D (figure 4).

Pour calculer les dommages aux bâtiments, une hauteur d'eau doit être associée à chaque bâtiment touché. La valeur moyenne des classes a été retenue, e.g. pour la classe de 50 cm à 1 m, on retient la valeur de 75 cm. L'information hauteur du premier plancher est indispensable

pour connaître la hauteur d'eau effective dans le bâtiment. On calcul la hauteur d'eau dans le bâtiment par soustraction de la hauteur d'eau sortie du modèle hydraulique par la hauteur du premier plancher, tous les deux par rapport au terrain naturel. Cette hauteur du premier plancher est un des paramètres qui est évalué différemment selon les méthodes A, B, C et D. Le calcul des dommages a ainsi été réalisé selon les différentes méthodes.

La monétisation des dommages directs repose sur les fonctions de dommages et d'endommagements existantes. Au total, 17 fonctions de dommages ont été utilisées : 2 pour les dommages aux bâtiments résidentiels $D_{résidentiel}$ (Torterotot, 1993) (figure 3), et 15 pour les dommages aux bâtiments occupés par des activités économiques et services publics $D_{activités}$ (DNRM, 2002) (tableau 1).

Tableau 1 : Fonctions de dommage utilisées pour les bâtiments occupés par les activités - basées sur DNRM (2002).

Activités	Petite superficie < 186m ²	Superficie moyenne > 186 et < 650m ²	Grande superficie > 650m ²
Classe	Dommmages (€)	Dommmages (€)	Dommmages (€/ m ²)
1	96,7.h - 0,226.h ²	298,9.h - 0,693.h ²	0,3784.h + 0,002317.h ²
2	193,5.h - 0,453.h ²	597,7.h - 1,386.h ²	0,7621.h + 0,004604.h ²
3	386,9.h - 0,905.h ²	1195,5.h - 2,771.h ²	1,532.h + 0,009177.h ²
4	773,9.h - 1,810.h ²	2391,3.h - 5,544.h ²	3,020.h + 0,01857.h ²
5	1547,8.h - 3,620.h ²	4782,0.h - 11,085.h ²	6,058.h + 0,03707.h ²

h = hauteur effective d'eau dans le bâtiment (cm)

Ces fonctions utilisent la hauteur effective d'eau dans le bâtiment comme principal caractéristique de l'aléa. Pour chaque fonction, une relation croissante entre la hauteur effective d'eau et le coût des dommages est définie. Les fonctions de dommage retenues pour le bâti dépendent du type d'occupation du bâtiment et de ses caractéristiques physiques. L'actualisation et la transposition des fonctions de dommages ont été réalisées en tenant compte de l'indice de la construction civile, du pouvoir d'achat et du taux de change pour les courbes de dommage étrangères. Le dommage total D est calculé selon l'équation 1.

$$D = (\sum D_{résidentiel}) + (\sum D_{activités}) \times 1,5 \quad (\text{Équation 1})$$

Le choix des fonctions de dommages à utiliser pour les bâtiments occupés par des logements se fait selon l'existence ou absence de sous-sol (figure 3). Pour les activités économiques, le choix dépend du type d'activité, ou classe de vulnérabilité (tableau 2), et de la superficie de l'activité dans le bâtiment (tableau 1).

Tableau 2 : Classe de vulnérabilité des bâtiments selon le type d'activité dans le bâtiment - basées sur DNRM (2002).

Classe	Type d'activité
1	Fleuriste, Salle de sport, Cabinet médical, Eglise, Buraliste, Quincaillerie
2	Café, Restaurant, Salle d'opération, Bureau, Vente de véhicules, Ecole, Poste, Boucherie, Boulangerie, Station service, Bar/Restaurant, Discothèque, Hardware, Epicerie

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations

- | | |
|---|--|
| 3 | Librairie, Presse, Magasin de vêtements |
| 4 | Chimiste, Instruments musicaux, Réparation d'électroniques, Distributeur de boissons, Vente de Caméras |
| 5 | Pharmacie, Vente d'électroniques |
-

Dans une optique d'analyse coût-bénéfices, le coût moyen annuel (CMA), ou dommage moyen annuel (DMA), a été choisi pour représenter les dommages d'une manière globale et permettre une comparaison entre les différentes méthodes. Le coût moyen annuel exprime la valeur monétaire des dommages moyennés dans le temps (annuellement), en se basant sur l'espérance statistique de la variable aléatoire « coût des dommages dus à un événement d'inondation » $D(q)$, avec des probabilités exprimées en fréquence annuelle de dépassement $F(q)$ (Torterotot, 1993 ; Stedinger, 1997). La fréquence annuelle de dépassement $F(q)$ est calculée en divisant 1 par la période de retour de l'événement q . Le CMA est calculé selon l'équation 2.

$$CMA = \int_0^{\infty} D(q) \times F(q) dq \quad (\text{Équation 2})$$

Dans cette étude, les dommages sont évalués pour les événements de période de retour de 10, 30 et 100 ans. Une régression linéaire est utilisée pour les valeurs intermédiaires. La première crue causant des dommages a été identifiée comme celle de période de retour égal à 5 ans (BCEOM, 1997). On a considéré que la crue de période de retour théorique infinie est lié aux dommages de valeur égal à 150% de la valeur évaluée pour la crue de période de retour égal à 100 ans (Edlenbruch et al., 2008).

