

Sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments

Julian Eleuterio^{a, b}, Sylvain Payraudeau^c et Anne Rozan^a

Réduire la sensibilité aux inondations des populations, des biens et des activités est un enjeu majeur en France, où plus de douze mille communes et cinq millions d'habitants sont placés en zone inondable, et où les crues récentes ont montré encore une fois l'importance du montant des dommages aux entreprises et aux particuliers. À partir d'une étude menée sur une commune du Bas-Rhin, les auteurs ont testé ici la sensibilité des évaluations des dommages liés aux inondations pour quatre méthodes reposant sur une description différente de la vulnérabilité des bâtiments. Ils proposent ainsi de guider les acteurs de la politique de prévention dans les choix des méthodes à mettre en œuvre pour parvenir à une réduction de la vulnérabilité face au risque inondation.

Les inondations représentent le principal risque naturel dans le monde (Messner *et al.*, 2007). Le risque inondation est caractérisé par la conjonction de l'aléa inondation et de la vulnérabilité des activités humaines en zone inondable, souvent décrite par l'occupation du sol. L'aléa représente le phénomène physique et ses caractéristiques. La vulnérabilité comprend les enjeux, leur sensibilité à l'aléa et leur capacité de réaction face à l'aléa, c'est ce qu'on appelle la résilience. La zone vulnérable à une inondation est le plus souvent beaucoup plus étendue que la zone inondée en raison des dépendances socio-économiques existantes sur un territoire donné (Penning-Rowsell et Green, 2000a).

En France, près de cinq millions de personnes sont touchées par le risque inondation (Lang et Lavabre, 2007). La gestion du risque d'inondation peut reposer sur la réduction de l'aléa et/ou de la vulnérabilité de l'occupation du sol. Actuellement, les mesures de réduction de la vulnérabilité sont préférées au contrôle de l'aléa dont l'impact environnemental est plus élevé. L'évaluation de dommages potentiels liés à un aléa permet de comparer, en termes économiques, les gains potentiels d'une mesure de gestion quelconque et son coût. L'analyse coûts-bénéfices ou coûts-avantages est un outil classiquement utilisé à cette fin.

Une évaluation type de dommages potentiels liés aux inondations passe par trois étapes fondamentales (LCL *et al.*, 2007) :

– la caractérisation de la vulnérabilité de l'occupation du sol,

– la quantification des impacts potentiels liés à l'aléa,

– la monétarisation de ces impacts.

Pour mettre en œuvre ces trois étapes, il est nécessaire de disposer de données :

– sur la vulnérabilité de l'occupation du sol, soit en utilisant des bases de données spatiales existantes, soit en planifiant des visites et enquêtes sur site ;

– sur l'aléa, grâce aux résultats de modélisations hydrauliques et hydrologiques ou des retours d'expériences ;

– sur le coût des dommages associés aux inondations obtenu par des enquêtes fines, des retours d'expérience et des études statistiques.

L'étape de caractérisation de la vulnérabilité de l'occupation du sol est très complexe. Les données requises portent à la fois sur les caractéristiques physiques, sociales et économiques pour chaque type d'occupation du sol, et leur sensibilité à l'aléa inondation. Quand on passe de l'échelle communale à l'échelle intercommunale, la disponibilité et la fiabilité de ce type de données sont en général décroissantes. Une enquête de terrain pour collecter ces données à l'échelle intercommunale peut très rapidement s'avérer très difficile à mener en raison du temps et des moyens financiers nécessaires. Plusieurs méthodes permettent de caractériser la vulnérabilité de l'occupation du sol (Green, 1995 ; Pottier

Les contacts

a. Cemagref/ENGEES,
UMR Gestion des
services publics,

1 quai Koch,
67000 Strasbourg
b. École nationale
du génie de l'eau et
de l'environnement
de Strasbourg, UPR
ENGEES Systèmes
hydrauliques urbains,
1 quai Koch, 67000
Strasbourg

c. Centre d'écologie
végétale et d'hydro-
logie, UMR ENGEES/
Université Louis
Pasteur, 1 quai Koch,
BP 61039, 67070
Strasbourg Cedex

et al., 2005). Cette vulnérabilité peut être évaluée par grandes zones homogènes d'occupation du sol (Simpson et Human, 2008 ; Van der Veen et Logtmeijer, 2005 ; Dutta et al., 2003) ou par une description de chaque entité, e.g. bâtiment, élément de réseaux, (Gilard, 1998 ; Oliveri et Santoro, 2000 ; Edlenbruch et al., 2008). L'étendue de la zone d'étude et la qualité des données disponibles sont des facteurs qui limitent la précision des résultats. La propagation des incertitudes apparaît ainsi comme un point clé dans la démarche de quantification des dommages (Apel et al., 2008b).

La sensibilité de l'évaluation du coût des dommages au choix de la méthode utilisée pour décrire la vulnérabilité est rarement posée (Apel et al., 2008a). Afin d'analyser cette sensibilité, quatre méthodes de caractérisation de la vulnérabilité de l'occupation du sol sont confrontées dans cet article. Le site d'étude retenu est la commune d'Holtzheim, touchée par les inondations de la Bruche (Bas-Rhin, Alsace, France). Cette étude porte principalement sur les dommages occasionnés aux zones urbaines. Les quatre méthodes reposent toutes sur une description de la vulnérabilité bâtiment par bâtiment. Elles diffèrent sur le type de données utilisées pour recenser et caractériser la vulnérabilité des bâtiments, i.e. caractéristiques d'occupation des bâtiments et caractéristiques des constructions. Ces quatre méthodes sont comparées à l'échelle communale, selon les critères de fiabilité des résultats et d'opérationnalité. L'opérationnalité correspond à la facilité de mise en œuvre de la méthode en ce qui concerne l'acquisition et le traitement des données.

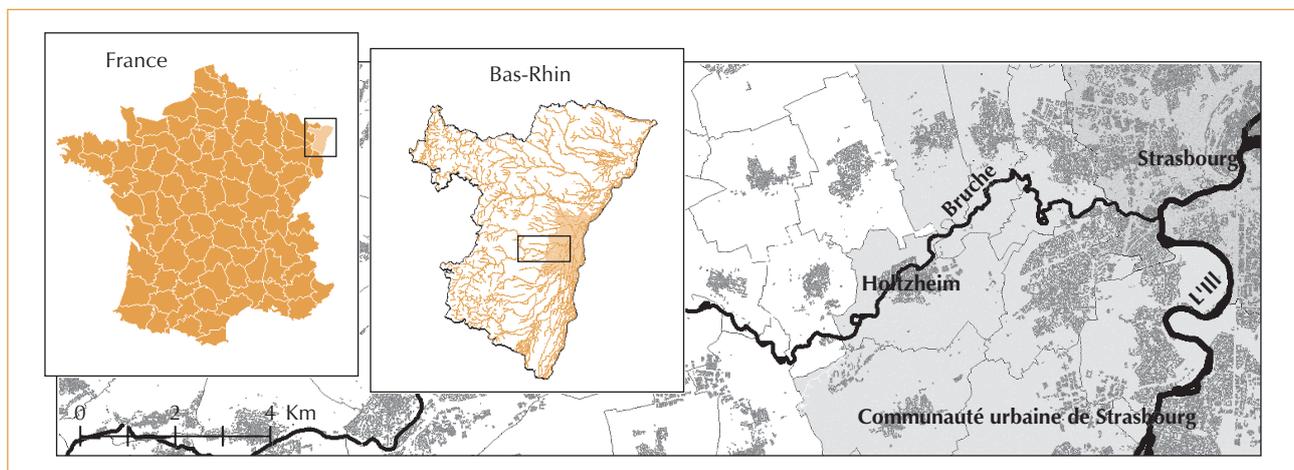
Dans un premier temps, nous présentons le site d'étude et les bases de données à l'origine des différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité, puis nous détaillons les quatre méthodes utilisées pour caractériser la vulnérabilité des bâtiments, nous décrivons la méthode d'évaluation des dommages utilisée dans l'étude et expliquons ensuite les tests de sensibilité réalisés selon les différentes méthodes. Enfin, les résultats obtenus à partir des quatre méthodes sont comparés en termes quantitatifs et qualitatifs et des recommandations sont apportées pour guider le choix de la méthode à utiliser en fonction de l'étendue de la zone d'étude et du degré de précision des résultats attendus.