3.2 Sensibilité de l'évaluation et propagation d'incertitudes

Afin de comparer les quatre méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments aux inondations, un test de sensibilité a été réalisé. Pour ceci, on se base sur les mêmes approches et bases de données concernant l'aléa, le croisement de données et la monétisation de dommages. Ainsi, on a réalisé 4 évaluations de dommages indépendantes différant seulement par les données et méthodes utilisées pour recenser les informations concernant la vulnérabilité des bâtiments.

La propagation d'incertitudes des données sur les résultats de l'évaluation a aussi été réalisée séparément pour chacune des méthodes, A, B, C et D. Pour intégrer cette incertitude, deux scénarios ont été considérés : scénario MIN et MAX, correspondant respectivement à la combinaison des incertitudes sur les données aboutissant au coût le plus faible et le plus fort des dommages possibles.

Pour les méthodes A et B, le manque de données concernant la vulnérabilité des bâtiments génère des incertitudes sur les résultats des évaluations de dommages. Le scénario MIN repose sur la combinaison des caractéristiques inconnues dans les méthodes A et B, e.g. surestimation de la hauteur des premiers planchers et sous-estimation de la superficie de l'activité dans le bâti, de la classe de vulnérabilité de l'activité et du taux d'occupation des rez-de-chaussées. Le scénario MAX repose sur la combinaison inverse et aboutit au coût le plus élevé. Les résultats obtenus avec ces deux scénarios sont comparés au scénario reposant sur les valeurs jugées les plus réalistes par des experts. Pour les méthodes C et D, l'incertitude des résultats est associée à la qualité de l'estimation des paramètres lors des enquêtes de terrain. Comme pour les méthodes A et B, les scénarios MIN et MAX correspondent aux

combinaisons extrêmes des paramètres. Le scénario central repose sur les valeurs estimées lors de l'enquête.

3.3 Résultats et discussions

L'application des quatre méthodes pour les trois aléas considérés aboutit aux dommages potentiels synthésés dans la figure 7. Les dommages sont proportionnels à l'importance de l'aléa. La variabilité entre les résultats centraux des quatre méthodes, exprimée par le coefficient de variation, est respectivement de 0,18, 0,07, et 0,06 pour les débits Q10, Q30 et Q100. Une incertitude est associée à chaque résultat. Les résultats obtenus dans la figure 7 permettent de définir le coût moyen annuel pour chaque méthode. La comparaison des méthodes en termes de coût global est réalisée sur le coût moyen annuel.

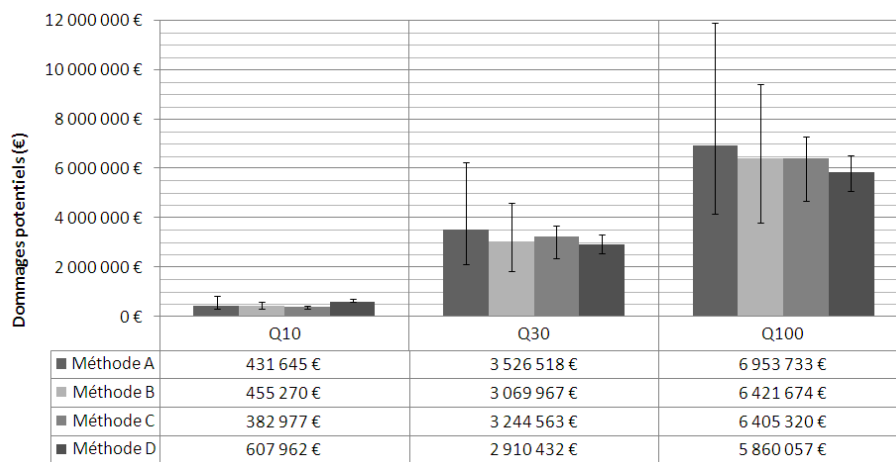


Figure 7 : Dommages potentiels en fonction des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité et de l'aléa (Q10, Q30 et Q100).

L'identification des caractéristiques d'occupation et de construction des bâtiments repose sur des hypothèses différentes pour chaque méthode (figure 6). Les dommages issus des quatre méthodes ont été associés à une incertitude variable en fonction des hypothèses réalisées (figure 8).

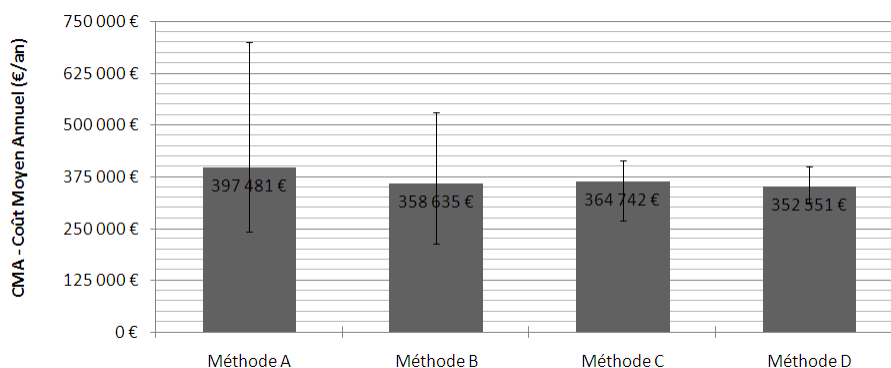


Figure 8: Coût moyen annuel en fonction des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité ; les bornes inférieures et supérieures correspondent respectivement aux incertitudes, représentées par les scénarios MIN et MAX.

Les résultats présentent des valeurs centrales relativement proches, indépendamment de la méthode utilisée. Les valeurs centrales varient de 350 k€ à 400 k€/an (figure 8). Ce résultat

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations

montre que les 4 méthodes peuvent donner des résultats convergents, si les hypothèses et les experts mobilisés sont fiables. Contrairement aux valeurs centrales, l'amplitude des dommages entre le scénario MIN et MAX est très variable. Plus la méthode est facile à mettre en œuvre, plus l'incertitude est grande en raison du nombre et de la qualité des données mobilisées. Les résultats de l'évaluation en utilisant la méthode A pourraient varier de 250 k€/an à 700 k€/an (180%) tandis qu'en utilisant la méthode D, les dommages pourraient varier de 325 k€/an à 400 k€/an (23%).

La répartition des dommages par type d'occupation des bâtiments, i.e. habitat, activités économiques et publiques, est analysée selon les différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité (figure 9).

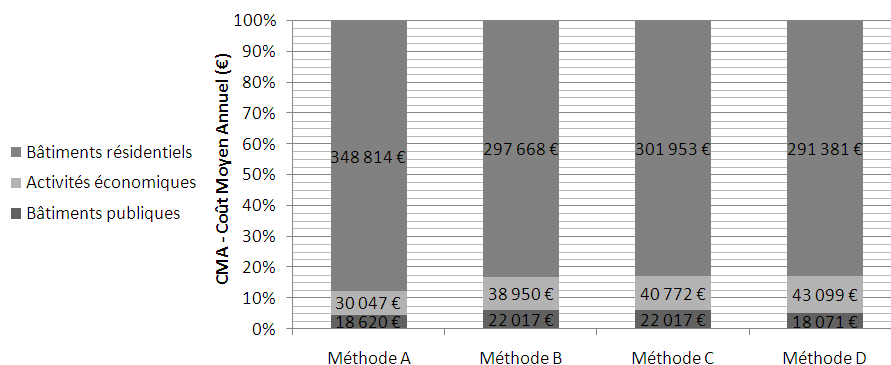


Figure 9 : Distribution des dommages, en Coût Moyen Annuel, par type d'occupation des bâtiments, selon les quatre méthodes, A, B, C et D.

Les résultats sont relativement proches en comparant la distribution des dommages par type d'occupation des bâtiments (figure 9). Les bâtiments publics représentent de 4,5% à 6,0% des dommages selon la méthode utilisée. La part des dommages concernant les bâtiments occupés par des activités économiques varie de 7,5% à 12,0%. Les habitats représentent la majorité des dommages, variant de 82% à 87% du total des dommages selon les différentes méthodes. Cependant, les incertitudes relatives à chaque type d'occupation, deviennent très importantes pour les dommages aux activités économiques et aux bâtiments publics. Ceci nous montre que dans des zones où les activités représentent une part plus importante parmi les enjeux, ces incertitudes deviendraient plus importantes.

4. Conclusions

La compréhension des aspects économiques corrélés aux inondations est un élément indispensable à la gestion du risque « inondation ». Même si l'évaluation des dommages liés aux inondations est un outil important d'aide à la décision, il doit être employé avec précaution. Les incertitudes existantes dans le processus d'évaluation peuvent entraîner des incertitudes importantes dans les résultats des évaluations. L'identification et la quantification de ces incertitudes sont des opérations nécessaires à l'amélioration des résultats de l'évaluation. En outre, ces opérations permettent de présenter dans le même temps les résultats et leurs incertitudes, de telle sorte que les preneurs de décision puissent être au courant des éventuelles incertitudes de l'évaluation. La présentation des incertitudes avec les résultats permet d'éviter une mauvaise utilisation des résultats de l'évaluation.