Site d'étude et données disponibles

Site d'étude

Les inondations de la Bruche affectent directement un grand nombre de communes, dont la proximité des zones fortement urbanisées au cours d'eau provoque une majorité de dommages dits « urbains ». Au sein de la communauté urbaine de Strasbourg (CUS), six communes sont directement touchées par les inondations de la Bruche. La Bruche représente la principale menace pour la ville de Strasbourg, qui n'est pas protégée des inondations de cette rivière. La dernière crue majeure a eu lieu en 1990. Une période de retour de trente ans lui a été associée. Excepté la commune de Strasbourg, seule la commune d'Holtzheim (figure 1) est traversée par la Bruche. En raison de la proximité de la Bruche avec les zones urbanisées, cette commune a été retenue comme site d'étude pour cette analyse.

▼ Figure 1 – Localisation de la zone d'étude – commune d'Holtzheim (Bas-Rhin, Alsace, France).



Pour la commune d'Holtzheim, la crue de 1990 a provoqué à l'époque plus de 15 millions de francs de dommages directs, soit l'équivalent de plus de 2,3 millions d'euros. Cette évaluation est issue du dossier de catastrophe naturelle déposé par la commune après recensement des dommages déclarés a posteriori par les particuliers et entreprises. Ce dossier est nécessaire pour initier le remboursement par les assurances.

Base de données

Toute démarche d'évaluation des dommages associée à une crue nécessite une connaissance de l'étendu spatiale de l'aléa et une caractérisation de la vulnérabilité (Messner *et al.*, 2007). La première phase de ce travail a consisté à recenser les données disponibles pour développer une base de données spatiale. La conception de cette base de données a nécessité l'élaboration de conventions avec la région Alsace dans le cadre du réseau CIGAL¹, avec le conseil général de Bas-Rhin (CG67) et avec la communauté urbaine de Strasbourg.

Dans l'optique de quantifier les dommages en zones urbaines, le paramètre descriptif de l'aléa le plus important est la hauteur d'eau (White, 1964 ; Messner et Meyer, 2006). D'autres paramètres caractéristiques de l'aléa, comme les vitesses, la durée de submersion et le niveau de contamination de l'eau permettent d'affiner l'estimation des dommages (Kreibich et Thieken, 2008). Ces données sont généralement obtenues grâce aux modélisations hydrologiques et hydrauliques. Plusieurs modèles opérationnels peuvent être utilisés pour réaliser ces simulations (Kreis, 2004).

La zone inondable modélisée sur le site d'étude correspond à des épisodes de crues de période de retour de dix, trente et cent ans. Les résultats des modélisations ont une résolution de 20 m sur 20 m et représentent les niveaux d'eau en six 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. Ces résultats 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). La topographie de la vallée de la Bruche utilisée dans l'étude, a été obtenue par technique LIDAR², à une précision altitudinale de 10 cm. La coopération avec la CUS nous a permis d'accéder aux

résultats de la première phase de modélisation, disponibles au printemps 2008.

L'évaluation de la vulnérabilité requiert une connaissance des caractéristiques physiques, sociales et économiques pour chaque type d'occupation du sol, et de leur sensibilité à l'aléa inondation (Messner et Meyer, 2006). Ce travail porte principalement sur la vulnérabilité des bâtiments. Dans un premier temps, il est nécessaire de localiser les bâtiments et de déterminer leur sensibilité au travers de l'occupation des rez-de-chaussée et sous-sol, de la superficie et de la hauteur du premier plancher des bâtiments par rapport au niveau du terrain naturel. Dans un deuxième temps, on cherche à déterminer le type d'occupation du bâti, *i.e.* particuliers, établissements publics ou activités économiques et le type d'activité, *e.g.* boulangerie, papeterie, mairie.

Trois bases de données existantes ont été utilisées afin d'extraire ces caractéristiques :

– la BD TOPO[®], conçue par l'Institut géographique national (IGN), représente sous forme numérique 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 SIG³ « bâti » permet de localiser le contour des bâtiments et le type d'occupation. Une enquête exhaustive des activités, décrite par la suite, a été réalisée sur Holtzheim et il s'avère que l'information « type d'occupation du bâti » dans la BD TOPO[®] est incomplète et parfois fautive ;

– la BD OCS⁴ 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) ;

– la BD Adresse est constituée d'une couche numérique qui contient des points géoréférencés indiquant toutes les adresses de la communauté urbaine de Strasbourg. Cette base de données a été développée par la CUS. La base a été enrichie avec les informations de la base de données de la chambre de commerce et d'industrie (CCI) et la base de données des activités et bâtiments publics de la CUS. Ces dernières nous apportent les adresses des activités économiques (commerces, industries...) et des bâtiments publics. Ceci nous permet de localiser les activités sur le site d'étude, à l'aide de la BD Adresse. La BD Adresse enrichie des deux autres bases de données sera dénommée « BD Adresse traitée » dans la suite de l'article.

1. Coopération pour l'information géographique en Alsace.
2. 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.
3. Système d'information géographique.
4. Base de données d'occupation du sol.

Parmi les caractéristiques requises, les informations suivantes n'ont pas pu être déterminées par les trois bases de données existantes :

- la présence de sous-sols dans chaque bâtiment,
- la hauteur du premier plancher des bâtiments par rapport au niveau du terrain naturel,
- la localisation dans le bâtiment de l'activité, *i.e.* rez-de-chaussée, sous-sol, étages supérieurs,
- le taux d'occupation réel, *i.e.* le rapport entre la superficie réellement occupée par une activité et la superficie totale du bâtiment.

En outre, il n'est pas possible d'évaluer la fiabilité *a priori* des informations « type d'occupation » et « type d'activité » de ces trois bases de données.

Pour pallier ces limites, une enquête de terrain exhaustive, dénommée « enquête E », a été réalisée sur l'ensemble des bâtiments présents dans l'enveloppe de la crue centennale sur Holtzheim. Une deuxième enquête plus superficielle, dénommée « enquête S », a été réalisée à l'échelle de la CUS. Alors que l'enquête E recense les caractéristiques, bâtiment par bâtiment, l'enquête S se base sur les caractéristiques moyennes des bâtiments par zone homogène, *i.e.* groupe de bâtiments aux caractéristiques similaires identifiées pendant l'enquête. Une enquête a également été menée auprès d'un expert local de l'immobilier pour déterminer les caractéristiques de construction, *e.g.* présence de sous-sols, hauteur du premier plancher, ainsi que le prix de l'immobilier.

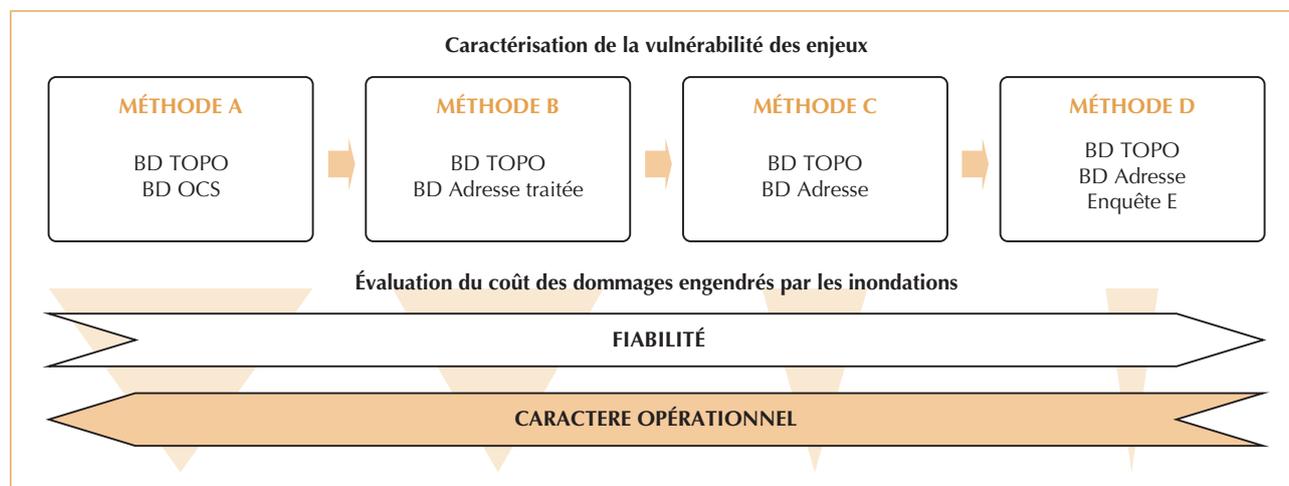
Méthode

Caractérisation de la vulnérabilité

Quatre méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments ont été évaluées (figure 2). Ces méthodes reposent sur des hypothèses différentes en termes de caractéristiques de construction, *i.e.* hauteur du premier plancher, présence de sous-sol et de type d'occupation du bâti, *i.e.* type d'occupation, type d'activité, localisation de l'activité dans le bâti et taux d'occupation réel. Le nombre et la qualité des données mobilisées sont croissants de la méthode A à la méthode D (figure 2). Ce travail repose sur l'*a priori* que la fiabilité de la méthode est proportionnelle au nombre et à la qualité des données mobilisés (figure 2). L'acquisition et le traitement des données rend les méthodes C et D moins opérationnelles que les méthodes A et B. La finalité de cette comparaison est d'évaluer le gain en terme de fiabilité et la perte du caractère opérationnel depuis la méthode A jusqu'à la méthode D. Le traitement des données spatiales requis pour les quatre méthodes a été réalisé avec le logiciel ArcGis 9.2®.

La Méthode A repose uniquement sur l'utilisation de la BD TOPO® et la BD OCS. L'analyse spatiale croisée de ces deux bases de données permet de caractériser aisément la superficie et le type d'occupation de chaque bâtiment. Cependant, l'utilisation de ces seules données ne permet pas d'obtenir les caractéristiques de construction ni le type précis d'activité, *e.g.* boulangerie, papeterie.

▼ Figure 2 – Comparaison des quatre méthodes en termes de données mobilisées, de fiabilité et du caractère opérationnelle.



La méthode B est basée sur le croisement de la BD TOPO® avec la BD Adresse traitée. L'intérêt majeur de la méthode B par rapport à la méthode A est de déterminer précisément le type d'activité pour chaque bâtiment. Comme pour la méthode A, aucune information sur la hauteur des premiers planchers des bâtiments, sur l'existence des sous-sols, sur l'occupation effective des rez-de-chaussée et sur la localisation de l'activité dans le bâtiment n'est disponible.

La méthode C repose sur les données recensées sur le terrain au travers de l'enquête S, sur la BD TOPO® et sur la BD Adresse. L'enquête S a permis de recenser par zone homogène toutes les caractéristiques, *i.e.* de construction et d'occupation du bâti, 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 méthode D utilise les données recensées au travers de l'enquête E, la BD TOPO® et la BD Adresse. À la différence de l'enquête S, les caractéristiques sont évaluées bâtiment par bâtiment. Le croisement des données pour les méthodes C et D est le même que pour la méthode B. Cependant, dans les méthodes C et D, la BD Adresse est enrichie par les informations provenant respectivement de l'enquête S et de l'enquête E, et non par des bases de données CCI et CUS.

Évaluation de dommages potentiels

La méthode retenue pour évaluer le coût des dommages nécessite trois étapes : la caractérisation de la vulnérabilité, la quantification des impacts potentiels liés à l'aléa et la monétarisation de ces impacts (Hubert et Ledoux, 1999). Les méthodes A, B, C et D sont successivement utilisées pour

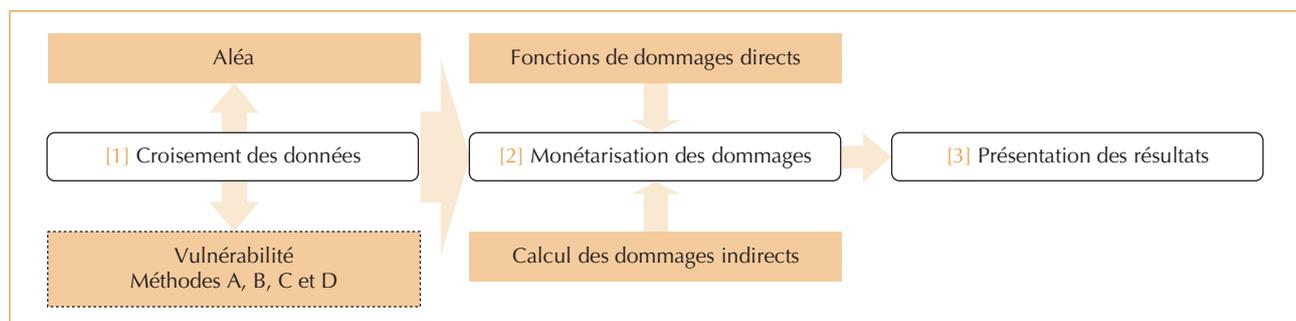
caractériser la vulnérabilité. Pour faciliter la comparaison entre ces quatre méthodes, les traitements spatiaux et calculs des dommages ont été automatisés en trois modules : [1] croisement des données de l'aléa et de la vulnérabilité, [2] monétarisation des dommages et [3] présentation des résultats (figure 3). Chaque module est détaillé par la suite.

CROISEMENT DE DONNÉES

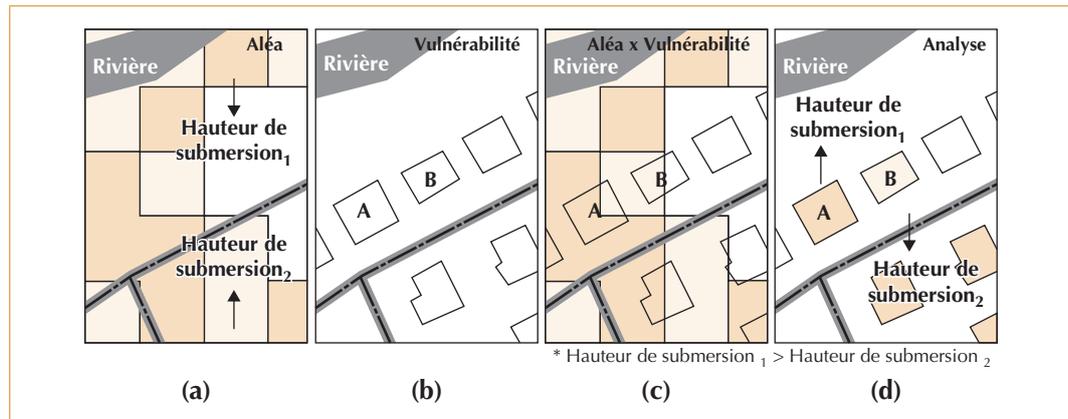
Le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité (module 1, figure 3) est réalisé par superposition de la couche des hauteurs d'eau associée à une crue (figure 4a) et de la couche vulnérabilité issue des méthodes A, B, C et D (figure 4b). Les enveloppes de crue utilisées ont été calculées à la résolution de 20 x 20 m en considérant six classes de hauteur d'eau. Lors du croisement des données, le même bâtiment peut être caractérisé par des niveaux différents de hauteur d'eau. Nous avons considéré que la classe de hauteur d'eau la plus importante touchant le bâtiment représente la hauteur d'eau dans tout le bâtiment. Le traitement est illustré pour les bâtiments A et B (figure 4c et 4d). Après traitement, chaque bâtiment est donc caractérisé par une hauteur d'eau. Cette étape permet de définir le risque inondation pour chaque bâtiment. Cette hypothèse maximise le risque. Le croisement des données a été effectué pour un aléa correspondant aux enveloppes de crues de période de retour de dix, trente et cent ans.