L'étude de cas des inondations de la rivière Bruche, présentée dans cet article, illustre le poids des incertitudes liées aux données de base de l'évaluation des dommages dans leur résultat.

Les résultats des évaluations pourraient varier de 180% pour la méthode la plus facile à mettre en œuvre et de 23% pour la méthode la plus fiable. En outre, les résultats du test de sensibilité de l'évaluation par rapport à l'étape de caractérisation de la vulnérabilité des enjeux montrent comment le choix d'une méthode peut avoir un impact sur les résultats de l'évaluation. Même si les résultats de l'évaluation selon les différentes méthodes ont été similaires en matière de coût des dommages totaux dans l'étude de cas, les analyses de propagation d'incertitudes accompagnées des tests de sensibilité ont montré que le choix d'une méthode plus adaptée se fait en considérant les caractéristiques locales.

La poursuite de ce travail se base sur la réalisation de tests de sensibilité et de propagation d'incertitudes dans les évaluations des dommages, en tenant compte des différentes étapes de l'évaluation. D'autres types de dommages, ainsi que différentes méthodes de caractérisation de l'aléa et de croisement des données de l'aléa avec la vulnérabilité, font partie des travaux en cours. Le but de cette recherche est de quantifier l'importance de l'application de ces types d'analyses d'incertitudes dans les évaluations des dommages des inondations. La présentation des incertitudes des résultats est une donnée supplémentaire qui apporte des nouveaux éléments pour la prise de décision de gestion du risque.

Bibliographie

- Apel, H., Merz, B., Thielen, A. H. (2008). Quantification of uncertainties in flood risk Assessments. *International Journal of River Basin Management (JRBM)*, 6, 2, 149-162.
- Barroca, B., Hubert, G., Diab, Y. (2007). Vulnérabilité : une clé de lecture du risque inondation. *17èmes Journées Scientifiques de l'Environnement : le Citoyen, la Ville et l'Environnement*, 23-24 mai 2006.
- BCEOM. (1977). *Evaluation des dommages dus aux inondations de la Bruche et de l'Ill dans l'agglomération Strasbourgeoise*. Rapport technique, Agence Financière de Bassin Rhin Meuse et Service de la Navigation de Strasbourg.
- DNRM. (2002). *Guidance on the assessment of tangible flood damages*. Department of Natural Resources and Mines, Brisbane, Australia.
- Edlenbruch, K., Germano, V., Gilbert, E., Grelot, F., Lescoulier, C. (2008). *Etude socio-économique des inondations sur le bassin versant de l'Orb*. INTEREG 3 C Sud Europe – INUNDA, Cemagref.
- Gilard, O. (1998). *Les bases techniques de la méthode inondabilité*. Eds Cemagref, Antony, 207 p.
- Hubert, G., Ledoux, B. (1999). *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Kreibich, H., Thielen, A. H. (2008). Assessment of damage caused by high groundwater inundation. *Water Resources Research*, Vol. 44, W09409.
- LCL, Cereve, Cemagref. (2007). *Évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations*. Rapport, Direction des Études Économiques et de l'Évaluation Environnementale.
- Lekuthai, A., Vongvisessomjai, S. (2001). Intangible Flood Damage Quantification. *Water Resources Management*, 15, 373-362.
- Mejdi, S. (2007). *Modélisation des crues sur le territoire de la CUS et ses applications*. Rapport Technique, Mission I, Communauté Urbaine de Strasbourg.

Sensibilité de l'évaluation des dommages potentiels liés aux inondations

- Messner, F., Meyer, V. (2006). *Flood damage, vulnerability and risk perception - Challenges for flood damage research*. J. Schanze et al. eds., Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures, 149-167.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., Van der Veen, A. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.
- Nascimento, N., Machado, M. L., Baptista, M., Silva, A. de P. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, Vol. 4, No. 3, 195-210(16).
- Penning-Rowsell, E. C., Chatterton, J. B. (1977). *The benefits of flood alleviation: A manual of assessment techniques*. Gower Technical Press/Saxon House, 297 p.
- Stedinger, J. R. (1997). Expected probability and Annual damages estimators. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, 125-135.
- Torterotot, J.-P. (1993). *Le coût des dommages dus aux inondations: Estimation et analyse des incertitudes*. Thèse de doctorat, Cereve, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Viollet, P-L. (2004). *L'hydraulique dans les civilisations anciennes – 5000 ans d'histoire*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 383 p.
- White, G.F. (1964). *Choice of Adjustment to Floods*. Department of Geography Research Papers, No. 93, Chicago, University of Chicago.

4-JSE-2009-Eleuterio-Manuscrit-2009-02-10.doc