Pour utiliser ces résultats dans la suite de l'évaluation, il est nécessaire de déterminer la hauteur d'eau effective. 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. D'autre part, les hauteurs d'eau ont été calculées par rapport à la topographie sans les bâtiments. L'information hauteur du premier plancher est donc indispensable

▼ Figure 3 – Enchaînement des trois modules de calcul pour évaluer le coût des dommages.



► Figure 4 – Croisement des informations de l'aléa et la vulnérabilité pour déterminer les hauteurs d'eau pour chaque bâtiment.



pour connaître la hauteur d'eau effective dans le bâtiment. Cette hauteur de premier plancher est un des paramètres qui est évalué différemment selon les méthodes A, B, C et D.

MONÉTARISATION DES DOMMAGES

Pour exprimer les impacts en termes économiques (module 2, figure 3), 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 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 ;

- 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, e.g. impact psychologique d'une crue, perte de patrimoine historique ou décès, peuvent difficilement être associés à un coût.

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 Vongvissomjai, 2001). Les dommages directs tangibles

sont classiquement calculés à l'aide de fonctions de dommages qui associent un coût à un paramètre de l'aléa, selon le type de vulnérabilité exposé au risque. Les méthodes de construction de ces fonctions sont diverses (White, 1964 ; Penning-Rowsell et Chatterton, 1977 ; Torterotot, 1993 ; Nascimento *et al.*, 2006). 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).

Dans ce travail, seuls les dommages tangibles directs aux bâtiments sont évalués en détail. Les dommages tangibles indirects aux activités sont estimés à partir des dommages directs aux activités au travers de relations établies par d'autres études. Les dommages tangibles directs aux routes et aux zones agricoles présentes sur la commune sont également estimés afin d'analyser la répartition des dommages par type d'occupation du sol. La monétarisation des dommages directs repose sur les fonctions de dommages et endommagements existantes (Torterotot, 1993 ; DNRM³, 2002 ; Edlenbruch *et al.*, 2008). Ces fonctions utilisent la hauteur effective d'eau dans le bâtiment comme principale 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.

Les dommages indirects pour les activités sont estimés à la moitié des dommages directs causés

5. Department of Natural Resources and Mines.

aux activités (DNRM, 2002). Cette estimation est retenue en raison de la complexité des analyses des dommages indirects. Pour les dommages directs, vingt-trois fonctions de dommages ont été utilisées : dix-sept fonctions de dommages pour les bâtiments (Torterotot, 1993 ; DNRM, 2002), deux pour les réseaux routiers et deux pour les surfaces agricoles (Edlenbruch *et al.*, 2008). Pour les bâtiments occupés par les particuliers, deux fonctions de dommage sont considérées selon l'absence ou la présence de sous-sols (tableau 1). Quinze fonctions de dommages sont utilisées pour les bâtiments abritant des activités commerciales et les bâtiments publics (tableau 3).

Comme discutée précédemment, le taux de sous-sols est évalué différemment selon les quatre méthodes de caractérisation de la vulnérabilité. Dans les méthodes A et B, ce taux est considéré unique pour tous les particuliers de la commune après dire d'expert. Dans la méthode C, ce taux est estimé lors de l'enquête par zone homogène. Seule la méthode D permet de caractériser bâtiment par bâtiment l'absence ou la présence de sous-sol. Par conséquent pour les méthodes A, B et C, les deux fonctions de dommages avec et sans sous-sol (tableau 1) sont appliqués sur chaque bâtiment. Ainsi, par exemple, si le taux de sous-sol est évalué à 70 %, la fonction de dommages avec sous-sol est appliquée à 70 % de la superficie de chaque bâtiment et celle sans sous-sol sur les 30 % restant. Pour la méthode D, l'application est directe puisque l'information est connue individuellement.

L'application des fonctions de dommages est réalisée bâtiment par bâtiment. Dans un premier temps, la présence ou absence de sous-sol conditionne le choix de la fonction de dommages (tableau 1). Ensuite, trois caractéristiques sont nécessaires pour leur application : la superficie du bâtiment, la hauteur du premier plancher du bâtiment et le taux d'occupation des rez-de-chaussée. Comme discuté précédemment, ces trois caractéristiques sont évaluées différemment par les quatre méthodes A, B, C, D. Pour la méthode D, le calcul des dommages pour l'habitat est réalisé pour chaque bâtiment selon l'équation 1. Pour les trois autres méthodes, l'équation 2 est utilisée en affectant un taux de sous-sol pour l'ensemble des bâtiments d'une zone homogène.

$$D_{h1} = f(h) \times S \times T_{rdc} \quad (1)$$

Habitat	Dommages (€/m ²)
Avec sous-sol	0,49.h + 113,4
Sans sous-sol	0,53.h + 102,1

h = hauteur effective d'eau (cm)

$$D_{h2} = [f(h)_{ass} \times S \times T_{rdc} \times T_{ss}] + [f(h)_{sss} \times S \times T_{rdc} \times (1 - T_{ss})] \quad (2)$$

Avec :

D_{h1} : dommages directs aux bâtiments résidentiels (€) (méthode D),

D_{h2} : dommages directs aux bâtiments résidentiels (€) (méthodes A, B et C),

$f(h)$: fonction de dommage (€/m²), choix dépendant de la présence ou absence de sous-sol,

$f(h)_{ass}$: fonction de dommage pour les bâtiments avec sous-sol (€/m²),

$f(h)_{sss}$: fonction de dommage pour les bâtiments sans sous-sol (€/m²),

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

S : superficie du bâtiment (m²),

T_{rdc} : taux d'occupation des rez-de-chaussée,

T_{ss} : taux de sous-sol (%/100).

Le choix des fonctions de dommages retenues pour les bâtiments occupés par les activités, *i.e.* publics et économiques, repose sur la classe de vulnérabilité relative au type d'activité (tableau 2) et sur l'importance de l'activité estimée par sa superficie effective dans le bâtiment. La superficie effective de l'activité est calculée en multipliant la superficie du bâtiment concernée par le pourcen-

▲ Tableau 1 – Fonctions de dommages utilisées pour les bâtiments occupés par des particuliers (d'après Torterotot, 1993).

▼ Tableau 2 – Classe de vulnérabilité selon le type d'activité (d'après DNRM, 2002).

Classe	Type d'activité
1	Fleuriste, salle de sport, cabinet médical, église, buraliste, quincaillerie
2	Café, restaurant, salle d'opération, bureau, vente de véhicules, école, poste, boucherie, boulangerie, station service, bar/restaurant, discothèque, hardware, épicerie
3	Librairie, presse, magasin de vêtements
4	Chimiste, instruments musicaux, réparation d'électroniques, distributeur de boissons, vente de caméras
5	Pharmacie, vente d'électroniques

tage d'occupation par l'activité dans le bâtiment. On distingue trois classes de superficie effective : inférieure à 186 m², entre 186 m² et 650 m², et supérieure à 650 m² (tableau 3). Pour chacune des quinze fonctions de dommages considérées, le coût des dommages est évalué proportionnellement à la hauteur d'eau effective.

Quatre caractéristiques des bâtiments sont donc nécessaires pour appliquer les fonctions de dommages à chaque activité : superficie, type d'activité, pourcentage d'occupation de l'activité dans le bâtiment et hauteur du premier plancher du bâtiment. Les trois dernières caractéristiques sont évaluées différemment selon les quatre méthodes. Contrairement aux particuliers, la présence ou l'absence de sous-sol n'intervient pas dans le choix de fonctions de dommages. La présence d'une activité en sous-sol est prise en compte en fonction du niveau d'eau simulée. Les dommages directs tangibles sont calculés pour chaque bâtiment, selon l'équation 3 pour les activités de petites et moyennes superficies et selon l'équation 4 pour celles de grandes superficies.

$$D_{a1} = f(C, S_{act}, h)t_{12} \times S \times P_{act} \quad (3)$$

$$D_{a2} = f(C, S_{act}, h)t_3 \quad (4)$$

Avec :

D_{a1} : dommages directs sur les activités de petite et moyenne superficie (€),

D_{a2} : dommages directs sur les activités de grande superficie (€),

$f(C, T_{act}, h)t_{12}$: fonction de dommage (€/m²), dépendant de la superficie de l'activité : petite ou moyenne,

$f(C, T_{act}, h)t_3$: fonction de dommage (€) pour les activités de grande superficie,

C : classe de vulnérabilité de l'activité,

S_{act} : superficie de l'activité,

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

S : superficie du bâtiment (m²),

P_{act} : pourcentage d'occupation de l'activité dans le bâtiment (m²/m²).

Pour les dommages agricoles et réseaux routiers, les courbes de dommages existantes (Edlenbruch *et al.*, 2008) ont été utilisées sans aucune modification. La vulnérabilité des zones agricoles a été définie selon les données de la BD OCS. Les données de la couche « routes » de la BD TOPO® ont été utilisées pour définir la vulnérabilité du réseau routier. Au vue des surfaces inondées concernées, ce traitement simplifié de la vulnérabilité apparaît justifié.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

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 (module 3, figure 3) 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 », avec des probabilités exprimées en fréquence annuelle de dépassement (Torterotot, 1993 ; Stedinger, 1997).

Le calcul du coût moyen annuel suppose de construire la courbe des dommages en fonction de la fréquence de dépassement associée à l'aléa

► Tableau 3 – Fonctions de dommages utilisées pour les bâtiments occupés par les activités (d'après DNRM, 2002).

Activités	Petite superficie < 186 m ²	Superficie moyenne > 186 et < 650 m ²	Grande superficie > 650 m ²
Classe	Dommages (€)	Dommages (€/m ²)	Dommages (€/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	1 195,5.h - 2,771.h ²	1,532.h + 0,009177.h ²
4	773,9.h - 1,810.h ²	2 391,3.h - 5,544.h ²	3,020.h + 0,01857.h ²
5	1 547,8.h - 3,620.h ²	4 782,0.h - 11,085.h ²	6,058.h + 0,03707.h ²

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

(figure 5). La fréquence annuelle de dépassement correspond à l'inverse de la période de retour associée à l'inondation. Le coût moyen annuel est l'intégrale de la relation « dommage potentiel en fonction de fréquence de dépassement associé à l'aléa ».

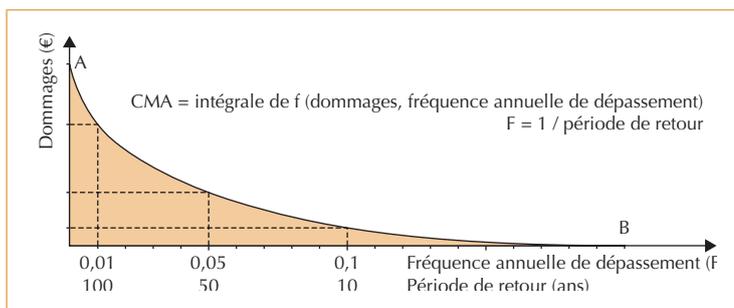
Deux points de la courbe sont cruciaux : points A et B (figure 5). Le point A correspond aux dommages pour une crue de période de retour théorique infinie (fréquence annuelle de dépassement $F \approx 0$), estimés à 1,5 fois les dommages de la crue centennale (Edlenbruch *et al.*, 2008). Le point B correspond à la période de retour de la crue à partir de laquelle on observe des dommages, estimée à cinq ans ($F = 0,2$) (BCEOM, 1977). Pour la construction de cette courbe sur la commune d'Holtzheim, les dommages associés aux inondations de périodes de retour dix ans, trente ans et cent ans ont été utilisés en considérant une interpolation linéaire entre ces valeurs.

Tests de sensibilité

Chaque donnée utilisée pour appliquer les quatre méthodes est associée à une incertitude qui doit être prise en compte dans les résultats. Pour intégrer cette incertitude, deux scénarios ont été considérés : scénario MIN et MAX, correspondant respectivement à la combinaison des données aboutissant au coût le plus faible et le plus forts des dommages possibles.

Pour les méthodes A et B, le manque de données concernant la vulnérabilité des bâtiments génèrent 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-chaussée. Le scénario MAX repose sur la combinaison inverse et aboutit au coût le plus élevé. Les résultats obtenus avec ces deux scénarios sont comparés à un scénario CENTRAL 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.



▲ Figure 5 – Courbe théorique des dommages en fonction de la fréquence de dépassement, permettant le calcul le coût moyen annuel (CMA) ; le point A correspond aux dommages pour une crue de période de retour théorique infinie et le point B correspond à la période de retour de la crue à partir de laquelle on observe des dommages.

Résultats et discussions

Répartition spatiale des dommages

Les différentes méthodes de caractérisation de la vulnérabilité induisent une répartition spatiale et un coût global des dommages très variables. Le type et la localisation des activités dans le bâtiment sont les principaux facteurs qui influencent la répartition spatiale des dommages. Pour ces deux caractéristiques, la méthode D est jugée la plus fiable car réalisée bâtiment par bâtiment. Cette méthode est donc prise comme référence afin de tester la fiabilité des trois méthodes, A, B et C.

Pour la méthode A, l'identification des types d'activités issue de la BD TOPO® et de la BD OCS se révèle très incertaine et parfois complètement incohérente avec l'enquête de terrain.

La méthode B permet de localiser précisément les activités économiques et les bâtiments publics en valorisant les bases de données de la chambre de commerce et d'industrie et des bâtiments publics de la CUS. L'application de cette méthode suppose l'estimation *a priori* de l'étage occupé par l'activité et du pourcentage d'occupation. Ces informations ne sont pas contenues dans les deux bases de données utilisées. La comparaison des méthodes B et D met en évidence une surestimation du nombre d'activités touchées. Cette surestimation est due à l'hypothèse *a priori* d'une localisation des activités au rez-de-chaussée. Or il s'avère après enquête qu'il y a des activités localisées à l'étage ou que l'adresse d'immatriculation n'héberge pas l'activité. Enfin, quelques erreurs de caractérisation sont associées à la fréquence de réactualisation des bases de données.

La qualité des informations spatiales obtenues par la méthode C est similaire à celle obtenue par la méthode D. Ce résultat s'explique par la similitude des protocoles retenus pour caractériser les activités dans ces deux méthodes.

Coût global des dommages

L'application des quatre méthodes pour les trois aléas considérés aboutit aux dommages potentiels synthétisés dans la figure 6. 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, sont 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 6 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.

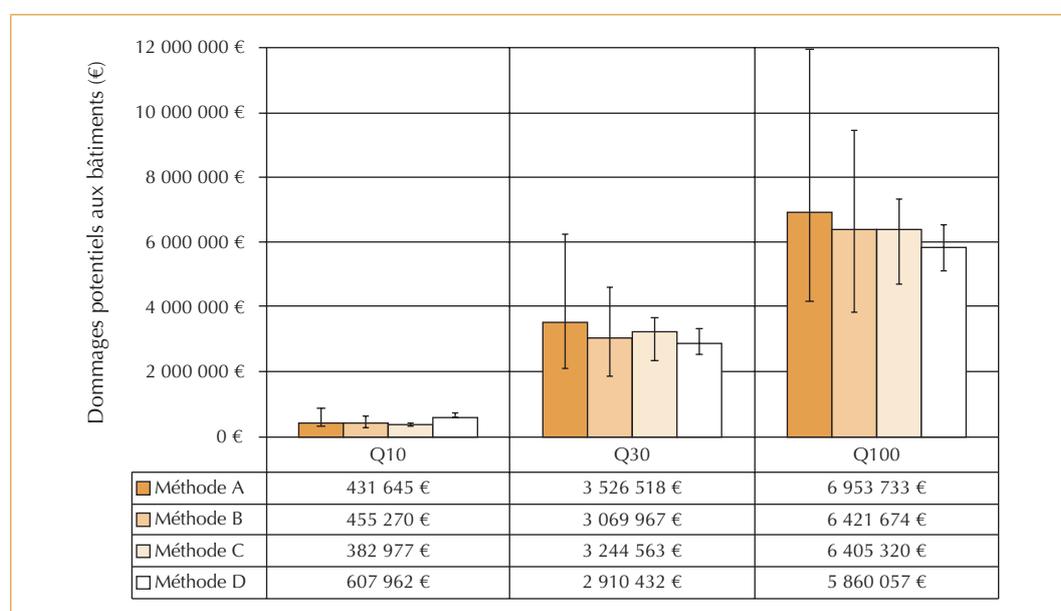
L'identification des caractéristiques d'occupation et de construction des bâtiments repose sur des hypothèses différentes pour chaque méthode. Les dommages issus des quatre méthodes ont été associés à une incertitude variable en fonction des hypothèses réalisées (figure 7). La répartition des types de dommages, *i.e.* habitat, activités, publics et autres, est également variable selon les quatre méthodes (figure 8).

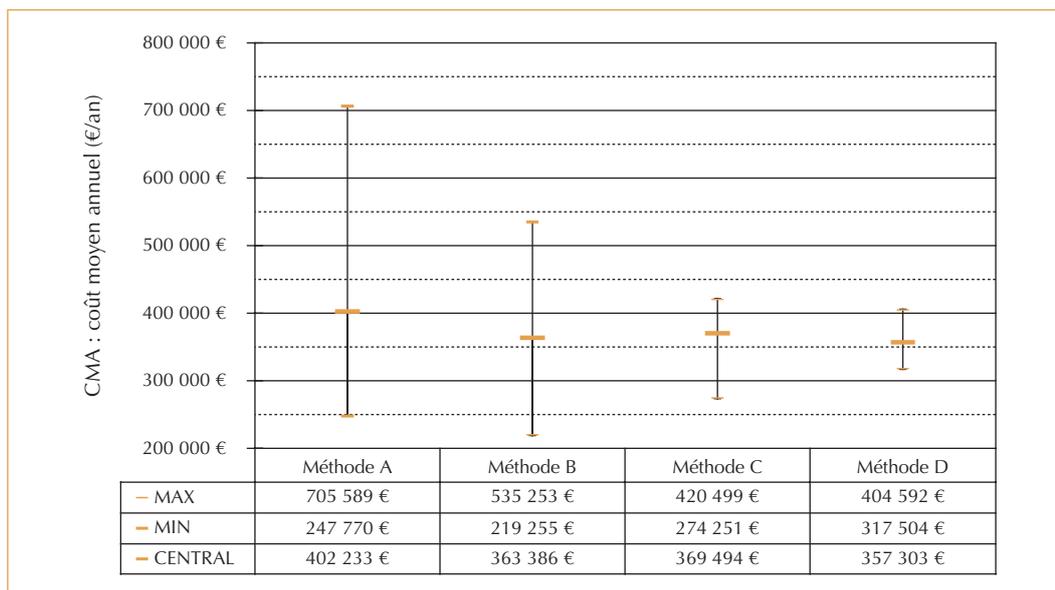
Les résultats présentent des valeurs centrales relativement proches indépendamment de la méthode utilisée. Les valeurs centrales varient de 350 000 à 400 000 €/an (figure 7). Ce résultat montre que les quatre méthodes peuvent donner des résultats convergents si les hypothèses et les experts mobilisés sont fiables. Contrairement aux valeurs centrales, l'amplitude des dommages entre le scénario MIN et MAX est très variable. Plus la méthode est opérationnelle, plus l'incertitude est grande en raison du nombre et de la qualité des données mobilisées. L'amplitude décroît au fur et à mesure que l'on ajoute des données supplémentaires depuis la méthode A jusqu'à D.

La variabilité de la répartition des dommages par type d'occupation du sol est faible entre les quatre méthodes (figure 8). Les bâtiments publics représentent de 4,5 % à 6 % des dommages selon la méthode utilisée. Les activités économiques représentent de 7,5 % à 12 % et l'habitat de 82 % à 87 %. En général, les dommages aux routes et aux surfaces agricoles ensemble représentent moins de 2 % des dommages totaux. Cette répartition est liée au choix du site d'étude et justifie *a posteriori* l'étude approfondie sur le bâti.

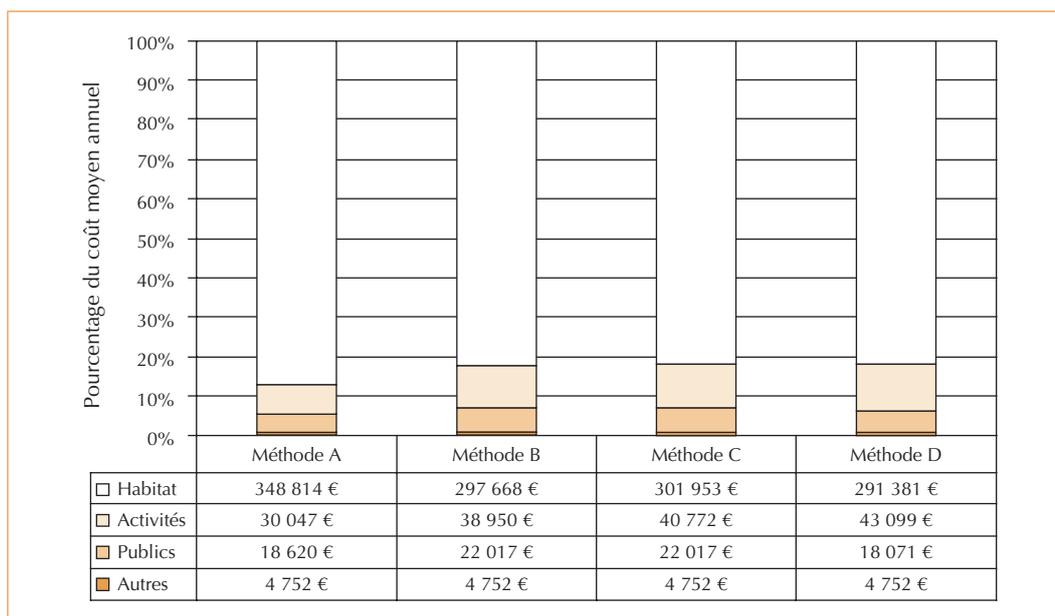
L'incertitude importante associée à la méthode A (figure 7) est due aux cinq variables inconnues devant être déterminées selon les experts locaux : hauteur des premiers planchers des bâtiments,

► Figure 6 – Dommages potentiels en fonction des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité et de l'aléa (Q10, Q30 et Q100).





◀ Figure 7 – Coût moyen annuel en fonction des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité ; les bornes supérieures et inférieures correspondent aux scénarios MIN et MAX, la valeur centrale est obtenue avec le scénario CENTRAL.



◀ Figure 8 – Pourcentage du coût moyen annuel en fonction du type d'occupation du sol, *i.e.* habitat, activités, publics et autres, en fonction des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité.

taux d'occupation des premiers niveaux, présence ou absence de sous-sol, type et localisation de l'activité dans le bâtiment. La sous-estimation des dommages aux activités économiques et aux bâtiments publics (figure 8) est due à la qualité médiocre de localisation et d'identification des activités dans la méthode A. Malgré la sous-estimation des dommages aux activités, la valeur centrale des dommages (figure 7) est proche de

celle obtenue avec la méthode D de référence. Ceci est due d'une part à la prédominance de l'habitat sur le coût global des dommages et d'autre part à la qualité des données fournies par l'expert immobilier.

L'application de la méthode B suppose de déterminer par dire d'expert quatre variables inconnues : hauteur des planchers, taux d'oc-

cupation effectif, localisation de l'activité dans le bâtiment et présence ou absence de sous-sol. Même si le nombre de bâtiments occupés par des activités est surestimé, le coût des dommages est proche de celui obtenu par la méthode de référence (figure 8). Cette similitude est liée à un phénomène de compensation entre le nombre de bâtiment, surestimé dans la méthode B et la superficie réellement occupée par l'activité, sous-estimée dans cette méthode. Ceci s'explique par la superficie des activités identifiées.

L'incertitude associée à l'hypothèse C (figure 7) est due à la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments par zone homogène et non bâtiment par bâtiment. Nous notons que les résultats centraux pour les bâtiments publics sont les mêmes entre les hypothèses B et C (figure 8). Ceci est dû à la qualité des informations de la BD ACTIVITÉS concernant les bâtiments publics. Cependant, l'écart existant entre les hypothèses C et D est *a priori* surprenant en ce qui concerne les activités économiques et le bâtiment public (figure 8). Cet écart est principalement dû à l'existence d'activités économiques en sous-sol à Holtzheim et à une petite surélévation de la hauteur des planchers pour les bâtiments publics mises en évidence lors de l'enquête E (méthode D). La

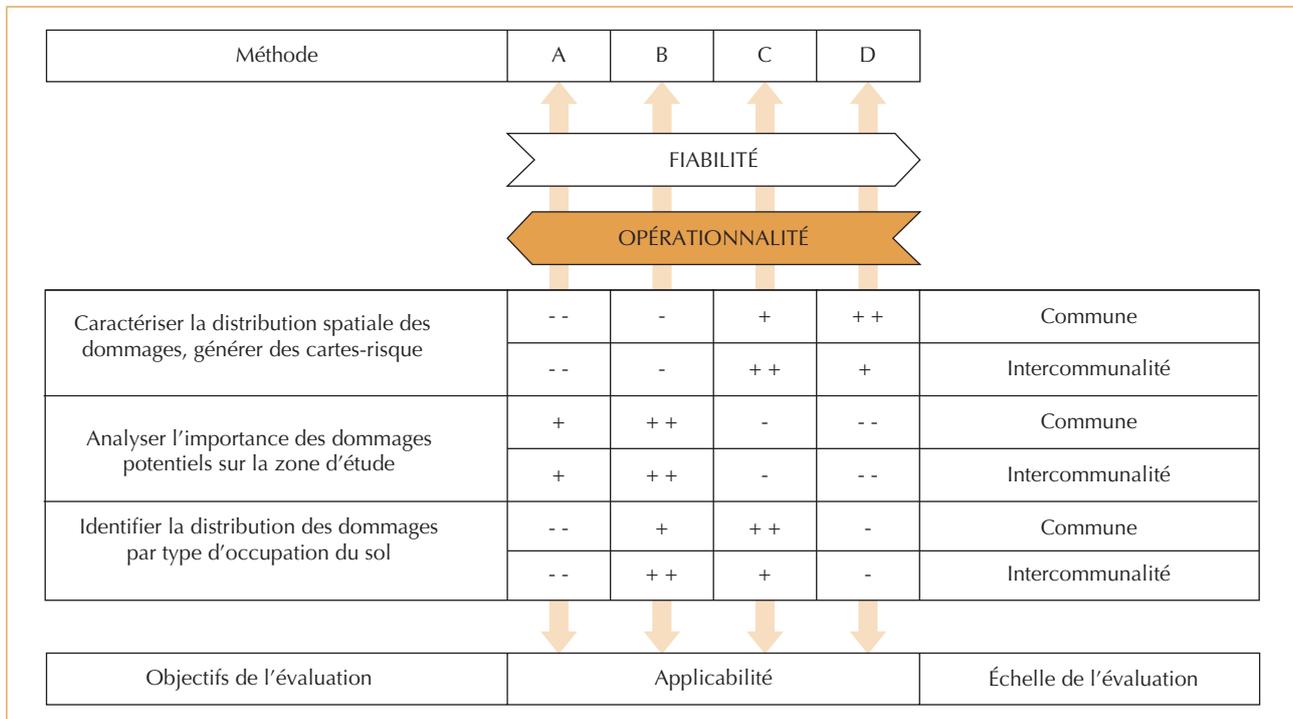
légère surestimation des dommages associés à l'habitat s'explique par la non-prise en compte de l'occupation effective des rez-de-chaussée dans la méthode C (figure 8).

Recommandations pour le choix d'une méthode

Sur la base des résultats obtenus sur la commune d'Holtzheim, plusieurs critères peuvent être retenus pour guider le choix de la méthode de caractérisation de vulnérabilité (figure 9). La hiérarchisation de ces critères est fortement liée au site d'étude et à la répartition du type d'occupation du bâti touché par l'inondation.

Si l'objectif de l'analyse est de savoir « où agir » pour réduire les dommages, il est nécessaire de caractériser la distribution spatiale des dommages. Les méthodes A et B ne sont alors pas adaptées car la distribution spatiale est trop grossière. Les méthodes C et D rendent possible une distribution spatiale fiable des dommages potentiels. Les deux méthodes sont applicables à l'échelle communale. L'opérationnalité de la méthode D décroît fortement quand on passe de l'échelle communale à celle de l'intercommunalité en raison du temps d'enquête. La méthode D est donc à préconiser à l'échelle communale, quand

▼ Figure 9 – Critères de choix d'une méthode de caractérisation de vulnérabilité (l'aptitude de la méthode est jugée d'inadaptée « - - » à très adaptée « ++ »).



on envisage une description spatiale précise des dommages potentiels. À l'échelle de l'intercommunalité, la méthode C offre le meilleur compromis entre l'opérationnalité et la fiabilité.

Si l'évaluation vise avant tout à quantifier les dommages potentiels globaux, les méthodes A et B peuvent s'avérer suffisantes sous réserve de disposer de données fiables provenant des experts. L'amplitude entre les scénarios MIN et MAX souligne la dépendance des résultats aux données fournies par l'expert. La forte opérationnalité des méthodes A et B permet une première quantification tant à l'échelle communale qu'intercommunale. Le choix entre la méthode A ou B dépend de la disponibilité des données. Si les données le permettent, le rapport fiabilité/opérationnalité penche pour la méthode B. Le gain de fiabilité apporté par les méthodes C et D ne se justifie pas pour une seule quantification des dommages potentiels globaux.

Si l'objectif est d'identifier la distribution des dommages par type d'occupation du sol en vue d'une hiérarchisation de mesures à adopter, on s'intéresse à la quantification des dommages potentiels par typologie sans s'intéresser précisément aux coûts globaux et à la précision spatiale de l'évaluation. Toutes les méthodes, à l'exception de la méthode A, permettent une bonne quantification des dommages par typologie d'occupation du sol (figure 8). On conseille, dans ce cas, l'utilisation de la méthode C à l'échelle communale et la méthode B à l'intercommunalité. Ceci se justifie par la moindre opérationnalité de la méthode C à grande échelle par rapport à la méthode B. Là encore, le gain de fiabilité apporté par la méthode D ne se justifie pas pour la connaissance globale des dommages par type d'occupation du bâti.

Conclusion

L'étude menée sur la commune d'Holtzheim a permis de tester la sensibilité des évaluations des dommages pour quatre méthodes reposant sur une description différente de la vulnérabilité des bâtiments. Il ressort de cette étude que les évaluations des dommages liés aux inondations sont très sensibles à la caractérisation de la vulnérabilité de l'occupation du sol. La fiabilité de l'évaluation est directement proportionnelle à la richesse et à la pertinence des données mobilisées. L'évaluation

des dommages potentiels nécessite le meilleur compromis entre la fiabilité et la faisabilité de la méthode de caractérisation de la vulnérabilité.

L'analyse des résultats obtenus a permis de retenir plusieurs critères de choix de la méthode :

- l'échelle d'étude, *i.e.* commune ou intercommunalité,
- les objectifs, *i.e.* caractérisation spatiale fine des dommages, évaluation des dommages potentiels globaux ou détermination de la distribution des dommages par type d'occupation du sol,
- la disponibilité des données.

Cependant, les résultats de cette étude sont strictement liés aux bases de données utilisées, qui sont en partie spécifiques au site d'étude. Donc, la transposabilité des résultats de ce travail devra être testée par l'application de la démarche en question sur d'autres sites d'étude, en reconstituant intégralement ou partiellement les bases de données utilisées dans cette étude. Dans le cas où les mêmes bases de données ne sont pas disponibles, on recommande la réalisation de tests de sensibilité de l'évaluation des dommages à des données divers, en utilisant la démarche méthodologique proposée ici.

Le recueil de données concernant la vulnérabilité est une étape indispensable et incontournable dans l'évaluation des dommages liés aux inondations. Comme exposé dans cette étude, le choix d'une méthode d'acquisition de données ou d'une autre, joue un rôle non négligeable dans la fiabilité des résultats de l'évaluation. Le recueil fastidieux des données s'avère encore nécessaire à la bonne réalisation de l'évaluation des dommages. La faisabilité des méthodes peut être néanmoins augmentée par l'existence de collaborations diverses, en rendant moins coûteux et fastidieux le recueil de données, et par l'automatisation de l'analyse spatiale des données qui minimise le temps d'analyse et de main d'œuvre spécialisée.

La prise en compte d'autres sources d'incertitude, *e.g.* définition de l'aléa, monétarisation des dommages, et la création d'un outil d'automatisation des analyses nécessaires pour analyser différentes bases de données, sont en cours d'étude, et constituent les perspectives à venir. □

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le département d'écologie urbaine de la communauté urbaine de Strasbourg pour sa coopération à cette étude, en mettant à notre disposition les bases de données nécessaires à la réalisation de l'étude de cas.

Résumé

Dans cette étude, nous comparons quatre méthodes différentes de caractérisation de la vulnérabilité des enjeux aux inondations à l'échelle communale. Toutes les méthodes portent sur les dommages directs aux bâtiments, principaux dommages en milieux urbains. Les méthodes diffèrent par la qualité thématique et spatiale des bases de données utilisées. Chaque méthode est évaluée selon la fiabilité de ses résultats et son opérationnalité. La commune d'Holtzheim, située dans la vallée de la Bruche (Bas-Rhin, Alsace, France) constitue le site d'étude. L'étude nous a permis de tester la sensibilité des résultats obtenus par les quatre méthodes. Le coût des dommages évalué avec la méthode la plus opérationnelle varie de 245 à 705 k€ par an. Pour la méthode la plus fiable, le coût varie de 315 à 405 k€ par an. Le choix entre les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité est discuté et un guide est proposé pour aider à ce choix.

Abstract

This paper compares, in a local scale, four different methods to assess buildings vulnerability to floods. In urban areas, buildings and contents represent the majority of flood damages. The four methods are different in relation to the quality of the data used. Each method is analyzed in terms of its feasibility and the reliability of the loss evaluation. The municipal of Holtzheim, in the Bruche River (Bas-Rhin, Alsace, France) is studied. We test the sensitivity of the evaluation results to the four different methods used to assess vulnerability. Loss is evaluated in the range of 245 to 705 k€ per year when using the most feasible method. When using the most reliable method, we evaluate loss in the range of 315 to 405 k€ per year. In conclusion, we discuss the choice between the different methods to assess vulnerability and a recommendation guide is proposed.

Bibliographie

- APEL, H., ARONICA, G.-T., KREIBICH, H., THIEKEN, A.-H., 2008a, Flood risk analyses - How detailed do we need to be ?, *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-008-9277-8.
- APEL, H., MERZ, B., THIEKEN, A.-H., 2008b, Quantification of uncertainties in flood risk Assessments, *International Journal of River Basin Management (JRBM)*, 6, 2, p. 149-162.
- BCEOM, 1977, *Évaluation des dommages dus aux inondations de la Bruche et de l'Ill dans l'agglomération Strasbourgeoise*, 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.
- DUTTA, D., HERATH, S., MUSIAKE, K., 2003, A mathematical model for flood loss estimation, *Journal of Hydrology*, n° 277, p. 24-49.
- EDLENBRUCH, K., GERMANO, V., GILBERT, E., GRELOT, F., LESCOULIER, C., 2008, *Étude socio-économique des inondations sur le bassin versant de l'Orb*, INTEREG 3 C Sud Europe – INUNDA, Cemagref.
- GÉOMÉDITERRANÉE, 2003, *Constitution d'une base de données « occupation du sol » à partir d'images satellitaires - BD OCS*, Rapport méthodologique, version 3, Région Alsace.
- GILARD, O., 1998, *Les bases techniques de la méthode inondabilité*, Cemagref Éditions, 207 p.
- KREIBICH, H., THIEKEN, A.-H., 2008, Assessment of damage caused by high groundwater inundation, *Water Resources Research*, vol. 44, W09409.
- GREEN, C., 1995, *Assessing Vulnerability to Flooding : Nodes and Networks*, IDNDR Workshop, Royal Society, London.
- HUBERT, G., LEDOUX, B., 1999, *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 232 p.
- KREIS, N., 2004, *Modélisation des crues pour la gestion intégrée du risque d'inondation*, PhD. ENGREF, Strasbourg.
- LANG, M., LAVABRE, J., 2007, *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Éditions Quae, 232 p.
- LCL, CEREVERE, CEMAGREF, 2007, *Évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations*, Direction des études économiques et de l'évaluation environnementale.
- LEKUTHAI, A., VONGVISESSOMJAI, S., 2001, Intangible Flood Damage Quantification, *Water Resources Management*, n° 15, p. 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.
- MESSNER, F., PENNING-ROUSELL, 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.
- MESSNER, F., MEYER, V., 2006, Flood damage, vulnerability and risk perception - Challenges for flood damage research, in : SCHANZE, J. et al. (eds.), *Flood Risk Management : Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, p. 149-167.
- 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, n° 3, p. 195-210(16).

- PENNING-ROUSELL, E.-C., GREEN, C., 2000a, New Insights into the Appraisal of Flood-Alleviation Benefits : (1) Flood Damage and Flood Loss Information, *J.CIWEM*, n° 14, p. 347-353.
- OLIVERI, E., SANTORO, M., 2000, Estimation of urban structural flood damages : the case study of Palermo, *Urban Water*, n° 2, p. 223-234.
- PENNING-ROUSELL, E.-C., CHATTERTON, J.-B., 1977, *The benefits of flood alleviation : A manual of assessment techniques*, Gower Technical Press/Saxon House, Aldershot, UK.
- POTTIER, N., PENNING-ROUSELL, E., TUNSTALL, S., HUBERT, G., 2005, Land use and flood protection : contrasting approaches and outcomes in France and in England and Wales, *Applied Geography*, vol. 25, p. 1-27.
- SIMPSON, D.-M., HUMAN, J.-R., 2008, Large-scale vulnerability assessments for natural hazards, *Natural Hazards*, p. 1573-0840.
- STEDINGER, J.-R., 1997, Expected probability and Annual damages estimators, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 123, n° 2, p. 125-135.
- TORTEROTOT, J.-P., 1993, *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*, Cereve, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- VAN DER VEEN, A., LOGTMEIJER, C., 2005, Economic Hotspots : Visualizing Vulnerability to Flooding, *Natural Hazard*, n° 36, p. 65-85.
- WHITE, G.-F., 1964, Choice of Adjustment to Floods, *Department of Geography Research Papers*, n° 93, Chicago, University of Chicago.